



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**ZENITE DA SILVA CARVALHO**

**COMPORTAMENTO DE BARREIRAS MINERAIS COM  
SOLO COMPACTADO NA FAIXA GRANULOMÉTRICA  
ÓTIMA PARA CONTENÇÃO DE LÍQUIDOS ORGÂNICOS**

Salvador – BA  
2015

**ZENITE DA SILVA CARVALHO**

**COMPORTAMENTO DE BARREIRAS MINERAIS COM  
SOLO COMPACTADO NA FAIXA GRANULOMÉTRICA  
ÓTIMA PARA CONTENÇÃO DE LÍQUIDOS ORGÂNICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana na área de conhecimento em Geotecnia do Ambiente Urbano da Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado

Salvador – BA  
2015

---

C331 Carvalho, Zenite da Silva

Comportamento de barreiras minerais com solo compactado na faixa granulométrica ótima para contenção de líquidos orgânicos / Zenite da Silva Carvalho. – Salvador, 2015.

131 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2015.

1. Contenção - bacia. 2. Permeabilidade. 3. Líquido orgânico. 4. Solo - compactação. 5. Solo - poluição. I. Machado, Sandro Lemos. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 624.151 363

---

## ZENITE DA SILVA CARVALHO

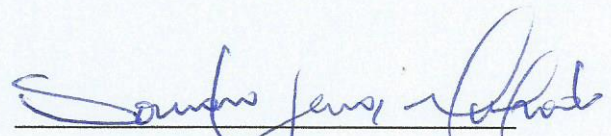
### COMPORTAMENTO DE BARREIRAS MINERAIS COM SOLO COMPACTADO NA FAIXA GRANULOMÉTRICA ÓTIMA PARA CONTENÇÃO DE LÍQUIDOS ORGÂNICOS.

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 26 de JUNHO de 2015

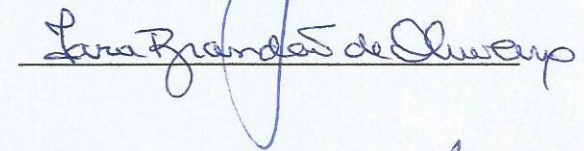
Banca Examinadora:

Profº. Drº Sandro Lemos Machado  
Universidade Federal da Bahia – UFBA



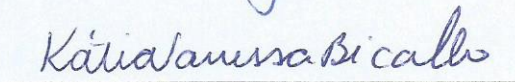
---

Profª. Drª Iara Brandão de Oliveira  
Universidade Federal da Bahia – UFBA



---

Profª Drª Kátia Vanessa Bicalho  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES



---

Dedico este trabalho a minha mãe, Zulmira por todo amor e carinho. Aos meus irmãos, Solange, Marco Antônio e Neto por todo apoio e compreensão. Ao meu noivo George, por todo apoio e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Deus que me ilumina e protege em todos os momentos de minha vida. E pela força que sempre busquei nos momentos mais difíceis desta caminhada.

A minha família, que é a base de minha história. Por apoiarem minhas escolhas e compreenderem minhas ausências nas datas festivas, amo vocês.

A George pela paciência e compreensão, pelo seu apoio e incentivo para concretização deste trabalho e, acima de tudo, pelo seu amor.

Ao professor Sandro Lemos Machado, pela confiança, pelas orientações, compreensão e paciência. Por me guiar na caminhada acadêmica.

As professoras Míriam de Fátima Carvalho e Iara Brandão de Oliveira pelas orientações e incentivo, sempre contribuindo para melhoria dessa dissertação.

Aos queridos amigos do GEOAMB Átila, Ritinha, Silas, Mario Sérgio, Gustavo e Jonatan pela convivência maravilhosa, a amizade, o apoio e as contribuições indispensáveis durante a realização desta dissertação. Em especial aos técnicos Jeová, Ricardo e Antônio que se empenharam bastante para realização desta dissertação, pelo apoio e amizade.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela concessão da bolsa de mestrado.

A PETROBRAS e aos seus funcionários, por atuarem em parceria com o GEOAMB e UFBA subsidiando e apoiando o desenvolvimento desta e diversas outras pesquisas no estado da Bahia.

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (GEOAMB) da UFBA, por disponibilizar toda estrutura física necessária à realização dos experimentos.

A BATTRE e aos seus funcionários, por terem apoiado o desenvolvimento desta pesquisas, cedendo a área para construção dos aterros experimentais.

As amigas da turma de 2013 do MEAU, Luana e Angélica pelas discussões, contribuições e aflições compartilhadas durante todo esse período.

Aos amigos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

*O otimista é um tolo. O pessimista, um chato.  
Bom mesmo é ser um realista esperançoso.*

Ariano Suassuna

*Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não  
é senão uma gota de água no mar. Mas o mar  
seria menor se lhe faltasse uma gota.*

Madre Teresa de Calcutá

## RESUMO

Este trabalho de pesquisa sobre permeabilidade de líquidos orgânicos em solos compactados, para avaliar o comportamento da proposição de faixa granulométrica de solo com potencial de uso como barreiras de contenção de produtos combustíveis. A justificativa para esta pesquisa está no fato que uma das principais fontes de contaminação de solos e águas subterrâneas têm sido os vazamentos de tanques de armazenamento de combustíveis derivados de petróleo. A contaminação do solo pode gerar danos à saúde humana, aos recursos hídricos e danos ambientais, sendo necessário desenvolver ou aprimorar os mecanismos de proteção e preservação de solos e águas subterrâneas. Uma das opções possíveis é o uso de barreiras minerais que evitem, em casos de vazamentos, que o contaminante gere problemas ambientais. Para isso, foram construídos sete aterros experimentais com solos obtidos em diferentes áreas de Salvador, sendo usados os solos Granulito e Barreiras, bem como misturas destes, em diferentes proporções. Identificaram-se as características granulométricas dos solos e misturas. Os aterros foram construídos com rigoroso controle de compactação, com energia equivalente a Proctor modificado. Realizaram-se ensaios de permeabilidade em campo, com o permeâmetro Guelph, em diferentes períodos, a fim de avaliar o comportamento dos aterros a longo prazo. A primeira campanha de ensaios ocorreu logo após a construção dos aterros e a segunda campanha após seis meses da construção dos aterros experimentais. Os líquidos percolantes utilizados nesta pesquisa foram o diesel, o biodiesel, e a gasolina; sendo a água utilizada como fluido de referência. Também foram feitos ensaios de permeabilidade em laboratório, para comparar com os valores de permeabilidade de campo. Em laboratório, os líquidos percolantes foram diesel e água. O perfil de infiltração do diesel nos aterros experimentais foi obtido com aplicação da equação de Philip (1967) a fim de conhecer o tempo de infiltração em cada mistura, e por conseguinte estimar o tempo que garanta a proteção ambiental para que as medidas de contingência, em eventuais vazamentos, sejam efetivadas. Os resultados indicaram que embora os aterros não atendessem a todos os parâmetros especificados na proposta de faixa granulométrica, verificou-se bom desempenho na contenção de líquidos orgânicos as misturas 2, 3 e 5, com fração de finos maior ou igual a 33%. Foi recomendado que a faixa granulométrica considerada ótima, deve passar por ajustes em seus valores limites; bem como, que se faça algumas adequações nos parâmetros tais como, reduzir o limite de liquidez, índice de plasticidade e a umidade ótima; e aumentar o teor de areia e a densidade seca máxima.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bacia de contenção; Permeabilidade; Líquidos Orgânicos.



## ABSTRACT

This research on permeability of body fluids in compacted soils, to evaluate the behavior of soil particle size range proposition with potential use as fuel products booms. The rationale for this research is in fact a major source of contamination of ground soil and water have been leaks of oil-based fuel storage tanks. Soil contamination can cause harm to human health, water resources and environmental damage, it is necessary to develop or enhance protection mechanisms and preservation of soil and groundwater. One possible option is the use of minerals barriers that prevent, in case of leakage, which generates contaminating environmental problems. To this, were constructed seven experimental landfill with soils obtained in different areas of Salvador, being used Granulito the Barreiras and soils as well as mixtures thereof in various proportions. Identified the particle size characteristics of the soils and mixtures. Landfills were constructed with strict control compression, with energy equivalent of modified Proctor. There were permeability field trials with Guelph permeameter at different periods in order to evaluate the long-term behavior of landfills. The first test campaign took place shortly after the construction of landfills and the second campaign after six months the construction of the experimental landfills. Liquid percolating used in this research were diesel, biodiesel and gasoline; water being used as reference fluid. Also permeability tests were performed in the laboratory to compare the field of permeability values. In the laboratory, liquid percolating were diesel and water. The diesel infiltration in experimental landfill profile was obtained by applying the equation Philip (1967) to meet the infiltration time for each mixture and therefore estimate the time that guarantees environmental protection for the contingency measures, in any leaks, take effect. The results indicated that although the landfill did not meet all the criteria specified in the proposed particle size range, it is good in containment performance of organic liquid mixtures 2, 3 and 5, with fine fraction greater than or equal to 33%. It was recommended that the particle size range considered great, must undergo adjustments to their limits; and be sure to make some adjustments in parameters such as reducing the liquid limit, plasticity index and optimum moisture; and increasing the sand concentration and the maximum dry density.

**KEYWORDS:** Bowl of containment; Permeability; Organic liquids.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3. 1:</b> Arranjo ilustrativo do experimento realizado por Darcy .....	6
<b>Figura 3. 2:</b> Representação esquemática da dupla camada elétrica difusa. (Adaptado de Shaw, 1975).....	12
<b>Figura 3. 3:</b> Esquema ilustrativo do permeâmetro Guelph.....	27
<b>Figura 3. 4:</b> Bulbo de saturação e não saturação durante o ensaio.....	27
<b>Figura 3. 5:</b> Variação do fator de forma C, em função do tipo de solo e da relação H/a. ....	29
<b>Figura 3. 6:</b> Curvas de infiltração de água .....	32
<b>Figura 3. 7:</b> Perfil de umidade típico de um solo uniforme em processo de infiltração de acordo com Bodman e Coleman (1944).....	32
<b>Figura 4. 1:</b> Variação da massa específica do solo seca máxima versus a) Gc%, b) Sc%, c) Fc%, d) Gs%, e) W <sub>L</sub> % e f) W <sub>P</sub> %. Para a energia de compactação Proctor Normal. Fonte: Machado, 2011. ....	42
<b>Figura 4. 2:</b> Variação do Teor de Umidade Ótima versus a) Gc%, b) Sc%, c) Fc%, d) Gs%, e) W <sub>L</sub> % e f) W <sub>P</sub> %. Para a energia de compactação Proctor Normal. Fonte: Machado, 2011. ....	43
<b>Figura 4. 3:</b> Resultados de ensaios de permeabilidade obtidos para o Granulito e para o Barreiras, nas energias do Proctor normal e modificado, usando como permeante água e diesel. Fonte: Machado, 2011. ....	44
<b>Figura 4. 4:</b> Resultados de ensaios de permeabilidade ao diesel para solos secos até a umidade higroscópica. Fonte: Machado, 2011.....	45
<b>Figura 4. 5:</b> Faixas de variação dos parâmetros de compactação, sendo a) a umidade ótima e b) massa específica seca máxima, na energia do Proctor Modificado. Fonte: Machado, 2011....	47
<b>Figura 4. 6:</b> Faixas de variação das propriedades físicas dos solos com potencial de uso como barreiras minerais para contenção de fluidos orgânicos. Fonte: Machado, 2011.....	47
<b>Figura 5. 1:</b> Foto do conteúdo das seis caçambas de solo Granulito.....	51
<b>Figura 5. 2:</b> Foto do solo Barreiras presente na área de bota-fora do Aterro Metropolitano Centro .....	51
<b>Figura 5. 3:</b> Solo Granulito sendo homogeneizado. ....	54

<b>Figura 5. 4:</b> A retro escavadeira sendo pesada com a concha cheia de solo Granulito.....	54
<b>Figura 5. 5:</b> Retro escavadeira vazia sendo pesada .....	54
<b>Figura 5. 6:</b> A retro escavadeira sendo pesada com a concha cheia de solo Barreiras. ....	54
<b>Figura 5. 7:</b> Solo Barreiras sendo homogeneizado .....	54
<b>Figura 5. 8.:</b> Solo Granulito sendo umedecido.....	54
<b>Figura 5. 9:</b> Mapa de Salvador com a localização do ASMC. FONTE: Google Mapas, 2014 .....	56
<b>Figura 5. 10:</b> Imagem do ASMC e em destaque a área de Bota-fora onde foi construído os aterros experimentais. Google Mapas, 2014 .....	57
<b>Figura 5. 11:</b> Imagem da área de bota-fora do ASMC e em destaque os aterros experimentais. Fonte Google Mapas, 2015.....	57
<b>Figura 5. 12:</b> Pluviosidade mensal do período de 2004 a 2014. ....	58
<b>Figura 5. 13:</b> Pluviosidade diária no período da primeira campanha.....	60
<b>Figura 5. 14:</b> Pluviosidade diária no período da segunda campanha .....	60
<b>Figura 5. 15:</b> Solo sendo lançado na área demarcada para o aterro .....	61
<b>Figura 5. 16:</b> Solo sendo compactação com rolo pé-de-carneiro. ....	61
<b>Figura 5. 17:</b> Lançamento da próxima camada de solo após a provação do controle de compactação. ....	62
<b>Figura 5. 18:</b> Solo sendo amostrado para verificação da umidade de grau de compactação da camada.....	62
<b>Figura 5. 19:</b> Execução dos aterros experimentais, em série.....	62
<b>Figura 5.20:</b> Disposição dos aterros experimentais.....	62
<b>Figura 5. 21:</b> Curva de viscosidade da água .....	65
<b>Figura 5. 22:</b> Curva de viscosidade do biodiesel.....	66
<b>Figura 5. 23:</b> Curva de viscosidade do diesel .....	66
<b>Figura 5. 24:</b> Curva de viscosidade do gasolina .....	66
<b>Figura 5. 25:</b> Permeâmetro Guelph. ....	68

<b>Figura 5. 26:</b> Ensaio de permeabilidade sendo realizado com o permeâmetro Guelph .....	70
<b>Figura 5. 27:</b> Em destaque, um pedaço de papelão usado para cobrir o furo a fim de minimizar a evaporação do líquido percolante. ....	70
<b>Figura 5. 28:</b> Amostra sendo embalada para transporte até o laboratório.....	71
<b>Figura 5. 29:</b> Amostra indeformada de solo, sendo retirada de um dos aterros experimentais. ....	71
<b>Figura 5. 30:</b> Corpo de prova sendo medido. ....	72
<b>Figura 5. 31:</b> Corpo de prova sendo moldado no bloco. ....	72
<b>Figura 5. 32:</b> Corpo de prova sendo pesado .....	72
<b>Figura 5. 33:.</b> Câmara de ensaio triaxial com o CP para o ensaio de permeabilidade. ....	72
<b>Figura 5. 34:</b> O cilindro usado na talhagem da amostra.....	76
<b>Figura 5. 35:</b> CP do ensaio de sucção sendo talhado no bloco indeformado. ....	76
<b>Figura 5. 36:</b> As oito amostras de solos para obtenção de oito pontos da curva característica do solo para uma mistura.....	77
<b>Figura 5. 37:</b> Solo na câmara de ensaio de sucção. ....	78
<b>Figura 5. 38:</b> Amostra de solo para ensaio de sucção. ....	78
<b>Figura 5. 39:</b> Câmara do ensaio de sucção fechada com aplicação de ar aplicada no topo. ...	78
<b>Figura 6. 1:</b> Umidade de compactação e peso específico seco obtido nos aterros experimentais, a área delimitada representa as recomendações para os respectivos parâmetros .....	82
<b>Figura 6. 2:</b> Permeabilidade a água. Primeira e segunda campanha. ....	84
<b>Figura 6. 3:</b> Permeabilidade ao biodiesel. Primeira e segunda campanha. ....	85
<b>Figura 6. 4:</b> Permeabilidade ao diesel. Primeira e segunda campanha. ....	85
<b>Figura 6. 5:</b> Permeabilidade a gasolina. Primeira e segunda campanha. ....	86
<b>Figura 6. 6:</b> Fotos tiradas no mês de outubro de 2013 .....	88
<b>Figura 6. 7:</b> Trincas que surgiram no aterro de mistura 1. Fotos tiradas no mês de outubro de 2013 .....	88
<b>Figura 6. 8:</b> Em evidencia uma trinca no aterro de mistura 1. Fotos tiradas no mês de outubro de 2013 .....	88

<b>Figura 6. 9:</b> Foto do aterro de mistura 4, tirada no mês de outubro de 2013 .....	88
<b>Figura 6. 10:</b> Permeabilidade da Mistura 1 para todos os líquidos percolante. Primeira e Segunda campanha. ....	89
<b>Figura 6. 11:</b> Permeabilidade da Mistura 2 para todos os líquidos percolante. Primeira e Segunda campanha. ....	90
<b>Figura 6. 12:</b> Permeabilidade da Mistura 3 para todos os líquidos percolante. Primeira e Segunda campanha. ....	90
<b>Figura 6. 13:</b> Permeabilidade da Mistura 4 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha. ....	90
<b>Figura 6. 14:</b> Permeabilidade da Mistura 5 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha. ....	91
<b>Figura 6. 15:</b> Permeabilidade da Mistura 6 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha. ....	91
<b>Figura 6. 16:</b> Permeabilidade da Mistura 7 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha. ....	91
<b>Figura 6. 17:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 1 em função da umidade do solo. ....	93
<b>Figura 6. 18:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 2 em função da umidade do solo. ....	93
<b>Figura 6. 19:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 3 em função da umidade do solo. ....	93
<b>Figura 6. 20:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 4 em função da umidade do solo. ....	94
<b>Figura 6. 21:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 5 em função da umidade do solo. ....	94
<b>Figura 6. 22:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 6 em função da umidade do solo. ....	94
<b>Figura 6. 23:</b> Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 7 em função da umidade do solo. ....	95

<b>Figura 6. 24:</b> Valores de $K^*$ dos aterros experimentais em função da constante dielétrica dos líquidos orgânicos – Primeira campanha.....	97
<b>Figura 6. 25:</b> Valores de $K^*$ dos aterros experimentais em função da constante dielétrica dos líquidos orgânicos – Segunda campanha.....	97
<b>Figura 6. 26:</b> Permeabilidades dos aterros experimentais calculada com o $\alpha$ obtido e o sugerido por Elrick et al (1989) – Primeira campanha.....	103
<b>Figura 6. 27:</b> Permeabilidades dos aterros experimentais calculada com o $\alpha$ obtido e o sugerido por Elrick <i>et al</i> (1989) – Segunda campanha .....	103
<b>Figura 6. 28:</b> Comparativo dos valores de permeabilidade à água e ao diesel obtidos em laboratório e os valores obtidos em campo durante a segunda campanha de ensaios.....	105
<b>Figura 6. 29:</b> Comparativo dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos obtido com o $\alpha$ de Elrick (1989) com os valores estimados pelo modelo de Machado (2014).....	106
<b>Figura 6. 30:</b> Comparativo dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos calculado com o $\alpha$ obtido, e com os valores estimados pelo modelo de Machado (2014).....	107
<b>Figura 6. 31:</b> Comparativo dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos obtido com o $\alpha$ de Elrick (1989) com os valores estimados pelo modelo de Oliveira (2001). .....	108
<b>Figura 6. 32:</b> Curva de retenção à água para a mistura 1 .....	110
<b>Figura 6. 33:</b> Curva de retenção à água para a mistura 2 .....	111
<b>Figura 6. 34:</b> Curva de retenção à água para a mistura 3 .....	111
<b>Figura 6. 35:</b> Curva de retenção à água para a mistura 4 .....	111
<b>Figura 6. 36:</b> Curva de retenção à água para a mistura 5 .....	112
<b>Figura 6. 37:</b> Curva de retenção à água para a mistura 6 .....	112
<b>Figura 6. 38:</b> Curva de retenção à água para a mistura 7 .....	112
<b>Figura 6. 39:</b> Curvas de Infiltração dos aterros experimentais.....	113

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 3. 1:</b> Vantagens e desvantagens dos permeâmetros de parede rígida e parede flexível .....	23
<b>Quadro 3. 2:</b> Parâmetro $\alpha$ sugerido por Elrick <i>et al.</i> (1989) .....	29
<b>Quadro 6. 1:</b> Classificação de desempenho dos aterros experimentais.....	114

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4. 1:</b> características dos solos usados na segunda etapa da pesquisa. ....	43
<b>Tabela 4. 2:</b> Características granulométricas e de compactação das misturas usada na terceira etapa da pesquisa. ....	46
<b>Tabela 4. 3:</b> Proposta de faixas ótimas de propriedades índices para confecção de barreiras minerais para contenção de orgânicos. ....	48
<b>Tabela 4. 4:</b> Recomendações de compactação para barreiras minerais de contenção de líquidos orgânicos. ....	49
<b>Tabela 5. 1:</b> Caracterização granulométrica e de compactação dos solos Barreiras e Granulito. ....	52
<b>Tabela 5. 2:</b> Teor de finos nas misturas dos solos Granulito e Barreiras. ....	52
<b>Tabela 5. 3:</b> Resultado dos ensaios de caracterização das misturas. ....	55
<b>Tabela 5. 4:</b> Propriedade dos líquidos a 20 °C ....	64
<b>Tabela 5. 5:</b> Número de ensaios de permeabilidade realizados em campo. ....	69
<b>Tabela 6. 1:</b> Grau de compactação por camada dos aterros experimentais. ....	80
<b>Tabela 6. 2:</b> Umidade dos aterros. ....	81
<b>Tabela 6. 3:</b> Permeabilidade dos aterros para os líquidos água, diesel, biodiesel e gasolina – Primeira campanha. ....	83
<b>Tabela 6. 4:</b> Permeabilidade dos aterros para os líquidos água, diesel, biodiesel e gasolina – Segunda campanha. ....	83
<b>Tabela 6. 5:</b> Valores de permeabilidade $K^*$ obtidos a partir dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos. ....	96
<b>Tabela 6. 6:</b> Comparação entre os valores de permeabilidade obtida experimentalmente comparada aos valores de permeabilidade estimados – Primeira campanha. ....	98
<b>Tabela 6. 7:</b> Comparação entre os valores de permeabilidade obtida experimentalmente comparada aos valores de permeabilidade estimados – Segunda campanha. ....	99



<b>Tabela 6. 8:</b> Permeabilidade, potencial matricial e constante de ajuste, obtidos através do Método Rigoroso – Primeira campanha. ....	101
<b>Tabela 6. 9:</b> Permeabilidade, potencial matricial e constante de ajuste, obtidos através do Método Rigoroso – Segunda campanha. ....	101
<b>Tabela 6. 10:</b> Comparativo dos valores do parâmetro de ajuste $\alpha$ obtidos e os valores sugeridos por Elrick <i>et al</i> (1989) que foram usados. ....	102
<b>Tabela 6. 11:</b> Resultados de permeabilidade à água e ao diesel obtidos nos ensaios em laboratório, e os resultados de permeabilidade à água e ao diesel obtidos em campo. ....	104
<b>Tabela 6. 12:</b> Valores de permeabilidade ao diesel estimados através da equação de Machado et al (2014).....	106
<b>Tabela 6. 13:</b> Média dos valores de permeabilidade $K^*$ . E classificação dos aterros experimentais – Primeira e Segunda Campanha. ....	109
<b>Tabela 6. 14:</b> Características granulométricas e de compactação das misturas segundo a classificação de desempenho. ....	114
<b>Tabela 6. 15:</b> Proposta de Melhoria para a faixa granulométrica ótima.....	115

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Área da seção transversal da bureta [ $L^2$ ]
$A$	Área do reservatório do Permeômetro utilizado [ $L^2$ ]
$a$	Constante de ajuste
$b$	Constante de ajuste
$B$	Termo genérico, associado ao tamanho do poro
$c$	Constante de ajuste
$C$	Fator de forma
$C_v$	Relação entre as viscosidades.
$d$	Constante de ajuste
$e$	Constante de ajuste
$f$	Constante de ajuste
$g$	Aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ]
$h_1$	Nível da água no início da medição [L]
$h_2$	Nível da água após o intervalo de tempo $\Delta t$ [L]
$I$	Profundidade de cravação do cilindro [L]
$i_h$	Gradiente de carga hidráulica
$IP$	Índice de plasticidade
$k$	Permeabilidade do solo [ $LT^{-1}$ ]
$K$	Permeabilidade intrínseca [ $L^2$ ]
$K_i$	Permeabilidade efetiva [ $L^2$ ]
$k_{Nutting}$	Permeabilidade do solo calculado através da equação de Nutting [ $LT^{-1}$ ]
$K_{r n}$	Permeabilidade relativa da fase não-molhante
$K_r$	Permeabilidade relativa
$k_{ref}$	Constante de ajuste
$K_{rw}$	Permeabilidade relativa da fase molhante
$L$	Altura do corpo de prova [L]
$L_e$	Comprimento da seção filtrante [L]
$N$	Constante de ajuste

n	Porosidade do meio
Q	Vazão [ $L^3T^{-1}$ ]
r	Raio interno do revestimento do poço [L]
R	Raio da perfuração [L]
Re	Número de Reynolds
$S_r$	Grau de saturação
$S_w$	Saturação da fase molhante
$T_L$	Tempo que leva para o nível da água cair a 37% da posição inicial [T]
U	Fator de conversão de unidades, passar mm/min para m/s, expresso como 1/160000.
$v_{real}$	Velocidade real [ $LT^{-1}$ ]
V	Volume de fluido percolado [ $L^3$ ]
WL	Limite de Liquidez
$\Delta h$	Variação da carga hidráulica [L]
$\Delta t$	Intervalo de tempo [T]
$\epsilon$	Constante dielétrica relativa
$\lambda$	Constante que depende do tipo de solo e do histórico de tensões do mesmo
$\mu$	Viscosidade dinâmica [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]
$\rho$	Densidade do fluido [ $ML^{-3}$ ]
$\phi_m$	Potencial matricial de fluxo [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]
IP	Índice de plasticidade do solo
Fc	Teor de finos
$W_L$	Limite liquidez
$W_P$	Limite de plasticidade
Gc	Teor de pedregulho
Sc	Teor de areia
GC	Grau de compactação
Gs	Densidade dos grãos [ $ML^{-3}$ ]
Ped	Pedregulho
AG	Areia grossa

AM	Areia Média
AF	Areia Fina
Silt	Silte
Arg	Argila

## LISTA DE ABREVEATURAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AER	Alberta Energy Regulator
ANN	Redes Neurais Artificiais
CETESB	Companhia Estadual de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo.
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
GEOAMB	Laboratório de Geotecnia Ambiental
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
MLR	Regressão Linear Múltipla
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SPCC	Spill Prevention, Control, and Countermeasure
UFBA	Universidade Federal da Bahia
CP	Corpos de prova

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>5</b>
3.1. PERMEABILIDADE DOS SOLOS .....	5
3.1.1. <i>Fatores que Interferem na Permeabilidade</i> .....	8
3.1.2. <i>Modelagem da Permeabilidade de Solos Granulares</i> .....	13
3.1.3. <i>Modelagem da Permeabilidade dos Solos Argilosos</i> .....	14
3.2. IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DOS FENÔMENOS ESTUDADOS.....	18
3.3.1. <i>Permeabilidade Efetiva</i> .....	19
3.3. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM CAMPO E EM LABORATÓRIO .....	21
3.3.1. <i>Ensaio em Laboratório</i> .....	22
3.3.2 <i>Ensaio em Campo</i> .....	24
3.4. INFILTRAÇÃO NO SOLO.....	31
3.4.1 <i>Modelo de Infiltração de Kostiakov</i> .....	33
3.4.2 <i>Modelo de Infiltração de Horton</i> .....	34
3.4.3 <i>Modelo de Infiltração de Green e Ampt</i> .....	35
3.4.4 <i>Modelo de Infiltração de Philip</i> .....	36
3.5. ASPECTOS NORMATIVOS .....	37
<b>4. PROPOSTA DE FAIXA GRANULOMÉTRICA ÓTIMA PARA A CONTENÇÃO DE LÍQUIDOS ORGÂNICOS</b> .....	<b>41</b>
<b>5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS PRELIMINARES</b> .....	<b>50</b>
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS PARA PRODUÇÃO DAS BARREIRAS DE CONTENÇÃO .....	50
5.1.1 <i>Procedimento de mistura e Caracterização do solo</i> .....	53
5.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA PARA CONSTRUÇÃO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS .....	56
5.3. CONSTRUÇÃO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS .....	61
5.4. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA DOS LÍQUIDOS PERMEANTES. ....	63

5.5. PERMEÂMETRO GUELPH -----	67
5.6. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE NOS ATERROS EXPERIMENTAIS -----	69
5.6.1. <i>Ensaio de permeabilidade in situ.</i> -----	69
5.6.2. <i>Ensaio de permeabilidade em laboratório com amostras indeformadas</i> -----	71
5.6.3. <i>Aplicação da Modelagem de Matemática</i> -----	73
5.7. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS -----	73
5.7.1. <i>Ensaio para determinação das curvas de retenção do solo</i> -----	75
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES -----</b>	<b>80</b>
6.1. GRAU DE COMPACTAÇÃO E DENSIDADE DOS ATERROS EXPERIMENTAIS -----	80
6.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS -----	82
6.2.1 <i>Permeabilidade dos Aterros Experimentais</i> -----	82
6.2.2. <i>Resultado da Permeabilidade em laboratório</i> -----	103
6.2.3. <i>Resultados da Aplicação de Modelagem Matemática</i> -----	105
6.3. IDENTIFICAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL MAIS ADEQUADO -----	108
6.3.1. <i>Critério 1: Permeabilidade média <math>K^*</math></i> -----	108
6.3.2. <i>Critério 2: Razão <math>K^*_{1^a}/K^*_{2^a}</math> média</i> -----	109
6.3.3. <i>Critério 3: Infiltração no Aterro Experimental</i> -----	110
<b>7. CONCLUSÕES -----</b>	<b>116</b>
<b>8. REFERÊNCIAS -----</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE -----</b>	<b>125</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das principais fontes de contaminação de solos e águas subterrâneas têm sido os vazamentos de tanques de armazenamento de combustíveis derivados de petróleo. A Companhia Estadual de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (2013) aponta que 75% das áreas contaminadas do Estado de São Paulo são atingidas por vazamentos em postos de combustíveis, tendo como contaminantes solventes aromáticos, combustíveis líquidos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs).

A contaminação do solo pode gerar danos à saúde humana, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, restrições de uso do solo, danos ao patrimônio público e privado, como a desvalorização da propriedade, além de danos ambientais (CETESB, 2013). A recuperação de áreas contaminadas envolve um custo muito alto e um período de tempo longo. Além disso, o Brasil, por ser um grande produtor de petróleo e derivados, onde armazena, distribui e revende, tem uma significativa vulnerabilidade a vazamentos durante estas etapas, e as consequências desta contaminação acarretam impactos ambientais gravíssimos, tanto pela magnitude como pela dificuldade de recuperação da área atingida. Estes aspectos ressaltam a necessidade de se desenvolver ou aprimorar os mecanismos de proteção e preservação de solos e águas subterrâneas.

Para os terminais de armazenamento de derivados de petróleo, um dos principais mecanismos de proteção é colocar ao tanques verticais de estocagem no interior de bacias de contenção, para conter vertical e horizontalmente eventuais vazamentos, sendo o solo argiloso compactado o material mais empregado na impermeabilização de bacias de contenção devido à sua eficiência comprovada na retenção de água e ao baixo custo de implantação. Conforme é discutido neste trabalho, contudo, barreiras de contenção puramente argilosas possuem deficiências na contenção de líquidos apolares, como no caso da grande maioria dos hidrocarbonetos.

No Brasil, não existe nenhuma legislação federal sobre os critérios construtivos das estruturas de contenção de derramamentos de tanques verticais. A Bahia possui o Decreto



Estadual n.º 11.235/2008, que estabelece no *Art. 68* – Que os diques de contenção deverão ser devidamente impermeabilizados.

A NBR 17505-2 / 2013 apresenta, em nível de recomendação, os critérios construtivos das estruturas de controle de derramamento de tanques verticais. Esta norma, exige que os diques e bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento tenham coeficiente de permeabilidade máximo de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, referenciado à água a 20°C, ou de  $1 \times 10^{-4}$  cm/s, também referenciado à água a 20°C, para as bacias de contenção que possuam canaletas de drenagem com área de escoamento mínimo de 900 cm<sup>2</sup>. Diversos pesquisadores, dentre estes, Machado *et al* (2011), alertam que a água não pode ser utilizada como fluido de referência para a avaliação da permeabilidade do solo a líquidos orgânicos de baixa polaridade, resultando normalmente em valores de permeabilidade que põem em risco a segurança ambiental na grande maioria dos casos. Isto ocorre pois em uma barreira mineral de contenção o mecanismo principal de retenção de líquidos pelas argilas reside na interação solo/líquido, a qual é fortemente influenciada pela polaridade do líquido percolante. A baixa polaridade dos hidrocarbonetos aumenta o seu valor de permeabilidade quando percolados em solos argilosos. Sendo assim, ao utilizar a água como referência para avaliar bacias de contenção para hidrocarbonetos pode resultar em um valor de permeabilidade menor que o valor de permeabilidade real ao fluido armazenado.

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. Como parte do processo de validação dos resultados de laboratório obtidos, uma avaliação em escala real, sob as condições de tempo do dia a dia, fez-se necessária. É neste escopo que se insere o objeto de estudo desta pesquisa, qual seja, o comportamento obtido em campo de barreiras de contenção construídas com solos que atendam as faixas granulométricas propostas a partir de ensaios de laboratório.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No capítulo 1 apresenta-se a introdução do trabalho acompanhada do problema de pesquisa e da justificativa. O objetivo geral, bem como os objetivos específicos, é apresentado no capítulo 2 deste trabalho. No capítulo 3 é desenvolvida uma breve Fundamentação Teórica sobre os temas correlacionados à pesquisa. No capítulo 4 é apresentada uma descrição sucinta da pesquisa que antecedeu este trabalho. A

área de estudo e os procedimentos de campo e laboratoriais são apresentados no capítulo 5. Os resultados, análises e interpretações são apresentadas no capítulo 6. Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as considerações finais.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa consiste em avaliar a eficiência de barreiras minerais construídas com misturas de solos que atendam a faixa granulométrica ótima proposta por Machado *et al* (2011), para a contenção de líquidos orgânicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construção de aterros experimentais com diversas misturas de solos.
- Determinação da permeabilidade, em campo e em laboratório, dos aterros experimentais compactados tendo a água e aos líquidos orgânicos, gasolina comercial, diesel comercial e biodiesel.
- Avaliação do desempenho dos aterros experimentais para validação da melhor faixa granulométrica utilizada na construção dos aterros.

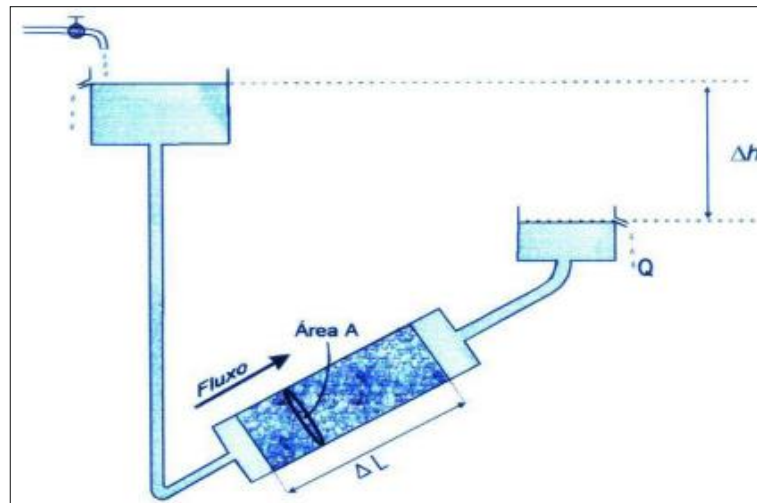
### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. PERMEABILIDADE DOS SOLOS

Os solos são formados de partículas resultantes do intemperismo das rochas através dos fenômenos de decomposição química ou desintegração mecânica. Dependendo do tipo de agente formador, o solo pode apresentar partículas com variados tamanhos. A NBR 6502 (ABNT, 1995) define a classificação granulométrica brasileira como: pedregulho (diâmetro das partículas compreendidas entre 60 mm e 2,0 mm), areia (diâmetro das partículas compreendidas entre 2,0 mm e 0,06 mm), siltes (diâmetro das partículas compreendidas entre 0,06 mm e 0,002 mm) e/ou argilas (diâmetro das partículas inferiores a 0,002 mm). No que diz respeito à textura os solos podem ser classificados em dois grandes grupos: solos grossos (areia, pedregulho, matacão) e solos finos (silte e argila). Esta divisão é fundamental no entendimento do comportamento dos solos, pois a depender do tamanho predominante das suas partículas, as forças de campo influenciando em seu comportamento serão gravitacionais (solos grossos) ou elétricas (solos finos). Quanto à natureza das partículas, os minerais presentes nos solos, as frações grossas são predominantemente de grãos silicosos, enquanto os minerais que ocorrem nas frações argilosas pertencem aos três grupos principais: caulinita, montemorilonita e ilita (CAPUTO, 1988).

A propriedade do solo de permitir o escoamento de líquidos através dos seus poros é chamada de permeabilidade, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo *coeficiente de permeabilidade*. A determinação do coeficiente de permeabilidade de um solo é feita baseada na Lei de Darcy. O engenheiro francês Henry Darcy realizou, em 1856, um experimento sobre taxas de infiltração através de filtros de areia; em um arranjo similar ao apresentado na figura 3.1.

A Figura 3.1 mostra uma coluna de solo de comprimento (L) e seção transversal constante (A) por meio da qual um fluxo constante de água (vazão de água Q), corre indo do reservatório superior para o inferior. Durante o ensaio os níveis de água são mantidos constantes; o fluxo ocorre devido a variação da carga hidráulica ( $\Delta h$ ) ou da energia da água entre os reservatórios.



**Figura 3. 1:** Arranjo ilustrativo do experimento realizado por Darcy

Segundo Darcy a vazão ( $Q$ ) que passa através da coluna de solo é diretamente proporcional à área  $A$  da secção transversal da coluna, à variação da carga hidráulica ( $\Delta h$ ) e ao coeficiente de proporcionalidade ( $k$ ) (condutividade hidráulica ou permeabilidade); e inversamente proporcional ao comprimento da coluna de solo ( $L$ ). A lei de Darcy é apresentada na Equação 3.1.

$$Q = \frac{k \times A \times \Delta h}{L} \quad [3.1]$$

Sendo, com as seguintes dimensões:

$Q$  = vazão [ $L^3T^{-1}$ ];

$k$  = coeficiente de permeabilidade do solo [ $LT^{-1}$ ];

$A$  = área da secção transversal [ $L^2$ ];

$L$  = comprimento da amostra de solo [ $L$ ]

Esta equação pode ser assim disposta:

$$Q = -k \times A \times i_h \quad [3.2]$$

Sendo o gradiente hidráulico ( $i_h$ ) adimensional, encontrado através da Equação 3.3

$$i_h = \frac{(h_1 - h_2)}{L} = \frac{\Delta h}{L} \quad [3.3]$$

A vazão (Q) dividida pela área transversal da coluna de solo (A) indica a taxa de descarga (v) com que a água percola no solo. Sendo a taxa de descarga v, em [LT<sup>-1</sup>], também chamada de velocidade de Darcy.

$$v = -k \times i_h \quad [3.4]$$

A velocidade obtida na equação 3.4 é chamada de velocidade de descarga, sendo esta, a velocidade média aparente da água pela área total da seção transversal do solo (sólidos+vazios). A velocidade de descarga difere da velocidade real da água nos vazios do solo porque a área efetiva que a água tem para percolar na seção de solo não é dada pela área transversal total da amostra (A), mas sim pela sua área transversal de vazios. Com o conhecimento sobre índices físicos, pode-se admitir que a relação entre a área transversal de vazios e a área transversal total seja dada pela porosidade do solo (n). Assim, a velocidade real da água no solo é encontrada pela Equação 3.5. Apesar disto, devido a sua aplicação prática mais imediata, a velocidade de descarga é a velocidade empregada na resolução de problemas envolvendo fluxo de água em solos.

$$v_{\text{real}} = \frac{v}{n} = \frac{k \times i_h}{n} \quad [3.5]$$

A lei de Darcy apresenta algumas limitações, sendo válida somente para os casos de fluxo laminar. Pesquisas efetuadas posteriormente à postulação da lei de Darcy demonstraram que o valor limite do número de Reynolds (Re) para o qual regime de fluxo muda de laminar para turbulento no solo se situa entre 1 e 2. Para tubulações de pequenos diâmetros, o fluxo laminar ocorre para Re menores que 1000 a 2200. Esta enorme diferença entre o Re para escoamentos em condutos forçados e no solo deve-se a grande desuniformidade nos caminhos por onde a água passa no solo, fazendo a velocidade de fluxo variar enormemente de ponto a ponto, ou seja, pela extrema irregularidade dos vazios do solo (KLAR, 1984).

### ***3.1.1. Fatores que Interferem na Permeabilidade***

De uma maneira geral os fatores que interferem na permeabilidade dependem das propriedades do solo e das propriedades dos fluídos percolantes. No entanto, não há unanimidade sobre quais propriedades do solo e dos fluidos influenciam, de forma significativa, a permeabilidade de solos argilosos; gerando diversas pesquisas sobre o tema, bem como uma série de modelos matemáticos para prever permeabilidade para diferentes líquidos.

Lambe e Whitman (1969) apontam cinco características do solo que afetam a permeabilidade, sendo: (1) Tamanho da partícula; (2) Índice de vazios; (3) Composição do solo; (4) Estrutura e (5) grau de saturação do solo. A viscosidade e a densidade, apontadas por Nutting (1930) como as características do fluido que afetam a permeabilidade. Para Lambe e Whitman (1969) estas não são as únicas características que influenciam a permeabilidade do solo aos diferentes fluidos. Estes pesquisadores expõem que a mobilidade do fluido no solo depende da polaridade do mesmo, sendo necessário que alguma medida de polaridade deva ser incluída nas equações que pretendam modelar a permeabilidade.

Mesri e Olson (1971) verificaram que em solos argilosos a permeabilidade é influenciada por variáveis mecânicas e físico-químicas. As variáveis físico-químicas influenciam na dispersão ou na agregação das partículas de argila. O raciocínio, deste pesquisadores, é que a molécula de água, com um grande momento dipolo, liga-se ao solo com grande área superficial, como as argilas, sendo que a maior parte do líquido existente nos poros se torna um filme adsorvido, sendo mantida no lugar por atrações intermoleculares de vários tipos. A existência de uma camada de água adsorvida sobre a superfície das partículas do solo reduz eficazmente o tamanho dos canais dos poros livres para o fluxo, diminuindo a capacidade do fluido se mover através do solo. Fluidos que têm polaridades menores do que a água, como é o caso de muitos líquidos orgânicos, são menos fortemente ligados aos minerais do solo, e o fluido flui mais facilmente através da rede de poros.

Bensen e Daniel (1990) ao investigarem a influência dos micro pacotes de partículas (*clusters*) sobre a permeabilidade de solos argilosos compactados demonstraram a importância de se considerar estes agregados no processo de compactação para se obter baixos valores de permeabilidade. O tamanho dos agregados de partículas teve uma grande influência sobre a permeabilidade dos solos compactados, quando compactados secos; ao serem compactados na

umidade ótima, não foi observada uma dependência do tamanho dos agregados de partículas, indicando a importância da umidade de compactação na permeabilidade do solo. Os referidos pesquisadores sugeriram duas formas de minimizar o aumento da permeabilidade causado pelos torrões: (1) uso de um teor de umidade grande o suficiente para amolecer os torrões e, assim, serem remodelados durante a compactação; e (2) usando uma energia de compactação suficientemente grande para destruir os torrões duros, mesmo em solos relativamente secos. No entanto, é válido lembrar que estes estudos foram feitos tendo apenas a água como fluido percolante. É evidente que a granulometria possui influência na permeabilidade do solo; são obtidos menores valores de permeabilidade para solos mais finos, devido à diminuição do tamanho dos canais dos poros.

Benson *et al.* (1994) avaliaram em seu estudo sobre revestimentos de solos em aterros da América do Norte, dois dos fatores apontados por Lambe e Whitman (1969) que afetam a permeabilidade, sendo estes: a composição do solo e a estrutura. Além disso, os pesquisadores desenvolveram um modelo de regressão multivariada para identificar as variáveis mais importantes na previsão da permeabilidade, sendo apontadas cinco variáveis: peso específico, índice de plasticidade, tipo de compactador, saturação inicial, percentagem pedregulho e percentagem de argila. Segundo Benson *et al.* (1994) para se obter uma permeabilidade  $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s com relação à água, o solo deverá apresentar as seguintes características: Limite de Liquidez – WL  $\geq 20\%$ , índice de plasticidade – IP  $\geq 7\%$ , percentagem de material fino (passando na peneira #200)  $\geq 30\%$  e percentagem de argila ( $< 0,002$  mm)  $\geq 15\%$ . Estes fatores, o WL e o IP, são diretamente relacionados a mineralogia dos solos e ao conteúdo de argila, por isso a tendência de baixa permeabilidade é esperada. Para Benson *et al.* (1994) uma baixa permeabilidade deverá ser provavelmente encontrada quando o solo for bem graduado e a fração argila governar o comportamento hidráulico da matriz.

A estrutura é apontada por vários pesquisadores como um fator de muita interferência na permeabilidade dos solos finos, pois o arranjo dos grãos interfere nas aberturas pelas quais os fluidos percolam. Mitchell e Soga (2005) citam três níveis de arranjos quando se considera a permeabilidade de solos finos, sendo: (a) *microfábrica*: corresponde aos agregados regulares de grãos e pequenos espaços vazios não maiores que 1  $\mu$ m dentro destes agregados (poros intra-agregados), onde há pouca possibilidade de fluxo; (b) *minifábrica*: contém estes agregados e os poros entre eles (poros inter-agregados), sendo que estes poros normalmente possuem diversas dezenas de micrômetros; e (c) *macrofábricas*: que se constituem nas laminações, fissuras,



rachaduras, buracos de raízes, que correspondem aos poros trans agregados ou macro poros, através dos quais o fluxo é tão alto que pode ser negligenciado o fluxo pelos outros tipos de poros.

Para Budhu *et al.* (1991), os fatores potencialmente importantes nas variações de suas propriedades hidráulicas para solos argilosos permeados por líquidos orgânicos, são as propriedades dos fluidos permeados, a composição físico-química do solo e a natureza da adsorção do permeante pelas partículas.

Sharma e Lewis (1994) citam que para solos arenosos, os parâmetros do fluido, massa específica e viscosidade dinâmica do fluido são suficientes para avaliação da percolação, no entanto para solos argilosos a densidade e a viscosidade não são as únicas propriedades do permeante que influenciam a permeabilidade; outros fatores físico-químicos podem influenciar significativamente os valores de permeabilidade, tais como a constante dielétrica, a concentração eletrolítica, a troca catiônica. Estes pesquisadores apontam ainda algumas propriedades do solo que podem influenciar a permeabilidade, sendo, o tamanho das partículas, índice de vazios, composição, estrutura e grau de saturação.

A constante dielétrica relativa ( $\epsilon$ ), segundo Halliday *et al.* (2007), é um fator adimensional e sua determinação é feita quando um material dielétrico é colocado entre duas placas de um capacitor; sendo dada pelo quociente entre as capacitâncias medidas, respectivamente com e sem o dielétrico entre as placas. Nesta dissertação, a constante dielétrica relativa será chamada apenas de constante dielétrica e será representada pelo símbolo ( $\epsilon$ ).

Em solos argilosos, foi encontrada boa correlação entre os valores de permeabilidade e a polaridade dos líquidos, através do inverso da constante dielétrica dos líquidos orgânicos; fato demonstrado por vários autores como Fernandez e Quigley (1985); Schramm *et al.* (1986); Budhu *et al.* (1991); Shackelford (1994); Oliveira (2001); Amorim Jr. 2007; Cardoso (2011). Esta descoberta mostrou que variáveis desconsideradas nos modelos, que descrevem a permeabilidade de solos, tornam-se importantes quando o fluxo é de líquidos orgânicos infiltrando em solos argilosos.

Shackelford (1994) mostrou em sua pesquisa que líquidos percolantes com constantes dielétricas menores (em relação a água) causam, possivelmente, a diminuição na espessura

(contração) da camada dupla elétrica das partículas, havendo então sua agregação e floculação, com consequente aumento do tamanho dos poros e aumento da permeabilidade.

Segundo Oliveira (2001), quanto maior for a constante dielétrica dos fluidos permeando sedimentos argilosos, maior será a propensão das argilas de adsorver o líquido. É apontado na literatura que a constante dielétrica do líquido influencia fortemente o volume de líquido adsorvido pelas argilas, fator que também determina o grau de expansividade da argila.

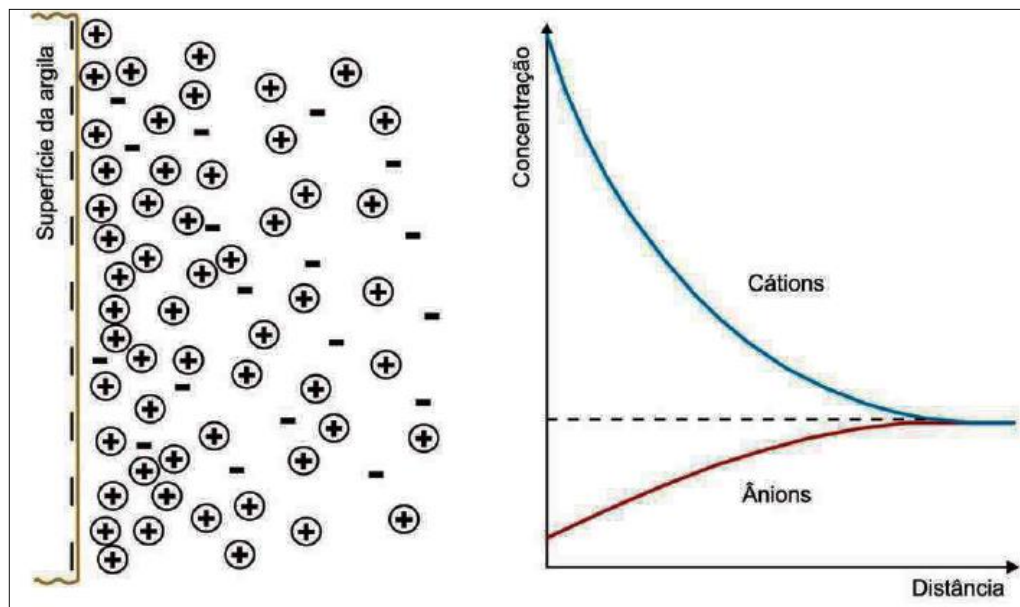
De forma geral, o que pode ser notado com base na literatura e que é citado por Abuel-Naga *et al.* (2005) é que existem três fatores que afetam a permeabilidade do solo. Em primeiro lugar, as propriedades do fluido que incluem a viscosidade e a densidade. Em segundo lugar, as propriedades da matriz do solo, que descrevem o tamanho do canal de fluxo entre as partículas do solo no interior da amostra de solo. Em terceiro lugar, as interações físico-químicas entre as partículas do solo e o líquido circundante que afetam também o tamanho do canal de fluxo. Segundo Abuel-Naga *et al.* (2005) a mudança na permeabilidade pode ser atribuída a qualquer alteração na espessura da dupla camada difusa, da matriz do solo como um resultado das mudanças de volume do solo ou das propriedades do fluido.

As partículas da fração textural argila do solo normalmente possuem uma carga eletronegativa, o que dá origem a reações de permuta catiônica. Duas fontes principais para a origem da carga negativa: (1) substituição isomórfica na formação dos minerais, chamada de carga permanente; e (2) chamada de carga variável, é causada pela dissociação da hidroxila na superfície da argila, que é dependente do pH do meio (TAN, 1998; EVANGELOU, 1998). As superfícies carregadas das argilas atraem íons de cargas opostas. À medida que aumenta a distância a partir da superfície da partícula, a concentração destes íons diminui em alguma taxa exponencial. A força elétrica atuando sobre esses cátions puxa-os para a superfície da partícula, enquanto que a força de difusão puxa-os para fora da superfície (há uma maior concentração de cátions próximo às partículas sólidas). Esta teoria de adsorção e distribuição de íons é conhecida como teoria de dupla camada difusa (EVANGELOU, 1998).

Shaw (1975) apresenta a dupla camada elétrica como constituída por duas regiões, isto é, uma região interna, que pode incluir íons adsorvidos, e uma região difusa na qual os íons se encontram distribuídos de acordo com a influência das forças elétricas e do movimento térmico. Considerando a parte difusa, o tratamento mais simples foi desenvolvido por Gouy e Chapman. Este modelo baseia-se em: (1) a superfície é supostamente plana, de extensão infinita e com

cargas distribuídas de maneira uniforme; (2) os íons na parte difusa da dupla camada são encarados como cargas puntiformes distribuídas de acordo com a distribuição de Boltzmann; (3) o solvente influencia a dupla camada somente através de sua constante dielétrica, que tem o mesmo valor através de toda a parte difusa; e (4) supõe-se para estudo um eletrólito isolado e simétrico, de carga  $z$ . Essa suposição facilita as derivações, perdendo-se pouco de exatidão, dada a pouca importância da carga do co-íon. A figura 3.2 ilustra a camada dupla difusa.

No modelo proposto por Stern, a parte interna da dupla camada está localizada a uma distância da superfície, idêntica ao raio do íon hidratado, sendo separado por um plano, denominado *plano de Stern*. Este modelo considera a possibilidade de adsorção iônica específica, ou seja, os íons são ligados (mesmo que temporariamente) a uma superfície por forças elétricas e/ou por forças de van der Waals suficientemente fortes para se sobreporem a agitação térmica (SHAW, 1975). Sendo assim, os íons adsorvidos à superfície das argilas são considerados como pertencentes a camada de Stern, os demais íons são considerados da camada dupla difusa e tratados pelo modelo de Gouy e Chapman.



**Figura 3. 2:** Representação esquemática da dupla camada elétrica difusa. (Adaptado de Shaw, 1975)

No solo os efeitos da camada dupla proporcionam, em meio aquoso, a expansão do mineral de argila, diminuindo a permeabilidade, devido a redução do tamanho dos poros disponíveis para fluxo. Um aumento da permeabilidade pode ser observado quando há redução da espessura da camada dupla. O modelo de camada dupla difusa de Gouy e Chapman, tem como uma das bases o fato do permeante influenciar a dupla camada através de sua constante dielétrica. Este modelo será melhor explorado mais à frente. A variação da permeabilidade pode

ser explicada pelo fato do líquido adsorvido no solo não contribuir para o fluxo global. Esta foi a explicação usada por Morandini e Leite (2012) para a redução da permeabilidade em solos contendo frações de bentonita.

Através desta teoria da dupla camada, Fernandez e Quigley (1985) explicaram com sucesso a variação da permeabilidade obtida ao variar o líquido permeado em um mesmo solo. Estes pesquisadores concluíram que para um dado índice de vazios, os valores de permeabilidade elevados estão diretamente relacionados à percolação de fluidos com valores baixos da constante dielétrica. Este mesmo princípio foi usado por vários pesquisadores para explicar a influência da constante dielétrica na permeabilidade do solo, como pode ser comprovado nos trabalhos de Mesri e Olson (1971); Kaya e Fang (2005); Oliveira (2001); Cardoso; 2011; entre outros.

Segundo Ruhl e Daniel (1997) são as seguintes características dos líquidos percolantes que tendem a contrair a camada dupla, levando a um aumento da permeabilidade: a baixa constante dielétrica ( $\epsilon$ ), a elevada concentração eletrolítica (água salobra ou hipersalinas) e a predominância de cátions multivalentes ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ).

### ***3.1.2. Modelagem da Permeabilidade de Solos Granulares***

Os experimentos de Nutting (1930), em meios porosos não reativos, mostraram que o coeficiente de permeabilidade é função tanto do fluido percolante como do meio. A textura, a estrutura do solo, a porosidade e o tamanho dos poros são apontados como as variáveis do solo que afetam a permeabilidade do mesmo. Quanto às propriedades do fluido que afetam o fluxo, são apontadas a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e densidade ( $\rho$ ). A propriedade pretensamente inerente ao solo de transmitir fluidos por seus interstícios é denominada de *permeabilidade intrínseca* ( $K$ ). A relação de proporcionalidade entre o coeficiente de permeabilidade, as propriedades do fluido e a permeabilidade intrínseca, é apresentada na Equação 3.6.

$$k = \frac{K \times \rho \times g}{\mu} \quad [3.6]$$

$K$  = é a permeabilidade intrínseca [ $L^2$ ];

$g$  = é a aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ];

$\mu$  = é a viscosidade dinâmica [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]; e

$\rho$  = é a densidade do fluido [ $ML^{-3}$ ].

A permeabilidade intrínseca ( $K$ ), na concepção de Nutting (1930), é uma função exclusiva das propriedades dos meios porosos, tais como: granulometria, arranjo dos grãos da matriz, forma dos grãos ou poros, tortuosidade, superfície específica dos grãos e porosidade e é independente das propriedades dos fluidos. Contudo, em solos naturais com algum teor de argila, as interações do meio poroso com o fluido não podem ser resolvidas pelas propriedades distintas e exclusivas do solo e do fluido (HILLEL, 1971).

### **3.1.3. Modelagem da Permeabilidade dos Solos Argilosos**

A variação do valor de permeabilidade de um solo ao ser percolado por líquidos orgânicos e por água foi observada por vários pesquisadores (Fernandez e Quigley, 1985; Schramm *et al.* 1986; Budhu *et al.* 1991; Oliveira, 2001; Amorim Jr., 2007, entre outros). Uma série de teorias vêm sendo desenvolvidas para explicar e/ou modelar matematicamente este comportamento. A polaridade foi apontada em diversos estudos como uma das principais variáveis influenciando os valores de permeabilidade, principalmente em solos argilosos. Uma medida do grau de polaridade dos líquidos é dada pela constante dielétrica relativa dos mesmos.

Em uma pesquisa sobre os modelos teóricos possíveis de tratamento matemático que pudessem representar meios porosos, Scheidegger (1957 *apud* Hillel, 1971) ressaltou que, em geral, meios porosos naturais são extremamente desordenadas, de modo que parece um procedimento bastante limitado representá-los por algo que está intrinsecamente ordenado. Por conseguinte, ele sugeriu que um modelo para um meio poroso deverá ser baseado em conceitos estatísticos.

A equação de Kozeny-Carman relaciona a permeabilidade intrínseca às propriedades geométricas do meio poroso baseada no conceito de *raio hidráulico* (HILLEL, 1971; KLAR, 1984). A equação de Kozeny-Carman é apresentada a seguir (Equação 3.7).

$$K = \frac{n^3}{C \times a^2 \times (1 - n)^2} \quad [3.7]$$

Onde,  $n$  – é a porosidade do meio [ - ];  $C$  – é um fator de forma, adimensional [ - ];  $a$  – é a superfície específica exposta ao fluido (área superficial por unidade de volume) [ $L^2L^{-3}$ ].

Oliveira (2001), afirma que definição de permeabilidade intrínseca é válida para meios granulares, sendo que nas argilas não se observa a independência entre a permeabilidade intrínseca e o líquido permeante, devido ao excesso de cargas elétricas na superfície dos argilominerais e a sua grande superfície específica e ainda em função das propriedades elétricas dos fluidos, fazendo com que os fenômenos de interação elétrica fluido/sólidos tenham grande influência na permeabilidade.

Devido à interferência das cargas elétricas na superfície das argilas na permeabilidade de solos argilosos há forte limitação em aplicar-se a definição de Nutting (1930) para se calcular a permeabilidade intrínseca quando a fração argilosa do solo é não desprezível, situação demonstrada por Hillel (1971), Fernandez e Quigley (1985), Schramm *et al.* (1986), Oliveira (2001).

Sabendo da influência da constante dielétrica sobre os valores de permeabilidade Budhu *et al.* (1991), realizaram experimentos com o intuito de avaliar e modelar matematicamente as alterações da permeabilidade intrínseca medidas para os líquidos orgânicos e para a água. A partir dos resultados obtidos, propuseram uma equação empírica (Equação 3.8), relacionando a razão das permeabilidades intrínsecas ( $K_p/K_w$ ), com a constante dielétrica do fluido. Nesta equação os subscritos  $p$  e  $w$  representam o produto orgânico e a água, respectivamente.

$$\frac{K_p}{K_w} = e^{\lambda \left(1 - \frac{\epsilon_p}{\epsilon_w}\right)} \quad [3.8]$$

Onde  $\lambda$  [ - ] é uma constante que depende do tipo de solo e do histórico de tensões do mesmo. Os pesquisadores não conseguiram definir quais propriedades do solo que determinam o valor de  $\lambda$ . Budhu *et al.* (1991), através de dados experimentais, definiram os valores de  $\lambda = 7$  e  $\lambda = 6$  para a montmorilonita e illita, respectivamente. Para a caulinita foi considerado razoável um  $\lambda = 1$ . Ao utilizar os resultados de permeabilidade obtidos por Fernandez e Quigley (1985) os valores para a referida constante foi de:  $\lambda = 4,5$  e  $\lambda = 8$ , para a argila proveniente de Lockport e argila proveniente de Sarina, respectivamente. Em relação à influência da constante dielétrica, Budhu *et al.* (1991) concluíram que esta pode não ser o único fator responsável por esse comportamento.

Oliveira (2001) concluiu no seu estudo que o coeficiente de permeabilidade de solos argilosos é fortemente influenciado pelas propriedades físico-químicas dos líquidos percolantes e pelas características dos argilominerais do meio. Tendo em vista a influência da constante dielétrica ( $\epsilon$ ) sobre os valores da permeabilidade em meio argiloso, de forma inversamente proporcional, Oliveira (2001) propõe uma formulação matemática para a permeabilidade nos meios argilosos que não depende somente do meio poroso, mas também da constante dielétrica do fluido (Equação 3.9).

$$k = \rho \frac{g}{\mu} \left( \frac{1}{5} \right) \left[ \frac{n^3}{(n-1)^2} \right] \frac{B}{\epsilon^N} \quad [3.9]$$

Onde, B é um termo genérico, associado ao tamanho do poro, que se mostra dependente da interação entre o líquido e a superfície do argilomineral, através da expansão da matriz argilosa, com dimensão [L<sup>2</sup>]; a constante dielétrica ( $\epsilon$ ) é elevada a um expoente  $N$ , que foi bem correlacionado com o teor de argila através do ajuste dos dados de Schramm *et al.* (1986). Segundo Oliveira (2001) os valores encontrados para  $N$ , corresponderam matematicamente, a  $N = n$ , quando o líquido permeante foi um líquido polar; ou a  $N = 20n$ , quando o líquido permeante foi um líquido apolar. Como  $N$  está correlacionado ao teor de argila, a explicação provável dada, é que, fisicamente, a porosidade está diretamente relacionada com o teor de argila na amostra.

Cardoso (2011) demonstrou em seu estudo, sobre transporte de contaminantes imiscíveis em solo, a importância dos fenômenos de interação solo/fluido; os valores de permeabilidade encontrados em relação aos fluidos com constante dielétrica menor que a água

se mostraram superiores aos valores para água. Cardoso (2011) apresenta uma proposta de equação matemática utilizada para prever a permeabilidade de diferentes solos e fluidos, em função da afinidade elétrica entre as partículas sólidas e o fluido percolante. Utilizando os resultados obtidos de permeabilidade e os valores do índice de plasticidade ( $IP$ ) e da constante dielétrica ( $\varepsilon$ ); a referida pesquisadora propõe a equação apresentada a seguir (Equação 3.10).

$$\log\left(\frac{k}{k_{Nutting}}\right) = a \times \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon} - 1\right)^b \times \frac{IP^{e+f \times IP}}{c + d + IP^{e+f \times IP}} \quad [3.10]$$

Onde,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$  são constantes de ajuste;  $k_{Nutting}$  [ $LT^{-1}$ ] é a permeabilidade do solo calculado através da equação de Nutting (Equação 3.6) tendo a água como fluido de referência. Cardoso (2011) encontrou os seguintes valores para:  $a = 0,0035$ ;  $b = 0,1$ ;  $c = 0,005$ ;  $d = 0,001$ ;  $e = 0,42$  e  $f = 0,008$  utilizando o método dos mínimos quadrados. Com esta equação foi possível explicar boa parte do comportamento obtido para os diferentes solos e fluidos empregados, pois a mesma possui um valor de  $R^2=0,91$ .

Machado *et al.* (2014) aperfeiçoaram o modelo matemático desenvolvido por Cardoso (2011). Estes pesquisadores usaram os resultados experimentais de permeabilidade de mais solos para derivar um modelo que estendesse a equação de Nutting (Equação 3.6) para prever valores de permeabilidade de fluidos com diferentes constantes dielétricas, em solos argilosos. O modelo proposto é apresentado na equação 3.11. Novos tipos de solo foram incorporados aos dados utilizados por Cardoso (2011).

$$\log\left(\frac{k}{k_{Nutting}}\right) = a \times \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon} - 1\right)^b \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-c \times IP}{c + IP} \times \log\left(\frac{k_{ref}}{k_w}\right)\right) + \frac{IP}{c + IP} \times \left\{ d \times \log\left(\frac{k_{ref}}{k_w}\right) + \frac{e}{(1 - Sr_w)} \right\} \right] \quad [3.11]$$

Onde,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $k_{ref}$  são parâmetros de ajuste do modelo;  $Sr_w$  é o grau de saturação à água. Esta equação foi reescrita para calcular diretamente a permeabilidade do solo para diferentes fluidos baseando-se na permeabilidade do solo à água (MACHADO *et al.* 2014).

$$k_f = \frac{\rho_f}{\rho_w} \times \frac{\mu_w}{\mu_f} \times k_w \times 10 \left\{ a \times \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon} - 1\right)^b \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-c \times IP}{c + IP} \times \log\left(\frac{k_{ref}}{k_w}\right)\right) + \frac{IP}{c + IP} \times \left\{ d \times \log\left(\frac{k_{ref}}{k_w}\right) + \frac{e}{(1 - Sr_w)} \right\} \right] \right\} \quad [3.12]$$



Nesta equação, os subscritos  $f$  e  $w$  representam o fluido de interesse e a água, respectivamente. Machado *et al* (2014) encontraram os seguintes parâmetros de ajuste:  $a = 0,263$ ;  $b = 0,20$ ;  $c = 5,00$ ;  $d = 1,19$ ;  $e = -0,259$  e  $k_{ref} = 1,34 \times 10^{-2}$  cm/s. Os resultados deste modelo apresentaram boa relação com os obtidos experimentalmente, com  $R^2 = 0,914$ .

### 3.2. IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DOS FENÔMENOS ESTUDADOS

Dentre os diversos fatores que afetam a permeabilidade do solo, as interações solo/fluido têm implicações diretas na performance das camadas de proteção mineral normalmente empregadas nos diques de contenção. As camadas de argila compactadas são bastantes empregadas na construção de diques de contenção, devido a sua eficiência comprovada na retenção de água, no entanto, como já foi mostrada por vários pesquisadores, com líquidos orgânicos tal eficiência não estaria totalmente garantida. Sob este aspecto, vários pesquisadores têm elaborados estudos.

Ao investigar a possibilidade de contaminação de um solo por hidrocarbonetos e metais pesados associados, em uma refinaria de petróleo em território nacional, Picarelli (2003) concluiu que as barreiras de argilas não são eficientes para contenção dos hidrocarbonetos, que estão percolando através dos aterros que compõem os diques de contenção, permanecendo apenas a saturação residual.

Melegari (2005) realizou estudos de permeabilidade nos solos das bacias de contenção do Terminal de Armazenamento de Cubatão – SP. O estudo concluiu que em 27% das amostras analisadas a permeabilidade para os combustíveis foi maior que para a água. Ou seja, em caso de eventuais derramamentos, os produtos poderão migrar mais rapidamente que a água. Com esses resultados, chegou à conclusão que a eficiência das bacias de contenção não deve ser baseada exclusivamente em critérios de permeabilidade em relação a água. Para Melegari (2005) a eficiência das bacias de contenção deve ser avaliada levando em consideração as características dos produtos armazenados, o coeficiente de permeabilidade do material utilizado na impermeabilização em relação ao produto armazenado, a profundidade do lençol freático, as distâncias das bacias de contenção dos pontos de exposição.

Ao estudar o comportamento de *Liners* sob a influência de um contaminante orgânico, Santos (2005) também obteve valores de permeabilidade maiores em amostras de Solo-Bentonita, quando percolados por óleo diesel.

Amorim Jr. (2007) realizou estudos para avaliar a eficiência de impermeabilização das bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos, e chegou a conclusão que em 52% das bacias avaliadas o coeficiente de permeabilidade para os produtos armazenados foi maior que o coeficiente determinado para água, evidenciando a influência do fluido na permeabilidade. Amorim Jr. (2007) também relata a necessidade de se estabelecer no Brasil uma legislação federal específica de impermeabilização das bacias de contenção de áreas de armazenamento de derivados de petróleo e etanol, bem como reformular os critérios de impermeabilização determinados na ABNT NBR 17505-2/2006, de forma que considere as especificidades de cada local. A referida norma passou por atualização em 2013, mas não foram alteradas as recomendações para bacias de contenção.

### **3.3.1. Permeabilidade Efetiva**

A facilidade com que um fluido se move em um meio poroso onde ocupa apenas parte dos vazios existentes, estando o resto ocupado por outros fluidos imiscíveis é chamada de permeabilidade efetiva ( $K_i$ ) [ $L^2$ ]. As permeabilidades efetivas aos fluidos dependem das saturações de cada um dos fluidos no meio poroso. Esta difere da permeabilidade intrínseca pelo fato desta última, ser definida para o caso de um único fluido intersticial. Contudo, quando mais um fluido ocupa os poros do solo, a presença de um fluido interferirá no escoamento dos demais fluidos presentes e vice-versa; sendo o escoamento influenciado pelo meio (permeabilidade intrínseca) e pela presença dos demais fluidos (permeabilidade relativa ( $K_r$ )) (MENDONÇA, 2003).

A *permeabilidade relativa* ( $K_r$ ) é definida com a razão entre permeabilidade efetiva ( $K_i$ ) e uma permeabilidade base, como a permeabilidade intrínseca ( $K$ ) no estado saturado com relação ao fluido de interesse (equação 3.13) (CARDOSO, 2011). A permeabilidade relativa é, portanto, uma grandeza adimensional que mede o quanto cada fase influencia no escoamento das demais fases presentes no meio (MENDONÇA, 2003).

A facilidade com que um fluido se move em um meio poroso onde ocupa apenas parte dos vazios existentes, estando o resto ocupado por outros fluidos imiscíveis é chamada de permeabilidade efetiva ( $K_i$ ) [ $L^2$ ]. As permeabilidades efetivas aos fluidos dependem das saturações de cada um dos fluidos no meio poroso. Esta difere da permeabilidade intrínseca pelo fato desta última, ser definida para o caso de um único fluido intersticial. Contudo, quando mais um fluido ocupa os poros do solo, a presença de um fluido interferirá no escoamento dos demais fluidos presentes e vice-versa; sendo o escoamento influenciado pelo meio (permeabilidade intrínseca) e pela presença dos demais fluidos (permeabilidade relativa ( $K_r$ )) (MENDONÇA, 2003).

A permeabilidade relativa ( $K_r$ ) é definida com a razão entre permeabilidade efetiva ( $K_i$ ) e uma permeabilidade base, como a permeabilidade intrínseca ( $K$ ) no estado saturado com relação ao fluido de interesse (equação 3.13) (CARDOSO, 2011). A permeabilidade relativa é, portanto, uma grandeza adimensional que mede o quanto cada fase influencia no escoamento das demais fases presentes no meio (MENDONÇA, 2003).

$$K_r = \frac{K_{i(S_r < 100)}}{K_{(S_r < 100)}} \quad [3.13]$$

Sendo,  $S_r$  o grau de saturação [ - ].

A determinação da permeabilidade efetiva é feita em laboratório e é normalmente apresentada em função da sucção matricial ou da umidade volumétrica. Para o caso de fluxo simultâneo de dois ou mais fluidos, os dados de permeabilidade efetiva são apresentados na forma de permeabilidade relativa. A equação 3.12 pode se particularizada para um fluido qualquer, fazendo-se referência ao seu coeficiente de permeabilidade saturado, obtendo-se a equação 3.14. O subscrito  $i$  das equações refere-se à fase ou fluido de interesse (CARDOSO, 2011).

$$k_{r i} = K_{r i} = \frac{k_{i(S_r < 100)}}{k_{sat i}} \quad [3.14]$$

A determinação da permeabilidade efetiva é de grande importância para o caso de vazamento de petróleo e seus derivados, onde podem ocorrer fluxos simultâneos de gás, água e óleo.

As curvas de permeabilidade relativa são obtidas em laboratório através de ensaios realizados sobre amostras do meio poroso. Segundo Mendonça (2003), tais curvas podem ser expressas por funções não-lineares da saturação da fase molhante ( $S_w$ ). O fluido molhante é aquele que adere preferencialmente à superfície da partícula de solo. Vários autores apresentam diferentes formas de modelar as curvas de permeabilidades relativas em função da saturação da fase molhante ( $S_w$ ). Mendonça (2003) apresenta um modelo bem simples para representar as permeabilidades relativas das fases molhantes e não-molhantes, respectivamente (Equação 3.15 e 3.16). Segundo o autor, estas equações são de uso muito comum em engenharia de petróleo

$$K_{rw} = S_w^2 \quad [3.15]$$

$$K_{rn} = (1 - S_w)^2 \quad [3.16]$$

Onde  $K_{rw}$  é a permeabilidade relativa da fase molhante [ - ],  $K_{rn}$  é a permeabilidade relativa da fase não-molhante [ - ].

### 3.3. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM CAMPO E EM LABORATÓRIO

Existem diversos ensaios e equipamentos para determinação da permeabilidade de solos em laboratório e em campo. Esses equipamentos são denominados de permeômetros. Os ensaios podem ser feitos com carga constante ou variável. Em ensaios com carga constante a amostra é submetida a uma diferença de energia constante durante o ensaio; e o coeficiente de permeabilidade é determinado pela quantidade de fluido que percola a amostra para um dado intervalo de tempo. Em ensaios com carga variável é utilizado a diferença entre as cargas em um determinado intervalo de tempo.

### 3.3.1. Ensaio em Laboratório

O controle das variáveis associado à praticidade e ao baixo custo dos ensaios de laboratório são vantagens destes ensaios para determinação da permeabilidade do solo. No entanto, cuidados especiais devem ser tomados para que os resultados possam ser extrapolados para casos reais, como a representatividade das amostras colhidas.

Nos ensaios de laboratório os permeômetros são classificados como de parede rígida ou de parede flexível.

Os permeômetros de parede rígida, em geral, apresentam como vantagens: (a) simplicidade de construção, operação e baixo custo; (b) amostras com dimensões maiores podem ser ensaiadas; (c) podem ser aplicadas as tensões verticais nulas se desejado. As principais desvantagens que estes permeômetro apresentam são: (a) problemas de fluxo lateral nas amostras; (b) não há controle da tensão horizontal; (c) não é possível confirmar o grau de saturação; (d) não é possível obter a saturação por contrapressão.

Já os permeômetros de parede flexível possuem como principal vantagem a possibilidade de simular melhor as condições esperadas em campo. Nesse permeômetro é possível medir/controlar as tensões que estão agindo no corpo de prova, o grau de saturação pode ser checado, e é possível monitorar as variações de volume. O quadro 3.1 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens dos permeômetros de parede rígida e flexível.

Para a determinação da permeabilidade nesses ensaios é medido o comprimento e a seção transversal do corpo de prova e a vazão e o gradiente hidráulico são medidos ou controlados. A permeabilidade é obtida admitindo-se que o fluxo é governado pela Lei de Darcy.

*Para os ensaios realizados com carga constante o coeficiente de permeabilidade é determinado pela quantidade de fluido que percola a amostra para um dado intervalo de tempo. A quantidade de água é medida por uma proveta graduada, determinando-se a vazão ( $Q$ ). O cálculo do coeficiente de permeabilidade é realizado quando uma condição de fluxo estacionário é atingida, ou seja, quando, sob um gradiente constante, a vazão de água pelo corpo*

de prova se torna constante. O coeficiente de permeabilidade é calculado pela equação 3.1, reescrita aqui como equação 3.17:

$$k = \frac{V \times L}{A \times \Delta h \times \Delta t} \quad [3.17]$$

Onde:

$V$  = volume de fluido percolado [ $L^3$ ];

$L$  = altura do corpo de prova [ $L$ ];

$A$  = área da seção transversal do corpo de prova [ $L^2$ ];

$\Delta h$  = diferença da carga hidráulica entre a entrada e saída do corpo de prova [ $L$ ];

$\Delta t$  = intervalo de tempo [ $T$ ].

**Quadro 3. 1:** Vantagens e desvantagens dos permeômetros de parede rígida e parede flexível

<b>Tipo de permeômetro</b>	<b>Principais vantagens</b>	<b>Principais desvantagens</b>
Parede rígida	<ul style="list-style-type: none"> <li>-simplicidade de construção e operação;</li> <li>-baixo custo;</li> <li>-grandes permeômetros podem ser construídos convenientemente;</li> <li>-vários tipos de materiais podem ser utilizados para a construção do equipamento;</li> <li>-expansão vertical irrestrita;</li> <li>-se desejado, uma tensão vertical nula pode ser conferida ao ensaio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-possíveis vazamentos laterais;</li> <li>-falta de controle das tensões horizontais;</li> <li>-se houver contração da amostra provavelmente ocorrerá vazamento lateral;</li> <li>-a saturação via contrapressão é deficiente;</li> <li>-tempos longos de ensaios para materiais de baixa permeabilidade.</li> </ul>
Parede flexível	<ul style="list-style-type: none"> <li>-saturação por contrapressão;</li> <li>-capacidade de controle das tensões envolvidas;</li> <li>-vazamento lateral improvável, mesmo para superfícies ásperas das amostras;</li> <li>-tempos menores de ensaio para materiais com baixa permeabilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-necessidade da aplicação de tensões triaxiais;</li> <li>-problema de compatibilidade química com certos líquidos;</li> <li>-operação mais complicada;</li> <li>-dificuldade em se realizar ensaios a baixas tensões compressivas.</li> </ul>

Fonte: Daniel,1994.

Em ensaios com carga variável é utilizada a variação do gradiente hidráulico em determinados intervalos de tempo. A permeabilidade para ensaios com carga variável é obtida com o uso da equação 3.18.

$$k = \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \times \ln \left( \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \right) \quad [3.18]$$

Onde:

$a$  = área da seção transversal da bureta [L<sup>2</sup>]

$L$  = altura do corpo de prova [L]

$A$  = área da seção transversal do corpo de prova [L<sup>2</sup>]

$\Delta h_1$  e  $\Delta h_2$  = diferenças de carga hidráulica nos tempos 1 e 2 [L]

$\Delta t$  = intervalo de tempo [T]

Como um dos fatores que influenciam a permeabilidade é a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e esta depende da temperatura, os valores de permeabilidade são, geralmente, referidos a temperatura de 20°C, com isso os valores de permeabilidade obtidos devem ser corrigidos pela seguinte relação:

$$k_{20^\circ} = k_T \times \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ}} = k_T \times C_v \quad [3.19]$$

Sendo, os subscritos 20° e T a temperatura de referência e a temperatura do ensaio, respectivamente; e  $C_v$  a relação entre as viscosidades.

### 3.3.2 *Ensaio em Campo*

Existem muitos ensaios para a determinação da permeabilidade em campo. A Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE (2013) afirma que na prática os ensaios estão associados ao método de prospecção empregado (sondagens a trado e a percussão, poços rasos e trincheiras). Do ponto de vista hidrogeotécnico, tais ensaios podem ser classificados conforme a maneira de realização (ensaio a nível constante e a nível variável) e o diferencial de pressão aplicado ao aquífero, positivo (carga) ou negativo (descarga). Nas

porções não saturadas dos solos os ensaios realizados admitem, obviamente, apenas a realização por injeção de líquido (ensaios de carga). A seguir é apresentada uma breve descrição sobre alguns destes ensaios.

**Método de Hvorslev:** Para utilização deste método são usados piezômetros instalados até a profundidade ensaiada. Este ensaio pode ser realizado através de adição ou remoção de água do piezômetro. A variação do nível d'água em determinado intervalo de tempo é registrada até que se atinja o estado de equilíbrio. Com a vazão de infiltração é possível determinar a permeabilidade com a utilização equação 3.20.

$$k = \frac{r^2 \times \ln(L_e/R)}{2 \times L_e \times T_L} \quad [3.20]$$

Onde:

k = Permeabilidade do solo [L.T<sup>-1</sup>]

r = raio interno do revestimento do poço [L];

L<sub>e</sub> = comprimento da seção filtrante [L];

T<sub>L</sub> = tempo que leva para o nível da água cair a 37% da posição inicial [T];

R = raio da perfuração [L].

A equação 3.20 é uma das muitas fórmulas apresentadas por Hvorslev (1951) para condições de geometria, piezômetros e aquíferos diferentes. Esta equação é a mais conhecida, pois, pode ser aplicada para a maioria dos modelos piezométricos. Este método apresenta como uma das restrições e/ou limitações, o comprimento do poço, que deve ser maior do que oito vezes o seu raio interno.

**Infiltrômetro de anel concêntrico:** Neste ensaio são utilizados dois cilindros dispostos de forma concêntrica, que são cravados alguns centímetros no solo pra impedir a dispersão lateral do fluido. O cilindro externo é preenchido com o líquido percolante até a estabilização do nível, Posteriormente, preenche-se o cilindro interno e, inicia o ensaio com a obtenção da medida



entre a lâmina d'água e o topo deste cilindro. Determina-se, em intervalos de tempo progressivamente maiores a vazão necessária para manter o nível de lâmina do percolante. A permeabilidade é obtida com o auxílio da equação 3.21, após a obtenção de condições estacionárias de fluxo.

$$k = U \times \frac{I}{\Delta t} \times \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad [3.21]$$

Onde:

I = Profundidade de cravação do cilindro [L];

$h_1$  = nível da água no início da medição [L];

$h_2$  = nível da água após o intervalo de tempo  $\Delta t$  [L];

$\Delta t$  = tempo decorrido para infiltração [T];

U = Fator de conversão de unidades, passar mm/min para m/s, expresso como 1/160000.

**Open end hole:** Esta técnica consiste em fazer furos utilizando-se trados, sendo colocado, em cada furo tubos de PVC com diâmetros adequados para revestir o furo e comprimentos variando conforme as profundidades. Os tubos devem ser cravados no solo para evitar a dispersão lateral do líquido ensaiado. O resultado do valor da permeabilidade utilizando carga variável é obtido pela aplicação da seguinte equação:

$$k = 2,303 \times \left( \frac{R}{4} \times \Delta t \right) \times \left[ \log \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \right] \quad [3.22]$$

Onde:

k = Permeabilidade do solo [L.T<sup>-1</sup>]

$h_1$  = nível da água no início da medição [L];

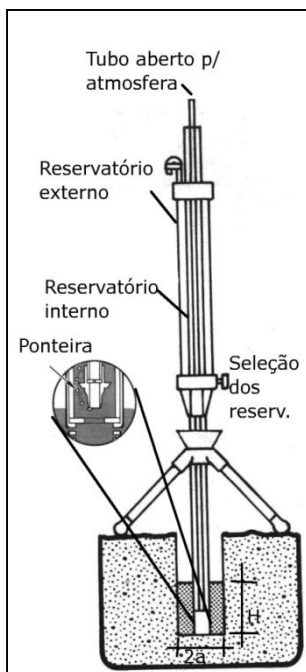
$h_2$  = nível da água após o intervalo de tempo  $\Delta t$  [L];

$\Delta t$  = tempo decorrido para infiltração [T];

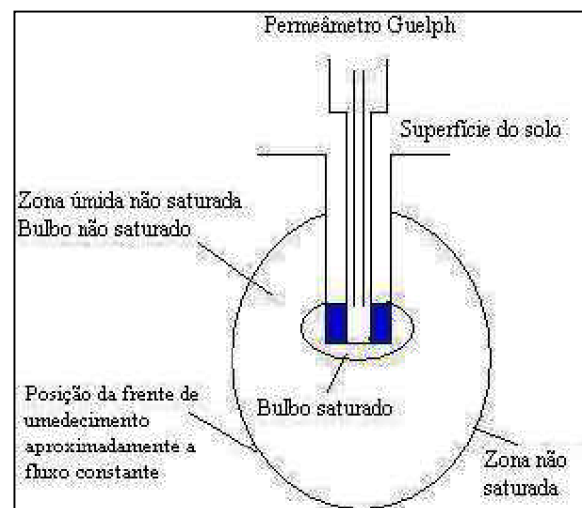
R = raio interno do tubo [L].

Fiori (2010), ao avaliar as metodologias de obtenção dos dados em campo, para ampliar a confiabilidade dos valores de permeabilidade obtidos nos ensaios *in situ*, concluiu que o infiltrômetro de anel obtém valores elevados de permeabilidade em função da biopertubação causada por insetos, anelídeos e raízes; e ainda devido a própria metodologia, que requer a constância de uma coluna de água sobre a área em que o ensaio é desenvolvido, o que pode levar à obtenção de valores elevados. Segundo a pesquisadora o método *Open end Hole* é adequado para determinação da condutividade em profundidade na zona não saturada. A mesma recomenda que para ampliar a acurácia na determinação deve-se causar a mínima deformação do material no fundo do furo de trado e durante a cravação do tubo de revestimento.

**Permeâmetro Guelph:** É um permeâmetro de campo a carga constante que mede a permeabilidade saturada do solo. É composto de uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante de líquido dentro do furo, um tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares (Figura 3.3). Após algum tempo, uma pequena área em torno do furo estará saturada, tornando o fluxo constante. Este valor de fluxo é utilizado no cálculo da permeabilidade (Figura 3.4).



**Figura 3. 3:**Esquema ilustrativo do permeâmetro Guelph.



**Figura 3. 4:** Bulbo de saturação e não saturação durante o ensaio.

A recarga de água no furo está submetida a três tipos de fluxo: um de pressão radial ao longo das paredes e dois verticais na base, um de pressão e outro gravitacional. O permeâmetro Guelph permite ainda, que sejam mensurados simultaneamente, a permeabilidade e o potencial matricial de fluxo ( $\phi_m$ ) (REYNOLDS E ELRICK, 1985).

A obtenção da permeabilidade pode ser feita utilizando o ensaio com apenas uma altura de carga no permeâmetro e/ou ensaios com diferentes alturas de carga. Para ensaios com apenas uma altura de carga (método simplificado) é utilizado o método teórico desenvolvido por Reynolds e Elrick (1985) o qual está baseado na equação de Richards (1931), aperfeiçoada por Elrick *et al* (1989). A vazão ( $Q$ ) é determinada pela Equação 3.23.

$$Q = A \times R \quad [3.23]$$

Onde:

$Q$  = é a vazão do regime permanente [ $L^3T^{-1}$ ];

$R$  = é a taxa de decaimento do nível de água no reservatório;

$A$  = é a área do reservatório do Permeâmetro utilizado [ $L^2$ ];

A permeabilidade ( $k$ ) é determinada pela equação 3.24; e o potencial de fluxo ( $\phi_m$ ) que corresponde ao fluxo devido ao potencial matricial do solo [ $L^2T^{-1}$ ] é obtido pela equação 3.25.

$$k = \frac{CQ}{\left(2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \frac{H}{\alpha}\right)} \quad [3.24]$$

$$\phi_m = \frac{CQ}{\left[\left((2\pi H^2 + \pi a^2 C) \times \alpha\right) + 2\pi H\right]} \quad [3.25]$$

Onde:

$H$  = é a altura da carga hidráulica [ $L$ ];

$a$  = é o raio do orifício aberto pelo trado no solo [ $L$ ];

$\alpha$  = é estimado inicialmente por avaliação visual *in situ* da macroporosidade (fissuras, formigueiros, furos de raízes, etc) e textura do solo, Quadro 3.2.

C = Fator de forma, pode ser obtido em função do tipo de solo ensaiado e da relação (H/a), através do uso da Figura 3.5.

A principal dificuldade neste método de ensaio é a escolha do valor de  $\alpha$  adequado, pois ele tem um valor diferente dependendo do meio poroso se encontrar num processo de infiltração ou drenagem (HILLEL *et al.*, 1972 *apud* LISBOA, 2006). O quadro 3.2 mostra valores do parâmetro  $\alpha$  sugerido por Elrick *et al.* (1989), em função do tipo e característica dos solos.

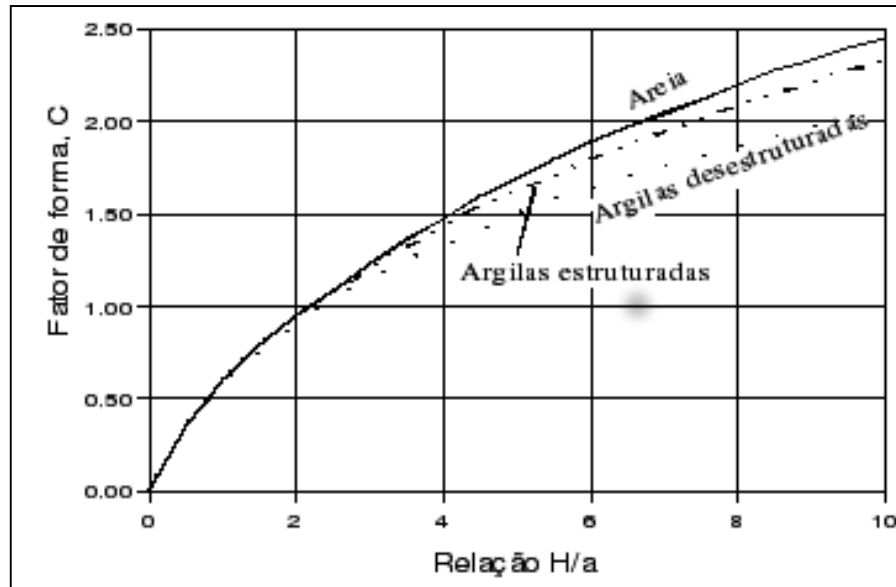


Figura 3. 5:Variação do fator de forma C, em função do tipo de solo e da relação H/a.

Quadro 3. 2: Parâmetro  $\alpha$  sugerido por Elrick *et al.* (1989)

$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	Tipo de Solo
0,01	Argilas compactadas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras
0,12	Argilas até areias finas com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras
0,36	Areia grossa inclui solos com macroporos e fissuras

Para a determinação da permeabilidade utilizando-se duas cargas hidráulicas distintas (método rigoroso), de acordo com Reynolds e Elrick (1985), são utilizadas as equações 3.26 e 3.27; para permeabilidade e potencial matricial de fluxo, respectivamente. Os subscritos 1 e 2 indicam as duas cargas hidráulicas empregadas para a realização dos ensaios.

$$k = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad [3.26]$$

$$\phi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2 \quad [3.27]$$

Onde:

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_1 C_2))} \quad [3.28]$$

$$G_1 = G_2 \frac{H_1 C_2}{H_1 C_2} \quad [3.29]$$

$$J_1 = \frac{((2H_2)^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi(2H_1 H_2 (H_1 - H_2) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad [3.30]$$

$$J_2 = J_2 \frac{((2H_1)^2 + a^2 C_1) C_2}{((2H_2)^2 + a^2 C_2) C_1} \quad [3.31]$$

O parâmetro  $\alpha$  neste método é determinado através da equação 3.32.

$$\alpha = \frac{k}{\phi_m} \quad [3.32]$$

O uso do método rigoroso por vezes conduz a obtenção de valores negativos de  $k$  e  $\phi_m$ . Segundo Reynolds e Elrick (1985) vários fatores podem influenciar para obtenção de valores negativos, como erros de medição por não se ter atingido o regime permanente; heterogeneidade das propriedades hídricas do solo; erros nas medições de  $Q_1$  e  $Q_2$ , por causa da presença de bolhas de ar; ar preso no solo; e a variação espacial, por perturbação das características do solo, ocasionando condições de medição diferentes. Quando o uso do método rigoroso resulta em valores negativos, é utilizado o método simplificado (uma única carga), assim, o valor da permeabilidade é obtido empregado a média dos valores obtidos para ambas as cargas.

Aguiar (2001) ao estudar a viabilidade e eficiência do uso do Permeâmetro de Guelph na medição da permeabilidade de coberturas de aterros e outros meios porosos heterogêneos relacionados a resíduos sólidos; obteve valores negativos de permeabilidade ao utilizar o método rigoroso (duas cargas) para a cobertura de aterro sanitário, um material argiloso e compactado. Segundo a pesquisadora, os valores negativos podem ter sido influenciados pela heterogeneidade ou serem consequência de vazios encontrados no solo, provenientes de uma compactação mal feita. Nos pontos onde havia vegetação plantada, estes vazios também podem ter sido criados pelas raízes das árvores.

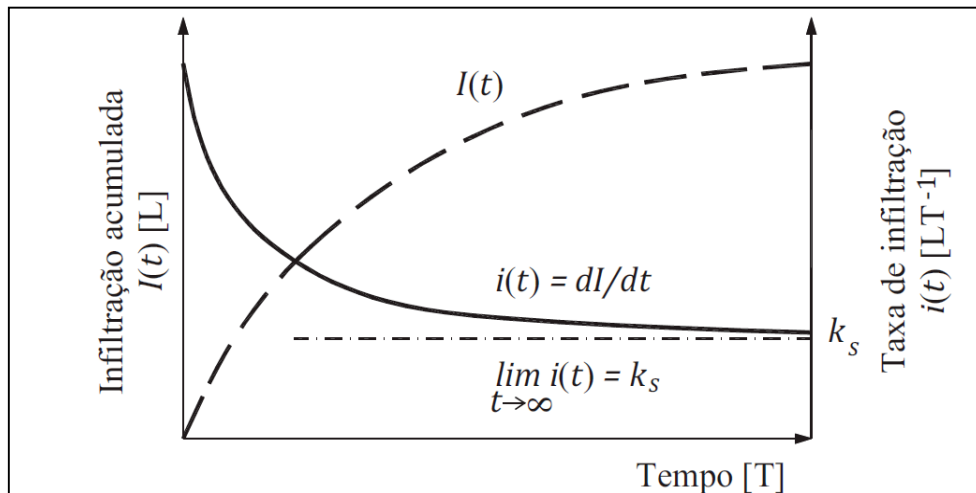
Para Soto *et al.* (2009) o método rigoroso é importante para a determinação da permeabilidade e do potencial matricial de fluxo, desde que se leve em conta suas limitações teóricas e experimentais. Estes pesquisadores recomendam que sejam realizados um número adequado de ensaios, a fim de obter resultados mais representativos, sendo sugerido acima de 30 ensaios.

### **3.4. INFILTRAÇÃO NO SOLO**

A infiltração é definida como a entrada de água no solo através de sua superfície, isto é, a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera (LIBARDI, 2000). A modelagem desse processo é de grande importância prática para várias áreas de pesquisa como agronomia, engenharia civil, hidrologia e as ciências ambientais em geral. A taxa de infiltração, por exemplo, fornece importantes subsídios para o dimensionamento de reservatórios, estruturas de controle de erosão e de inundações, canais e sistema de irrigação, drenagem e bacias de contenção.

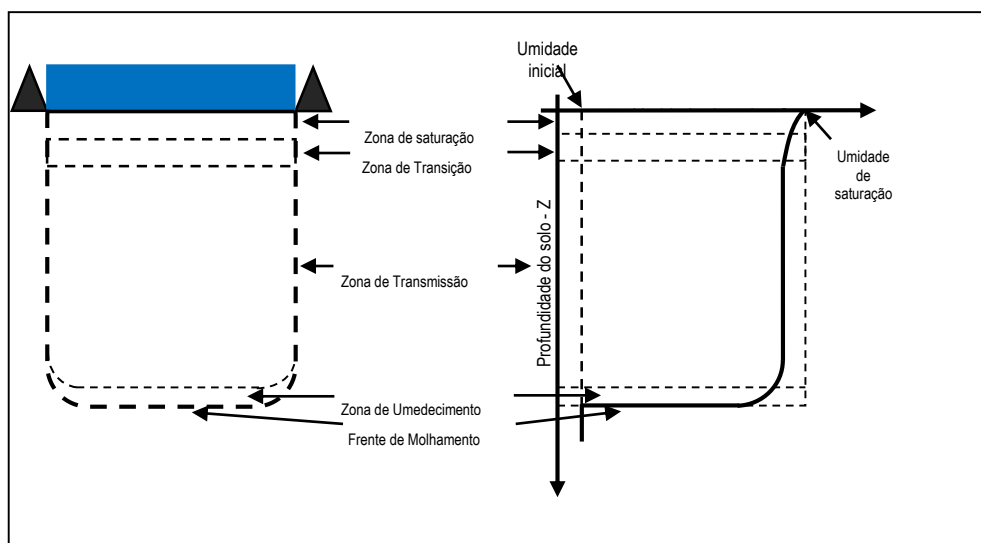
A infiltração é representada por duas variáveis: taxa de infiltração e infiltração acumulada. A taxa de infiltração ( $i$ ) é a quantidade de água que penetra no solo ao longo do tempo, expresso em  $[LT^{-1}]$ . A máxima taxa de infiltração que um solo pode ter é definida como sua capacidade de infiltração (COLLISCHONN E DORNELLES, 2013). A taxa de infiltração tende a decrescer com o tempo, atingindo um valor constante (LIBARDI, 2000), este valor constante, segundo alguns autores como Reichardt (1990 *apud* Lima, 2009), é numericamente igual à permeabilidade saturada do solo, ou seja, o limite da curva de taxa de infiltração para o

tempo tendendo ao infinito é igual à permeabilidade do solo saturado. A infiltração acumulada ( $I$ ) corresponde ao volume, por unidade de área, de água infiltrada ao longo do tempo, é expressa em [L]. A figura 3.6 mostra, de forma generalizada, o comportamento destas duas variáveis.



**Figura 3. 6:** Curvas de infiltração de água

A capacidade de infiltração de água no solo varia de acordo com a umidade do solo. Em solos secos a capacidade de infiltração é, normalmente, bastante alta. Na medida em que o solo vai ficando úmido, no entanto, a capacidade de infiltração diminui (COLLISCHONN E DORNELLES, 2013). O perfil de umidade típica durante o processo de infiltração de um solo uniforme foi apresentado por Bodman e Coleman em 1944 (*apud* LIBARDI, 2000), como é mostrado na figura 3.7.



**Figura 3. 7:** Perfil de umidade típico de um solo uniforme em processo de infiltração de acordo com Bodman e Coleman (1944)

A zona de saturação é formada no estágio inicial da infiltração, onde se presume que o solo está saturado. A zona de transição caracteriza-se pelo rápido decréscimo de umidade. A zona de transmissão é uma porção de perfil através da qual a água é transmitida com variação muito pequena na umidade. A zona de umedecimento é uma região de variação relativamente rápida de umidade. E a frente de molhamento compreende uma pequena região na qual o gradiente de umidade sofre uma variação bastante abrupta que representa o limite visível da penetração da água (LIBARDI, 2000; KLAR, 1984).

A capacidade de infiltração pode ser medida, e pode ser representada matematicamente utilizando modelos de infiltração. Alguns equipamentos, como os infiltrômetro de anéis concêntricos e o permeâmetro Guelph podem ser usados para medir a capacidade de infiltração, estes equipamentos já foram descritos na seção 3.6.2.

As formulações proposta para descrição da infiltração no solo são empíricas ou teóricas. Segundo Brandão (2003) os modelos empíricos têm a vantagem de permitir os ajustes do modelo, relacionar seus parâmetros a características do solo, e englobar na determinação de suas constantes alguns fatores que são de difícil consideração nos modelos teóricos como, por exemplo, a heterogeneidade do solo. A principal desvantagem do emprego de equações empíricas é que as equações ajustadas somente são válidas para as condições em que elas foram determinadas, ou seja, não podem ser adotadas para outros tipos de solos. Dentre os modelos empíricos pode-se citar os de Kostikov e Horton. Já os modelos teóricos são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrito pela equação de Darcy ou pela equação de Richards. Os modelos teóricos mais usados estão Green e Ampt, e Philip.

#### ***3.4.1 Modelo de Infiltração de Kostikov***

Kostikov (1932, *apud* LIBARDI, 2000) desenvolveu uma equação totalmente empírica, da seguinte forma:

$$i = i_i \times t^{-a} \quad [3.33]$$



Em que:

$i_i$  = é a taxa de infiltração inicial ( $t = 0$ ) [ $LT^{-1}$ ];

$a$  = é uma constante [ - ].

A determinação de  $i_i$  e  $a$  são obtidos empiricamente a partir da observação de valores de dois pares de  $i$  e  $t$ .

A partir da Equação [3.33] chega-se à infiltração acumulada  $I$  até um dado instante  $t$ :

$$I = i_i \frac{t^{(1-a)}}{1-a} \quad [3.34]$$

Como desvantagem desta equação é apontado o fato de que  $i$  tende para zero quando  $t$  tende para o infinito, o que não é verdade quando  $t \rightarrow \infty$ ,  $i$  deve ser igual a um valor constante  $k_0$  (LIBARDI, 2000). No entanto, é possível calcular quando esta taxa final constante deve ser atingida num tempo  $T$  dado pela substituição de  $i$  por  $k_s$  na equação [3.33] e explicitando o  $T$ , obtém-se a equação [3.35].

$$T = \left( \frac{i_i}{k_s} \right)^{1/a} \quad [3.35]$$

Esta condição só é válida para os tempos  $t$  menores que  $T$  ( $t < T$ ). Ou seja, é válida apenas nos estágios iniciais de infiltração.

Segundo Libardi (2000) a equação de Kostiakov (equação 3.33), embora empírica e de aplicabilidade limitada, é útil em aplicações de irrigação, devido à sua simplicidade e ao fato de que, para curtos intervalos de tempo, ajusta-se razoavelmente bem para uma grande quantidade de solos.

### ***3.4.2 Modelo de Infiltração de Horton***

Como já mencionado, este modelo de infiltração de Horton é uma equação empírica que descreve o comportamento da capacidade de infiltração decrescente, isto é, a taxa de infiltração  $i$  pode ser representada em função do tempo de infiltração  $t$ .

$$i = i_f + (i_i - i_f)e^{-ct} \quad [3.36]$$

Em que:

$i_f$  = é a taxa de infiltração para um tempo infinito ( $t \rightarrow \infty$ ) [ $LT^{-1}$ ];

$i_i$  = é a taxa de infiltração inicial ( $t = 0$ ) [ $LT^{-1}$ ];

$C$  = é uma constante de ajuste da equação [ $T^{-1}$ ].

Libardi (2000) afirma que a determinação dos três parâmetros ( $i_i$ ,  $i_f$  e  $C$ ) que aparecem nesta equação, pode ser feita pelo melhor ajuste estatístico dos dados experimentais (valores de  $i$  e  $t$ ).

Segundo Collischonn e Dornelles (2013) a equação é uma função exponencial assintótica ao valor  $i_f$ . Em solos argilosos o valor de  $i_f$  é mais baixo, o que resulta em uma capacidade de infiltração menor para chuvas de duração mais longa

Na formulação de Horton o limite de  $i$ , quando  $t$  tende ao infinito é diferente de zero, sendo este ponto apontado como vantagem. As desvantagens são apontados a necessidade da determinação de três parâmetros, e o fato da equação ser incapaz de representar adequadamente a diminuição muito rápida de  $i$  com a variação dos pequenos valores de  $t$  (PHILIP, 1957 *apud* PEIXOTO, 2011).

Segundo Libardi (2000) a aplicabilidade da equação de Horton é muito variada, pois, não se baseia em nenhuma teoria física adequada, apenas na intuição.

### **3.4.3 Modelo de Infiltração de Green e Ampt**

O modelo de infiltração de Green e Ampt descreve o processo de avanço da frente de molhamento ao longo do tempo. Neste modelo a frente úmida é bem definida, que assume modelo tipo pistão. Esta equação é baseada na lei de Darcy, a taxa de infiltração é obtida pela equação 3.37.

$$i = k_s \left( 1 + \frac{|\psi_f|}{L} \right) \quad [3.37]$$

Em que:

$k_s$  = é a permeabilidade do solo saturado [ $LT^{-1}$ ];

$\psi_f$  = é o potencial matricial imediatamente abaixo da frente de umedecimento [L];

$L$  = é a profundidade da frente de umedecimento [L].

A infiltração acumulada é dada por:

$$I = L(\theta_s - \theta_i) \quad [3.38]$$

Em que,  $\theta_s$  é umidade do solo na saturação [ $L^3L^{-3}$ ] e  $\theta_i$  umidade inicial do solo [ $L^3L^{-3}$ ].

Souza (2012) aponta como vantagem para o modelo de Green e Ampt a sua simplicidade, uma vez que os parâmetros exigido são de fácil obtenção, e o satisfatório desempenho para uma grande variedade de problemas, sendo bastante usado em física dos solos e hidrologia. Como uma desvantagem da utilização do modelo Cecílio *et al* (2003) apontam o fato de que os parâmetros de entrada não representam fielmente as condições reais de ocorrência da infiltração, por exemplo o modelo pressupõe que a existência de uma carga hidráulica constante na superfície do solo, o perfil do solo homogêneo e com profundidade infinita.

#### **3.4.4 Modelo de Infiltração de Philip**

Neste modelo suas constantes possuem um significado físico. É uma equação deduzida a partir da equação do perfil de umidade. A infiltração acumulada é obtida pela equação 3.39.

$$I(t) = S_p t^{1/2} + At \quad [3.39]$$

Onde  $S_p$  é a sorptividade [ $LT^{-1/2}$ ] e  $A$  é uma constante [ $LT^{-1}$ ].

A sorptividade indica a capacidade de um solo homogêneo absorver água em relação a sua umidade inicial. E a constante  $A$  está relacionada com a contribuição da gravidade para o movimento da água (LIBARDI, 2000). Souza (2012) evidencia que a sorptividade pode ser definida de diferentes formas por depender da difusividade no meio poroso. A seguir é apresentado a equação 3.40, que é usada para obtenção do parâmetro  $S_p$ .

$$S_p^2 = 2k_{sat}(\theta_s - \theta_i)(h_p - h_f) \quad [3.40]$$

Sendo que,  $h_p$  é a carga líquida aplicada no solo em [L];  $h_f$  é a sucção da frente úmida em [L];  $\theta_s$  é a umidade volumétrica saturada[-] e  $\theta_i$  é a umidade volumétrica inicial[-].

Segundo Souza (2012) Philip (1987) propôs, para o parâmetro  $A$ , a relação  $A = \delta k_{sat}$ , onde o  $\delta$  é um parâmetro que depende da umidade volumétrica inicial ( $\theta_i$ ), da relação  $k_i/k_{sat}$ , e da difusividade. A partir de uma série de combinações ficou constatado que o  $\delta$  se encontra na faixa de [0 à 2/3] para solos com  $k_i/k_{sat}$ , extremamente pequeno. Para areia seca Souza (2012) usou o valor 2/3. Philip (1967 *apud* Souza, 2012), recomenda  $\delta = 0,363$  para argilas, arenoso, areno argilosos.

### 3.5. ASPECTOS NORMATIVOS

No Brasil, os elementos normativos sobre impermeabilização das bacias de contenção de áreas de armazenamento de combustíveis são compostos pelo conjunto de normas NBR 17505/2013 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT; pela N-1763, uma norma interna da Petrobras e no Estado da Bahia pelo Decreto Estadual n.º 11.235/2008, que estabelece no 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* (BAHIA, 2008).

A NBR 17505/2013 se apresenta como a principal referência usada na construção e operação de tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis, definindo os critérios de construção e impermeabilização de bacias de contenção em áreas de armazenamento de líquidos

inflamáveis. A referida norma tem como objetivo fixar os requisitos exigíveis para os projetos de instalações de armazenamento, manuseio e uso de líquidos inflamáveis e combustíveis contidos em tanques estacionários ou recipientes. Dentre esse conjunto de normas, a NBR 17505-2 apresenta os critérios construtivos dos diques e bacias de contenção para o controle de derramamentos de tanques de superfície.

Segundo a NBR 17505/2013, no que se refere às bacias de contenção de possíveis vazamentos, estas devem ter capacidade volumétrica no mínimo igual à capacidade do maior tanque armazenado; e ainda uma borda livre mínima de 0,2 m para comportar precipitações de chuva ou água de combate a incêndio. Em relação à impermeabilização, as bacias de contenção devem ter permeabilidade máxima nas paredes e nos pisos das bacias de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s referente à água a 20° C. Para o caso de líquidos estáveis e no caso das bacias de contenção possuírem canaletas de drenagem em concreto armado com área de escoamento mínima de 900 cm<sup>2</sup> em torno dos tanques é admitida a permeabilidade máxima de  $1 \times 10^{-4}$  cm/s, referenciada à água a 20° C.

A NBR 17505-2 recomenda que as bacias de contenção podem ser feitas de terra, aço ou alvenaria sólida desde que sejam projetadas para serem estanques e para resistirem a coluna hidrostática total. É importante ressaltar que os valores de permeabilidade do solo das bacias de contenção não fazem referência aos líquidos estocados nos tanques de armazenamento.

Amorim Jr (2007) avaliou os critérios estabelecidos na NBR 17505-2/2006 (os mesmo da versão atualizada em 2013, para fins de interesse deste projeto), relacionados à impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos inflamáveis e combustíveis; e concluiu que as bacias de contenção feitas com solo argilosos não oferecem proteção efetiva ao subsolo e as águas subterrâneas devido às diferenças na interação entre a água e os líquidos inflamáveis e combustíveis derivados de petróleo com as partículas sólidas do solo.

A NBR 17505 foi revisada em 2013, e apesar das barreiras argilosas não apresentarem estanqueidade efetiva aos líquidos orgânicos, a referida norma não alterou as recomendações para a construção de bacias de contenção de líquidos inflamáveis e combustíveis feitas com solo, sendo determinada a permeabilidade máxima referente à água, sem considerar as características do líquido armazenado.

Nos Estados Unidos os elementos normativos têm como principal referência para a impermeabilização de bacias de contenção o Registro Federal 40 CFR Parte 112 da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), intitulada *Oil Pollution Prevention* atualizado em 2013. Estabelece no parágrafo 112.7 que as bacias de contenção, diques e bermas devem ser *suficientemente impermeáveis* para conter os derramamentos dos compostos armazenados nos tanques, sem especificar um coeficiente de permeabilidade máximo (EPA, 2013).

Além dessa Norma, a EPA possui um guia de orientação para procedimentos de controle e prevenção e resposta da poluição por derramamentos de óleo em áreas de armazenamento de combustíveis. O *SPCC Guidance for Regional Inspectors* (EPA, 2013) explica que o sistema de contenção de eventuais vazamentos deve ser eficaz, ou seja, capaz de conter o líquido derramado até que seja feita sua limpeza. E que o termo *suficientemente impermeável* do Registro Federal 40 CFR Parte 112 não significa necessariamente indefinidamente impermeável, mas uma flexibilidade para determinar a melhor forma de projetar o sistema de contenção para evitar qualquer descarga. Esta determinação leva em consideração uma avaliação das propriedades do produto e condições específicas do local. Sendo assim, estruturas de contenção secundárias, tais como diques, bermas e muros de contenção podem ser consideradas suficientemente impermeável, enquanto elas permitem a limpeza do local sem prejuízo ao ambiente. Em última análise, a determinação da permeabilidade deve ser verificada e documentada no Plano de SPCC.

Na Inglaterra, o *Department for Environment, Food and Rural Affairs* possui uma regulamentação para contenção secundária em locais de armazenamento de óleos: *Guidance note for the Control of Pollution (Oil Storage) (England) Regulations 2001*. Esta regulamentação ressalva que *sua base e paredes devem ser impermeáveis à água e ao óleo*, sem especificar o material com o qual a contenção secundária deve ser construída (DEFRA, 2001).

Em Alberta no Canadá, uma província com grande produção de petróleo e gás natural, a *Directive 055: Storage Requirements for the Upstream Petroleum Industry* especifica os critérios para construção de bacias de contenção, podendo estas, serem com material natural ou sintético. Para bacias de contenção com material natural, a resolução especifica o tipo de solo a ser usado como solo argiloso compactado com um coeficiente de permeabilidade menor ou igual a  $1 \times 10^{-6}$  cm/s quando determinado *in situ* ou menor ou igual a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s quando for determinado em laboratório. A espessura da camada de solo deve ser no mínimo 0,9 m e o nível da água subterrânea deve estar abaixo de 1,0 m a partir do fundo. Esta resolução ainda traz

especificações de construção da bacia de contenção, bem como os fatores, indicados pela literatura, como os mais importantes na obtenção de baixa permeabilidade em revestimentos de solo compactado (AER, 2001). Assim como a norma brasileira, esta resolução usa a água como líquido de referência, e não leva em consideração a interação do fluido-solo.

#### **4. PROPOSTA DE FAIXA GRANULOMÉTRICA ÓTIMA PARA A CONTENÇÃO DE LÍQUIDOS ORGÂNICOS**

As pesquisas de Machado (2011) sobre permeabilidade de líquidos orgânicos em solos compactados teve como um dos resultados, uma proposição de faixas granulométricas de solo com potencial de uso para barreiras de contenção de hidrocarbonetos. Mais detalhes sobre a pesquisa podem ser encontrados em: Machado (2011).

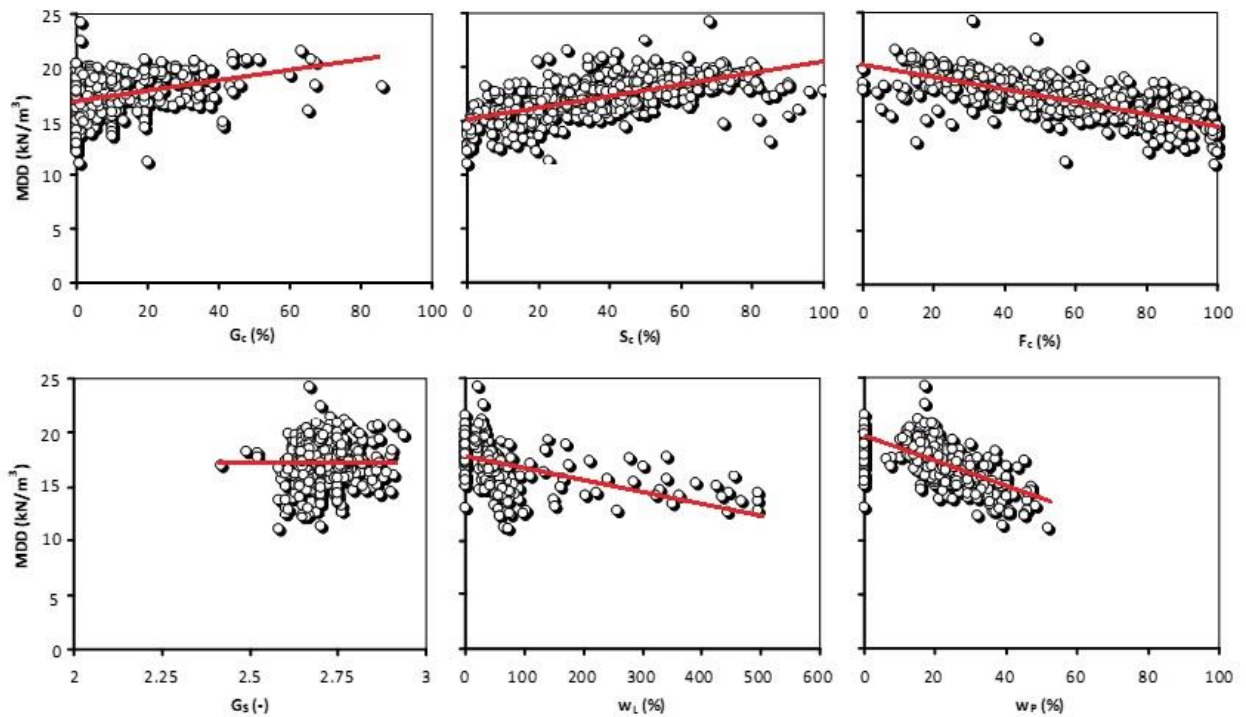
O autor dividiu a pesquisa em três etapas; inicialmente buscou-se estudar a influência das propriedades índices, como granulometria e limites de Atterberg, na curva de compactação. Na segunda etapa buscou-se estudar a influência dos parâmetros de compactação e ambientais na permeabilidade dos solos. Na terceira etapa se estudou a influência das propriedades índices, como granulometria e limites de Atterberg, na permeabilidade dos solos.

Na primeira etapa da pesquisa, o estudo para identificar as influências das propriedades índices na curva de compactação foi compilado um banco de dados contendo informações de 728 solos; e 227, destes, (31% do total) provenientes de ensaios de compactação e caracterização geotécnicas executadas pelo GEOAMB com solos coletados na região Metropolitana de Salvador. O restante dos dados foi compilado da literatura técnica. Os dados usados são de diferentes tipos de solos e sob diferentes energias de compactação.

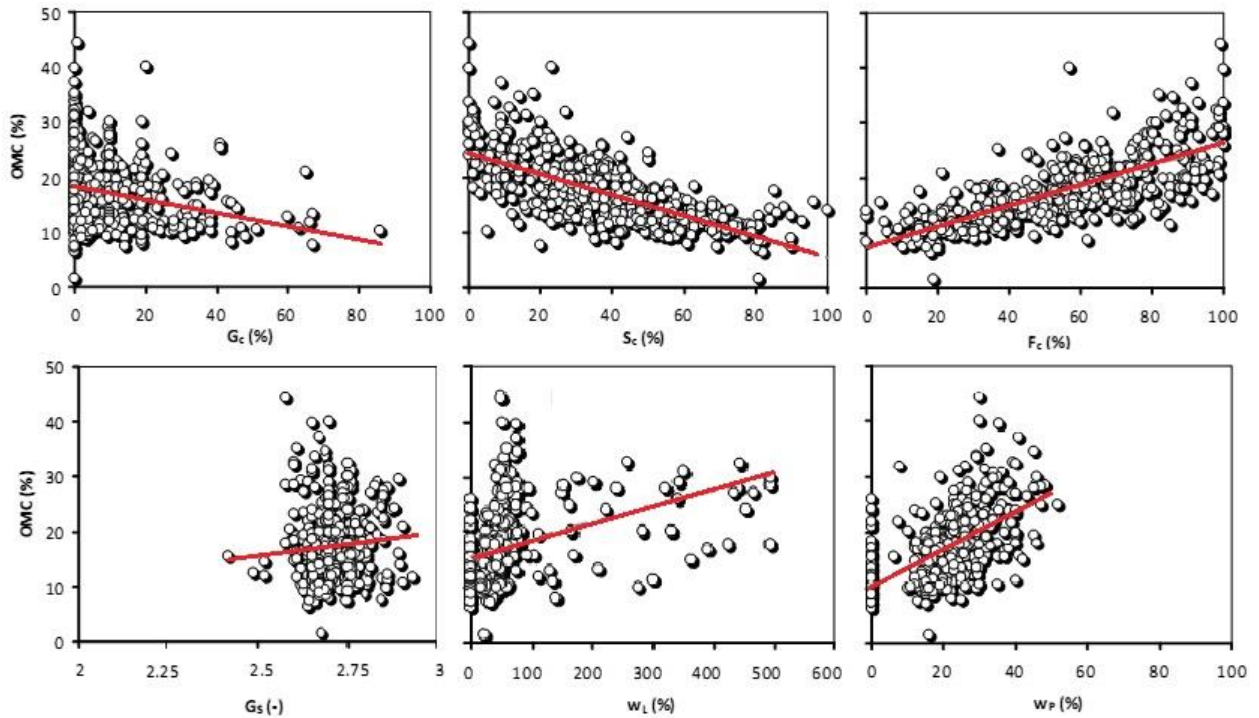
Para identificar as propriedades índices que influenciam a curva de compactação foram usados dois métodos de modelagem, sendo Regressão Linear Múltipla (MLR) e Redes Neurais Artificiais (ANN). O método MLR assume que uma variável dependente é uma função linear de vários parâmetros independentes. O método ANN é uma ferramenta muito poderosa de interpolação para vincular variáveis dependentes a uma série de variáveis independentes, principalmente onde é difícil de estabelecer equações numéricas ou modelos entre elas. Foram avaliados como alguns parâmetros influenciam para se obter a massa específica seca do solo é máxima (MDD – Maximum Dry Density) e o teor de umidade ótima (OMC- Optimum Moisture Content) para produzir tal efeito na estrutura do solo. Os parâmetros usados em ambos os métodos foram: % de pedregulho ( $G_c$ ), % de areia ( $S_c$ ), teor de finos ( $F_c$ ) ( $<0,075\text{mm}$ ), densidade dos grãos ( $G_s$ ), limite liquidez ( $W_L$ ), limite de plasticidade ( $W_P$ ), energia de compactação ( $E$ ) e índice do tipo de Solo (STI); o índice de plasticidade do solo (IP) foi usado apenas no método MLR.



As variáveis apontadas como mais importantes foram o  $F_c$ ,  $S_c$  e  $W_P$ ; o  $G_s$  parece ter um efeito secundário sobre os valores do OMC e MDD. Como resultado da primeira etapa da pesquisa o autor concluiu que os valores do teor de Umidade ótima e da massa específica seca máxima são claramente dependente um do outro, apresentando um baixo nível de dispersão. Considerando apenas a energia do Proctor normal, solos mais grossos apresentam maior massa específica seca e menor teor de umidade. Tais resultados podem ser observados nas figuras 4.1 e 4.2.



**Figura 4. 1:** Variação da massa específica do solo seca máxima versus a)  $G_c\%$ , b)  $S_c\%$ , c)  $F_c\%$ , d)  $G_s\%$ , e)  $W_L\%$  e f)  $W_P\%$ . Para a energia de compactação Proctor Normal. Fonte: Machado, 2011.



**Figura 4. 2:**Variação do Teor de Umidade Ótima versus a)  $G_c\%$ , b)  $S_c\%$ , c)  $F_c\%$ , d)  $G_s\%$ , e)  $w_L\%$  e f)  $w_P\%$ . Para a energia de compactação Proctor Normal. Fonte: Machado, 2011.

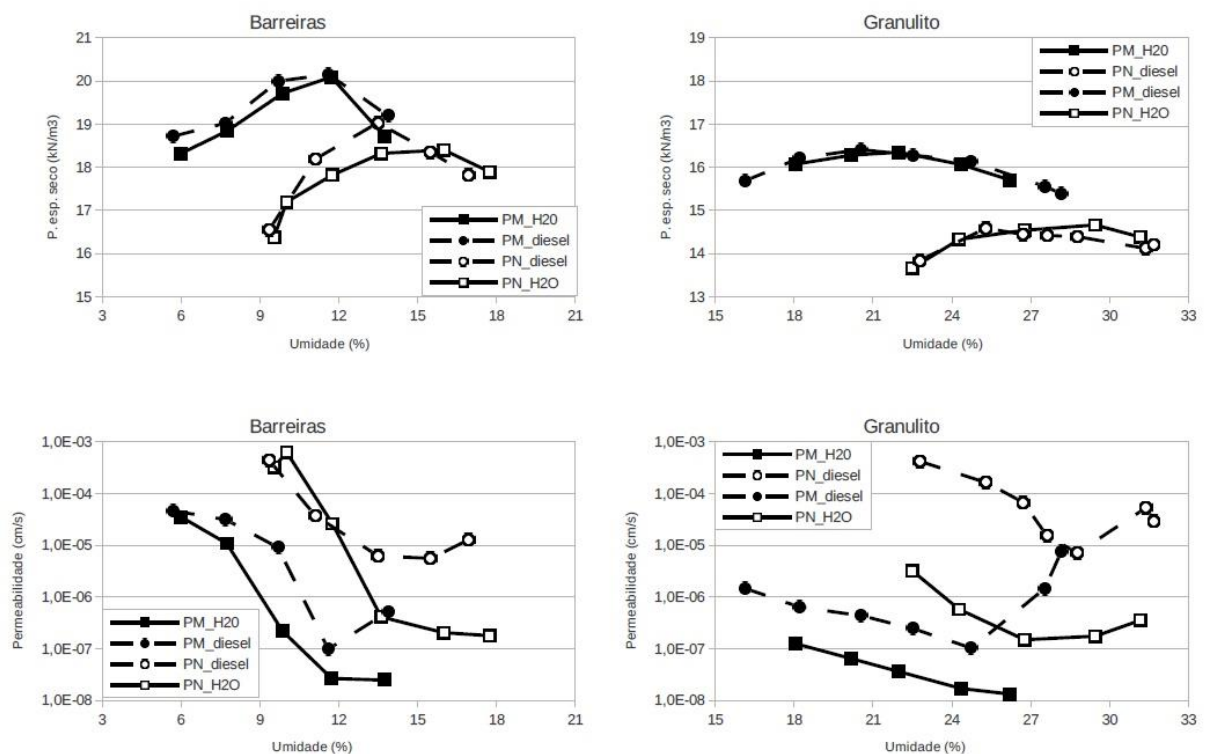
Para a segunda etapa da pesquisa, que consistiu em estudar os efeitos da compactação e os efeitos ambientais na permeabilidade, especificamente a estrutura do solo interfere nos valores de permeabilidade à água e ao diesel. Foram usados dois solos de grande ocorrência na região Metropolitana de Salvador: o solo residual do Granulito, coletado no campus da UFBA – Salvador e o solo sedimentar Barreiras, coletado na estrada do Cia-aeroporto, na região Metropolitana de Salvador. As amostra de solo foram usadas para ensaios de caracterização, compactação e permeabilidade. A tabela 4.1 apresenta as características dos solos usados nesta etapa da pesquisa.

**Tabela 4. 1:** características dos solos usados na segunda etapa da pesquisa.

Ident. das Amostras	Ensaio de Granulometria (%)						Ensaio de consistência			Massa Esp.grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Ensaio de Compactação				Classificação das amostras	
	Ped	AG	AM	AF	Silt	Arg	LL	LP	IP		P. Normal		P. Modificado			
										Wot.	$\rho_{d\max}$	Wot.	$\rho_{d\max}$	SUCS	ABNT	
Barreiras	0	19	41	8	7	25	44	21	23	2,660	13,6	1,86	10,9	1,99	SC	Areia argilosa com pouco silte
Granulito	2	6	11	8	32	42	69	39	30	2,759	28,0	1,46	22,5	1,62	MH	Argila arenosa vestígios de pedregulho

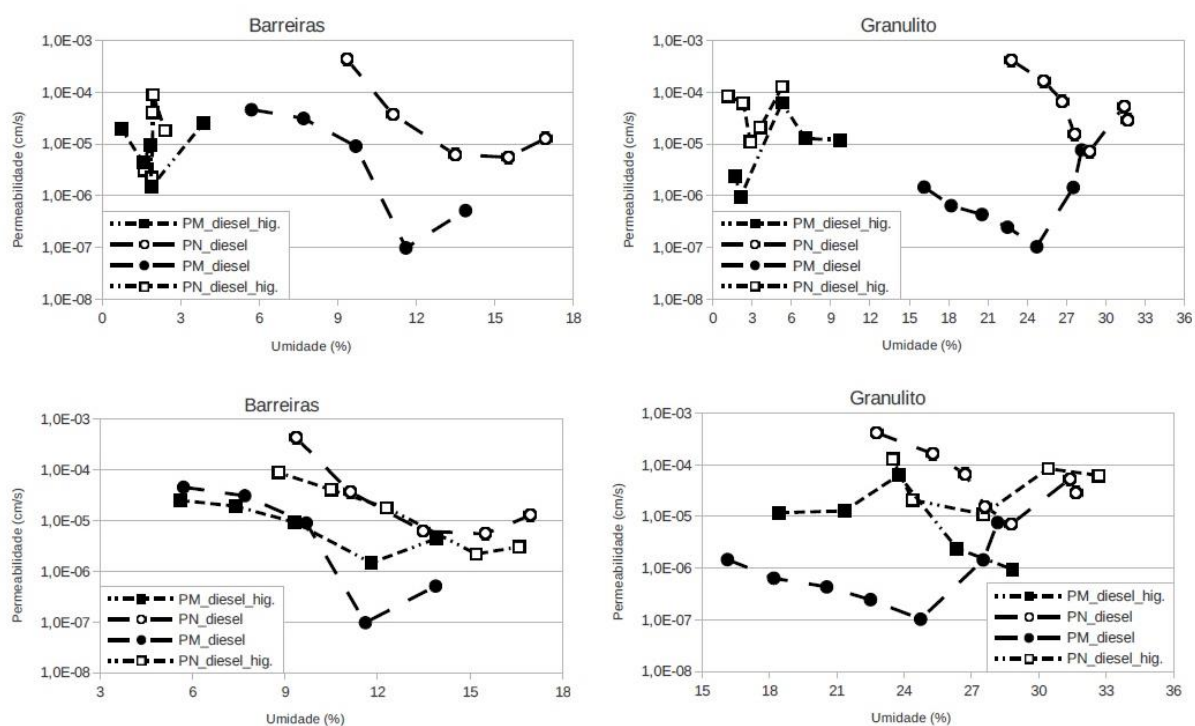
Os ensaios de permeabilidade, realizados na segunda etapa, foram feitos para diferentes condições de compactação dos solos Granulito e Barreiras. Os solos foram compactados em duas energias, Proctor normal e Proctor modificado. Foram empregados teores de umidade diferentes, afim de obter cinco pontos na curva de compactação, sendo dois no ramo seco, dois no ramo úmido e um ponto, aproximadamente, na umidade ótima. Os líquidos percolantes usados nos ensaios de permeabilidade foram a água e o diesel. Foram feitos 47 ensaios de permeabilidade para o solo Barreiras e 50 para o solo Granulito.

Os resultados obtidos na segunda etapa da pesquisa estão apresentados na figura 4.3. De forma geral, foi observado que com o aumento do teor de umidade de moldagem dos corpos de prova houve uma diminuição dos valores de permeabilidade. Os resultados também mostraram que o fluido permeante influencia a permeabilidade. Para as amostras com mesma energia de compactação foi observado que a permeabilidade ao diesel foi maior que a permeabilidade a água, refletindo a menor interação deste fluido com as partículas sólidas.



**Figura 4. 3:** Resultados de ensaios de permeabilidade obtidos para o Granulito e para o Barreiras, nas energias de Proctor normal e modificado, usando como permeante água e diesel. Fonte: Machado, 2011.

A figura 4.4 apresenta os resultados obtidos por Machado *et al* (2011) para mostrar a influência da secagem do solo em campo na permeabilidade ao diesel.



**Figura 4.4:** Resultados de ensaios de permeabilidade ao diesel para solos secos até a umidade higroscópica. Fonte: Machado, 2011.

Para os solos compactados na energia do Proctor Normal não houve diferenças significativas na permeabilidade dos corpos de prova secos ao ar e sem secagem. Quando a energia foi do Proctor Modificado houve uma aumento na permeabilidade nos corpos de prova compactados no ramo úmido da curva de compactação e secos ao ar.

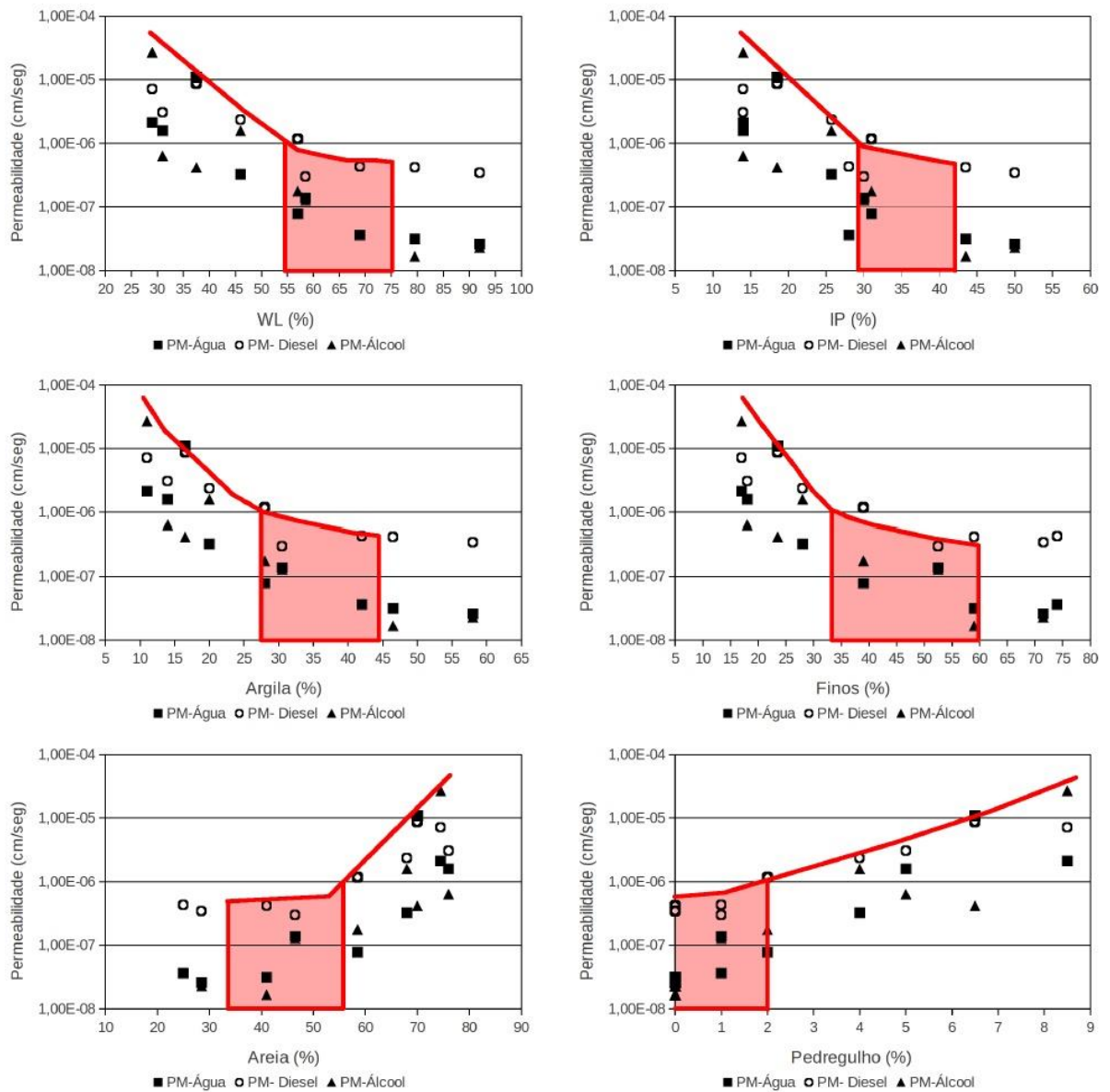
A terceira etapa da pesquisa estudou a influência das propriedades índices, como granulometria e limites de Atterberg, na permeabilidade dos solos para diferentes fluídos e buscou a proposição de especificações ótimas para solos potencialmente utilizáveis na confecção de barreiras de contenção para hidrocarbonetos. Foram preparados 8 misturas de solos para que fosse obtidos granulometrias variadas. Os solos Barreiras e Granulito (características foram apresentadas na tabela 4.1) foram usados em proporções variadas para preparar as misturas de 5 a 8. As misturas de 1 a 4 foram feitas com proporções de solo Barreiras e de areia lavada. Após preparadas, as mistura foram ensaiadas para identificação de suas características granulométricas e de compactação. A tabela 4.2 apresenta tais resultados.

**Tabela 4. 2:** Características granulométricas e de compactação das misturas usada na terceira etapa da pesquisa.

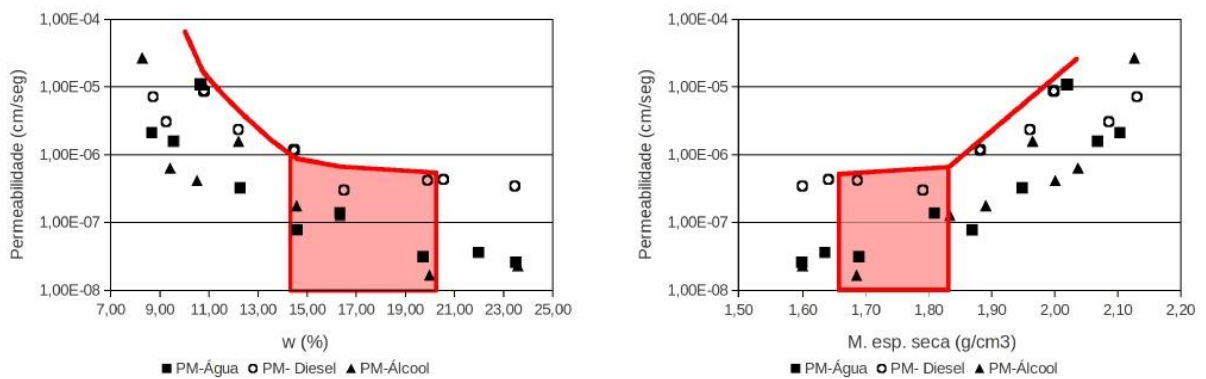
Ident. das Amostras	Ensaio de Granulometria (%)						Ensaio de consistência			Massa Esp.grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Ensaio de Compactação				Classificação das amostras	
	Ped	AG	AM	AF	Silt	Arg	LL	LP	IP		P. Normal		P. Modificado		SUCS	ABNT
										Wot.	ρdmáx	Wot.	ρdmáx			
Mistura 01	5	28	35,5	12,5	5	14	31	16	15	2,662	11,33	1,933	9,41	2,036	SC	Areia argilosa com vestígios de pedregulho e silte
Mistura 02	8,5	28	32	14,5	5,5	11,5	27	16	12	2,660	10,44	1,964	8,6	2,069	SC	Areia argilosa com vestígios de pedregulho e silte
Mistura 03	4	24,5	33	10,5	8	20	46	20	26	2,674	15,02	1,804	12,15	1,951	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 04	6,5	25,5	32,5	12	7	16,5	38	19	19	2,662	12,95	1,880	10,57	1,994	SC	Areia argilo- siltosa com pouco pedregulho
Mistura 05	1	13,5	24	9	22	30,5	58	29	29	2,713	21,24	1,618	16,18	1,792	CH/MH	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 06	0	10,5	20	10,5	12,5	46,5	80	36	44	2,727	26,72	1,485	19,84	1,676	CH	Argila areno-siltosa
Mistura 07	2	15	34	9,5	11,5	28	56	26	30	2,698	17,8	1,692	14,7	1,857	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 08	0	5,5	13	10	13,5	58	91	41	50	2,764	29,62	1,412	23,26	1,594	MH	Argila areno – siltosa

A partir das misturas foram compactados corpos de prova na umidade ótima e massa específica seca máxima obtidas das energias de compactação Proctor Normal e Proctor Modificado, ambos compactado na umidade ótima. Para os ensaios de permeabilidade desta etapa foram usados os líquidos percolantes água, diesel e álcool. Foram realizados 144 ensaios de permeabilidade.

Os resultados de permeabilidade obtidos na terceira etapa da pesquisa para as misturas de solos compactadas com a energia do Proctor Normal não obtiveram valores de permeabilidade a diesel abaixo  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, com isso, o autor chegou a duas conclusões: a primeira foi descartar a execução de barreiras minerais de contenção compactada na energia no Proctor normal e a segunda foi que o diesel é o fluido que alcança maiores valores de permeabilidade, logo é o mais crítico dentre os usados na pesquisa (água e álcool). Com isso a faixa granulométrica foi proposta com os resultados obtidos para permeabilidade a diesel na energia do Proctor Modificado. As figuras 4.5 e 4.6 apresentam as relações entre permeabilidade e propriedades índices dos solos apontadas na etapa 1 como as mais relevantes e em destaque a faixa de variação de referência para solos com potencial de uso como barreira minerais de contenção. O autor considerou adequado os ensaios que obtiveram valor de permeabilidade inferior a  $1 \times 10^{-6}$  cm/s.



**Figura 4. 6:**Faixas de variação da propriedades físicas dos solos com potencial de uso como barreiras minerais para contenção de fluidos orgânicos. Fonte: Machado, 2011.



**Figura 4. 5:**Faixas de variação dos parâmetros de compactação, sendo a) a unidade ótima e b) massa específica seca máxima, na energia do Proctor Modificado. Fonte: Machado, 2011.

Segundo Machado (2011), ao analisar as figuras 4.5 e 4.6, as variáveis que mais influenciaram os valores de permeabilidade a água foram a umidade de moldagem ( $w$ ), o limite de liquidez ( $W_L$ ) e a massa específica seca das amostras, todas elas conduzindo, sozinhas, a obtenção de valores de  $R^2 \approx 0,81$ . Para os valores de permeabilidade ao diesel, as variáveis mais influentes foram a fração fina ( $R^2 = 0,855$ ), umidade de compactação ( $R^2 = 0,829$ ) e módulo de finura ( $R^2 = 0,82$ ). Nas figuras são apresentadas também envoltórias superiores de valores de permeabilidade, traçadas manualmente, as quais foram utilizadas para a definição dos valores mínimos/máximos das especificações dos solos com potencial para serem utilizados como camadas de proteção mineral para a contenção de líquidos orgânicos.

Foi com base nos resultados para permeabilidade ao diesel na energia do Proctor Modificado que foi elaborada a proposta de faixas ótimas de propriedades índices para confecção de barreiras minerais para contenção de orgânicos, de forma que se o solo pudesse atender os critérios mínimos de permeabilidade para o diesel. A tabela 4.3 a faixa de variação proposta.

**Tabela 4. 3:** Proposta de faixas ótimas de propriedades índices para confecção de barreiras minerais para contenção de orgânicos.

Parâmetro		Faixa de valores	
Limite de Liquidez	$W_L$	55%	75%
Índice de Plasticidade	IP	28%	42%
Teor de Finos	Fc	33%	60%
Teor de Argila	Cc	27%	45%
Teor de Areia	Sc	34%	57%
Teor de Pedregulho	Gc	$\leq 2\%$	

Vale ressaltar que apesar do número relativamente grande de parâmetros, muitos dos parâmetros listados são dependentes uns dos outros de forma que o atendimento a todos os parâmetros listados não deve constituir uma tarefa por demais árdua.

Com a adoção dos parâmetros acima, o solo compactado na energia correspondente a do Proctor Modificado deverá apresentar valores de umidade ótima e densidade seca máxima conforme descrito na tabela 4.4.

**Tabela 4. 4:** Recomendações de compactação para barreiras minerais de contenção de líquidos orgânicos.

Parâmetro		Faixa de valores	
Umidade de compactação (umidade ótima)	w	14%	20%
Densidade seca (densidade seca máxima)	$\rho_{\text{máx}}$	1,65g/cm <sup>3</sup>	1,83g/cm <sup>3</sup>

Para que uma barreira de contenção tenha desempenho satisfatório, a pesquisa recomendou que além das faixas propostas, fossem respeitadas diversas observações construtivas; as quais são listadas a seguir.

- O equipamento utilizado na compactação de campo deverá garantir a energia de compactação do tipo Proctor Modificado.
- A compactação deverá ser realizada em etapas, até que se alcance a espessura final da camada, sendo que em cada etapa o material lançado não poderá ter espessura superior a 25 cm e, após a compactação, 15 cm.
- Deverá ser feito um adequado controle de compactação em campo, que garanta um grau de compactação acima de 95%, e para que a umidade das camadas compactadas estejam acima da umidade ótima em 1%, aceitando-se uma variação de 2,0% em torno deste valor.



## **5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS PRELIMINARES**

Para o cumprimento do objetivo principal propostas nessa pesquisa, que é uma avaliação da eficiência das Barreiras de contenção de líquidos orgânicos construídas utilizando as faixas de variação ótimas propostas por Machado (2011), o seu desenvolvimento foi dividido em etapas, conforme se apresenta nos itens seguintes.

### **5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS PARA PRODUÇÃO DAS BARREIRAS DE CONTENÇÃO**

Os solos utilizados, para o desenvolvimento desta pesquisa, foram provenientes de áreas de corte realizados em pontos distintos de Salvador. Foram usados o solo residual do Granulito/Gnaiss, comum na maior parte da cidade de Salvador e o solo de formações terciárias de areia argilosa, denominadas de formação Barreiras, também comum na região Metropolitana de Salvador. Os dois solos amostrados foram denominados, respectivamente, de solo Granulito e solo Barreiras. Investigou-se diferentes solos, a fim de obter aqueles que atendessem as características das faixas granulométricas propostas para funcionarem como barreiras de contenção de líquidos orgânicos ou que pudessem ser utilizados na forma de misturas para este fim.

Esses solos foram escolhidos, por serem provenientes da mesma região dos solos usados na pesquisa desenvolvida por Machado (2011). Sendo assim, possuem características similares aos usados na referida pesquisa facilitando o atendimento da variação dos índices físicos para composição da faixa de propriedades físicas proposta para se obter barreiras de contenção de líquidos orgânicos. As figuras 5.1 e 5.2 mostram os solos Granulito e Barreiras dispostos no campo. Como o solo Granulito foi coletado em diferentes regiões de Salvador, o conteúdo das seis caçambas de solo usadas para o estudo apresentam coloração diferente, como pode ser observado na figura 5.1. Como este solo seria uniformizado posteriormente, a amostra recolhida para o ensaio granulométrico foi composta de quantidades iguais de solo de cada uma das seis caçambas. O solo da formação sedimentar Barreiras usado na pesquisa é proveniente da área

de bota-fora do Aterro Sanitário Metropolitano Centro – ASMC, em Salvador, o qual se mostrou mais uniforme, facilitando o processo de coleta das amostras.



**Figura 5. 1:** Foto do conteúdo das seis caçambas de solo Granulito.



**Figura 5. 2:** Foto do solo Barreiras presente na área de bota-fora do Aterro Metropolitano Centro

Foram realizados ensaios de caracterização e de compactação na energia do Proctor modificado para levantar as propriedades índices dos solos. Para classificação dos solos foram empregados o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As normas da ABNT utilizadas nos ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA e no Laboratório de Solos são listadas no quadro 5.1.

**Quadro 5. 1:** Lista das Normas da ABNT usadas no ensaios de caracterização e compactação dos solos.

Normas	Descrição do ensaio
NBR 6457/1986	Amostras de solo → Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
NBR 6508/1984	Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação de massa específica
NBR 7181/1984	Análise granulométrica
NBR 6459/1984	Solo – Determinação do limite de liquidez
NBR 7180/1984	Solo – Determinação do limite de plasticidade
NBR 7182/1986	Ensaio de Compactação

A Tabela 5.1. apresenta a caracterização dos solos usados nesta pesquisa. São classificados segundo o SUCS da seguinte forma: O solo de formação Barreiras como SM, areia com quantidades apreciáveis de finos de baixa plasticidade; e o solo Granulito como CH, argilas inorgânicas de alta plasticidade.

**Tabela 5. 1:** Caracterização granulométrica e de compactação dos solos Barreiras e Granulito.

Identificação das Amostras	Ensaio de Granulometria (%)						Ensaio de consistência			Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Ensaio de Compactação		Classificação das amostras	
	Ped	AG	AM	AF	Silt	Arg	WL	Wp	IP		W <sub>ot</sub>	pd <sub>máx</sub>	SUCS	ABNT
Solo Barreiras	3	17	49	14	7	10	NL	NP		2,633	10,5*	1,95*	SM	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Solo Granulito	1	5	12	17	29	36	55	28	27	2,725	17,98*	1,732*	CH	Argila areno-siltosa com vestígios de pedregulho

\*Energia do Proctor modificado; NL – não liquez; NP – não plástico; Ped – Pedregulho; AG – Areia fina; AM – Areia média; AF – Areia fina; Silt – Silte; Arg – Argila.

Para se obter solos com diferentes características, foram preparadas misturas de solos, Granulito e Barreiras (Tabela 5.1) e as faixas granulométricas propostas por Machado (2011) (seção 3.7). Foi usada a propriedade índice Teor de Finos – Fc (teor de argila mais teor de silte) como parâmetro para obter granulometrias diferentes nas misturas. Este parâmetro foi escolhido por se mostrar de grande influência na permeabilidade, além de ter influência direta nas outras propriedades índices contidas na faixa granulométrica proposta. O procedimento de mistura é descrito na sequência.

A tabela 5.2 apresenta a fração de finos desejada para cada mistura. Assim, foi feita uma estimativa da proporção que cada solo (Granulito e Barreiras) deveria ser misturado, conforme indicado na tabela 5.2.

**Tabela 5. 2:** Teor de finos nas misturas dos solos Granulito e Barreiras.

Misturas	Fração de finos desejada	Proporção de solo para a mistura		Fração de finos obtida
		Solo Granulito	Solo Barreiras	
Mistura 01	65 %	100%	0%	45 %
Mistura 02	60 %	90%	10%	40 %
Mistura 03	55 %	79%	21%	37 %
Mistura 04	50 %	69%	31%	35 %
Mistura 05	45 %	58%	42%	33 %
Mistura 06	17 %	0%	100%	18 %
Mistura 07	-	-	-	27 %

Além dos solos Barreiras e Granulito, um outro solo sedimentar mais argiloso encontrado no ASMC, foi usado para a execução de um aterro experimental. Este solo foi denominado de Mistura 07.

### 5.1.1 Procedimento de mistura e Caracterização do solo

O processo de mistura dos solos e sua homogeneização foi feito *in situ* e se deu com o auxílio de uma retroescavadeira. Antes de iniciar as misturas dos solos foram feitos alguns procedimentos, os quais são descritos na sequência:

- Foram definidas as dimensões dos aterros experimentais, e com isso pôde-se calcular os volumes de solo, Granulito e Barreiras, a serem compactados na energia do Proctor modificado, para um aterro apenas como solo Granulito e outro aterro apenas com solo Barreiras. Com o conhecimento de índices físicos, e os valores de umidade ótima e peso específico seco máximo dos solos Granulito e Barreiras, foi feita uma estimativa da massa de cada solo que deveria ser misturada para se obter a massa de solo seco em cada aterro experimental e a massa de solo por camada para se atingir a densidade seca desejada e a altura final da camada;
- A massa de solo a ser empregada em cada mistura foi convertida em número de conchas equivalente da retroescavadeira. Para isso, a retroescavadeira vazia foi pesada em uma balança rodoviária (Figura 5.3); procedeu-se também a pesagem da retroescavadeira com a concha cheia de solo Barreiras e depois com o solo Granulito (Figuras 5.4 e 5.5). Com isso foi possível identificar a massa de solo em cada concha, e, com a devida correção de umidade (previamente determinada em campo), calcular o número de conchas de cada solo, Granulito e Barreiras, necessário para obter os teores de finos desejados para cada mistura.

Anterior ao processo de mistura, cada solo foi homogeneizado e umedecido para que chegasse na umidade ótima antes de serem misturados nas proporções definidas. As figuras 5.6, 5.7 e 5.8 mostram os solos sendo homogeneizados e umedecidos em campo.



**Figura 5. 3:** Retro escavadeira vazia sendo pesada



**Figura 5. 4:** A retro escavadeira sendo pesada com a concha cheia de solo Granulito.



**Figura 5. 5:** A retro escavadeira sendo pesada com a concha cheia de solo Barreiras.



**Figura 5. 6:** Solo Granulito sendo homogeneizado.



**Figura 5. 8:** Solo Granulito sendo umedecido.



**Figura 5. 7:** Solo Barreiras sendo homogeneizado

Após a preparação das misturas nas proporções desejadas, as misturas foram amostradas para uma nova caracterização. O resultado desta caracterização são apresentados na tabela 5.3.

Sendo assim, foram obtidos sete solos para a realização deste estudo. Como pode ser observado nas tabelas 5.2 e 5.3, contudo, o teor de finos das misturas ficou abaixo do esperado.

**Tabela 5. 3:** Resultado dos ensaios de caracterização das misturas.

Identificação das Amostras	Ensaio de Granulometria (%)						Ensaio de consistência			Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Ensaio de Compactação		Classificação das amostras	
	Ped	AG	AM	AF	Silt	Arg	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	IP		W <sub>ot.</sub>	pd <sub>máx</sub>	SUCS	ABNT
Mistura 01	1	12	24	18	17	28	41	20	20	2,70	12,5*	1,94*	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 02	2	11	31	16	17	23	31	18	13	2,67	11,1*	1,97*	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 03	3	9	33	18	14	23	30	17	13	2,68	10,3*	2,00*	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 04	1	9	37	18	13	22	28	16	12	2,69	10,6*	2,01	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Mistura 05	0	16	33	18	12	21	28	17	11	2,67	10,2*	2,01*	SC	Areia argilo-siltosa
Mistura 06	0	18	41	23	6	12	NL	NP		2,67	9,4*	1,96*	SM	Areia argilosa com pouco silte
Mistura 07	1	15	35	22	8	19	25	15	10	2,69	10,2*	2,02*	SC	Areia argilosa com pouco silte e com vestígios de pedregulho

\*Energia do Proctor modificado; NL – não liquidez; NP – não plástico; Ped – Pedregulho; AG – Areia fina; AM – Areia média; AF – Areia fina; Silt – Silte; Arg – Argila.

O fato de ter obtido teores de finos abaixo do estimado pode ter sido causado pela heterogeneidade do solo, o que dificulta a obtenção de amostras representativas em campo. O solo Granulito (Mistura 01) apresentou grande diferença das características obtidas em sua primeira amostragem (tabela 5.1), para as características apresentadas após a homogeneização em campo das seis caçambas de solo (tabela 5.2). Vale ressaltar que o primeiro ensaio com o solo Granulito foi feito com uma amostra composta por solo das seis caçambas, sendo estes homogeneizadas em laboratório. Esta diferença das características do solo Granulito antes da homogeneização em campo e após, gerou a diferença de aproximadamente 20% nos teores de finos estimados e obtidos para as misturas com maiores proporções deste solo.

Desta forma, os aterros experimentais foram construídos com uma fração de finos diferente da estimada, o que antes da homogeneização em campo e após só foi constatado depois da construção dos aterros experimentais. Vale ressaltar que os aterros tiveram que ser construídos imediatamente após a preparação das misturas devido ao alto custo do aluguel das máquinas usadas, não sendo possível esperar os resultados de caracterização das misturas, e assim confirmar os teores de finos desejados. Além disso, apesar da diferença entre os teores



de finos desejados e obtidos após a realização das misturas de solos em campo, a percentagem de finos dos aterros experimentais ficou dentro da faixa de finos considerada ótima (à exceção da mistura 6 e do solo da mistura 7), de forma que este fato não gerou nenhum empecilho para a execução dos aterros experimentais.

## 5.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA PARA CONSTRUÇÃO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS

Os aterros experimentais foram construídos numa área de bota-fora no ASMC em Salvador – Ba, cedido pela BATTRE – Bahia Transferência e Tratamento de Resíduos Ltda. A Área fica localizada na Estrada CIA-Aeroporto (BA – 526), Km 6,5, s/n. A figura 5.9 mostra o mapa de Salvador, o ponto vermelho é a localização da UFBA e o círculo vermelho a localização do ASMC. As figuras 5.10 e 5.11 mostram o local de construção dos aterros experimentais na área do ASMC.

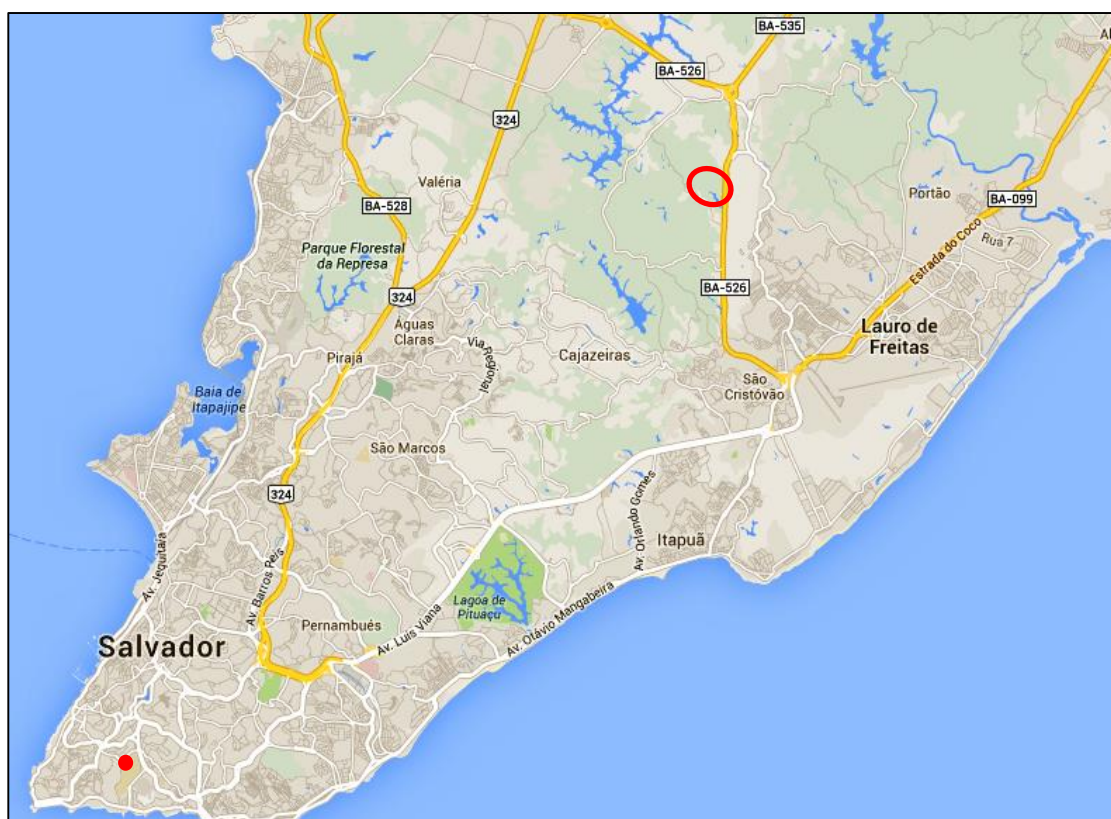


Figura 5. 9: Mapa de Salvador com a localização do ASMC. FONTE: Google Maps, 2014



**Figura 5. 10:** Imagem do ASMC e em destaque a área de Bota-fora onde foi construído os aterros experimentais. Google Mapas, 2014



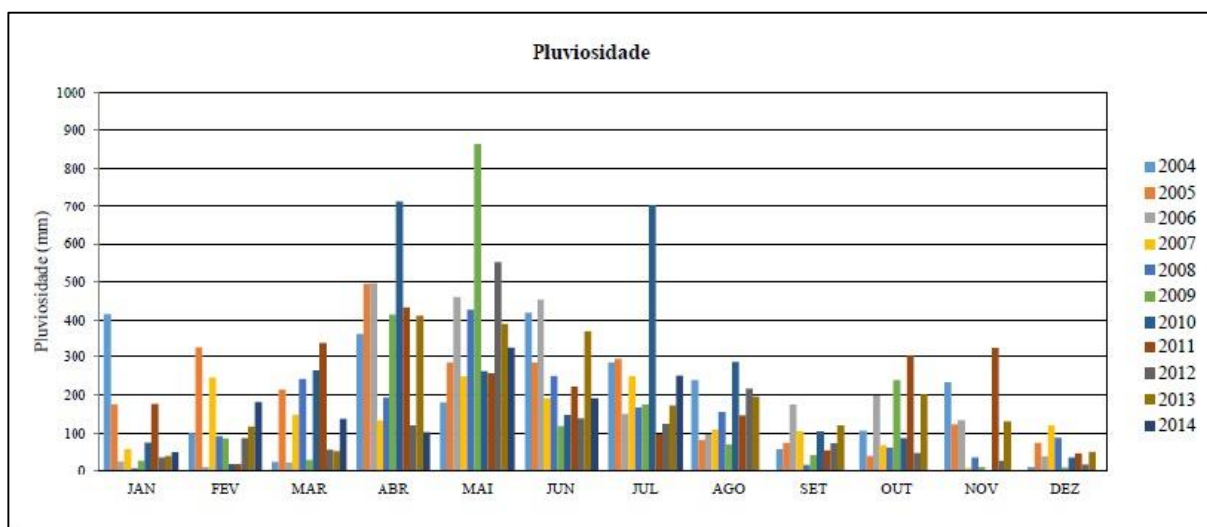
**Figura 5. 11:** Imagem da área de bota-fora do ASMC e em destaque os aterros experimentais. Fonte Google Mapas, 2015.



O ASMS está inserido na Área de Proteção Ambiental Joanes/Ipitanga (APA), cujo o Zoneamento Ecológico, da mesma, instituído pela Resolução CEPRAM nº 2.974, de 24 de maio de 2002, classifica a área do ASMC como Zona de Uso Específico (ZUE). O solo da área é de formação Sedimentar Barreiras.

Sobre os Sedimentos Barreiras desenvolvem-se solos do tipo Latossolo Amarelo álico com textura areno-argilosa, em relevo plano a suavemente ondulado e Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, com textura areno-argilosa em relevo ondulado (MOTA, 2001).

A precipitação média anual de 1998 a 2014 no ASMC foi em torno de 2.100 mm. Segundo Mota (2001) a APA Joanes/Ipitanga apresenta precipitação máxima anual de 2.300 a 3.500 mm e a precipitação mínima anual de 800 a 1.200 mm, valores similares aos obtidos através duas estações pluviométricas instaladas no ASMC (Figura 5.12), foram cedidos pela BATTRE, e por intermédio da análise desse dados foram identificados os índices pluviométricos no período de realização dos ensaios. As chuvas ocorrem predominantemente nos meses de abril, maio e junho. O período seco compreende-se entre setembro a março. A temperatura média da cidade de Salvador é de 25,2 °C.



**Figura 5. 12:** Pluviosidade mensal do período de 2004 a 2014.

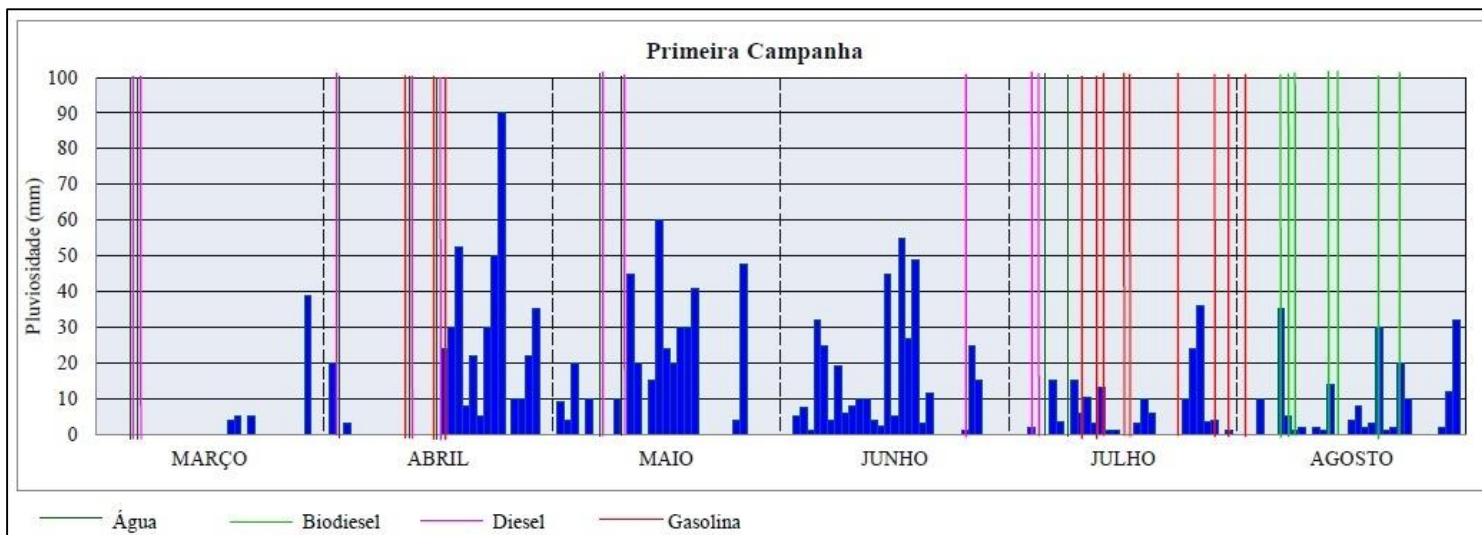
Com o objetivo de avaliar o desempenho dos aterros ao longo do tempo, foram realizadas duas campanhas de ensaios. A primeira campanha, foi realizada logo após a confecção dos aterros, no período chuvoso. E a segunda campanha após seis meses da

compactação dos aterros, no período seco. A variação dos valores de permeabilidade com o tempo, representaria os efeitos das intempéries na bacia de contenção.

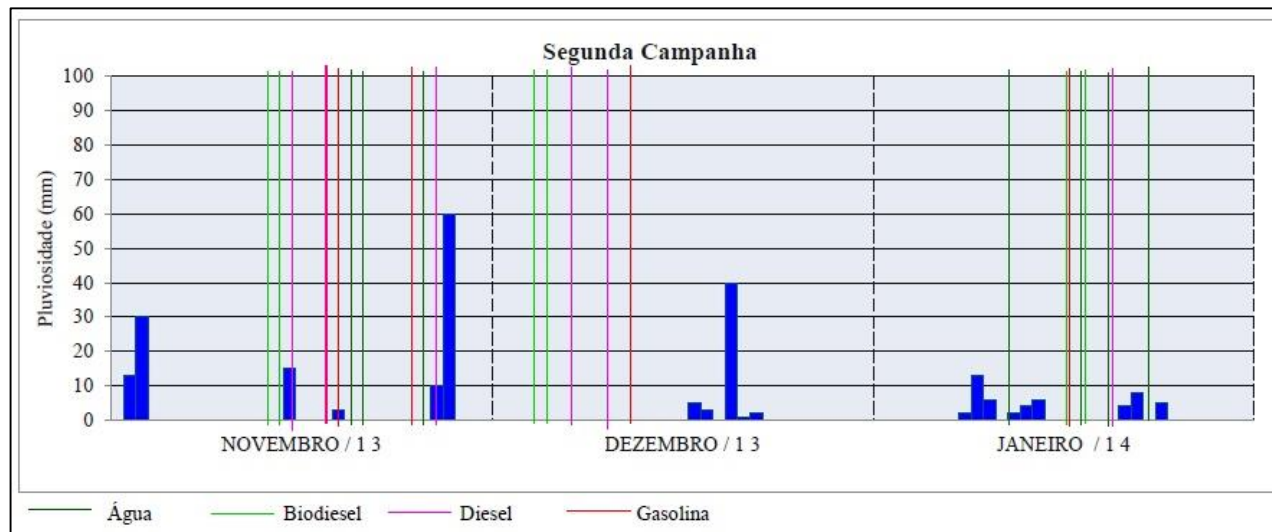
Como a umidade do solo influencia a permeabilidade os ensaios foram classificados como sendo de *período chuvoso* quando a pluviosidade foi de no mínimo 3mm no dia do ensaio ou com histórico de chuvas com pluviosidade igual ou superior 5mm nos dois dias que antecederam o dia do ensaio; e como *período seco* quando a pluviosidade era menor que 3mm no dia do ensaio, desde que o histórico de chuvas nos dois dias anteriores fosse inferior a 5mm.

Do total de 56 ensaios realizados na primeira campanha, 22 foram realizados em período seco, cerca de 39,3%. Vale ressaltar neste caso que os solos se apresentavam naturalmente com elevados valores de umidade, em função da sua compactação recente. Para a segunda campanha, utilizando a mesma classificação para período chuvoso e período seco, dos 56 ensaios realizados apenas 12 estava em período chuvoso, cerca de 21,4%.

As figuras 5.13 e 5.15 apresentam a pluviosidade para cada período de ensaio. A primeira campanha compreendeu o período de março a agosto de 2013; a segunda campanha compreendeu o período de novembro de 2013 a janeiro de 2014. As colunas em azul são os índices pluviométricos e as linhas verticais são os dias em que foram feitos os ensaios, as cores destas linhas indicam o líquido percolante.



**Figura 5. 13:** Pluviosidade diária no período da primeira campanha



**Figura 5. 14:** Pluviosidade diária no período da segunda campanha

### 5.3. CONSTRUÇÃO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS

A construção dos aterros mostrou-se como a etapa mais importante deste estudo, visto que a eficiência das bacias de contenção depende de rigoroso controle de compactação do solo.

Cada aterro foi confeccionado gradualmente, em camadas com altura de lançamento do solo menor que 25cm. Foi definido que cada aterro teria 5m de comprimento por 2,2m de largura e 0,6m de altura, com exceção do aterro denominado de Mistura 06 que teria 10m de comprimento por 2,2m de largura e 0,6 m de altura; estas dimensões foram definidas em função da quantidade de solo disponível para o experimento. A área do aterro era medida seus limites definidos a marcação com piquetes. Em seguida o solo era lançado e compactado com o rolo pé de carneiro vibratório de 24 toneladas (Figura 5.13 e 5.14).



**Figura 5. 15:** Solo sendo lançado na área demarcada para o aterro



**Figura 5. 16:** Solo sendo compactação com rolo pé-de-carneiro.

O número de passadas do rolo compactador foi de 9 a 10 vezes, sendo contado 1 vez a sua ida e volta pela camada. Depois de compactada cada camada passou pelo controle de compactação, onde foi verificada a umidade e o grau de compactação (Figura 5.15); após tais verificações a camada era liberada ou não para o lançamento de solo da próxima camada (Figura 5.16). Para este controle, foram retiradas três amostras de solo em cada camada. Quando os valores de umidade e grau de compactação da camada não se encontrava no intervalo especificado, o número de passadas do rolo compactador era acrescido e uma nova avaliação era feita. Caso os valores obtidos não se mostrassem adequados novamente, a camada era



rejeitada. Todos os aterros foram executados com este controle, por camada. Nenhuma camada precisou de mais passadas do rolo compactador ou foi descartada. Os aterros foram executados em série como mostra as figuras 5.17 e 5.18.



**Figura 5. 17:** Solo sendo amostrado para verificação da umidade de grau de compactação da camada.



**Figura 5. 18:** Lançamento da próxima camada de solo após a provação do controle de compactação.



**Figura 5. 19:** Execução dos aterros experimentais, em série



**Figura 5.20:** Disposição dos aterros experimentais.

A umidade foi obtida com o auxílio do *Speedy Moisture Test* e com o uso de uma balança de umidade com aquecimento por infravermelho. O grau de compactação (GC), é a relação entre a massa específica seca (medida em campo) e a massa específica seca máxima (obtida em laboratório). Para obtenção da massa específica seca em campo, um cilindro, com dimensões conhecidas, era cravado na camada do aterro a ser avaliada; em seguida, este era rasado na parte superior, destacado do solo compactado e rasado na parte inferior; o solo contido no cilindro era pesado numa balança mecânica. Com a massa e o volume do solo é obtido a massa específica, que corrigida com a umidade, permite determinar a massa específica seca de campo. Para obter resultados mais confiáveis da umidade, com as amostras de solos retiradas dos aterros foram feitos também ensaios de umidade no laboratório do GEOAMB, a fim de comparar com os resultados obtidos em campo.

Como no período de execução dos aterros experimentais ainda não estavam prontos os ensaios de caracterização e a curva de compactação das misturas, tanto a umidade ótima quanto a massa específica seca máxima, foram estimadas levando-se em consideração as curvas de compactação e as proporções das misturas do solo Granulito e Barreiras. Sendo assim, o Grau de Compactação (GC) foi obtido com os dados estimados e posteriormente, confirmados após a obtenção dos resultados da curva de compactação das misturas. Tal medida foi indispensável devido ao tempo necessário para obtenção da curva de compactação das misturas, e a impossibilidade de manter o maquinário (retroescavadeira, rolo pé-de-carneiro, entre outros) ociosos a espera de tais resultados.

#### **5.4. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA DOS LÍQUIDOS PERMEANTES.**

Foram utilizados como líquidos percolantes a água, o biodiesel, o diesel e a gasolina. É válido ressaltar, que a gasolina brasileira é composta de uma mistura com aproximadamente 22% de álcool.

Para os ensaios de permeabilidade em campo utilizou-se água potável proveniente de poços do ASMC. Para os ensaios em laboratório foi utilizada água deionizada.

O biodiesel foi cedido pela Petrobras – Unidade de Candeias-BA. O biodiesel é um substituto natural do diesel de petróleo que pode ser produzido a partir de fontes renováveis

como óleos vegetais, gorduras animais e óleos utilizados na fritura de alimentos (SANTOS, 2010). O biodiesel utilizado neste estudo foi produzido a partir de diferentes fontes, sendo 40% de soja, 40% de sebo e 20% de algodão, pela Petrobras – Unidade de Candeias - BA.

O diesel e a gasolina comercial brasileira foram adquiridos em postos de venda de combustível. Ambos são combustíveis constituídos basicamente por hidrocarbonetos. O diesel apresenta também, baixas concentrações, de enxofre, nitrogênio e oxigênio. A gasolina possui, em menor quantidade, produtos oxigenados. Os hidrocarbonetos da gasolina, em geral, são mais “leves” do que aqueles que compõem o diesel, pois são formados por moléculas de menor cadeia carbônica (normalmente de 4 a 12 átomos de carbono).

As propriedades, a 20 °C, desses líquidos são apresentadas na tabela 5.4. A mobilidade é a razão entre a massa específica e a viscosidade, ( $\rho/\mu$ ). Os valores de viscosidade e a massa específica apresentados nesta tabela foram obtidos no GEOAMB. A constante dielétrica é uma medida da polaridade dos líquidos e tensão superficial/interfacial uma medida das forças de coesão entre moléculas semelhantes, as forças de atração que faz interface do líquido se comportar como uma película elástica como um látex. A tensão superficial também é responsável pelo efeito de capilaridade, formação de gotas e bolhas, e imiscibilidade entre líquidos polares e apolares.

**Tabela 5. 4:** Propriedade dos líquidos a 20 °C

Líquido	Massa específica - $\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> )	Viscosidade dinâmica - $\mu$ (g.(cm.s) <sup>-1</sup> )	Mobilidade (s.cm <sup>-2</sup> )	Constante dielétrica - $\epsilon$	Tensão superficial / interfacial (mN.m <sup>-1</sup> )
Água	0,998	0,0107	93,028	80,08 <sup>1</sup>	72
Biodiesel	0,883	0,0630	14,016	4,5 <sup>2</sup>	23,85
Diesel comercial	0,829	0,0351	23,618	2,13 <sup>1</sup>	27,3
Gasolina comercial brasileira	0,767	0,0123	62,358	9,06 <sup>1</sup>	22,23
Água / Diesel					10,6

<sup>1</sup>Valores obtidos em Machado, 2011; <sup>2</sup>Média dos resultados obtidos por Cordeiro *et al*, 2010.

A massa específica dos líquidos empregados no estudo foi obtida no GEOAMB através de um tensiômetro com capacidade de realização de medidas de densidade (Tensiômetro Kruss Easy Dyne, Modelo K20, Alemanha).

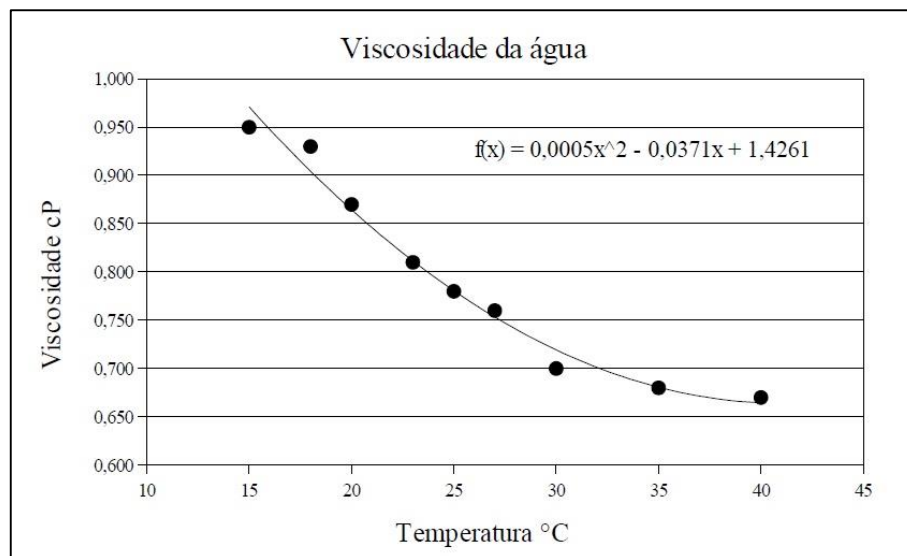
A viscosidade dos permeantes foi determinada em um viscosímetro em função da temperatura (Viscosímetro Brookfield, Modelo DV2T, Estados Unidos). Para as equações de ajuste foi utilizado polinômio de segundo grau, com  $R^2$  de 0,99 para todos os líquidos usados nesta pesquisa. As equações de ajuste da viscosidade em função da temperatura para a água (Equação 5.1), biodiesel (Equação 5.2), diesel (Equação 5.3) e gasolina (Equação 5.4). Onde  $T$  é o temperatura em graus Celsius. As figuras 5.19 a 5.22 apresentam as curvas de viscosidade obtidas.

$$\text{Para água: } \mu = 0,0005T^2 - 0,0371T + 1,4261 \quad [5.1]$$

$$\text{Para biodiesel: } \mu = 0,0025T^2 - 0,2645T + 10,6343 \quad [5.2]$$

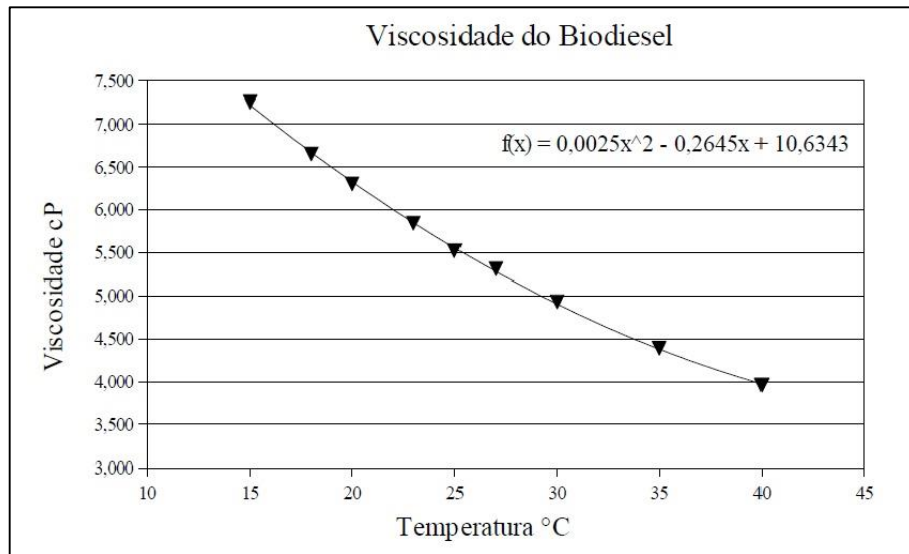
$$\text{Para diesel: } \mu = 0,0013T^2 - 0,1346T + 5,6939 \quad [5.3]$$

$$\text{Para gasolina: } \mu = 0,0004T^2 - 0,0010T + 1,3943 \quad [5.4]$$

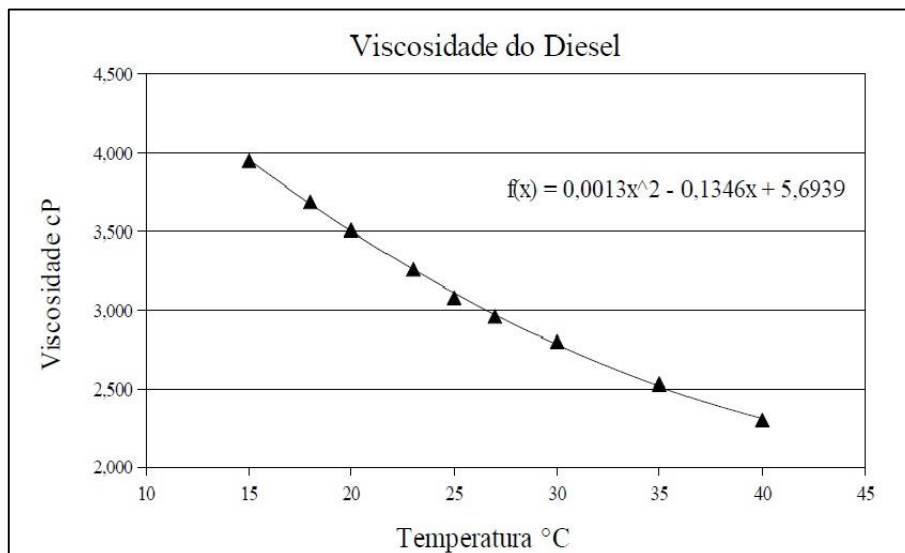


**Figura 5. 21:** Curva de viscosidade da água

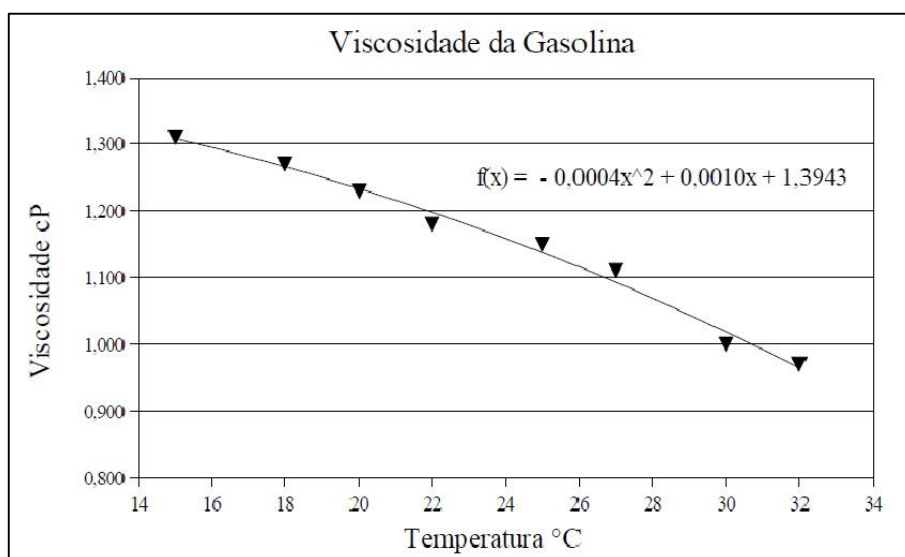




**Figura 5. 22:** Curva de viscosidade do biodiesel.



**Figura 5. 23:** Curva de viscosidade do diesel



**Figura 5. 24:** Curva de viscosidade do gasolina

As equações de viscosidade em função da temperatura foram usadas para a correção dos valores de permeabilidade obtidos em laboratório para permeabilidade a 20 °C ( $k_{20}$ ), através da seguinte relação:

$$k_{20} = k_T \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad [5.5]$$

O subscrito T é a temperatura de realização do ensaio.

## 5.5. PERMEÂMETRO GUELPH

Foi utilizado um permeâmetro Guelph desenvolvido para a realização dos ensaios de campo da pesquisa de Machado (2011), para a determinação da permeabilidade de barreiras de proteção minerais compactadas para a contenção de hidrocarbonetos. Utilizando-se os fluidos normalmente estocados nas áreas dos diques de contenção (Figura 5.23). O equipamento possui as seguintes características:

- O equipamento foi construído empregando materiais nobres e pouco reativos quimicamente, como o aço inoxidável, o teflon e o vidro, para que o mesmo pudesse ser utilizado nos testes de permeabilidade empregando os fluidos estocados nos tanques contidos nos diques de proteção;
- Na realização dos ensaios, utiliza-se um pequeno volume de fluido (volume menor que 2 litros), de forma a não provocar impactos significativos ao meio ambiente;
- O equipamento evita ao máximo possível o contato do operador com os fluidos empregados. Para tanto, a entrada do fluido de interesse é pela base do permeâmetro, por gravidade, a partir de um reservatório apoiado em cota superior ao mesmo. Todas as conexões empregadas são do tipo engate rápido com dupla vedação de forma a prevenir vazamentos e uma exposição demasiada do operador aos fluidos empregados nos ensaios;
- A unidade de leitura de dados possui capacidade de armazenamento compatível com a execução de pelo menos 20 ensaios de campo consecutivos. Para tanto foi utilizado um

controlador lógico programável (PLC) com interface homem-máquina, de tecnologia nacional, fabricado pela HI Tecnologia. Este controlador possui uma unidade de memória flash com capacidade de armazenamento de aproximadamente 16 Mb, o que é suficiente para o armazenamento de cerca de 30.000 leituras de campo, o que corresponde há cerca de 130 horas de ensaio, com um intervalo entre leituras de 15 segundos;

- O permeâmetro é capaz de ser utilizado em campo por um período de 12 horas sem a necessidade de carga das suas baterias, isto é possível através de um conjunto de carregador e baterias capazes de fornecer uma alimentação estável de 25.9 VDC ao sistema;
- O equipamento é apropriado para a utilização em ambientes industriais. Como o PLC utilizado e o conjunto de baterias não são apropriados para uso em áreas industriais classificadas como perigosas, foi necessário que o sistema fosse acondicionado em uma caixa à prova de explosão.



**Figura 5. 25:** Permeâmetro Guelph.

## 5.6. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE NOS ATERROS EXPERIMENTAIS

### 5.6.1. Ensaios de permeabilidade *in situ*.

Para avaliar a eficiência dos aterros experimentais na retenção de líquidos orgânicos foram feitos ensaios de permeabilidade *in situ*, utilizando os seguintes fluidos permeantes: água, como base de comparação, gasolina comercial brasileira, óleo diesel comercial e biodiesel.

Os ensaios de permeabilidade de campo foram feitos com permeâmetro Guelph. Com o objetivo de avaliar o desempenho dos aterros ao longo do tempo, foram realizadas duas campanhas de ensaios. A primeira campanha, foi realizada logo após a confecção dos aterros e a segunda campanha após seis meses da compactação dos aterros.

Em cada aterro experimental foram feitos 8 (oito) ensaios de permeabilidade, sendo 2 (dois) com cada líquido percolante, totalizando 56 ensaios por campanha e 112 ensaios ao final das duas campanhas. A tabela 5.5 apresenta o número de ensaios realizados em cada campanha. A primeira campanha de ensaios foi realizada no período de março a agosto de 2013. A segunda campanha iniciou em novembro de 2013 e findou em janeiro de 2014.

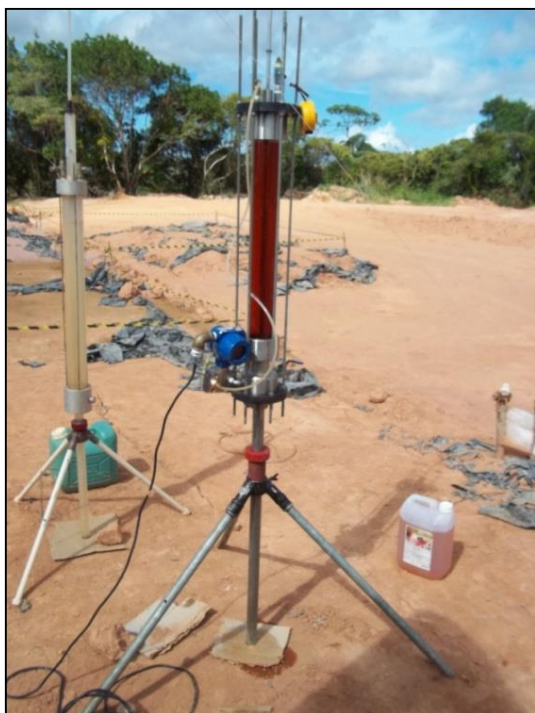
**Tabela 5. 5:** Número de ensaios de permeabilidade realizados em campo.

Período	Primeira Campanha	Segunda Campanha	Total
	Março a agosto/2013	Novembro /2013 a janeiro/2014	
Número de ensaios por Mistura com água	2	2	4
Número de ensaios por Mistura com Biodiesel	2	2	4
Número de ensaios por Mistura com Diesel	2	2	4
Número de ensaios por Mistura com Gasolina	2	2	4
Número de ensaios por aterro	8	8	16
Total por campanha	56	56	112

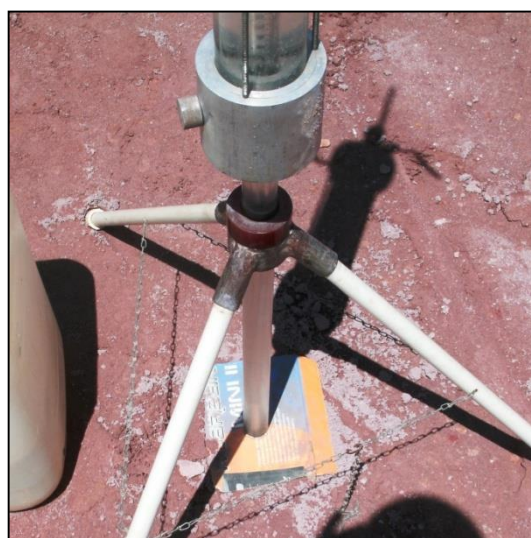
Em todos os ensaios o permeâmetro foi instalado em um furo de 20cm de profundidade com 10cm de diâmetro (Figura 5.24), feito com um trado manual e, em alguns casos, com trado mecânico. Em cada furo foram feitos ensaios com duas cargas distintas.

Para a realização dos ensaios foram utilizados 3 (três) permeômetros Guelph, sendo que um era para uso exclusivo com água e os outros apropriados para uso com líquidos orgânicos.

Estes permeâmetros foram desenvolvidos no GEOAMB, conforme citado anteriormente. Após a instalação do equipamento era colocado um papelão cobrindo o furo, a fim de minimizar possíveis efeitos de evaporação do líquido percolante (Figuras 5.24 e 5.25).



**Figura 5. 26:**Ensaio de permeabilidade sendo realizado com o permeâmetro Guelph



**Figura 5. 27:**Em destaque, um pedaço de papelão usado para cobrir o furo a fim de minimizar a evaporação do líquido percolante.

A permeabilidade foi obtida através da equação 3.24. Esta equação é usada para ensaios com apenas uma carga. Como foram feitos ensaios com duas cargas, foram calculadas a permeabilidade para cada carga individualmente e depois tirado uma média, assim foi obtida a permeabilidade para cada aterro de acordo com o líquido percolante. Os resultados válidos obtidos pelo método rigoroso (duas cargas hidráulicas) foram empregados para se obter uma estimativa do parâmetro  $\alpha$ . Desta forma, os valores de permeabilidade obtidos pelo método simplificado (médias das duas cargas hidráulicas) foram calculados utilizando-se tanto os valores de  $\alpha$  apresentados no quadro 3.2 quanto os calculados a partir do método rigoroso.

### 5.6.2.. *Ensaio de permeabilidade em laboratório com amostras indeformadas*

Foram realizados ensaios de permeabilidade a carga constante, em permeâmetro de parede flexível (uso de células triaxiais). Neste caso, a carga hidráulica foi ajustada em função da permeabilidade do solo, de forma a se obter valores de permeabilidade em períodos de tempo inferiores a um mês. A carga hidráulica variou de 1,5 m a 2,0 m. Em alguns casos foi necessário a utilização de pressão para aumentar a carga aplicada, sendo neste caso usada uma pressão de 50 kPa, equivalente a 500cm de coluna d'água.

Foram retirados blocos de amostras indeformadas de cada aterro experimental, no período de janeiro a março de 2014. As figuras 5.26 e 5.27 mostram a retirada de algumas amostras indeformadas.



**Figura 5. 29:** Amostra indeformada de solo, sendo retirada de um dos aterros experimentais.

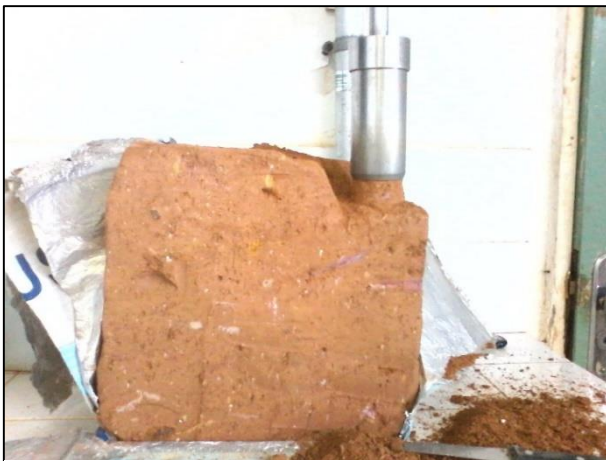


**Figura 5. 28:** Amostra sendo embalada para transporte até o laboratório.

Para a execução dos ensaios de permeabilidade foram moldados corpos de prova (CP) a partir dos blocos indeformados (Figura 5.28). Os corpos de prova foram medidos e pesados e, em geral, apresentaram dimensões aproximadas de 5cm de diâmetro e 10cm de comprimento (Figuras 5.29 e 5.30). O solo excedente do processo de talhamento foi amostrado logo após moldagem do corpo de prova para obtenção da umidade, que foi usada nos cálculos dos índices físicos do CP. Com o intuito de se obter uma melhor homogeneidade nos resultados, os corpos de prova para ensaios com os diferentes permeantes (água e diesel) foram moldados um ao lado do outro. Foram moldados seis CP na parte superior do bloco e quatro CP na parte inferior.



De um modo geral, foram utilizados como permeantes o diesel e a água, como referência. Para as amostras dos aterros das misturas 06 e 07, foram utilizados, além destes percolantes, a gasolina. A gasolina foi utilizada para melhor avaliar estes aterros, visto que estes apresentaram baixo valor de permeabilidade nos ensaios de campo da primeira campanha, conforme se verá adiante, sendo este resultado não esperado. Foram feitos 5 ensaios de permeabilidade com cada fluido permeante, totalizando 10 ensaio por bloco. Para cada fluido, dos 5 ensaios, 3 eram com CPs retirados próximos ao topo e 2 logo abaixo, a cerca de 15 cm do topo. Os ensaios de permeabilidade do solo foram feitos com o auxílio de câmaras para ensaio triaxial (Figura 5.31). A permeabilidade foi calculada com o auxílio da equação para carga constante (Equação 3.17).



**Figura 5. 31:** Corpo de prova sendo moldado no bloco.



**Figura 5. 30:** Corpo de prova sendo medido.



**Figura 5. 32:** Corpo de prova sendo pesado



**Figura 5. 33:** Câmara de ensaio triaxial com o CP para o ensaio de permeabilidade.

### **5.6.3. Aplicação da Modelagem de Matemática**

Existem diversas modelagens matemáticas para estimar a permeabilidade ao líquido de interesse a partir da permeabilidade a água e das propriedades viscosidade e densidade da água e do líquido em análise. A seção 3.1 desta dissertação apresenta algumas formulações constantes na literatura sobre o assunto.

A fim de avaliar o uso de modelagem matemática para previsão da permeabilidade a líquidos orgânicos, foram usadas duas equações: a equação desenvolvida por Oliveira (2001) (Equação 3.6) e a equação desenvolvida por Machado (2014) (Equação 3.12). Os resultados obtidos com as referidas equações foram comparados com os resultados de permeabilidade obtidos nos ensaios em campo e em laboratório.

A equação de Machado (2014) foi escolhida por ter sido desenvolvida empregando-se resultados de laboratório obtidos com o uso de uma gama diversificada de solos, boa parte deles de ocorrência comum na região metropolitana de Salvador.

Como não foi obtido a umidade do solo no momento de cada ensaio de permeabilidade em campo, para utilizar a equação de Machado (2014) foi feito uma estimativa da umidade em cada período de campanha. Para primeira campanha foi considerado a umidade de compactação e o peso específico do solo seco das misturas, ambos obtidos no período de construção dos aterros experimentais; assim foi estimada o grau de saturação para cada mistura. Para a segunda campanha, foi medida a umidade dos aterros no período de realização dos ensaios; o peso específico do solo seco das misturas foi considerado uma média dos valores obtidos em laboratório para os CPs talhados a partir de amostras indeformadas coletadas no mesmo período de realização dos ensaios da segunda campanha.

## **5.7. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS**

Para identificação do aterro experimental com melhor desempenho na contenção de líquidos orgânicos, foram estabelecidos diferentes critérios. A permeabilidade intrínseca (Equação 3.6) deduzida para solos granulares por Nutting (1930) foi um dos critérios escolhidos



para avaliação do desempenho das camadas de solo compactadas. Conforme discutido anteriormente, o uso do termo intrínseco não é adequado quando o solo é argiloso, visto que está deixa de ser uma propriedade somente inerente ao solo. Para diferenciá-lo da permeabilidade intrínseca –  $K$ , ao utilizar a equação de Nutting em solos argilosos, o termo usado será  $K^*$ . Com isso, o primeiro critério de avaliação dos aterros experimentais foi o valor médio de  $K^*$ , obtido considerando os diferentes fluidos empregados nos ensaios realizados. Os aterros que apresentaram os menores valores médios de  $K^*$  para os líquidos orgânicos foram considerados com bom desempenho.

O segundo critério de avaliação foi a variação do valor de  $K^*$  nas duas campanhas de ensaios em campo. Os aterros com valores de  $K^*$  mais estáveis no tempo foram considerados como de melhor desempenho. A variação dos valores de permeabilidade com o tempo representaria os efeitos das intempéries na bacia de contenção. Identificar o aterro experimental com a menor variação no valor de permeabilidade ao longo do tempo, indica qual solo sofre menos as influências das intempéries. A variação dos valores de permeabilidade foi obtida pela razão entre os valores médios de  $K^*$  da primeira e da segunda campanha.

O terceiro critério foi a adequação das camadas de solo compactadas para a confecção do aterro, verificada a partir de simulações simplificadas dos processos de infiltração em campo. A curva de infiltração descreve a evolução do volume infiltrado em função do tempo de infiltração e foram calculadas com a utilização da equação de Philip (1969) (Equação 3.39). Para usar a equação de Philips, os valores de sucção inicial do solo para os líquidos orgânicos, foram estimados com base na curva de retenção obtida para a água, por escalonamento capilar (Equação 5.6). O valor da permeabilidade do solo empregada nas simulações de infiltração foi obtida para o diesel, escolhido aqui como o líquido orgânico base para a avaliação de desempenho das camadas. As letras  $a$ ,  $w$  e  $o$  representam as fases ar, água e óleo, respectivamente

$$\frac{\psi_{ow}}{\sigma_{ow}} = \frac{\psi_{ao}}{\sigma_{ao}} = \frac{\psi_{aw}}{\sigma_{aw}} \quad [5.6]$$

### 5.7.1. Ensaio para determinação das curvas de retenção do solo

Foram empregadas duas técnicas para obtenção da curva de retenção à água das misturas de solo: o papel-filtro e a câmara de sucção, em um procedimento modificado inicialmente proposto por Fourie e Papageorgian (1995) e implementado por Dourado e Machado (2001).

O método do papel-filtro é uma técnica que tem sido utilizada com sucesso para obtenção dos trechos de maiores valores de sucção (acima de 500 kPa) de curvas de retenção de solos. A técnica pode ser utilizada com medidas de sucção matricial ou total. O método consiste em colocar um pedaço de papel-filtro em um recipiente hermético com uma amostra de solo até que seja estabelecido o equilíbrio de sucção entre o papel e a amostra. Caso o seja colocado em contato direto com o solo a sucção obtida é a sucção matricial, caso contrário a sucção medida será a sucção total. Neste trabalho foram realizadas medidas de sucção total. A sucção do papel-filtro e da amostra foi calculada utilizando-se as curvas de calibração do papel-filtro. O papel-filtro utilizado neste trabalho foi o Whatman nº 42 e as equações de calibração adotadas foram as propostas por Chandler *et al* (1992).

$$w > 47 \rightarrow S = 10^{(6,05 - 2,48 \log(w))} \quad [5.7]$$

$$w \leq 47 \rightarrow S = 10^{(4,84 - 0,0622(w))} \quad [5.8]$$

Onde:  $w$  = é o teor de umidade gravimétrica do papel-filtro [%] e  $S$  = é a Sucção em kPa.

As amostras de solo usadas nos ensaios de sucção foram retiradas dos blocos indeformados das misturas. Foram moldados pequenos Corpos de Prova (CP) com o auxílio de um cilindro, cujas dimensões internas são aproximadamente, 4cm de diâmetro e 3,8cm de altura (Figuras 5.32 e 5.33).



**Figura 5. 35:** CP do ensaio de sucção sendo talhado no bloco indeformado.



**Figura 5. 34:** O cilindro usado na talhagem da amostra

Cada amostra teve sua massa medida. O solo excedente do processo de talhagem foi amostrado logo após moldagem do CP para obtenção da umidade. Estas informações foram usadas para determinação dos índices físicos iniciais das amostras (teor de umidade, grau de saturação, índice de vazios, pesos específicos). Determinado o teor de umidade e o grau de saturação inicial para cada CP, foi determinada a quantidade de água a ser adicionada ou retirada das amostras para que fossem atingidos os graus de saturação que cada CP deveria ter para obtenção de oito pontos da curva de retenção do solo.

Água foi retirada, e, em alguns casos, acrescentada, para que os CPs atingissem o grau de saturação desejado (10, 20, 30, 40, 55, 70, 85 e 100%), de forma que a curva de retenção obtida segue uma trajetória mista. Cada CP foi colocado em uma vasilha plástica, acrescentando-se espaçadores de PVC e o papel-filtro; a vasilha foi fechada e lacrada com fita adesiva (Figura 5.34). O conjunto (vasilha, CP e papel-filtro) foi colocado em uma caixa de isopor numa sala com temperatura mantida em torno de 20°C, para estabilizar por um período de 30 dias. Esse processo foi realizado para cada mistura.



**Figura 5. 36:** As oito amostras de solos para obtenção de oito pontos da curva característica do solo para uma mistura.

Após alcançado o equilíbrio, os recipientes foram abertos e os papéis-filtro foram removidos rapidamente da amostra, com o auxílio de uma pinça, e colocados em uma cápsula com massa conhecida e pesadas usando uma balança com resolução de 0,001g. Em seguida a cápsula foi colocada em uma estufa com temperatura de 100°C, permanecendo na estufa por 24 horas para efetuar a secagem.

Após 24 hora, a capsula com o papel-filtro foi retirada da estufa e colocada em um dessecador com sílica gel para esfriar sem reter água da atmosfera, e posteriormente foi pesada para determinar sua nova massa. O mesmo procedimento foi feito para os corpos de prova. Através desses dados o teor de umidade do papel-filtro foi calculado. Com o teor de umidade do papel-filtro e a correspondente equação de calibração (equações 5.2 e 5.3) foi obtida a sucção do papel-filtro, considerada igual à existente na amostra. Esse valor de sucção e o teor de umidade da amostra (ou grau de saturação) foram utilizados para a construção da curva de retenção.

Para a realização do ensaio de sucção pelo método desenvolvido por Dourado e Machado (2001) foram talhadas amostras no bloco indeformado com o auxílio de anéis metálicos (Figura 5.35).

A amostra de solo foi colocada sobre o disco cerâmico de alto valor de entrada de ar (15 BAR), contido na câmara de ensaio (Figura 5.36) e em seguida foi acrescentado água entre a câmara e o solo contido no anel para que o mesmo atingisse condições próximas à da saturação.



**Figura 5. 38:** Amostra de solo para ensaio de sucção.



**Figura 5. 37:** Solo na câmara de ensaio de sucção.

Após um período de aproximadamente cinco horas, o volume de água não absorvido pela amostra foi removido. Em seguida, a câmara foi fechada e uma pressão de ar de cerca de 600 kPa foi aplicada no topo da câmara (Figura 5.37).



**Figura 5. 39:** Câmara do ensaio de sucção fechada com aplicação de ar aplicada no topo.

Como todos os registros se encontram fechados no início do ensaio, ocorre um equilíbrio entre o valor da pressão da linha de saída de água da câmara e o valor da pressão de ar aplicada no topo da câmara, valores estes que são acompanhados pelo sistema e de aquisição de dados. Após o equilíbrio das pressões (entrada e saída) o sistema é aberto para a drenagem de uma determinada quantidade de água do corpo de prova. Após drenagem do volume estabelecido, o sistema é fechado e um novo estágio de equilíbrio é atingido. Os novos valores de pressão de

água vão ficando gradualmente menores devido ao aumento da sucção do solo, pela perda gradual de água.

O ensaio então é composto de diversas etapas, sendo que cada etapa é iniciada após atingido o equilíbrio das pressões, decorrente da drenagem da fase anterior. Em cada etapa é conhecido o volume drenado, e a sucção, quando as pressões se estabilizam, calculada pela diferença entre as pressões de ar e água.

Ao término da última etapa a câmara é aberta, a amostra é retirada e pesada, sendo em seguida colocada em estufa, para se determinar a quantidade de água existente no último estágio de sucção. O volume de água na amostra, relativo a cada estágio de sucção, é obtido somando o volume de água da etapa posterior (iniciando com o valor obtido em estufa) com volume drenado. Calcula-se a partir daí a umidade da amostra referente a cada etapa. De posse destes resultados e dos valores de sucção é efetuada a montagem da curva de retenção de água.

O ajuste da curva de retenção de água do solo foi obtida pela aplicação da equação de Van Genuchten (1980). A relação funcional estabelecida por Van Genuchten para os parâmetros de umidade volumétrica e sucção é dada pela equação 5.9.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s + \theta_r}{(1 + (\alpha_1 S)^n)^m} \quad [5.9]$$

Onde  $S$  é a sucção [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ ];  $\theta$  é teor de umidade volumétrica dos corpos de prova [-];  $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual [-];  $\theta_s$  é a umidade de saturação [-];  $n$ ,  $m$  e  $\alpha_1$  são parâmetros de ajuste, sendo  $m=1/(n-1)$ .

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. GRAU DE COMPACTAÇÃO E DENSIDADE DOS ATERROS EXPERIMENTAIS

A tabela 6.1 apresenta os valores de densidade ( $\rho_d$ ) e grau de compactação (GC) para energia do Proctor Modificado, obtidos para os aterros experimentais. Estes resultados são apresentados por camada e mistura. Os valores de GC foram obtidos com a umidade determinada em laboratório e massa específica seca máxima obtidas pela curva de compactação das misturas. Como o controle de compactação foi realizado em triplicada, na tabela 6.1 os valores apresentados são valores médios.

**Tabela 6. 1:** Grau de compactação por camada dos aterros experimentais.

	$\rho_{dm\acute{a}x}$	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		Camada 5		Média	
		$\rho_d(\text{campo})$	GC	$\rho_d(\text{campo})$	GC	$\rho_d(\text{campo})$	GC	$\rho_d(\text{campo})$	GC	$\rho_d(\text{campo})$	GC	$\rho_d(\text{campo})$	GC
	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	g/cm <sup>3</sup>	%	g/cm <sup>3</sup>	%	g/cm <sup>3</sup>	%	g/cm <sup>3</sup>	%	g/cm <sup>3</sup>	%
Mistura 01	1,936	1,824	94,2	1,882	97,2	1,805	93,3	1,870	96,6	1,781	92,0	<b>1,820</b>	<b>94,7</b>
Mistura 02	1,966	1,849	94,1	1,885	95,9	1,868	95,0	1,886	95,9	-	-	<b>1,872</b>	<b>95,2</b>
Mistura 03	1,998	1,913	95,7	1,962	98,2	1,950	97,6	1,944	97,3	-	-	<b>1,942</b>	<b>97,2</b>
Mistura 04	2,013	1,960	97,4	1,979	98,3	1,943	96,5	1,990	98,9	-	-	<b>1,968</b>	<b>97,8</b>
Mistura 05	2,008	1,756	87,5	1,977	98,4	1,935	96,3	2,052	102,2	-	-	<b>1,930</b>	<b>96,1</b>
Mistura 06	1,964	1,801	91,7	1,856	94,5	1,758	89,5	1,925	98,0	1,961	99,8	<b>1,860</b>	<b>94,7</b>
Mistura 07	2,018	1,911	94,7	1,916	95,0	1,955	96,9	1,998	99,0	2,005	99,4	<b>1,957</b>	<b>97,0</b>

O valor médio do GC das misturas ficou acima de 95%, com exceção dos aterros das misturas 01 e 06, que obtiveram o GC um pouco abaixo do recomendado na proposta de faixa granulométrica (94,7 %).

A tabela 6.2 apresenta os valores de umidade ótima de cada mistura e a umidade obtida em campo, durante a construção dos aterros, além dos valores de umidade obtidos durante os ensaios de permeabilidade na segunda campanha de campo.

**Tabela 6. 2:** Umidade dos aterros.

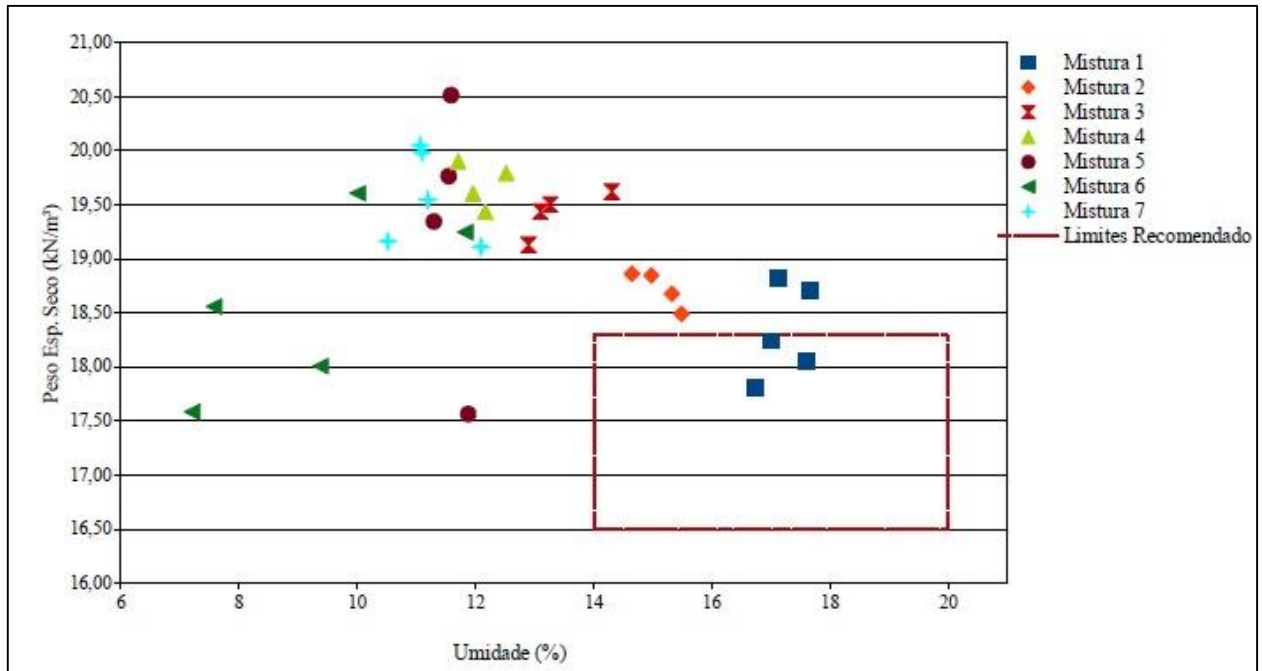
	Umidade (%)						
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Mistura 5	Mistura 6	Mistura 7
Umidade ótima de compactação	12,5	11,1	10,3	10,6	10,2	9,4	10,2'
Umidade obtida durante construção dos aterros	17,6	15,1	13,4	12,1	11,6	9,0	11,2
Desvio absoluto da umidade de campo em relação a umidade ótima	5,1	4,0	3,1	1,5	1,4	-0,4	1,0
Umidade obtida durante a 2ª campanha	13,4	9,7	9,6	7,5	7,9	7,0	7,0
Desvio absoluto da umidade da 2ª campanha em relação a umidade ótima	0,8	-1,4	-0,7	-3,1	-2,2	-2,4	-3,2

Como pode ser observado na tabela 6.2 a umidade de compactação ficou acima da ótima mais que a variação aceitável de 3%, para as misturas 01, 02 e 03. Enquanto, nas demais misturas estão dentro da variação aceitável. A diferença apresentada na umidade de compactação para umidade ótima foi resultado da falha na caracterização do solo Granulito, devido a amostragem do solo, cuja as causas já foram relatadas anteriormente. A umidade muito acima da ótima é um tema controverso, pois ao mesmo tempo que aumenta-se o índice de vazios, obtém-se uma estrutura mais dispersa, o que facilita a redução dos micro-agregados (BENSEN e DANIEL, 1990) essa redução contribui para a baixa permeabilidade.

A recomendação de Machado (2011) para a construção de bacias de contenção com solos que atendam a proposta de faixa granulométrica ótima, é que a umidade de compactação esteja acima 1% da umidade ótima em valores absoluto, aceitando uma variação de 2% em torno deste valor.

Vale ressaltar ainda que os valores de umidade ótima empregados estão fora da faixa proposta por Machado (2011), de 14% a 20%. Também foi recomendado que as barreiras minerais deverão ser compactadas na energia do Proctor Modificado e deverão apresentar valores densidade seca variando de 1,65 a 1,83 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto os aterros das misturas de solo não atenderam estas recomendações. Entretanto, considerando-se o desempenho apresentado pelas misturas em campo, conforme se verá adiante, demonstra a necessidade de ajuste na faixa de valores sugerida para estes parâmetros. A figura 6.1 compara os valores obtidos para as misturas e os valores propostos anteriormente para a confecção de barreiras minerais.





**Figura 6. 1:** Umidade de compactação e peso específico seco obtido nos aterros experimentais, a área delimitada representa as recomendações para os respectivos parâmetros

## 6.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS

### 6.2.1 Permeabilidade dos Aterros Experimentais

A tabela 6.3 apresenta os resultados de permeabilidade obtidos com o permeâmetro Guelph na primeira campanha. Na tabela 6.4 estão os resultados da segunda campanha de ensaios de campo.

**Tabela 6. 3:** Permeabilidade dos aterros para os líquidos água, diesel, biodiesel e gasolina – Primeira campanha.

Permeabilidade (cm/s)								
Líquido Permeante	Fração de Finos	45 %	40%	37%	35%	33%	18%	27%
	Nº de ensaios	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Mistura 5	Mistura 6	Mistura 7
Água	1	1,22E-07	1,43E-06	5,83E-07	2,61E-07	9,32E-08	1,72E-05	2,80E-05
	2	1,83E-06	3,29E-07	6,02E-07	1,23E-07	1,52E-07	1,19E-06	3,47E-06
Diesel	1	3,22E-07	3,47E-07	4,86E-07	3,22E-07	5,07E-07	9,43E-06	7,90E-07
	2	5,66E-07	2,82E-07	5,09E-07	4,95E-07	2,15E-06	5,89E-06	2,69E-06
Gasolina	1	2,31E-06	1,09E-06	1,38E-06	2,63E-06	2,48E-06	3,22E-06	4,00E-07
	2	3,00E-06	1,25E-06	3,13E-06	1,74E-06	1,57E-06	7,58E-06	1,07E-06
Biodiesel	1	3,98E-07	8,53E-06	1,27E-07	7,17E-07	1,46E-07	5,30E-06	1,16E-06
	2	2,40E-07	1,36E-07	7,46E-08	1,03E-06	9,78E-08	3,48E-06	1,27E-06

**Tabela 6. 4:** Permeabilidade dos aterros para os líquidos água, diesel, biodiesel e gasolina – Segunda campanha.

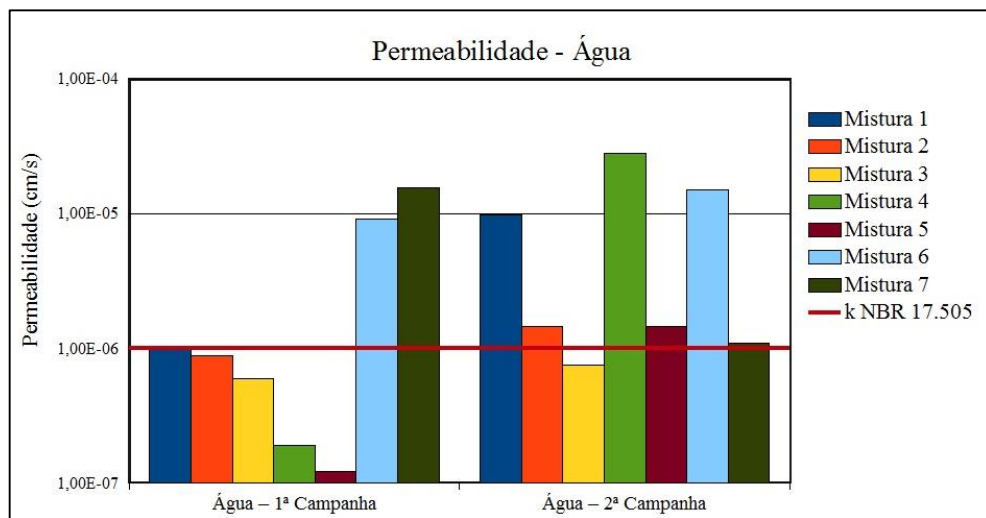
Permeabilidade (cm/s)								
Líquido Permeante	Fração de Finos	45 %	40%	37%	35%	33%	18%	27%
	Nº de ensaios	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Mistura 5	Mistura 6	Mistura 7
Água	1	1,48E-06	1,39E-06	9,48E-07	1,94E-06	2,41E-06	1,40E-05	1,38E-06
	2	1,83E-06	1,51E-06	5,09E-07	5,46E-05	4,93E-07	1,63E-05	8,04E-07
Diesel	1	1,47E-06	3,48E-07	3,56E-06	1,90E-06	2,85E-06	1,83E-05	8,22E-07
	2	3,38E-06	1,85E-06	2,02E-06	1,72E-05	1,89E-06	3,37E-05	6,87E-07
Gasolina	1	2,40E-06	7,27E-05	1,76E-06	8,81E-05	3,32E-06	2,82E-05	3,58E-06
	2	7,24E-06	2,62E-06	2,21E-07	5,56E-05	7,60E-06	6,69E-05	5,22E-06
Biodiesel	1	2,11E-06	5,32E-06	2,37E-06	1,23E-06	4,36E-06	1,10E-05	1,12E-05
	2	7,92E-06	6,99E-07	8,63E-07	4,01E-06	4,14E-06	4,79E-06	1,01E-05

Os valores de permeabilidade apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4 e figuras 6.2 a 6.5 foram obtidos com a aplicação do método simplificado. Como cada ensaio foi feito com duas cargas, foi calculada a permeabilidade com cada carga e posteriormente calculada a média dos valores obtidos.

Na figura 6.2 são evidenciados os desempenhos dos aterros para a água como líquido percolante.

Como mostrado na Figura 6.2, na primeira campanha, o desempenho dos aterros das misturas 1, 2, 3, 4 e 5 (pertencentes a faixa granulométrica proposta) foi considerado

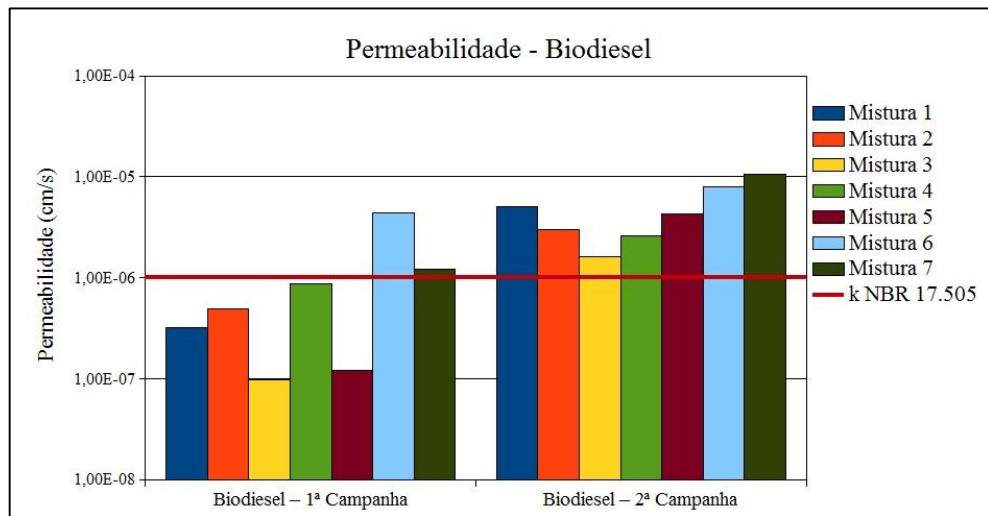
satisfatório, apresentando permeabilidade na ordem de  $10^{-7}$  cm/s. Estes aterros apresentaram valores de permeabilidade cerca de 10 vezes menores que nos aterros das misturas 6 e 7. Na segunda campanha a eficiência na retenção de água reduziu, a permeabilidade aumentou, ficando na ordem de  $10^{-6}$  cm/s, para os aterros das misturas 1, 2, 3 e 5. Apesar de ter aumentado a permeabilidade, estes valores ainda podem ser considerados como satisfatórios, principalmente se considerarmos o tempo necessário para que o líquido percolante atinja uma profundidade de 1 metro, considerada como a espessura da camada compactada, conforme se verá adiante. O aterro da mistura 4 obteve valor de permeabilidade na ordem de  $10^{-5}$  cm/s. Os aterros das misturas 6 e 7 mantiveram o valor de permeabilidade similar ao da primeira campanha.



**Figura 6. 2:** Permeabilidade a água. Primeira e segunda campanha.

Como mostra a figura 6.2, na segunda campanha a eficiência na retenção de água reduziu, a permeabilidade aumentou, ficando na ordem de  $10^{-6}$  cm/s, para os aterros das misturas 1, 2 e 5. Apesar de ter aumentado a permeabilidade, estes valores não podem ser considerados como ruins, principalmente se considerarmos o tempo necessário para que o líquido percolante atinja uma profundidade de 1 metro, considerada como a espessura da camada compactada, conforme se verá adiante. O aterro da mistura 4 obteve valor de permeabilidade na ordem de  $10^{-5}$  cm/s.

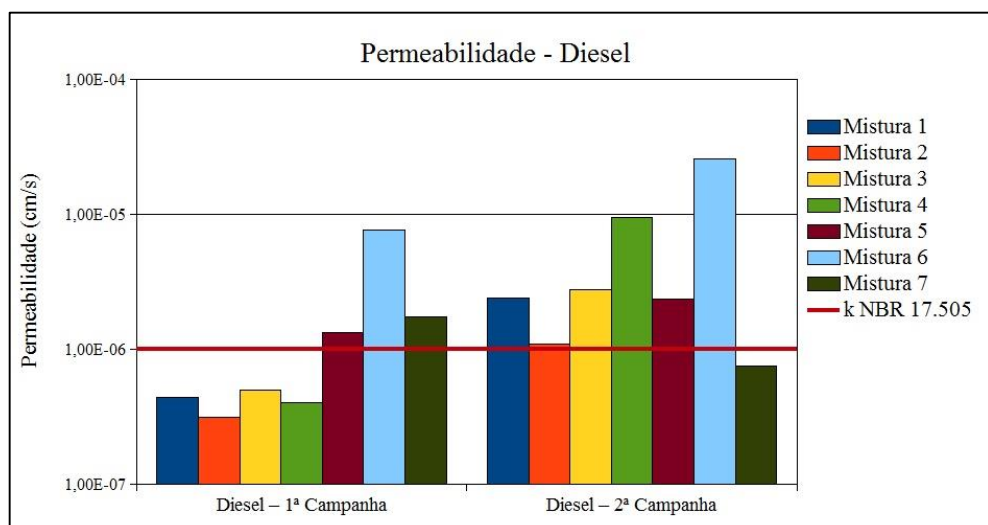
Na figura 6.3 são evidenciados o desempenho dos aterros para o biodiesel como líquido percolante.



**Figura 6. 3:** Permeabilidade ao biodiesel. Primeira e segunda campanha.

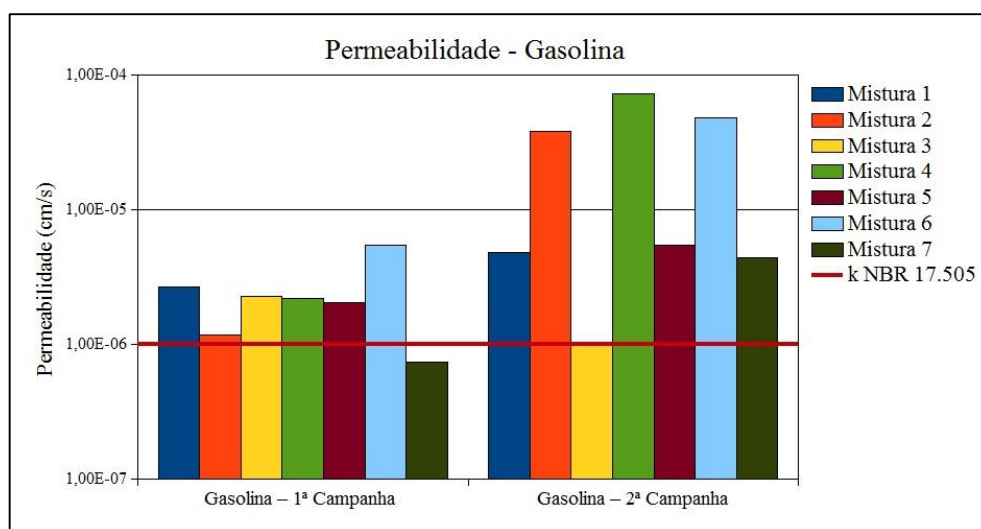
Como mostrado na Figura 6.3, os aterros experimentais ao serem percolados pelo biodiesel, apresentaram desempenho similar ao desempenho quando o líquido percolado foi à água. Os aterros de Mistura 6 e 7 também, apresentaram valores de permeabilidade cerca de 10 vezes maiores que os aterros das misturas 1, 2, 3, 4 e 5. Na segunda campanha de ensaios os aterros tiveram aumento da permeabilidade ao biodiesel, no entanto, com pouca variação nos valores de permeabilidade.

Na figura 6.4 são evidenciados o desempenho dos aterros para o diesel como líquido percolante.



**Figura 6. 4:** Permeabilidade ao diesel. Primeira e segunda campanha.

Como mostra na figura 6.4, ao usar o diesel como líquido percolante, os aterros das misturas 1, 2, 3 e 4 apresentaram melhor desempenho, com a permeabilidade inferior a  $10^{-6}$  cm/s. Quanto aos aterros das misturas 5, 6 e 7 apresentaram valores de permeabilidade acima  $10^{-6}$  cm/s. Na segunda campanha de ensaios todos os aterros aumentaram o valor de permeabilidade com exceção do aterro de mistura 7 que obteve permeabilidade inferior a  $10^{-6}$  cm/s. Na figura 6.5 são evidenciados o desempenho dos aterros para a gasolina como líquido percolante.



**Figura 6. 5:** Permeabilidade a gasolina. Primeira e segunda campanha.

Como mostrado na figura 6.5, quando o líquido percolante foi a gasolina os valores de permeabilidade, na primeira campanha, foram da ordem de  $10^{-6}$  cm/s para todos os aterros exceto o da mistura 7, no qual o valor de permeabilidade ficou da ordem de  $10^{-7}$  cm/s. Na segunda campanha os valores de permeabilidade à gasolina aumentaram de foram bastante variados. Com exceção da mistura 3, que reduziu a permeabilidade.

O limite de permeabilidade (linha vermelha –  $k < 10^{-6}$  cm/s) apresentado nas figuras de 6.2 a 6.5 refere-se a permeabilidade à água, recomendado pela resolução da ABNT, NBR 17.505 como valor que garante a segurança ambiental. No entanto, pode ser claramente visto na figura 6.2 que a permeabilidade referente à água não serve como padrão para avaliar a eficiência de bacias de contenção de líquidos orgânicos. Comparando-se os resultados da primeira campanha, enquanto a permeabilidade deu valores menor ou igual à  $10^{-6}$  cm/s para a gasolina os valores foram maiores que o padrão da NBR.

Os valores de permeabilidade à gasolina e ao diesel da mistura 7 são considerados baixos, estes resultados foi inesperado, visto que a mistura 7 não pertence a faixa

granulométrica ótima. Contudo, ao analisar estes resultados com a pluviosidade no dia de realização dos ensaios de permeabilidade tendo a gasolina e o diesel como permeante para o aterro de mistura 7, foi observado que tais dias foram classificados, segundo os critérios já apresentados, como *dias chuvosos*. Ou seja, o bom desempenho apresentado por este aterro, foi obtido provavelmente devido à hierarquia de molhabilidade do solo, como o mesmo estava com o grau de saturação à água alto, a gasolina e o diesel não conseguiram percolar com facilidade pelo solo da mistura 7.

Ao analisar as figuras 6.2 a 6.5 é evidente que os resultados da primeira campanha apresentam valores de permeabilidade mais baixos do que os valores obtidos na segunda campanha, em quase a totalidade dos ensaios realizados e para todos os fluidos empregados. Isso foi certamente influenciado pela umidade do solo. Na primeira campanha realizada logo após o término da construção dos aterros, o solo possuía valores umidade entre 9% a 17,6% (Tabela 6.2) para os diversos aterros. Além disso, os ensaios foram feitos no período chuvoso, que compreende de abril a julho. Já a segunda campanha foi realizada, após seis meses de construção dos aterros e no período seco. A tabela 6.2 mostra que a umidade ficou entre 7% a 13,4 %. Verificou-se que após o solo ser exposto a diversos ciclos de umedecimento e secagem, apareceram trincas no solo devido ao ressecamento dos aterros.

O surgimento de trincas em todos os aterros, com exceção do aterro da mistura 6, que o solo foi classificado como não plástico. O surgimento de trincas altera a estrutura do solo, podendo levar a caminhos preferenciais para o fluxo. O aterro da mistura 1 foi o que apresentou as maiores trincas, consequência provavelmente da compactação em umidade acima da ótima e de seu maior conteúdo de argila. As figuras 6.6 e 6.9 mostram alguns exemplos das trincas observadas em campo.





**Figura 6. 7:** Trincas que surgiram no aterro de mistura 1. Fotos tiradas no mês de outubro de 2013



**Figura 6. 8:** Em evidência uma trinca no aterro de mistura 1. Fotos tiradas no mês de outubro de 2013



**Figura 6. 6:** Fotos tiradas no mês de outubro de 2013

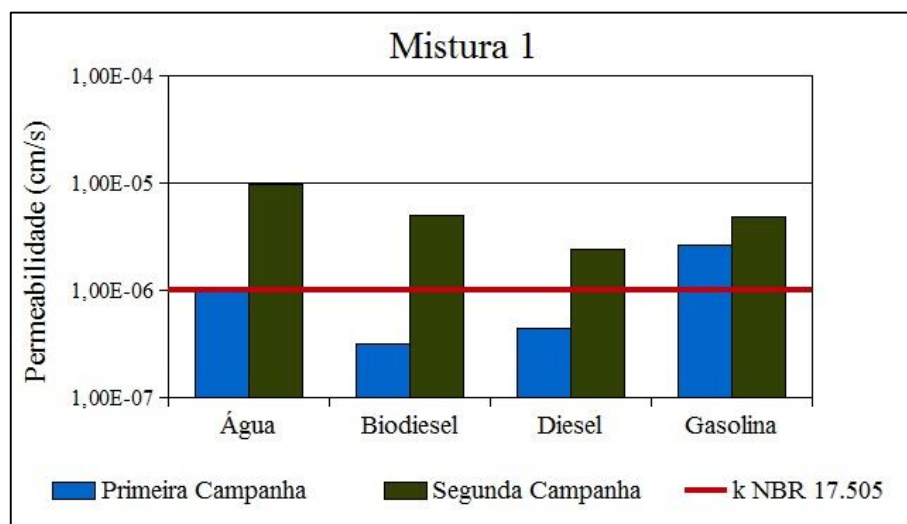


**Figura 6. 9:** Foto do aterro de mistura 4, tirada no mês de outubro de 2013

Em solos argilosos, a perda de umidade contribui para o surgimento das trincas. Segundo Santos (1975) as propriedades dos solos argilosos como a plasticidade, resistência, compactação, entre outras, são afetadas por variações no seu conteúdo de água. Comparando-se o desempenho dos aterros experimentais neste aspecto, pode-se dizer que a menor quantidade de trincas foi observada no aterro da mistura 6, sendo este o que possui a menor quantidade de argila, cerca de 12%. Contudo, mesmo o aterro da mistura 06 apresenta de forma clara um aumento da permeabilidade com a redução da umidade e pela ação dos agentes intempéricos. Sendo assim, é possível afirmar que a umidade do solo, que naturalmente é influenciada pelas chuvas, afetou o desempenho dos aterros experimentais na contenção de líquidos orgânicos.

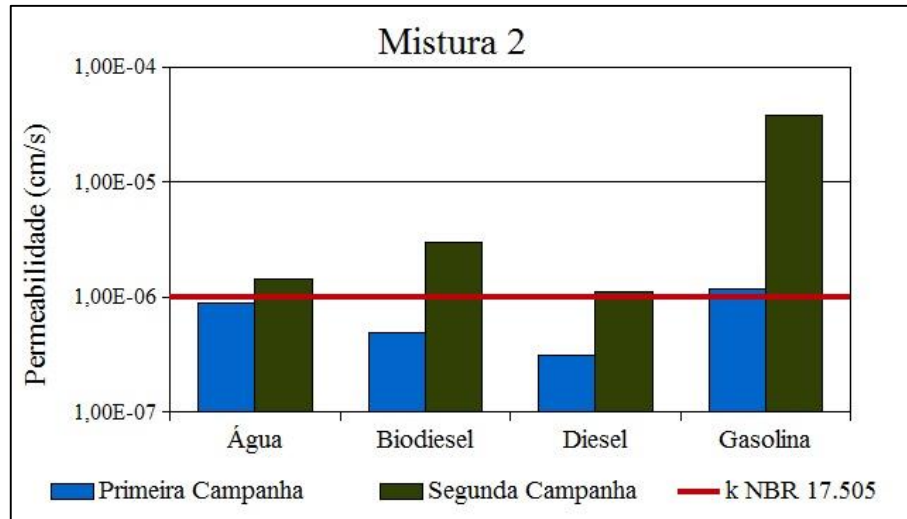
Os valores de permeabilidade maiores quando o líquido percolante foi a gasolina (na ordem de  $10^{-06}$  cm/s na primeira campanha e  $10^{-05}$  cm/s na segunda campanha), nos aterros das misturas que atendem a faixa granulométrica ótima, pode ter sido motivado pela maior mobilidade deste líquido em comparação aos demais líquidos orgânicos usados nesta pesquisa. No entanto, vale ressaltar que, apesar de a mobilidade ser menor para os líquidos orgânicos em comparação a mobilidade da água, o que poderia resultar em uma permeabilidade menor ao serem usados os líquidos orgânicos como permeante. Contudo, isto não ocorre devido a menor interação destes fluidos com os solos argilosos, em função de sua menor constante dielétrica. Isso foi constatado por diversos pesquisadores como Cardoso (2011), Amorim Jr. (2007), Oliveira (2001), entre outros.

As figuras 6.10 a 6.16 apresentam o desempenho de cada aterro para todos os líquidos percolantes para as duas campanhas de ensaios.

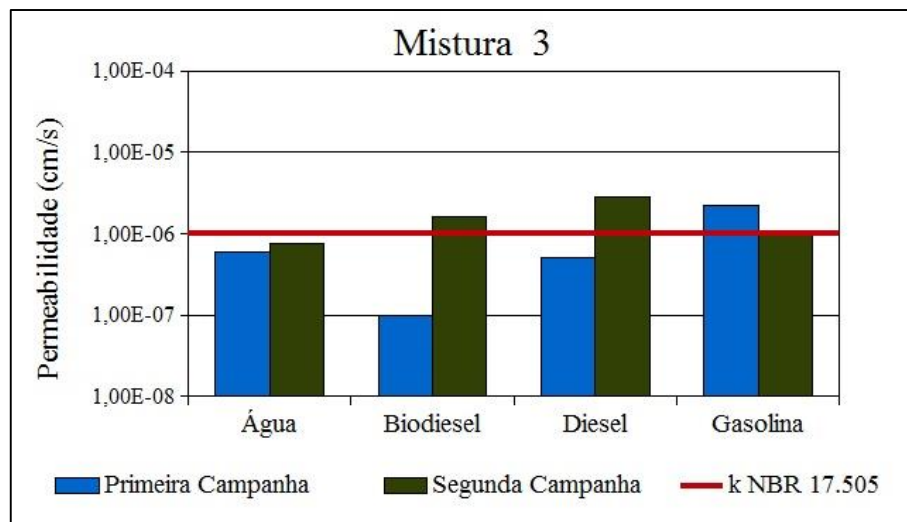


**Figura 6. 10:** Permeabilidade da Mistura 1 para todos os líquidos percolante. Primeira e Segunda campanha.

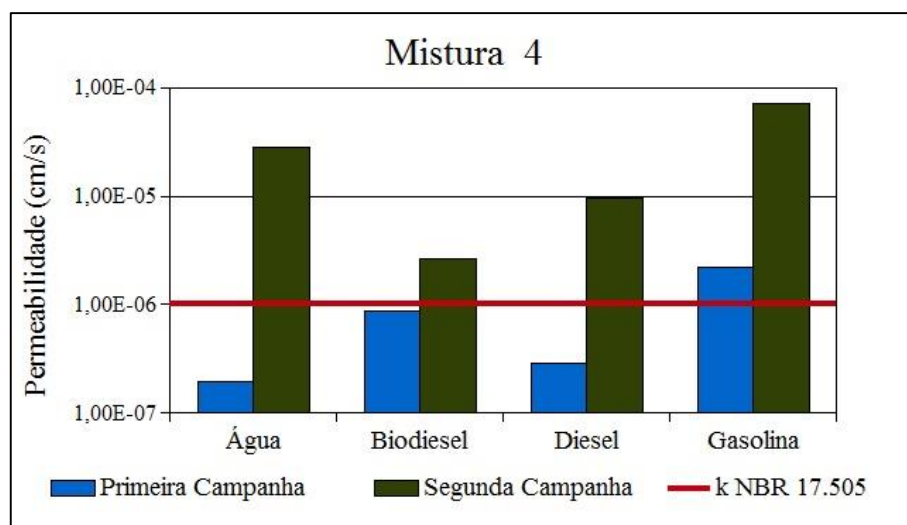




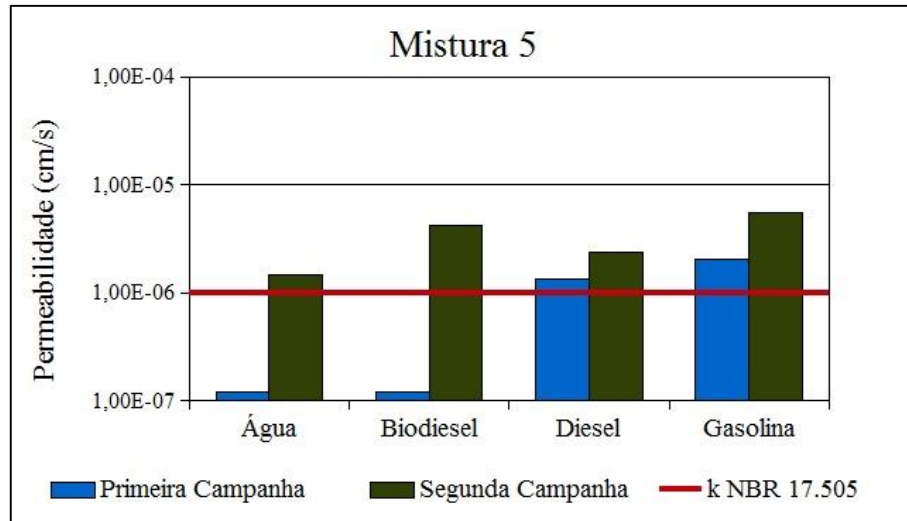
**Figura 6. 11:** Permeabilidade da Mistura 2 para todos os líquidos percolante. Primeira e Segunda campanha.



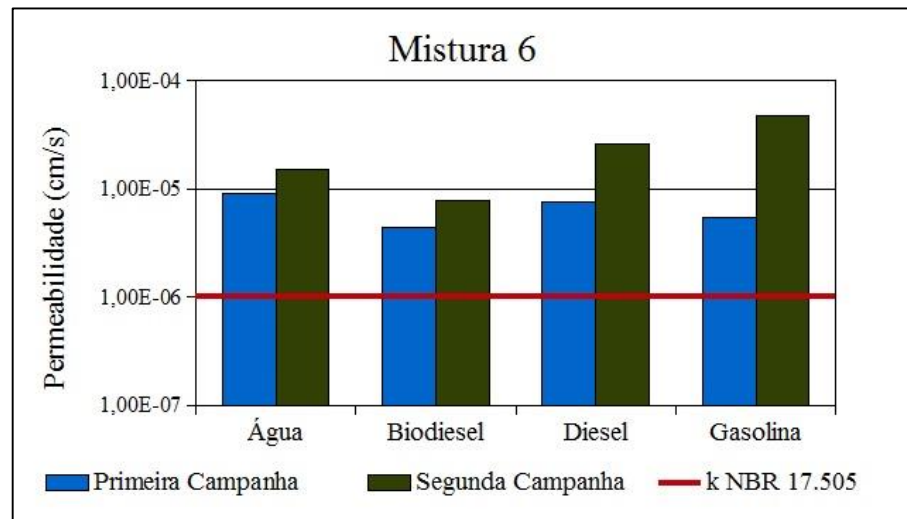
**Figura 6. 12:** Permeabilidade da Mistura 3 para todos os líquidos percolante. Primeira e Segunda campanha.



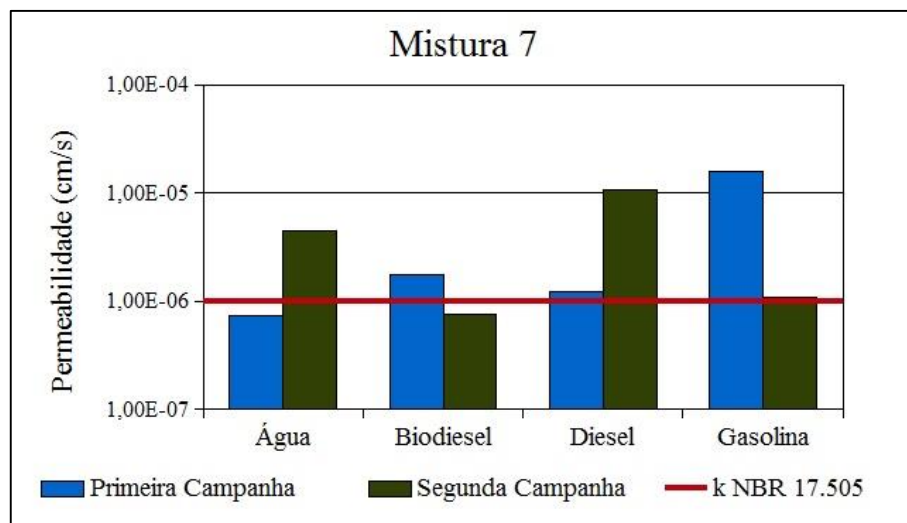
**Figura 6. 13:** Permeabilidade da Mistura 4 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha.



**Figura 6. 14:** Permeabilidade da Mistura 5 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha.



**Figura 6. 15:** Permeabilidade da Mistura 6 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha.

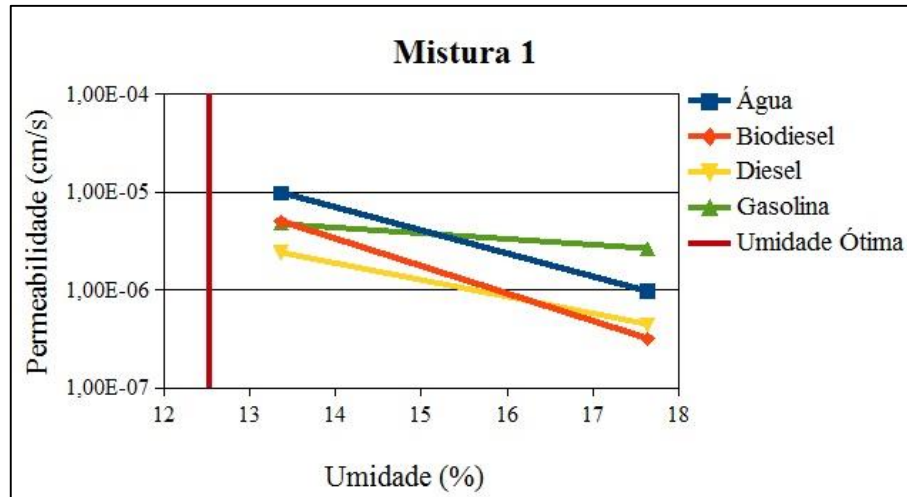


**Figura 6. 16:** Permeabilidade da Mistura 7 para todos os líquidos percolantes. Primeira e Segunda campanha.

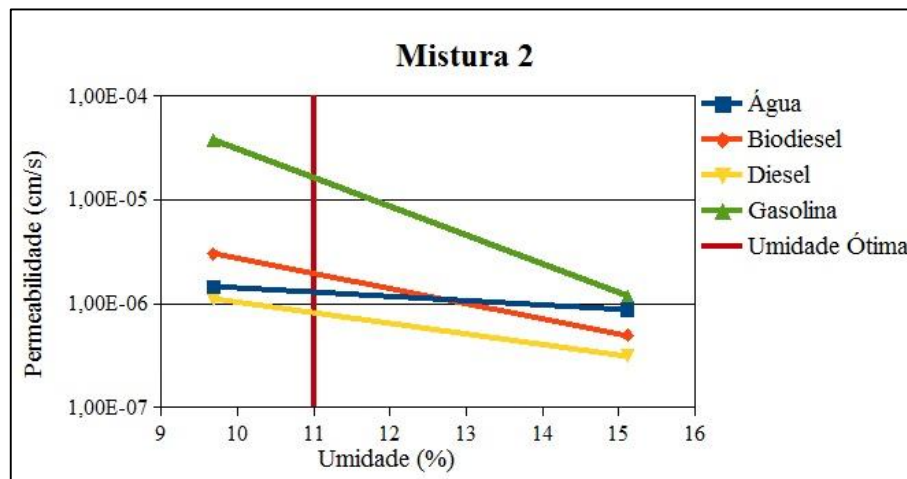
Para o biodiesel, como líquido percolante, o desempenho dos aterros das misturas 1 a 6 apresentaram valores de permeabilidade da ordem  $10^{-6}$  cm/s e da ordem de  $10^{-5}$  cm/s para o aterro da mistura 7. Ao utilizar o diesel como líquido percolante o desempenho dos aterros foi similar ao desempenho com biodiesel para os aterros das misturas 1 a 6, entretanto para o aterro da mistura 7 o desempenho foi melhor, com valores de permeabilidade da ordem de  $10^{-7}$  cm/s. Quando utilizada a gasolina como líquido percolante, os aterros apresentaram grande variação no desempenho, quando comparado com o desempenho da primeira campanha. Os aterros das misturas 1, 5 e 7 apresentaram valores de permeabilidade da ordem de  $10^{-6}$  cm/s, sendo obtidos valores da ordem de  $10^{-5}$  cm/s para os aterros das misturas 2, 3 e 6. Já o aterro da mistura 3 apresentou o melhor desempenho, com valores de permeabilidade na ordem de  $10^{-7}$  cm/s.

Levando em consideração o critério da NBR 17.505 que considera adequado a bacia de contenção com permeabilidade à água menor ou igual a  $1 \times 10^{-6}$  cm/s (linha vermelha nos gráficos das figuras 6.10 a 6.16). Na segunda campanha de ensaios apenas as misturas 3 e 7 obtiveram valores de permeabilidade menor que  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, a mistura 3 para permeabilidade à água (Figura 6.12) e a mistura 7 para permeabilidade à diesel (Figura 6.16). No entanto como já foi mencionado este critério não se mostra adequado, visto que o ideal é que a bacia de contenção retenha o líquido orgânico, em eventual vazamento, tempo suficiente para que as medidas de contingência sejam realizadas.

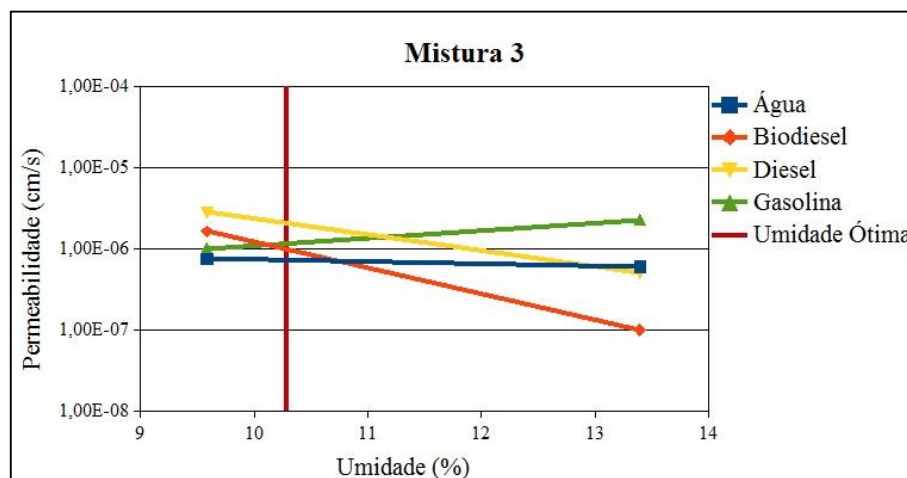
As figuras 6.17 a 6.23 apresentam os gráficos da permeabilidade versus o teor de umidade do solo dos aterros. Na primeira campanha, a umidade nos aterros foi a umidade de compactação. Na segunda campanha a umidade foi medida no período de realização dos ensaios. A tabela 6.2, apresentada anteriormente, contém o valor de umidade ótima dos aterros, os valores obtidos em campo, durante a construção dos aterros e a umidade durante os ensaios na segunda campanha. A linha vermelha vertical nos gráficos indica a umidade ótima de compactação de cada mistura.



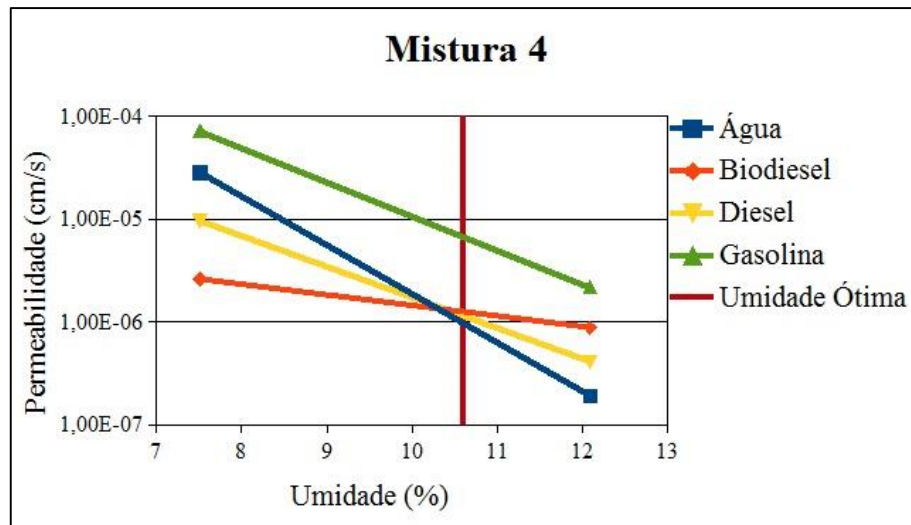
**Figura 6. 17:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 1 em função da umidade do solo.



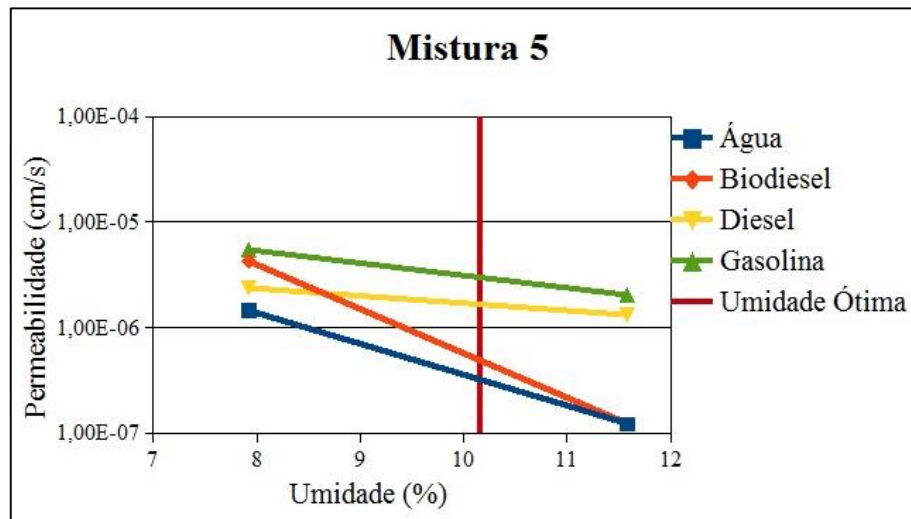
**Figura 6. 18:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 2 em função da umidade do solo.



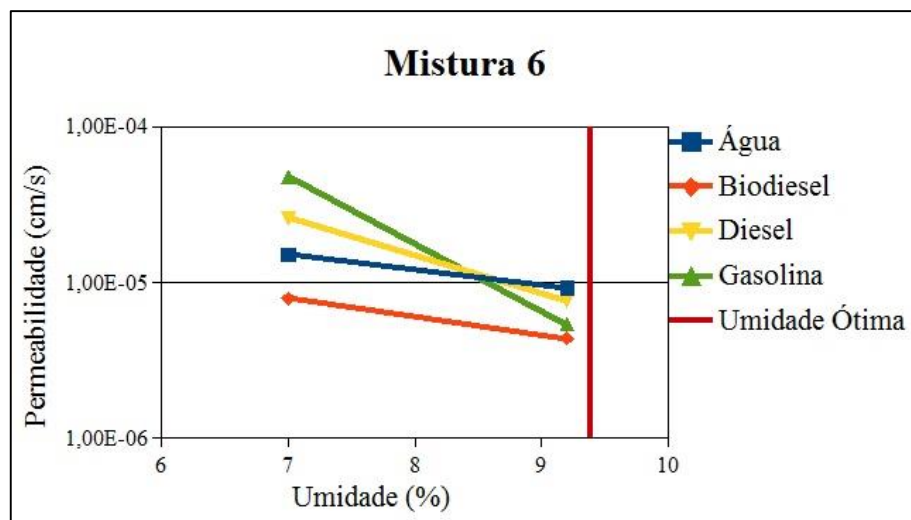
**Figura 6. 19:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 3 em função da umidade do solo.



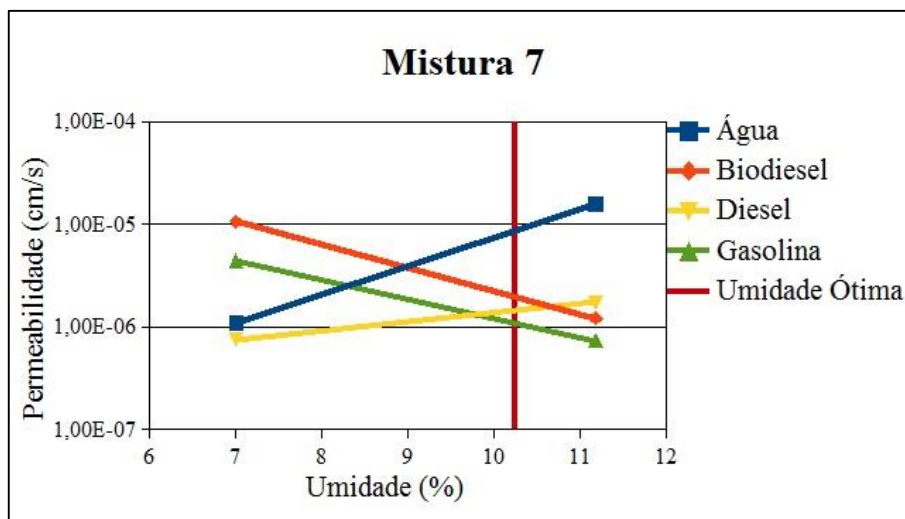
**Figura 6. 20:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 4 em função da umidade do solo.



**Figura 6. 21:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 5 em função da umidade do solo.



**Figura 6. 22:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 6 em função da umidade do solo.



**Figura 6. 23:** Resultados de permeabilidade obtidos para a mistura 7 em função da umidade do solo.

As figuras 6.17 a 6.23 mostram que, quase todos os resultados apresentaram um decréscimo de permeabilidade com o crescimento de umidade. A alta umidade dos aterros, reduz a permeabilidade dos líquidos orgânicos, pois, eles possuem uma hierarquia de molhabilidade inferior à da água no solo e o que se mede em campo, ou em laboratório, nestes ensaios, está mais próximo da permeabilidade efetiva, que dá permeabilidade do solo, a qual por sua vez é influenciada pelo conteúdo dos outros líquidos em seus interstícios. O APÊNDICE A e B apresentam a pluviosidade por dia de realização dos ensaios, em cada campanha.

A influência do conteúdo de água na permeabilidade dos líquidos orgânicos também foi observada por outros pesquisadores como Lambe e Witman (1969), Benson e Daniel (1990), Bensen *et al* (1994), Mitchell e Soga (2005), Machado *et al* (2011), entre outros. No caso da água, o aumento da permeabilidade deve refletir principalmente a ocorrência de trincas e fissuras no solo quando o mesmo é secado em campo.

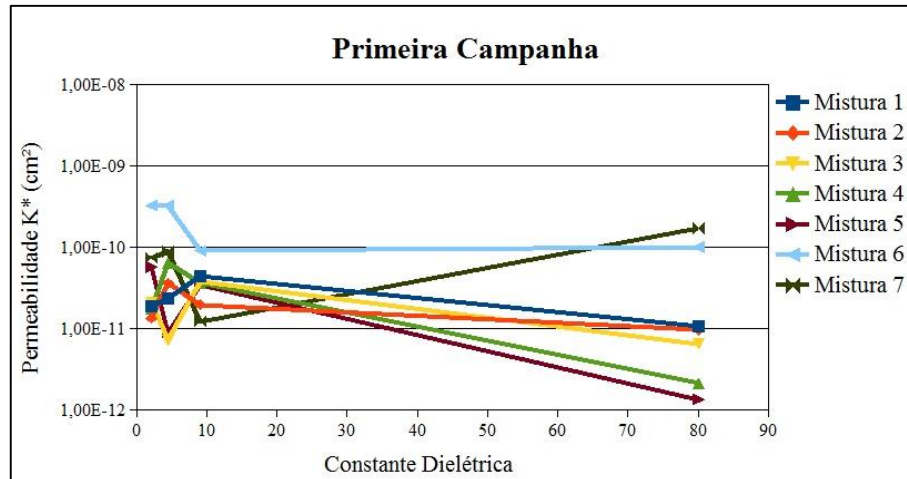
A tabela 6.5 apresenta os valores de permeabilidade  $K^*$  obtidos a partir dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos.

**Tabela 6. 5:** Valores de permeabilidade  $K^*$  obtidos a partir dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos.

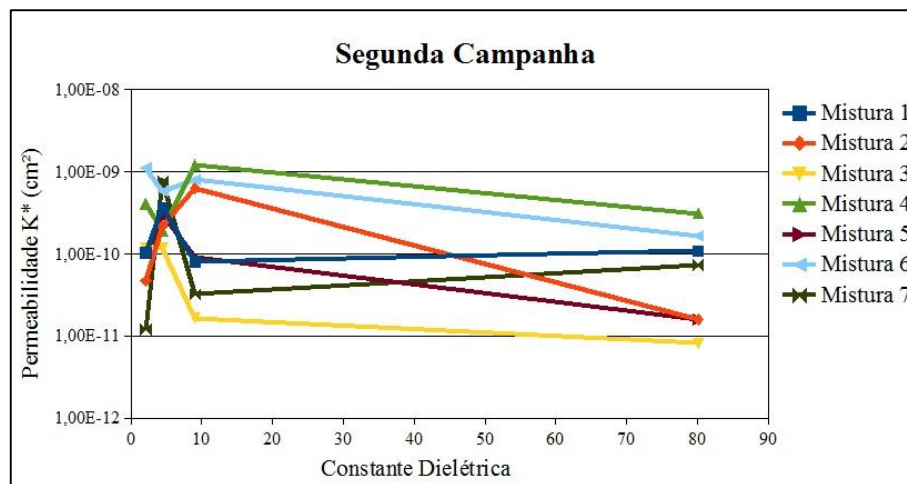
Aterro Experimental	Fluído	1ª Campanha	2ª Campanha
		$K^*$ (cm <sup>2</sup> )	$K^*$ (cm <sup>2</sup> )
Mistura 1	Diesel	1,89E-11	1,03E-10
	Biodiesel	2,33E-11	3,66E-10
	Gasolina	4,43E-11	8,06E-11
Mistura 2	Diesel	1,34E-11	4,68E-11
	Biodiesel	3,61E-11	2,20E-10
	Gasolina	1,96E-11	6,30E-10
Mistura 3	Diesel	2,12E-11	1,19E-10
	Biodiesel	7,19E-12	1,18E-10
	Gasolina	3,77E-11	1,65E-11
Mistura 4	Diesel	1,74E-11	4,07E-10
	Biodiesel	6,39E-11	1,92E-10
	Gasolina	3,65E-11	1,20E-09
Mistura 5	Diesel	5,67E-11	1,01E-10
	Biodiesel	8,92E-12	3,10E-10
	Gasolina	3,39E-11	9,13E-11
Mistura 6	Diesel	3,26E-10	1,11E-09
	Biodiesel	3,21E-10	5,78E-10
	Gasolina	9,02E-11	7,95E-10
Mistura 7	Diesel	7,40E-11	1,20E-11
	Biodiesel	8,86E-11	7,76E-10
	Gasolina	1,22E-11	3,21E-11

A tabela 6.5 mostra os valores de permeabilidade  $K^*$  nas duas campanhas de ensaios, e mostram, também, que os aterros experimentais sofreram interferência em sua estrutura ao longo do tempo, que resultou no aumento da permeabilidade  $K^*$  na segunda campanha.

As figuras 6.24 e 6.25 apresentam os valores de permeabilidade  $K^*$  em função da constante dielétrica (Tabela 5.4) para a primeira e segunda campanha, respectivamente.



**Figura 6. 24:** Valores de K\* dos aterros experimentais em função da constante dielétrica dos líquidos orgânicos – Primeira campanha



**Figura 6. 25:** Valores de K\* dos aterros experimentais em função da constante dielétrica dos líquidos orgânicos – Segunda campanha

As figuras 6.24 e 6.25 mostram, de forma geral, uma tendência que a permeabilidade  $K^*$  dos aterros foi menor para o líquido de maior constante dielétrica. Os valores de permeabilidade  $K^*$  ao diesel ( $\epsilon = 2,13$ ) e ao biodiesel ( $\epsilon=4,5$ ) não apresentaram grandes variações, como era esperado, visto que as suas constantes dielétricas são próximas. Quando analisamos a gasolina ( $\epsilon=9,06$ ), alguns aterros obtiveram permeabilidade  $K^*$  maior, em comparação com o diesel e biodiesel, apesar de apresentar maior constante dielétrica (misturas 1, 3 e 5, na primeira campanha e misturas 2, 4 e 6, na segunda campanha), este fato pode ser consequência da influência de outras propriedades do líquido permeante, como a mobilidade. Ao analisar estas figuras fica evidente que outros fatores, além da constante dielétrica, influenciaram a permeabilidade dos aterros, como a umidade e as trincas. Como a



permeabilidade  $K^*$  é um fator inerente ao solo, ao longo do tempo o mesmo sofreu interferência em sua estrutura, que resultou no aumento da permeabilidade  $K^*$  na segunda campanha.

Vale ressaltar, que a influência da constante dielétrica era esperada não ser muito expressiva nos aterros experimentais deste trabalho. Cardoso (2011) obteve valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos mais altos em comparação a permeabilidade à água para solos com maiores teores de argilas, a diferença entre a permeabilidade a água e ao diesel foi da ordem de 10.000 vezes para solo com aproximadamente 70% de argila em sua composição granulométrica, essa diferença caiu para a ordem de 10 vezes para o solo com 27,5% de argila. Os solos usados nesta pesquisa possuem teores de argilas abaixo de 30%, e os valores de permeabilidade obtidos pelos líquidos orgânicos são cerca de 10 vezes maiores que os valores obtidos tendo a água como percolante. Assim sendo, pela escolha dos solos das misturas que foram utilizadas nos aterros experimentais, pois os mesmos foram desenvolvidos para que a constante dielétrica dos líquidos orgânicos não tivesse grande influência na permeabilidade.

A fim de demonstrar que a permeabilidade é influenciada por outras propriedades dos fluidos, além da mobilidade (razão  $\rho/\mu$  presente na equação 3.6 de Nutting (1930)), os resultados de permeabilidade obtidos em campo foram comparados aos valores de permeabilidade estimados com o uso da equação de Nutting, tendo à água como líquido de referência (Tabelas 6.6 e 6.7, para primeira e segunda campanha, respectivamente). A razão entre a permeabilidade experimental e a permeabilidade obtida com a equação de Nutting ( $k/k_{nutting}$ ), ilustra o erro que são obtidos em relação aos resultados experimentais. Os valores de permeabilidade experimental são uma média dos dois ensaios realizados por líquido em cada aterro, que foram apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4.

**Tabela 6. 6:** Comparação entre os valores de permeabilidade obtida experimentalmente comparada aos valores de permeabilidade estimados – Primeira campanha.

Primeira campanha					
Solo	Fluído	$k$ (cm/s)	$k_{nutting}$ (cm/s)	$k/k_{nutting}$	Média dos Erros
Mistura 1	Água	9,75E-07	9,75E-07	1	2,699
	Biodiesel	3,19E-07	1,46E-07	2,181	
	Diesel	4,44E-07	2,51E-07	1,769	
	Gasolina	2,65E-06	6,39E-07	4,148	
Mistura 2	Água	8,78E-07	8,78E-07	1	2,394
	Biodiesel	4,94E-07	1,32E-07	3,753	
	Diesel	3,15E-07	2,26E-07	1,393	
	Gasolina	1,17E-06	5,76E-07	2,035	
Mistura 3	Água	5,93E-07	5,93E-07	1	3,392
	Biodiesel	9,84E-08	8,89E-08	1,107	
	Diesel	4,97E-07	1,52E-07	3,261	
	Gasolina	2,26E-06	3,89E-07	5,808	

Mistura 4	<b>Água</b>	<b>1,92E-07</b>	<b>1,92E-07</b>	<b>1</b>	18,683
	Biodiesel	8,75E-07	2,88E-08	30,401	
	Diesel	4,08E-07	4,94E-08	8,268	
	Gasolina	2,19E-06	1,26E-07	17,378	
Mistura 5	<b>Água</b>	<b>1,22E-07</b>	<b>1,22E-07</b>	<b>1</b>	24,694
	Biodiesel	1,22E-07	1,84E-08	6,643	
	Diesel	1,33E-06	3,15E-08	42,211	
	Gasolina	2,03E-06	8,03E-08	25,227	
Mistura 6	<b>Água</b>	<b>9,18E-06</b>	<b>9,18E-06</b>	<b>1</b>	2,444
	Biodiesel	4,39E-06	1,38E-06	3,190	
	Diesel	7,66E-06	2,36E-06	3,245	
	Gasolina	5,40E-06	6,02E-06	0,897	
Mistura 7	<b>Água</b>	<b>1,57E-05</b>	<b>1,57E-05</b>	<b>1</b>	0,339
	Biodiesel	1,21E-06	2,36E-06	0,514	
	Diesel	1,74E-06	4,04E-06	0,430	
	Gasolina	7,33E-07	1,03E-05	0,071	

**Tabela 6. 7:** Comparação entre os valores de permeabilidade obtida experimentalmente comparada aos valores de permeabilidade estimados – Segunda campanha.

Segunda campanha					
Solo	Fluído	k (cm/s)	$k_{\text{nutting}}$ (cm/s)	$k/k_{\text{nutting}}$	Média dos Erros
Mistura 1	<b>Água</b>	<b>9,87E-06</b>	<b>9,87E-06</b>	<b>1</b>	1,696
	Biodiesel	5,02E-06	1,48E-06	3,387	
	Diesel	2,43E-06	2,54E-06	0,955	
	Gasolina	4,82E-06	6,47E-06	0,745	
Mistura 2	<b>Água</b>	<b>1,45E-06</b>	<b>1,45E-06</b>	<b>1</b>	18,808
	Biodiesel	3,01E-06	2,18E-07	13,845	
	Diesel	1,10E-06	3,73E-07	2,944	
	Gasolina	3,77E-05	9,51E-07	39,634	
Mistura 3	<b>Água</b>	<b>7,47E-07</b>	<b>7,47E-07</b>	<b>1</b>	10,326
	Biodiesel	1,62E-06	1,12E-07	14,438	
	Diesel	2,79E-06	1,92E-07	14,517	
	Gasolina	9,90E-07	4,89E-07	2,023	
Mistura 4	<b>Água</b>	<b>2,83E-05</b>	<b>2,83E-05</b>	<b>1</b>	1,936
	Biodiesel	2,62E-06	4,24E-06	0,619	
	Diesel	9,56E-06	7,28E-06	1,314	
	Gasolina	7,19E-05	1,85E-05	3,875	
Mistura 5	<b>Água</b>	<b>1,45E-06</b>	<b>1,45E-06</b>	<b>1</b>	10,538
	Biodiesel	4,25E-06	2,18E-07	19,530	
	Diesel	2,37E-06	3,73E-07	6,341	
	Gasolina	5,46E-06	9,51E-07	5,745	
Mistura 6	<b>Água</b>	<b>1,51E-05</b>	<b>1,51E-05</b>	<b>1</b>	4,985
	Biodiesel	7,91E-06	2,27E-06	3,483	
	Diesel	2,60E-05	3,89E-06	6,680	
	Gasolina	4,75E-05	9,92E-06	4,792	
Mistura 7	<b>Água</b>	<b>1,09E-06</b>	<b>1,09E-06</b>	<b>1</b>	24,530
	Biodiesel	1,06E-05	1,64E-07	64,770	
	Diesel	7,54E-07	2,81E-07	2,684	
	Gasolina	4,40E-06	7,16E-07	6,138	

Os valores da relação  $k/k_{\text{nutting}}$  mostrados nas tabelas 6.6 e 6.7 estão entre 64,77 e 0,071, sendo que a maioria encontra-se abaixo de 25. Estes valores baixos são similares aos obtidos

por Machado (2014) e Cardoso (2011). Isto resulta do fato dos solos, Granulito e Barreiras, não possuírem argilas de alta atividade.

Ao utilizar o método de duas cargas hidráulicas para obter os valores de permeabilidade foram obtidos muitos valores negativos, inclusive para o potencial matricial; alguns pesquisadores também relataram este problema ao usarem o referido método. As tabelas 6.8 e 6.9 apresentam os resultados de permeabilidade e de potencial matricial obtidos utilizando o método rigoroso, e o valor de  $\alpha$  obtido pela equação 3.32, pondo-se em destaque os resultados válidos. Dos 54 ensaios realizados na primeira campanha apenas 10 obtiveram resultados válidos. Na segunda campanha dos 54 ensaios, 13 obtiveram resultados válidos.

Tabela 6. 8: Permeabilidade, potencial matricial e constante de ajuste, obtidos através do Método Rigoroso – Primeira campanha.

PERMEABILIDADE – Método Rigoroso – Primeira Campanha																					
	Mistura 01			Mistura 02			Mistura 03			Mistura 04			Mistura 05			Mistura 06			Mistura 07		
	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$
Água 1	-1,37E-06	3,09E-05	-4,43E-02	-5,55E-06	2,27E-04	-2,44E-02	8,28E-06	-5,89E-05	-1,41E-01	-2,73E-06	6,96E-05	-3,93E-02	1,35E-07	8,02E-06	1,68E-02	7,54E-05	7,74E-04	9,74E-02	6,71E-04	-5,58E-03	-1,20E-01
Água 2	-3,90E-05	7,02E-04	-5,56E-02	4,41E-06	-2,09E-05	-2,11E-01	1,63E-05	-1,44E-04	-1,13E-01	5,41E-07	5,58E-06	9,70E-02	4,76E-06	-9,97E-06	-4,78E-01	2,12E-05	-1,84E-04	-1,15E-01	5,96E-05	-3,88E-04	-1,53E-01
Diesel 1	6,31E-06	-4,60E-05	-1,37E-01	-4,49E-06	9,57E-05	-4,69E-02	8,41E-06	-5,52E-05	-1,52E-01	1,88E-06	7,49E-06	2,51E-01	-1,21E-05	2,37E-04	-5,12E-02	1,62E-04	-9,02E-04	-1,80E-01	1,50E-05	-1,06E-04	-1,41E-01
Diesel 2	1,18E-06	4,49E-05	2,64E-02	-9,83E-06	1,37E-04	-7,15E-02	2,66E-06	2,14E-05	1,24E-01	-3,49E-06	1,07E-04	-3,27E-02	4,86E-05	-4,86E-04	-9,99E-02	2,06E-05	3,78E-04	5,46E-02	2,49E-05	-2,70E-05	-9,22E-01
Gasolina 1	-3,11E-05	7,72E-04	-4,03E-02	-1,69E-05	4,19E-04	-4,03E-02	2,55E-05	-2,60E-04	-9,78E-02	-4,72E-06	3,69E-04	-1,28E-02	-4,58E-05	1,02E-03	-4,49E-02	-1,52E-05	6,25E-04	-2,43E-02	4,14E-06	-2,55E-05	-1,62E-01
Gasolina 2	8,64E-06	2,16E-04	4,01E-02	2,20E-05	-1,54E-04	-1,43E-01	9,90E-06	1,83E-04	5,42E-02	-1,44E-05	4,48E-04	-3,22E-02	1,52E-05	-9,22E-05	-1,65E-01	6,05E-05	-2,21E-04	-2,73E-01	7,59E-06	-1,49E-05	-5,09E-01
Biodiesel 1	9,71E-06	-1,01E-04	-9,64E-02	-1,85E-07	9,71E-05	-1,91E-03	-5,89E-07	2,23E-05	-2,64E-02	-7,34E-06	1,89E-04	-3,89E-02	-3,20E-06	6,39E-05	-5,01E-02	1,60E-04	-1,80E-03	-8,89E-02	9,27E-06	-1,03E-05	-8,99E-01
Biodiesel 2	2,66E-06	-1,31E-05	-2,03E-01	-2,98E-06	5,94E-05	-5,02E-02	-1,37E-07	1,03E-05	-1,33E-02	1,47E-05	-1,06E-04	-1,40E-01	-1,10E-06	2,73E-05	-4,05E-02	9,31E-06	2,46E-04	3,79E-02	1,69E-05	-1,11E-04	-1,52E-01

Tabela 6. 9: Permeabilidade, potencial matricial e constante de ajuste, obtidos através do Método Rigoroso – Segunda campanha.

PERMEABILIDADE – Método Rigoroso – Segunda Campanha																					
	Mistura 01			Mistura 02			Mistura 03			Mistura 04			Mistura 05			Mistura 06			Mistura 07		
	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$	k	$\phi_m$	$\alpha$
Água 1	-3,45E-06	1,97E-04	-1,75E-02	2,25E-06	1,25E-04	1,80E-02	4,26E-06	5,98E-05	7,11E-02	7,28E-05	-5,83E-04	-1,25E-01	4,54E-06	2,05E-04	2,22E-02	1,52E-04	-1,44E-04	-1,06E+00	3,60E-05	-2,42E-04	-1,48E-01
Água 2	-7,00E-05	2,73E-03	-2,56E-02	-4,32E-06	2,10E-04	-2,06E-02	6,41E-06	-1,49E-05	-4,29E-01	1,42E-03	-9,62E-03	-1,48E-01	1,37E-05	-9,61E-05	-1,43E-01	3,00E-04	-1,51E-03	-1,98E-01	2,36E-05	-1,70E-04	-1,39E-01
Diesel 1	6,54E-05	-5,54E-04	-1,18E-01	5,96E-06	-4,08E-05	-1,46E-01	1,70E-05	1,69E-04	1,01E-01	3,88E-05	-2,92E-04	-1,33E-01	5,10E-05	-2,48E-04	-2,05E-01	2,27E-04	-5,04E-04	-4,51E-01	-9,79E-06	1,95E-04	-5,02E-02
Diesel 2	1,68E-04	-1,46E-03	-1,15E-01	1,83E-05	-6,88E-05	-2,66E-01	1,73E-05	2,96E-05	5,84E-01	1,29E-04	4,52E-04	2,85E-01	2,73E-05	-9,39E-05	-2,91E-01	1,04E-04	2,35E-03	4,42E-02	-1,82E-05	2,72E-04	-6,69E-02
Gasolina 1	-2,67E-05	5,49E-04	-4,86E-02	5,60E-04	1,74E-03	3,22E-01	-8,80E-05	1,15E-03	-7,67E-02	1,03E-03	-1,68E-03	-6,11E-01	-6,05E-05	1,02E-03	-5,95E-02	4,51E-04	-2,73E-03	-1,65E-01	4,31E-05	-8,43E-05	-5,12E-01
Gasolina 2	1,87E-04	-1,61E-03	-1,16E-01	1,14E-05	1,58E-04	7,20E-02	5,32E-06	-3,41E-05	-1,56E-01	-1,19E-03	1,90E-02	-6,28E-02	-8,70E-06	9,40E-04	-9,25E-03	8,88E-04	-4,13E-03	-2,15E-01	3,16E-05	2,19E-04	1,44E-01
Biodiesel 1	-1,07E-05	3,44E-04	-3,10E-02	2,01E-04	-1,61E-03	-1,25E-01	6,54E-06	1,84E-04	3,55E-02	1,21E-05	1,12E-06	1,08E+01	6,91E-05	-2,82E-04	-2,45E-01	2,93E-05	8,69E-04	3,37E-02	1,23E-04	-1,39E-04	-8,88E-01
Biodiesel 2	-9,09E-05	1,84E-03	-4,93E-02	-1,93E-05	2,85E-04	-6,76E-02	1,18E-05	-3,49E-05	-3,37E-01	-6,80E-06	5,07E-04	-1,34E-02	1,85E-04	-1,46E-03	-1,27E-01	6,61E-05	-2,03E-04	-3,26E-01	-7,96E-05	1,95E-03	-4,08E-02

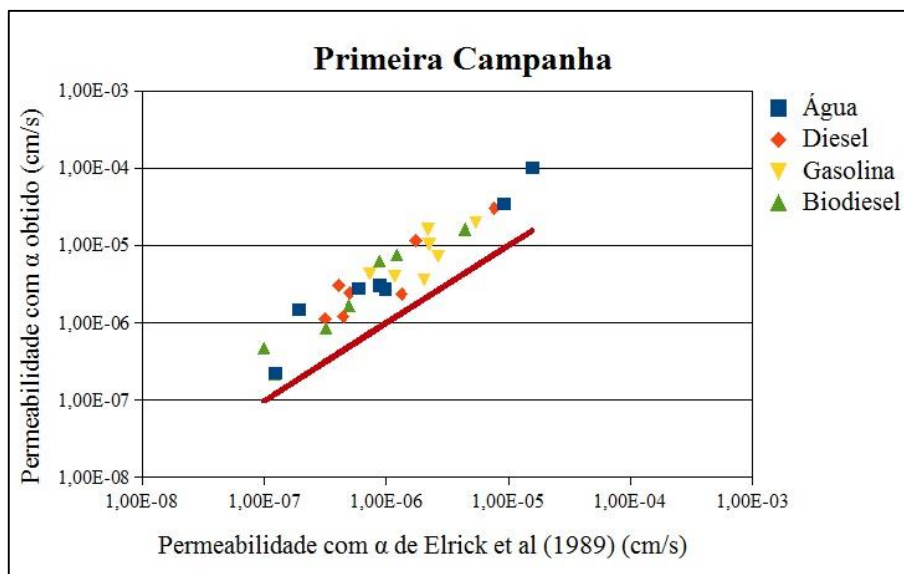
A Tabela 6.10 apresenta os valores do parâmetro de ajuste  $\alpha$ , sugerido por Elrick *et al.* (1989), o qual foi usado para a obtenção dos valores de permeabilidade pelo método simplificado; e os valores de  $\alpha$  obtidos com os resultados válidos pelo método rigoroso.

**Tabela 6. 10:** Comparativo dos valores do parâmetro de ajuste  $\alpha$  obtidos e os valores sugeridos por Elrick *et al.* (1989) que foram usados.

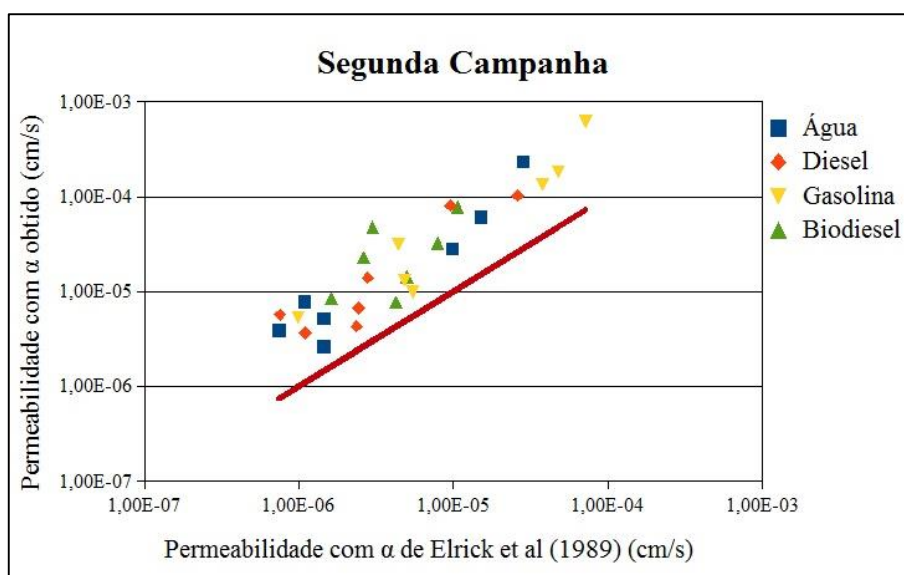
Valores de $\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )							
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Mistura 5	Mistura 6	Mistura 7
<b>Elrick <i>et al.</i> (1989)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Primeira Campanha</b>	0,026		0,124	0,097	0,017	0,097	
	0,040		0,054	0,251		0,055	
						0,038	
<b>Segunda Campanha</b>		0,018	0,071	0,285	0,022	0,044	0,144
		0,072	0,101			0,034	
			0,036				
<b>Média dos valores obtidos</b>	<b>0,033</b>	<b>0,045</b>	<b>0,0772</b>	<b>0,211</b>	<b>0,0195</b>	<b>0,0536</b>	<b>0,144</b>

Os valores obtidos pela razão entre a permeabilidade e o potencial matricial (equação 3.32) resultou em valores de  $\alpha$  maiores que os sugeridos por Elrick *et al.* (1989) para solos compactados ( $\alpha=0,01\text{cm}^{-1}$ ). As misturas 3 e 6 obtiveram a maior quantidade de resultados válidos para permeabilidade pelo método rigoroso e conseqüentemente maior número de valores de  $\alpha$ . Os valores obtidos na mistura 3 são bastante variados, não convergindo para nenhum valor. Os valores obtidos para as misturas 1, 2 e 6 ficaram próximos dos valores recomendados para solos de textura fina, sem macroporos e fissuras ( $\alpha=0,04\text{cm}^{-1}$ ). Como já mencionado, o parâmetro  $\alpha$  depende das propriedades do solo como a sua textura. Conforme mencionado anteriormente, foi visível que a estrutura dos aterros experimentais sofreu alteração ao longo do tempo, com o surgimento de trincas, porém essa alteração na estrutura não ficou refletida no parâmetro  $\alpha$ .

Ao calcular a permeabilidade com a média dos valores de  $\alpha$  obtidos encontrou-se valores de permeabilidades maiores que a permeabilidade obtida utilizando o  $\alpha$  sugeridos por Elrick *et al.* (1989). As figuras 6.27 e 6.28 apresentam o comparativo da permeabilidade obtida com o emprego dos  $\alpha$ 's segundo o líquido permeante e por período da campanha.



**Figura 6. 26:** Permeabilidades dos aterros experimentais calculada com o  $\alpha$  obtido e o sugerido por Elrick et al (1989) – Primeira campanha.



**Figura 6. 27:** Permeabilidades dos aterros experimentais calculada com o  $\alpha$  obtido e o sugerido por Elrick *et al* (1989) – Segunda campanha

### 6.2.2. Resultado da Permeabilidade em laboratório

A tabela 6.11 apresenta os valores médios de permeabilidade obtidos em laboratório, acompanhado dos resultados obtidos em campo, para facilitar a análise dos mesmos. Salienta-se que os ensaios em laboratório foram feitos em corpos de provas moldados em blocos de amostras indeformadas retiradas no período de janeiro a março de 2014.

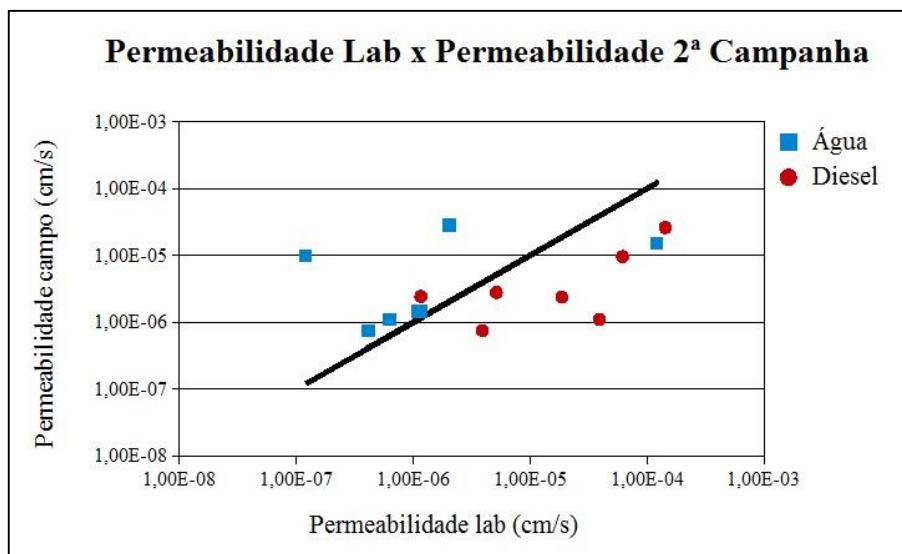
**Tabela 6. 11:** Resultados de permeabilidade à água e ao diesel obtidos nos ensaios em laboratório, e os resultados de permeabilidade à água e ao diesel obtidos em campo.

Permeabilidade (cm/s)						
Aterros experimentais	Laboratório		1ª Campanha		2ª Campanha	
	Água	Diesel	Água	Diesel	Água	Diesel
Mistura 1	1,19E-07	1,16E-06	9,75E-07	4,44E-07	9,87E-06	2,43E-06
Mistura 2	1,09E-06	3,90E-05	8,78E-07	3,15E-07	1,45E-06	1,10E-06
Mistura 3	4,13E-07	5,12E-06	5,93E-07	4,97E-07	7,47E-07	2,79E-06
Mistura 4	2,02E-06	6,14E-05	1,92E-07	4,08E-07	2,83E-05	9,56E-06
Mistura 5	1,16E-06	1,86E-05	1,22E-07	1,33E-06	1,45E-06	2,37E-06
Mistura 6	1,21E-04	1,43E-04	9,18E-06	7,66E-06	1,51E-05	2,60E-05
Mistura 7	6,25E-07	3,88E-06	1,57E-05	1,74E-06	1,09E-06	7,54E-07

Nos ensaios em laboratório, os aterros de mistura 1, 3 e 7 obtiveram os melhores resultados, apresentando valores de permeabilidade ao diesel de  $1,16 \times 10^{-6}$  cm/s,  $12 \times 10^{-6}$  cm/s e  $3,88 \times 10^{-6}$  cm/s, respectivamente. Quando o líquido percolante foi a água os aterros das mistura 1, 3 e 7 mantiveram o melhor desempenho, com  $k = 1,19 \times 10^{-7}$  cm/s para a mistura 1,  $k = 4,13 \times 10^{-7}$  cm/s para a mistura 3 e  $k = 6,25 \times 10^{-7}$  cm/s para a mistura 7.

De forma geral, os valores de permeabilidade obtidos em laboratório foram maiores do que os valores obtidos na primeira campanha de ensaios em campo, esta diferença era esperada, visto que as amostras indeformadas foram tiradas cerca de 10 meses após a construção dos aterros experimentais e no período seco. Por isso, os valores de permeabilidade obtidos em laboratório são mais similares aos valores obtidos na segunda campanha de ensaios de campo, também realizada no período seco.

A figura 6.29 evidencia a diferença dos resultados de permeabilidade obtidos em laboratório e os resultados obtidos na segunda campanha de ensaios em campo. A reta representa a obtenção de valores iguais em campo e laboratório e a distância dos pontos até a mesma, é a diferença nos valores de permeabilidade. Quando o permeante foi a água, as misturas 1 e 4 apresentaram maior permeabilidade em campo, estando mais distantes da reta. Para o permeante diesel, a permeabilidade em campo foi em geral menor que a permeabilidade em laboratório.



**Figura 6. 28:** Comparativo dos valores de permeabilidade à água e ao diesel obtidos em laboratório e os valores obtidos em campo durante a segunda campanha de ensaios.

### 6.2.3. Resultados da Aplicação de Modelagem Matemática

A modelagem matemática para líquidos orgânicos desenvolvida por Machado (2014) foi aplicada às misturas usadas nessa pesquisa (Tabela 6.12). As características dos líquidos permeantes foram obtidas no GEOAMB, apenas a constante dielétrica foi obtida em literatura. Tais características foram apresentada na seção 5.4. As características dos solos necessários para a aplicação da modelagem matemática, como grau de saturação e a permeabilidade a água, foram obtidas de diferentes formas: nos ensaios de permeabilidade de laboratório, as características foram obtidas para cada CP sendo depois calculados os valores médios para a aplicação da modelagem.

Como o grau de saturação da primeira e segunda campanha de ensaios é uma estimativa, há de se esperar uma maior dispersão nos resultados previstos pelo modelo em comparação com os resultados obtidos em campo do que no caso dos ensaios em laboratório. A tabela 6.12 apresenta os valores de permeabilidade estimados pelo modelo e os valores obtidos em campo e laboratório.

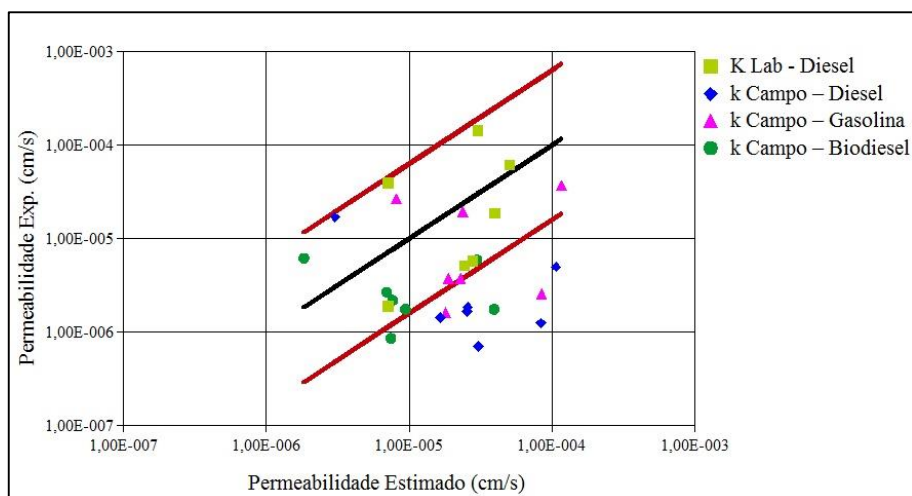


**Tabela 6. 12:** Valores de permeabilidade ao diesel estimados através da equação de Machado (2014)

Aterros experimentais	k exp. obtido em:	Fluido orgânico	Permeabilidade à água	Grau de Saturação a água	Valor de N <sup>1</sup>	k – Experimental	k - Modelo de Machado	k - Modelo de Oliveira
			$k_{w\ 20^\circ}$ (cm/s)	$S_{rw}$ (%)		$k_{f\ 20^\circ}$ (cm/s)	$k_{f\ 20^\circ}$ (cm/s)	$k_f$ (cm/s)
Mistura 1	Laboratório	Diesel	1,19E-07	82,9	5,57	1,90E-06	7,12E-06	1,49E-09
		Diesel	5,42E-06	90,7		1,43E-06	1,65E-05	1,93E-07
	Campo	Gasolina	5,42E-06	90,7		4,44E-07	2,29E-05	1,63E-10
		Biodiesel	5,42E-06	90,7		4,44E-07	6,95E-06	1,80E-09
Mistura 2	Laboratório	Diesel	1,09E-06	53,6	5,42	3,90E-05	4,51E-05	1,48E-08
		Diesel	1,16E-06	75,1		7,07E-07	3,05E-05	5,62E-08
	Campo	Gasolina	1,16E-06	75,1		3,15E-07	2,38E-05	5,90E-11
		Biodiesel	1,16E-06	75,1		3,15E-07	9,41E-06	5,89E-10
Mistura 3	Laboratório	Diesel	4,13E-07	61,4	5,42	5,80E-06	2,41E-05	5,61E-09
		Diesel	6,70E-07	71,5		1,64E-06	2,55E-05	4,50E-08
	Campo	Gasolina	6,70E-07	71,5		4,97E-07	1,80E-05	4,72E-11
		Biodiesel	6,70E-07	71,5		4,97E-07	7,44E-06	4,71E-10
Mistura 4	Laboratório	Diesel	2,02E-06	62,8	5,39	6,14E-05	5,05E-05	2,78E-08
		Diesel	1,42E-05	76,2		4,98E-06	1,06E-04	1,63E-06
	Campo	Gasolina	1,42E-05	76,2		4,08E-07	1,16E-04	1,78E-09
		Biodiesel	1,42E-05	76,2		4,08E-07	3,93E-05	1,74E-08
Mistura 5	Laboratório	Diesel	1,16E-06	51,5	5,37	1,86E-05	3,97E-05	1,63E-08
		Diesel	7,87E-07	67,4		1,85E-06	2,56E-05	1,99E-08
	Campo	Gasolina	7,87E-07	67,4		1,33E-06	1,89E-05	2,26E-11
		Biodiesel	7,87E-07	67,4		1,33E-06	7,66E-06	2,17E-10
Mistura 6	Laboratório	Diesel	1,21E-04	41,6	5,15	1,43E-04	3,01E-05	1,89E-06
		Diesel	1,22E-05	48,3		1,68E-05	3,03E-06	7,50E-07
	Campo	Gasolina	1,22E-05	48,3		7,66E-06	8,15E-06	1,16E-09
		Biodiesel	1,22E-05	48,3		7,66E-06	1,83E-06	9,60E-09
Mistura 7	Laboratório	Diesel	8,62E-07	61,6	5,31	5,77E-06	2,79E-05	1,24E-08
		Diesel	8,40E-06	70,1		1,25E-06	8,38E-05	7,87E-07
	Campo	Gasolina	8,40E-06	70,1		1,74E-06	8,46E-05	9,65E-10
		Biodiesel	8,40E-06	70,1		1,74E-06	2,97E-05	8,93E-09

<sup>1</sup>N – Fator relacionado ao teor de argila no solo.

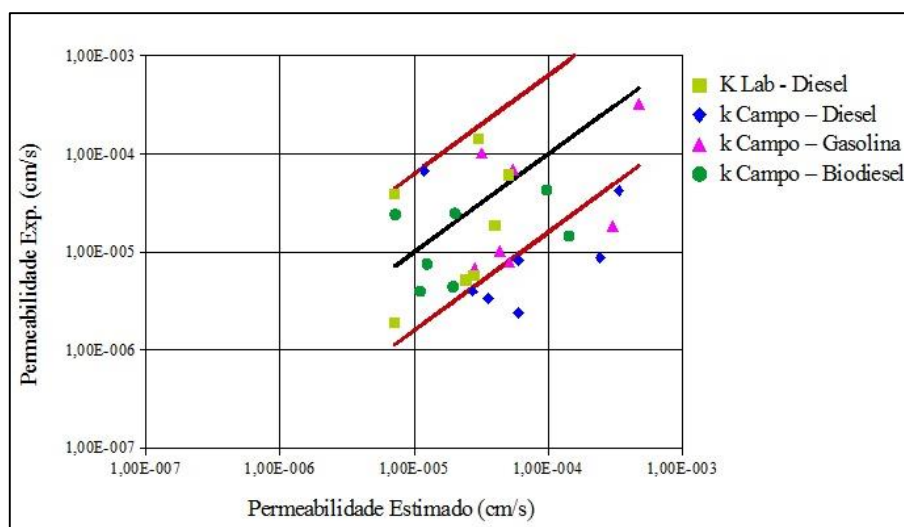
A figura 6.29 evidencia os resultados dos modelos de Machado, apresentados na tabela 6.12. A linha preta é a estimativa da permeabilidade aos líquidos orgânicos obtida pela aplicação do modelo. As linhas vermelhas delimitam um intervalo de confiança de 90%.



**Figura 6. 29:** Comparativo dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos obtido com o  $\alpha$  de Elrick (1989) com os valores estimados pelo modelo de Machado (2014).

Como pode ser observado, os valores estimados a partir das características dos solos obtidas nos ensaios de laboratório estão dentro do intervalo de confiança de 90%. A maior parte dos resultados de permeabilidade estimados a partir das características obtidas em campo estão fora do intervalo de confiança, porém o uso da equação acarretou na obtenção de valores de permeabilidade maiores que os obtidos experimentalmente. A grande divergência dos valores de permeabilidade obtidos em campo com os valores estimados, podem ter sido consequência do fato de não se ter identificado o grau de saturação do solo no dia de realização do ensaio de permeabilidade.

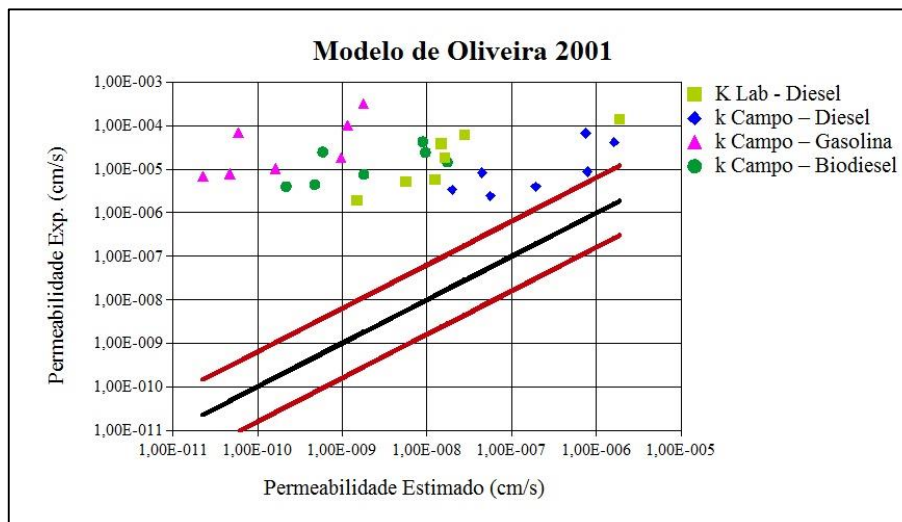
A figura 6.30 apresenta os resultados de permeabilidade calculados com o  $\alpha$  obtido através do método rigoroso (apresentado na tabela 6.10) e os resultados de permeabilidade estimados pelo modelos de Machado. A linha preta é a estimativa da permeabilidade aos líquidos orgânicos obtida pela aplicação do modelo. As linhas vermelhas delimitam um intervalo de confiança de 90%.



**Figura 6. 30:** Comparativo dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos calculado com o  $\alpha$  obtido, e com os valores estimados pelo modelo de Machado (2014).

Comparando os valores de permeabilidade experimentais calculados com o  $\alpha$  de Elrick (figura 6.29) e os valores calculados com o  $\alpha$  obtido (figura 6.30) os valores estimados a partir da permeabilidade calculado  $\alpha$  obtido alcançou resultados mais próximos, dentro do intervalo de confiança de 90%.

A figura 6.31 evidencia os resultados dos modelos de Oliveira, apresentados na tabela 6.12. A linha preta é a estimativa da permeabilidade aos líquidos orgânicos obtida pela aplicação do modelo. As linhas vermelhas delimitam um intervalo de confiança de 90%.



**Figura 6. 31:** Comparativo dos valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos obtido com o  $\alpha$  de Elrick (1989) com os valores estimados pelo modelo de Oliveira (2001).

Como pode ser observado na figura 6.31, os valores estimados pelo modelo de Oliveira são menores que os valores experimentais, estando todos os valores fora do intervalo de confiança de 90%. Não sendo adequado o uso do modelo de Oliveira para prever a permeabilidade de líquidos orgânicos. A grande divergência dos valores de permeabilidade obtidos em campo com os valores estimados, indicam que a permeabilidade é afetada por outros parâmetros além dos que compõem o modelo de Oliveira.

### 6.3. IDENTIFICAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL MAIS ADEQUADO

#### 6.3.1. Critério 1: Permeabilidade média $K^*$

A tabela 6.13 apresenta a classificação dos aterros em função da média da permeabilidade  $K^*$ . Os valores de  $K^*$  apresentados na tabela 6.13 foram obtidos a partir da média dos valores apresentados na tabela 6.12. A tabela 6.13, apresentada ainda a razão  $K^*_{1^a}/K^*_{2^a}$  ilustrando a variação dos resultados em cada campanha de ensaio.

**Tabela 6. 13:** Média dos valores de permeabilidade  $K^*$ . E classificação dos aterros experimentais – Primeira e Segunda Campanha.

Aterro Experimental	Fluido	1ª Campanha			2ª Campanha			$K^*_{1^a}/K^*_{2^a}$	Desvio médio
		$K^*$ (cm <sup>2</sup> )	$K^*$ médio (cm <sup>2</sup> )	Classificação	$K^*$ (cm <sup>2</sup> )	$K^*$ médio (cm <sup>2</sup> )	Classificação		
Mistura 1	Diesel	1,89E-11	2,88E-011	3	1,03E-10	1,83E-010	3	0,183	0,266
	Biodiesel	2,33E-11			3,66E-10			0,064	
	Gasolina	4,43E-11			8,06E-11			0,550	
Mistura 2	Diesel	1,34E-11	2,30E-011	2	4,68E-11	2,99E-010	5	0,286	0,161
	Biodiesel	3,61E-11			2,20E-10			0,164	
	Gasolina	1,96E-11			6,30E-10			0,031	
Mistura 3	Diesel	2,12E-11	2,20E-011	1	1,19E-10	8,45E-011	1	0,178	0,840
	Biodiesel	7,19E-12			1,18E-10			0,061	
	Gasolina	3,77E-11			1,65E-11			2,280	
Mistura 4	Diesel	1,74E-11	3,93E-011	5	4,07E-10	6,00E-010	6	0,043	0,135
	Biodiesel	6,39E-11			1,92E-10			0,333	
	Gasolina	3,65E-11			1,20E-09			0,030	
Mistura 5	Diesel	5,67E-11	3,31E-011	4	1,01E-10	1,68E-010	2	0,562	0,321
	Biodiesel	8,92E-12			3,10E-10			0,029	
	Gasolina	3,39E-11			9,13E-11			0,371	
Mistura 6	Diesel	3,26E-10	2,46E-010	7	1,11E-09	8,27E-010	7	0,295	0,321
	Biodiesel	3,21E-10			5,78E-10			0,555	
	Gasolina	9,02E-11			7,95E-10			0,114	
Mistura 7	Diesel	7,40E-11	5,83E-011	6	1,20E-11	2,73E-010	4	6,183	2,226
	Biodiesel	8,86E-11			7,76E-10			0,114	
	Gasolina	1,22E-11			3,21E-11			0,381	

Ao analisar a tabela 6.13, a média da permeabilidade  $K^*$  para cada mistura, na primeira campanha os aterros experimentais que apresentaram o melhor desempenho foram os das misturas 3, 2, e 1 (em ordem de menor valor de permeabilidade  $K^*$ ), no entanto as demais misturas também apresentaram um bom desempenho, com o valor de permeabilidade  $K^*$  próximos aos valores das misturas de melhor desempenho, com exceção do aterro da mistura 6. Na segunda campanha os aterros experimentais que apresentaram o melhor desempenho foram os das misturas 3, 5 e 1 (em ordem de menor valor de permeabilidade  $K^*$ ).

### 6.3.2. Critério 2: Razão $K^*_{1^a}/K^*_{2^a}$ média

A tabela 6.13 também apresenta uma média da razão  $K^*_{1^a}/K^*_{2^a}$ , que foi chamada de desvio médio, pois indica a variação da permeabilidade  $K^*$  da primeira para a segunda campanha de ensaios. Quanto mais próximo de 1 for o desvio médio, mais estável se apresentou o aterro experimental. Segundo este critério o aterro que obteve melhor desempenho foi o de mistura 3, com desvio médio de 0,84, seguido dos aterros de mistura 5, 6 e 1 com desvio médio

de aproximadamente 0,3. Ainda por este critério o aterro que mais sofreu alterações ao longo do tempo foi o da mistura 7 com desvio médio de 2,23.

### 6.3.3. Critério 3: Infiltração no Aterro Experimental

O terceiro critério de avaliação dos aterros experimentais, foi o critério da infiltração. Para esta análise foi adotado o período mais crítico, ou seja, a segunda campanha de ensaios. Neste período os aterros já haviam sofrido degradação de sua estrutura pela ação do tempo e apresentavam baixos valores de umidade. A curva de infiltração foi simulada para uma carga superficial de 1,5m de coluna de diesel. O Aterro apresenta bom desempenho quando o mesmo obtiver um tempo de infiltração para ultrapassar 1m de espessura de barreira de solo adequado para a realização das medidas de contingência para os casos de vazamento. O tempo considerado adequado foi igual ou superior a 12 horas, mas este tempo deve variar em função do plano de contingência de cada área.

#### 6.3.3.1. Curva de retenção do solo

As figuras 6.32 a 6.38 apresentam as curvas de retenção dos solos para água, das misturas usadas nesta pesquisa. Nas figuras os pontos em vermelho, são os resultados obtidos com a câmaras desenvolvida por Machado e Dourado (2001).

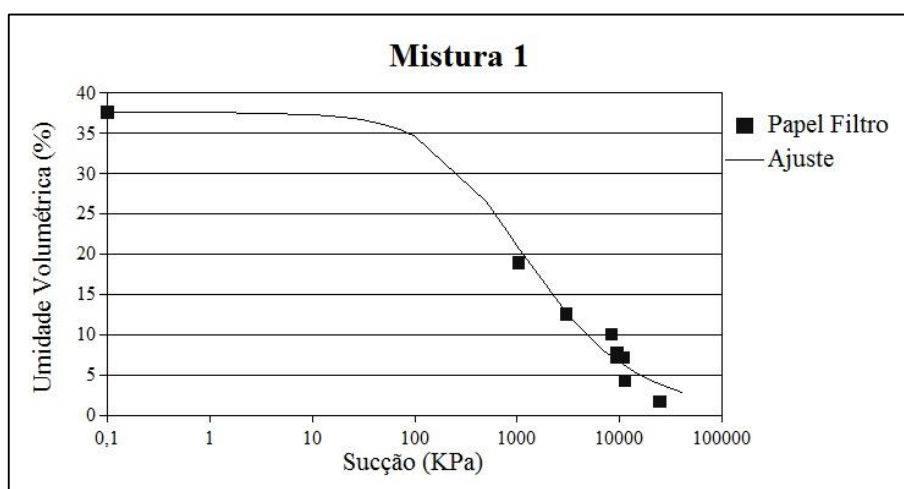
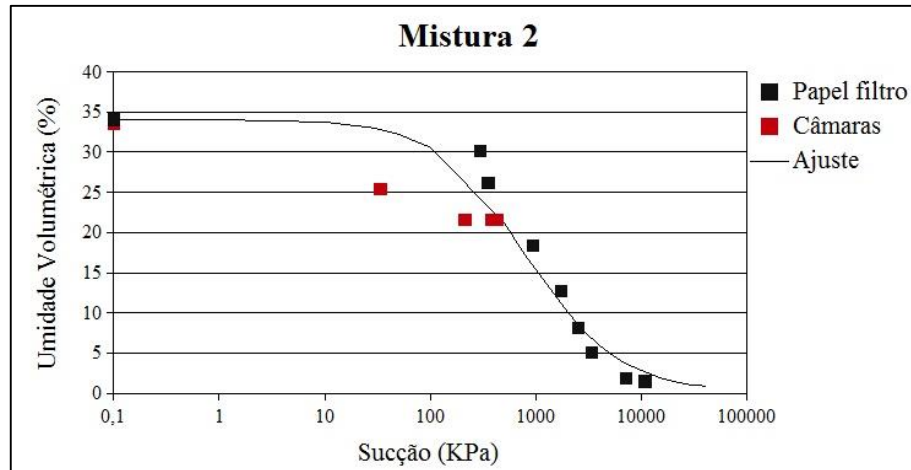
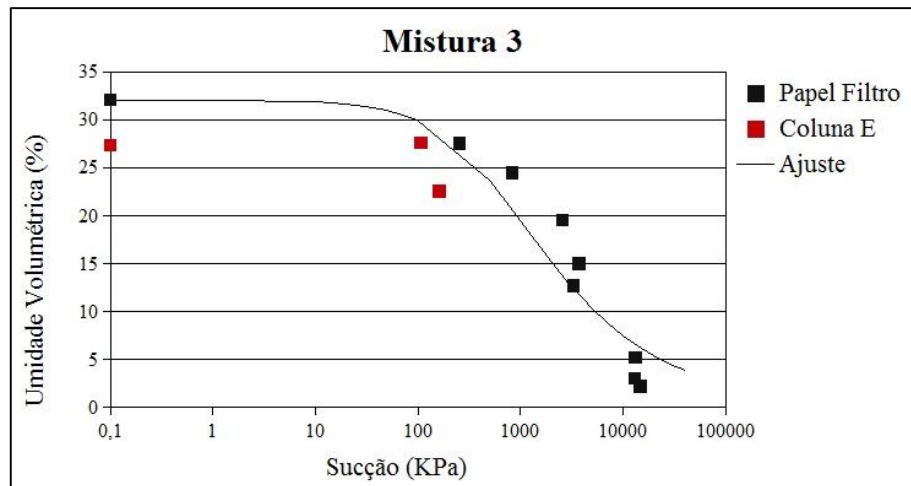


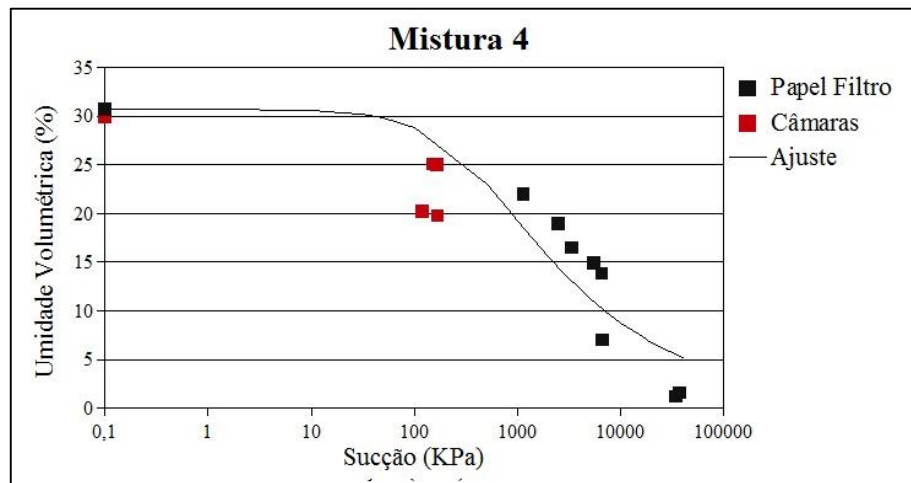
Figura 6. 32: Curva de retenção à água para a mistura 1



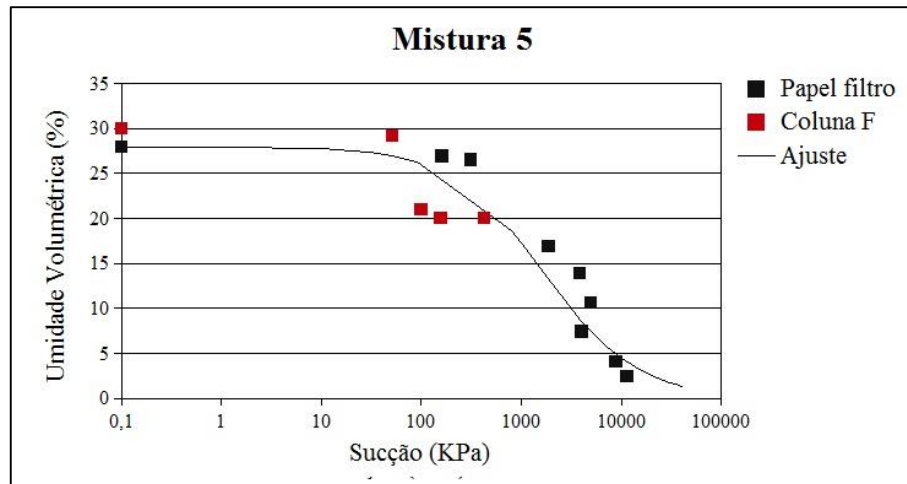
**Figura 6. 33:** Curva de retenção à água para a mistura 2



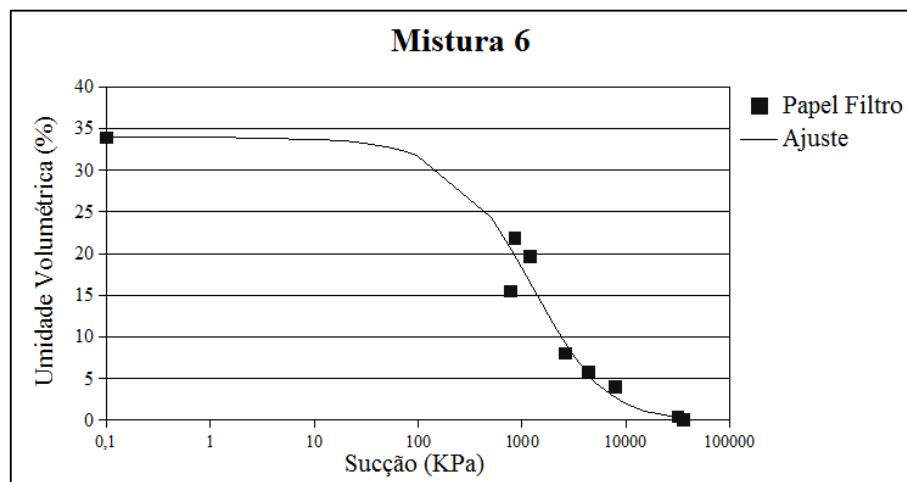
**Figura 6. 34:** Curva de retenção à água para a mistura 3



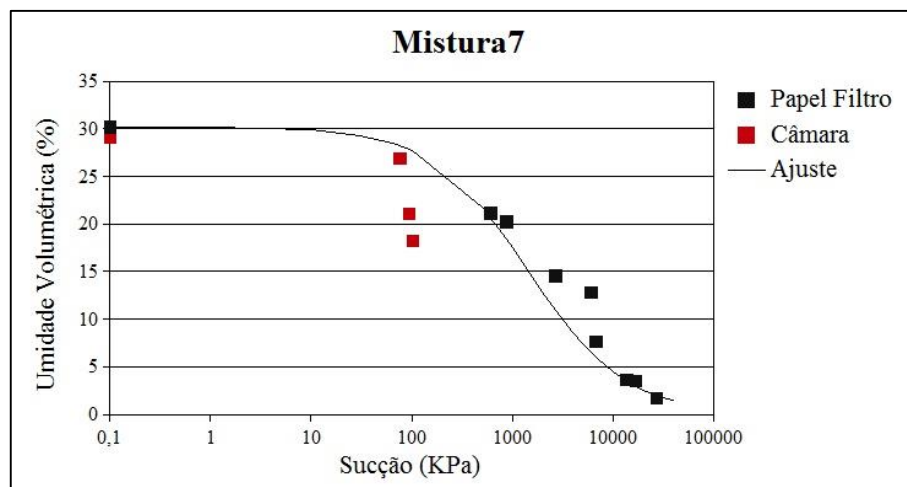
**Figura 6. 35:** Curva de retenção à água para a mistura 4



**Figura 6. 36:** Curva de retenção à água para a mistura 5



**Figura 6. 37:** Curva de retenção à água para a mistura 6

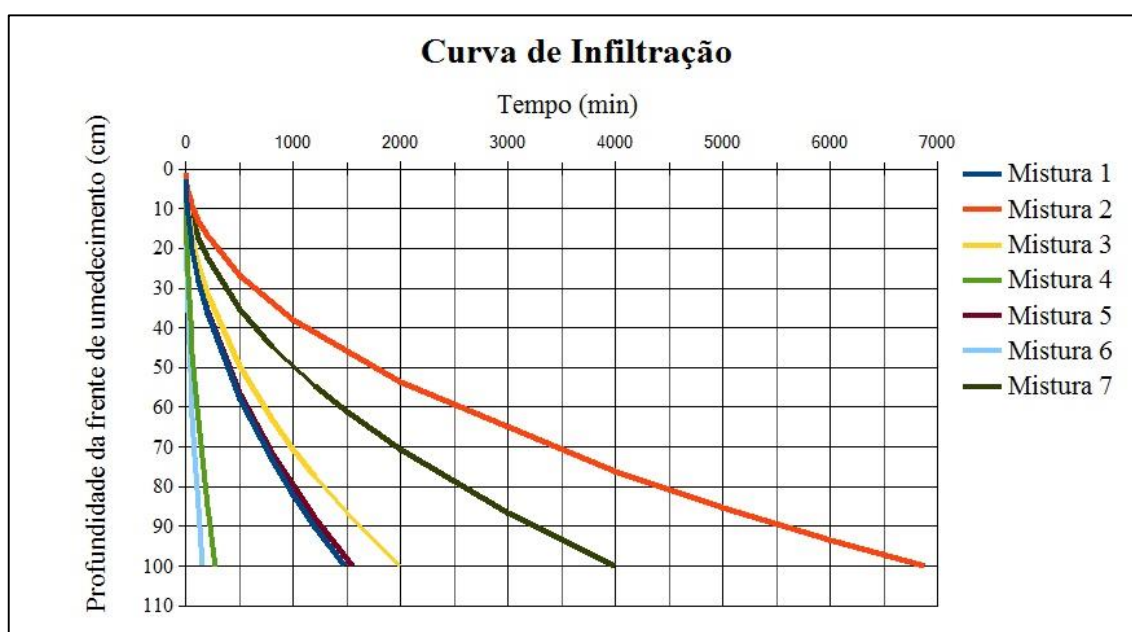


**Figura 6. 38:** Curva de retenção à água para a mistura 7

As curvas de retenção à água apresentadas nas figuras de 6.32 a 6.38 obtiveram boa correlação com os resultados experimentais, com  $R^2$  acima de 95% para todas as misturas de solos.

### 6.3.3.2. Curva de infiltração no solo

A figura 6.39 apresenta a curva de infiltração para o diesel dos aterros experimentais.



**Figura 6.39:** Curvas de Infiltração dos aterros experimentais

As misturas 4 e 6 não atenderam ao tempo mínimo de 12 horas para as medidas de contingência, obtendo 04h37min e 02h33min, respectivamente. As demais misturas obtiveram um tempo superior a 24 horas para se atingir 1 metro de profundidade da frente de infiltração. Sendo, 24h38min para a mistura 1; 114h30min para a mistura 2; 33h20min para a mistura 3; 25h52min para a mistura 5; 66h30min para a mistura 7. Os maiores tempos para infiltrar o perfil de solo de 1 metro foram obtidos pelas misturas 2 e 7, respectivamente. Para a mistura 2 a frente de umedecimento levará mais de 4 dias para percorrer 1 metro do perfil de solo da bacia de contenção e para mistura 7 levará mais de 2 dias.

O quadro 6.1 apresenta a classificação de desempenho dos aterros experimentais em cada um dos critérios estabelecidos. Para a classificação geral atribui-se peso 1 para os critérios



1 e 2 e peso 2 para o critério 3. Assim, ao somar a classificação de acordo com o peso de cada um foi possível definir a classificação geral de desempenho dos aterros experimentais.

**Quadro 6. 1:** Classificação de desempenho dos aterros experimentais

Classificação				
Aterro Experimental	Critério 1: Menor valor médio de $K^*$	Critério 2: Média da razão $K^*_{1^a}/K^*_{2^a}$ mais próxima de 1	Critério 3: Tempo de infiltração	Geral
Mistura 1	3°	4°	5°	4°
Mistura 2	2°	5°	1°	2°
Mistura 3	1°	1°	3°	1°
Mistura 4	5°	6°	6°	5°
Mistura 5	4°	3°	4°	3°
Mistura 6	7°	2°	7°	5°
Mistura 7	6°	7°	2°	4°

O quadro 6.1 mostra que os três aterros experimentais com melhor desempenho foram, em ordem de classificação, os de mistura 3, 2 e 5. Os aterros de misturas 1 e 7 obtiveram classificação igual ocupando a quarta colocação. E as misturas 4 e 6, também obtiveram classificação igual com a 5 posição.

A tabela 6.14 apresenta as características granulométricas e de compactação propostas nos estudos anteriores realizados no GEOAMB em comparação com as características das misturas de melhor desempenho na contenção de líquidos orgânicos.

**Tabela 6. 14:** Características granulométricas e de compactação das misturas segundo a classificação de desempenho.

	WL (%)	IP (%)	Teor de finos (%)	Teor de Argila (%)	Teor de areia (%)	Teor de pedregulho (%)	Umidade de compactação (%)	Densidade seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Faixa Proposta</b>	<b>55 a 75</b>	<b>28 a 42</b>	<b>33 a 60</b>	<b>27 a 45</b>	<b>34 a 57</b>	<b>≤ 2</b>	<b>14 a 20</b>	<b>1,65 a 1,83</b>
Mistura 3	30	13	37	23	60	3	10,3	1,998
Mistura 2	31	13	40	23	58	2	11,1	1,966
Mistura 5	28	11	33	21	67	0	10,2	2,008
Mistura 1	41	20	45	28	54	1	12,5	1,936
Mistura 7	25	10	27	19	72	1	10,2	2,018
Mistura 4	28	12	35	22	64	1	10,6	2,013
Mistura 6	NL <sup>1</sup>	-	18	12	82	0	9,4	1,964

<sup>1</sup>NL – Não liquidez

Os dois melhores aterros experimentais (misturas 3 e 2) possuem características granulométricas e de compactação similares. Tais características não atenderam as especificações propostas anteriormente. As características das misturas destoaram de todos os

parâmetros que compõem as especificações anteriores, com exceção do teor de finos, que foi usado como critério de variação da granulometria das misturas.

Para uma proposta de melhoria da faixa granulométrica ótima usou-se as características dos dois aterros de melhor desempenho (mistura 3 e 2) e os dois aterros de pior desempenho (mistura 4 e 6). A proposta de melhoria da faixa granulométrica apresentada na tabela 6.15 adéqua apenas um dos limites (máximo ou mínimo) dos parâmetros que compõe a faixa. Não foi possível adequar os dois limites por que durante o processo de mistura dos solos, nenhuma mistura foi obtida com parâmetros acima dos valores especificado na faixa ótima. Apesar de não ser possível especificar alguns limites, é recomendado que o WL e IP sejam baixos, próximo do limite inferior da faixa proposta, para reduzir trincamentos ao longo do tempo.

**Tabela 6. 15:** Proposta de Melhoria para a faixa granulométrica ótima.

	WL (%)	IP (%)	Teor de finos (%)	Teor de Argila (%)	Teor de areia (%)	Teor de pedregulho (%)	Umidade de compactação (%)	Densidade seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de Compactação médio (%)
<b>Faixa Proposta</b>	55 a 75	28 a 42	33 a 60	27 a 45	34 a 57	≤ 2	14 a 20	1,65 a 1,83	> 95,0
Mistura 3	30	13	37	23	60	3	10,3	1,998	97,2
Mistura 2	31	13	40	23	58	2	11,1	1,966	95,2
Mistura 4	28	12	35	22	64	1	10,6	2,013	97,8
Mistura 6	NL	-	18	12	82	0	9,4	1,964	94,7
<b>Proposta de melhoria</b>	30-75	13-42	40-60	23 – 45	34-60	≤ 3	10-20	1,83-2,00	> 95,0

## 7. CONCLUSÕES

A presente pesquisa foi desenvolvida visando avaliar a aplicação *in situ* da faixa granulométrica ótima proposta por Machado (2011) para a construção de bacias de contenção de líquidos orgânicos. Para tanto foram, construídos aterros experimentais com solos que atendessem aos parâmetros especificados na faixa ótima. Os aterros experimentais foram avaliados quanto a permeabilidade de líquidos orgânicos, especificamente diesel, gasolina e biodiesel, em campo e em laboratório. Também foram avaliados como os eventos ambientais (sol e chuva) ao longo do tempo influenciam o desempenho dos aterros experimentais. A seguir são apresentadas as conclusões obtidas como resultado deste trabalho.

- Os aterros experimentais construídos com as misturas que atenderam o teor de finos (misturas 1, 2, 3, 4 e 5) especificado na faixa (teor de finos variando de 33 a 60%), conseguiram valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos menores que os aterros construídos com as misturas fora da faixa (mistura 6 e 7).
- Os resultados de permeabilidade dos aterros na primeira campanha foi, de forma geral, menor que os valores de permeabilidade obtidos na segunda campanha. Esta diferença foi influenciada pela umidade do solo e mudanças na estrutura dos aterros experimentais após um período. A estrutura das misturas foi afetada pelo surgimento de trincas ao longo do tempo causados pelo umedecimento e secagem dos aterros experimentais.
- Como era esperado a constante dielétrica não influenciou expressivamente os resultados de permeabilidade, visto que a faixa granulométrica e as recomendações de compactação, foram desenvolvidas para minimizar os efeitos da constante dielétrica na permeabilidade.
- Os valores do parâmetro de ajuste  $\alpha$ , usado para obter a permeabilidade pelo método simplificado, encontrados para as misturas foram maiores que os valores sugerido na literatura para solos compactados.
- Os resultados de permeabilidade obtidos em laboratório a partir de amostras indeformadas ficaram próximos dos valores obtidos durante a segunda campanha de ensaios como era esperado, visto que ambos correspondem ao período seco. Com exceção dos resultados para as misturas 1 e 4 quando líquido percolante foi a água e mistura 2 quando o líquido percolante foi o diesel.

- O modelo matemático usado para estimar os valores de permeabilidade aos líquidos orgânicos a partir da permeabilidade a água, obteve resultados de permeabilidade dentro do intervalo de confiança quando foi estimado a partir dos resultados de laboratório. Ao usar o modelo a partir dos resultados de campo, os valores estimados ficaram fora do intervalo de confiança, no entanto os valores estimados foram superiores aos valores experimentais, mesmo com este erro, o modelo estima valores que permitem a segurança ambiental visto que o erro é para mais, obtendo valores de permeabilidade maiores que os reais.
- Os aterros que apresentaram melhor desempenho na contenção de líquidos orgânicos foram os que estão com teor de finos obedecendo a faixa ótima. As misturas 3, 2 e 1 obtiveram menores permeabilidade  $K^*$ . As misturas 3, 6 e 5 apresentaram menor variação na permeabilidade ao longo do tempo. A mistura 6 alcançou este bom desempenho, quanto a este critério, devido ao seu baixo teor de argila que reduz a possibilidade de trincamento com o processo de umedecimento e secagem do solo ao longo do tempo. As misturas 2, 7 e 3 garante a segurança ambiental, por mais de 24 horas, permitindo que as medidas de contingência, em caso de vazamento, sejam tomadas.
- De forma geral conclui-se que os aterros de melhor desempenho foram os aterros de misturas 3, 2 e 5, pois apresentaram baixa permeabilidade, pouca variação ao longo do tempo e mais de 24 horas para as medidas de contingência, em caso de vazamento.
- Assim, conclui-se que a faixa granulométrica ótima deve passar por ajustes em seus valores limites. Nesta pesquisa foi sugerido algumas adequações, porém não foi possível adequar os dois limites (inferior e superior) porque durante o processo de mistura dos solos, nenhuma mistura foi obtida com parâmetros acima dos valores especificado na faixa ótima. No entanto, é recomendado que o WL e IP sejam baixos para reduzir trincamentos ao longo do tempo.

## 8. REFERÊNCIAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo**. Adalberto Aurélio Azevedo e José Luiz Albuquerque Filho (Coordenadores). 4ª. Edição. São Paulo: 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17505 **Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 2: Armazenamento em tanques, em vasos e em recipientes com capacidade superior a 3000 L**. 2013.

\_\_\_\_\_NBR 6457. **Amostras de solo. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 1986.

\_\_\_\_\_NBR 6459. **Solo – Determinação do limite de liquidez**. 1984.

\_\_\_\_\_NBR 6502. **Rochas e solos**. 1995.

\_\_\_\_\_NBR 6508. **Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação de massa específica**. 1984.

\_\_\_\_\_NBR 7180. **Solo – Determinação do limite de plasticidade**. 1984.

\_\_\_\_\_NBR 7181. **Análise granulométrica**. 1984.

\_\_\_\_\_NBR 7182. **Ensaio de Compactação**. 1986.

ABUEL-NAGA, H. M.; BERGADO, D. T.; SORALUMP, S.; and RUJIVIPAT, P. **Thermal consolidation of soft bangkok clay**. Lowland Technology International. Vol. 7, N.º 1. June, 2005.

AER - ALBERTA ENERGY REGULATOR. **Directive 055: Storage Requirements for the Upstream Petroleum Industry**. 2001. Disponível em: <<http://www.aer.ca/documents/directives/Directive055.pdf>>. Acesso em: 01 setembro 2014.

AGUIAR, A. B. **O emprego do Permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura.** Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

AMORIM JR., C. J. **Avaliação dos Critérios de Impermeabilização de Bacias de Contenção da Norma ABNT NBR 17505-2/2006 para Terminais de Armazenamento de Petróleo e Derivados.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2007.

BAHIA. Decreto Nº 11.235 de 10 de Outubro de 2008. **Aprova o 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 [...].** 2008. Disponível em: <<http://www.meioambiente.ba.gov.br/legislacao/Decretos%20Estaduais/Meio%20Ambiente-Biodiversidade/Dec11235.pdf>>. Acesso em: 20/11/2013.

BENSEN, C. H.; DANIEL, D. E. **Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay.** Journal of Geotechnical Engineering. Vol 116, N.º 8, August, 1990

BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG, X. **Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners.** Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, N.º 2, February, 1994.

BRANDÃO, V. S. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2003.

BUDHU, M., GIESE JR., R. F., CAMPBELL, G. e BAUMGRASS, L. **The permeability of soils with organics fluids.** Canadian Geotechnical Journal, 28: 140-147. 1991

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** Vol. 1, 6ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Livros Técnicos e Científicos S.A., 1988.

CARDOSO, L. S. P. **Estudo do transporte de poluentes imiscíveis em solos.** Tese Doutorado. Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A. **Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de**

**Green-Ampt.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.3, p.415-422. Campina Grande, 2003.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relação de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo.** Dezembro de 2013. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2013/texto-explicativo.pdf>>. Acesso em: 05/05/2014.

CHANDLER, R. J., CRILLEY, M. S. e MONTGOMERY- SMITH, G. **A low-cost method of assessing clay desiccation for lowrise buildings.** Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng. 92, May, 82-89, 1992.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre, 2013.

CORDEIRO, T. C.; RANGEL A.B.; SILVA E.C. **Técnica De Caracterização Dielétrica De Materiais Líquidos E Pastosos Em Função Da Temperatura.** In: II Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica. 2010.

DANIEL, D. E. **State-of-the-Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils.** In: Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142. D. E. Daniel and S. J. Trautwein (Editores). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

DEFRA – DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD E RURAL AFFAIRS. **Guidance note for the Control of Pollution (Oil Storage) (England) Regulations 2001.** October, 2001. Disponível em: <[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/69255/pb576\\_5-oil-storage-011101.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69255/pb576_5-oil-storage-011101.pdf)>. Acesso em: 01 setembro 2014.

ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D. e TAN, K.A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis.** Ground water monitoring review. Vol. 19, 184-193; 1989.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **SPCC Guidance for Regional Inspectors.** Office of Emergency Management (EPA/550/B-13/002). Revisado, 16 Dezembro 2013. Disponível em:

<[http://www.epa.gov/emergencies/docs/oil/spcc/guidance/SPCC\\_Guidance\\_fulltext.pdf](http://www.epa.gov/emergencies/docs/oil/spcc/guidance/SPCC_Guidance_fulltext.pdf)>.

Acesso em: 01 setembro 2014.

EVANGELOU, V. P. **Environmental soil and water chemistry: principles and applications**. John Wiley & Sons: New York, 1998.

FERNANDEZ, F.; e QUIGLEY, R.M.. **Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons**. Canadian Geotechnical Journal, 22: 205–214. 1985

FIORI, J. P. de O. **Avaliação de método de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 2010.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. Vol. 3 7ª ed. Editora: LTC, 2007.

HILLEL, Daniel. **Soil and Water: Physical Principles and Processes**. Department of Soil Science. The Hebrew University of Jerusalem. Rehovot – Israel, 1971.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in ground water observations**. U.S. Army Corps of Engineers. Waterway Experimentation Station, Bulletin 36. Vicksburg, 1951.

KAYA, A. e FANG, Hsai-Yang. **Experimental evidence of reduction in attractive and repulsive forces between clay particles permeated with organic liquids**. NRC Research Press. Canadá, 2005.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984.

LAMBE, T.W.; e WHITMAN, R.V. **Soil mechanics**, Wiley, New York, 1969.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

LIMA, V. C. G. DA R. **Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.



LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa. 2006.

MACHADO, S. L. **Relatório Final: Proposição de faixa granulométricas ótimas para a confecção de barreiras minerais para líquidos orgânicos.** 2011.

MACHADO, S. L.; DOURADO, K. A. **Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo.** In: 4º Simpósio de Brasileiro de Solos Não Saturados. Porto Alegre, v. 1, 2001.

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

MELEGARI, S. P. **Eficiência das bacias de contenção em áreas de armazenamento de petróleo e derivados em caso de derramamentos superficiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2005.

MENDONÇA, A. L. **Simulação numérica de escoamento incompressíveis bifásicos de fluido não-Newtoniano e imicéis em meios porosos via método dos elementos finitos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil. 2003

MESRI, G.; e OLSON, R.E. **Mechanisms controlling the permeability of clays.** Clays and Clay Minerals, 19: 151-158. 1971.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior.** 3ª Ed. John wiley & sons: 2005.

MORADINI, T. L. C.; LEITE, A. L. **Characterization, Hydraulic Conductivity of Mixtures of Tropical Soil and Bentonite for Barrier Usage Purpose.** Soils and Rocks. ABMS – Brazilian Association for soil mechanics and geotechnical engineering. Vol. 35, N.º 3. São Paulo, 2012.

NUTTING, P. G. **Physical Analysis of oil Sands.** Bull. Amer. Ass. Petr. Geol., v.14, p. 1337-1549, 1930.

OLIVEIRA, J. C. S. de. **Contaminação de Sedimentos Argilosos por Combustíveis Automotivos: Problemas de Avaliação da Permeabilidade.** 116 p. Tese de Doutorado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

PEIXOTO, V. C. **Análise Paramétrica e Dimensionamento de Poços de Infiltração para Fins de Drenagem Urbana.** 111p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PICARELLI, S. **Avaliação da contaminação de solos por hidrocarbonetos e metais pesados em diques de contenção.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia. 2003.

REYNOLDS, W. D.; e ELRICK, D. E. **Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and conductivity-pressure head relationship using the *Guelph permeameter*.** In: National Water Well Association Conference On Characterization And Monitoring Of The Vadose (Unsaturated) Zone. Colorado, 1985.

RICHARDS, B. G. **Capillary conduction of liquids through porous media.** Physics, New York, 1, 318-333. 1931.

RUHL, J. L.; DANIEL, D. E. **Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 123, n.º 4. 1997.

SANTOS, A. B. **Comportamento de *Liners* sob a influência de um contaminante orgânico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2005.

SANTOS, P.de S. **Tecnologia de Argilas: Fundamentos.** Vol. 1. Editora Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo. 1975.

SANTOS, S. de F. F. dos. **Otimização do processo de purificação de biodiesel por lavagem a seco “Dry Washing”.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2010.

SCHRAMM, M.; WARRICK, A. W.; e FULLER W. H. **Permeability of soils to four organic liquids and water.** Vol. 3, n.º 1. Hazardous Waste & Hazardous Materials. 1986.

SHACKELFORD, C. D. **Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity**. In: Hydraulic Conductivity and waste contaminant Transport in Soil.. David E. Daniel and Stephen J. Trautwein. Eds. ASTM STP 1142. Philadelphia, 1994.

SHARMA, Hari D.; LEWIS, Sangeeta P. **Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation**. John wiley & sons. Canadá, 1994.

SHAW, D. J. **Introdução à química dos coloides e de superfícies**. Tradução: Juergen Heinrich Maar. Editora Edgard Blucher. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1975.

SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. **Análise Do Método Do Permeômetro Guelph Na Determinação Da Condutividade Hidráulica Saturada**. Águas Subterrâneas. Vol.23, n.01, p.137-152, 2009.

SOUSA, R. P. **Estudo dos fluxos de óleo diesel e água em solos não saturados: desenvolvimento experimental e modelagem matemática**. Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador 2012.

TAN, Kim. H. **Principles of soil chemistry**. 3<sup>a</sup> ed. M. Dekker: New York, 1998.

VAN GENUCHTEN, M. TH. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Sci. Soc. Am. J., n. 44, p. 892-898, 1980.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A - Os dias de realização dos ensaios na primeira campanha

As letra maiúscula indicam a mistura e os líquidos, seguida de número que indicam a mistura e o número de ensaios. Sendo M – mistura, A – água, B – biodiesel, D – Diesel e G – gasolina. Assim M1-A1 indica que na mistura 1 foi realizado o primeiro ensaio de permeabilidade com água.

Dias	MARÇO		ABRIL		MAIO		JUNHO		JULHO		AGOSTO	
	Pluv. (mm)	Ensaio realizados	Pluv. (mm)	Ensaio realizados	Pluv. (mm)	Ensaio realizados	Pluv. (mm)	Ensaio realizados	Pluv. (mm)	Ensaio realizados	Pluv. (mm)	Ensaio realizados
1	0		20		9		0		0		0	M2 G1
2	0		0	M1 D1 M6 A1 M6 A2 M6 D1	4		5		0		0	
3	0		3		20		7,5		2	M4 D1	10	
4	0		0		0		1		0	M4 D2	0	
5	0	M6 D2 M7 A1 M7 D1	0		10		32		0	M4 A1 M4 A2	0	
6	0	M1 A1 M7 D2	0		0		25		15		35	M7 B1 M7 B2
7	0		0		0	M2 D2 M3 A1	4		3,5		5	M6 B1 M6 B2
8	0	M2 G2	0		0		19		0	M5 A1 M5 A2	1	M5 B1 M5 B2
9	0		0		10		6		15		2	
10	0		0		0	M3 A2 M3 D1 M3 D2	8		6	M5 G1 M5 G2	0	
11	0		0		45		10		10,5		2	
12	0		0	M1 D2 M2 A1 M7 G2	20		10		3	M3 G2	1	
13	0		0		0		4		13	M3 G1	14	M4 B1 M4 B2
14	0		0		15		2,5		1		0	M3 B1 M3 B2
15	0		0		60		45		1		0	
16	0		0	M1 A2 M1 G1 M2 D1 M2 A2	24		5		0	M4 G1	4	
17	0		24	M1 G2	20		55		0	M4 G2	8	
18	0		30		30		27		3		2	
19	4		52,5		30		49		10		3	
20	5		8		41		3		6		30	M2 B1 M2 B2
21	0		22		0		11,5		0		1	

22	5		5		0		0		0		2	
23	0		30		0		0		0		20	
24	0		50		0		0		0	M6 G1 M6 G2	10	
25	0		90		0		0		10		0	
26	0		0		4		1	M5 D1 M5 D2	24		0	
27	0		10		47,5		25		36		0	
28	0		10		0		15		3,5		0	M1 B1 M1 B2
29	0		22		0		0		4	M7 G2	2	
30	39		35		0		0		0		12	
31	0		-		0		-		1	M7 G1	32	

### APÊNDICE B - Os dias de realização dos ensaios na segunda campanha

As letra maiúscula indicam a mistura e os líquidos, seguida de número que indicam a mistura e o número de ensaios. Sendo M – mistura, A – água, B – biodiesel, D – Diesel e G – gasolina. Assim M1-A1 indica que na mistura 1 foi realizado o primeiro ensaio de permeabilidade com água.

Dias	NOVEMBRO / 13		DEZEMBRO / 13		JANEIRO / 14	
	Pluviosidade (mm)	Ensaio realizados	Pluviosidade (mm)	Ensaio realizados	Pluviosidade (mm)	Ensaio realizados
1	0		0		0	
2	13		0		0	
3	30		0	M7 B1 M7 B2	0	
4	0		0	M2 B1 M2 B2 M3 B1	0	
5	0		0		0	
6	0		0	M2 D1 M2 D2	0	
7	0		0		0	
8	0		0		2	
9	0		0	M3 D1 M3 D2	13	
10	0		0	M2 G1 M3 G1 M3 G2	6	
11	0		0	M2 G2 M5 G1	0	M2 A1 M2 A2
12	0	M6 B1 M6 B2	0		2	

13	0	M1 B1 M1 B2 M4 B1 M4B2	0		4	
14	0	M4 D1 M4 D2 M6 D1 M6 D2	0		6	
15	15		0		0	
16	0		0		0	M3 B2 M5 G2
17	0		5		0	M3 A1 M5 B1 M5 B2
18	0	M1 D1 M1 D2 M4 G1 M4 G2	3		0	
19	3	M1 G1 M1 G2 M6 G1 M6 G2	0		0	
20	0	M4 A1 M4 A2 M6 A1 M6 A2	40		0	M5 A1 M5 D1 M5 D2
21	0	M1 A1 M1 A2	1		4	
22	0		2		8	
23	0		0		0	M3 A2 M5 A2
24	0		0		5	
25	0	M7 G1 M7G2	0		0	
26	0	M7 A1 M7 A2	0		0	
27	10	M7 D1 M7 D2	0		0	
28	60		0		0	
29	0		0		0	
30	0		0		0	
31	-		0		0	