

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

CARLOS JOSÉ DE AMORIM JÚNIOR

**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

FLORIANÓPOLIS, 2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

CARLOS JOSÉ DE AMORIM JÚNIOR

**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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil

FLORIANÓPOLIS, 2007

Amorim Jr, Carlos José de

Avaliação dos Critérios de Impermeabilização de Bacias de Contenção da Norma ABNT NBR 17505-2/2006 para Terminais de Armazenamento de Petróleo e Derivados.

Carlos José de Amorim Júnior – Florianópolis, 2007.

xiii, 114f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Título em inglês: Evaluation of Impermeability Criteria for Secondary Containments in the Standard ABNT NBR 17505-2/2006 for Storage Terminals of Petroleum and Petroleum Products.

1. Bacia de Contenção. 2. Impermeabilização. 3. Coeficiente de Permeabilidade. 4. Solo Argiloso. 5. Petróleo e Derivados.

TERMO DE APROVAÇÃO

CARLOS JOSÉ DE AMORIM JÚNIOR

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 submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Aprovado por:

Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC

Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC

Prof^ª. Dr^a. Iara Brandão de Oliveira
Departamento de Engenharia Ambiental, UFBA

Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil
(Orientador)

Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares
(Coordenador)

FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 2007.

“Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar suas próprias árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar do calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece, para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como imaginamos e não simplesmente como ele é ou pode ser; que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver”.

(Amyr Klink)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Henry, pelo exemplo de Mestre nesses mais de 6 anos de orientação, da iniciação científica ao mestrado, pelo grande entusiasmo e dedicação à pesquisa, contagiando e dando segurança para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de pesquisa, e ao CENPES/PETROBRAS e TRANSPETRO/PETROBRAS pelo financiamento do projeto *Avaliação da eficiência das bacias de contenção de terminais de armazenamento e do risco ambiental associado aos possíveis derramamentos de petróleo e derivados*, em especial ao Mário do Rosário pela disponibilidade e amizade.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) que, além de públicos e gratuitos, proporcionaram toda a infra-estrutura necessária para a realização do mestrado em Engenharia Ambiental.

À banca examinadora, pela disponibilidade.

A toda equipe do Laboratório de Remediação de Solos e Águas Subterrâneas (REMAS) pelo companheirismo e amizade: Aline Matulja, Ana Hilda, Ana Paula, Beatriz Becker, Cássio Moraes, Cristina Nunes, Érico Malamud, Gerly Sanchez, Jovani Lazarin, Márcio Busi, Marcos Wendt, Mariana Moller, Marilda Fernandes, Nara Alonso, Rafael Andrade, Tatiana Heltel, em especial ao Alexandre Scheidt, à Deise Paludo, à Helen Simone e ao Márcio Schneider.

Ao Professor José Carlos e seu filho Alexandre, pelo auxílio na coleta de campo e parte experimental, e também ao Felipe Trennepohl pelo auxílio na parte experimental.

A minha querida Vó Jandira, a maior incentivadora para minha formação.

Aos meus pais, Carlos e Darlete, por todo amor, carinho, dedicação, compreensão, paciência e ensinamentos, e pelo sentido que me dão à vida. Dedico este trabalho a vocês.

Aos meus irmãos Dé, Dudu e Gustavo, pela irmandade e amizade cada vez mais fortalecida.

A minha namorada Bruna, pelo amor incondicional, por estar sempre presente mesmo na minha ausência, e por iluminar o caminho dos nossos sonhos.

Aos meus amigos missionários da capoeira, em especial ao Tuti, grande mestre da capoeira, da amizade e da vida.

A todos os amigos que diretamente ou indiretamente me acompanharam nesta caminhada, em especial à Deise, ao Gafa, ao Marcos e ao Paulo (*in memoria*), pela amizade eternizada.

RESUMO

No Brasil ainda não existe uma legislação federal específica estabelecendo os critérios de impermeabilização em áreas de armazenamento de líquidos inflamáveis. A Bahia é o único estado que possui uma legislação distinta sobre eficiência de retenção de bacias de contenção, a qual estabelece que tais áreas devem ser providas de diques de contenção devidamente impermeabilizados. Apesar disso, alguns estados têm apresentado recomendações sobre impermeabilização tomando como base a norma brasileira ABNT NBR 17505-2/2006. A NBR 17505-2 especifica que bacias de contenção devem ter coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-6} cm/s, referenciado à água a 20°C, ou 10^{-4} cm/s, referenciado à água a 20°C, caso possuam canaletas de drenagem. O solo argiloso compactado é o material predominantemente empregado na impermeabilização de bacias de contenção devido à eficiência comprovada na retenção da água e ao baixo custo de implementação. No entanto, estudos têm demonstrado que solos argilosos submetidos à infiltração de compostos orgânicos apresentaram coeficientes de permeabilidade superiores aos obtidos em ensaios com água. Em vista disso, o objetivo geral deste estudo foi avaliar se os critérios estabelecidos pela NBR 17505-2 são suficientes para a tomada de decisão sobre a impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos, considerando o estudo de caso de cinco terminais. Para isso, foram coletadas 118 amostras de solos dentre 51 bacias de contenção dos cinco terminais. As amostras de solo foram submetidas a ensaios de granulometria e raios-X, e determinação do coeficiente de permeabilidade referenciado à água e aos produtos armazenados nas bacias de contenção. Os ensaios de granulometria demonstraram composição distinta entre os solos dos terminais. A composição mineralógica do solo revelou a predominância dos argilominerais illita e caulinita, caracterizados como não expansivos. Através dos ensaios de permeabilidade, foi possível constatar a influência da mobilidade do líquido percolado no valor do coeficiente de permeabilidade. A exemplo disso, verificou-se que as amostras permeadas por óleo combustível ou gasóleo, produtos de altíssima viscosidade, apresentaram coeficientes de permeabilidade na ordem de 10^{-8} cm/s, independente das mesmas apresentarem valores de permeabilidade à água entre as ordens de grandeza 10^{-7} a 10^{-3} cm/s. No geral, os resultados revelaram que 52% das bacias de contenção apresentaram o coeficiente de permeabilidade referenciado ao produto maior que o coeficiente de permeabilidade referenciado à água. Logo, este estudo demonstrou que os critérios estabelecidos pela NBR 17505-2 relacionados à impermeabilização de bacias de contenção não oferecem proteção efetiva aos solos e às águas subterrâneas. Com isso, foram propostos novos procedimentos para a avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção, os quais se baseiam na previsão da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração do contaminante, em caso de derramamento. Esse estudo de previsão do cenário concebe uma excelente ferramenta para tomada de decisão no gerenciamento dessas áreas com grande potencial de contaminação, e permite avaliar a eficiência de impermeabilização das bacias de contenção considerando-se as especificidades de cada local.

ABSTRACT

In Brazil there is no specific federal legislation establishing impermeability criteria in flammable liquid storage areas. Bahia is the only state having specific legislation about the retention capacity of secondary containments. The state's legislation establishes that these areas must have dikes sufficiently impermeable. In spite of that, some states have recommended impermeability criteria based on the Brazilian standard ABNT NBR 17505-2/2006. According to that standard, secondary containments must have a maximum permeability coefficient of 10^{-6} cm/s, measured with water at 20°C, or 10^{-4} cm/s, measured with water at 20°C, if draining trough are present. Compact clay soil has proved to be efficient in water retention and low implementation cost, being predominantly used in secondary containments. However, researchers have found that clay soils permeated by organic compounds presented permeability coefficients higher than those permeated by water. This work aimed to evaluate if the impermeability criteria of NBR 17505-2 are enough for assuming that the secondary containments of aboveground storage tanks are impermeable, considering the five-terminal case studies. A total of 118 soil samples were collected from 51 secondary containments in the five terminals. The soil samples were submitted to grain size tests and X-ray tests, and had their permeability coefficient measured with water and with the product stored in the secondary containment tanks. The grain size test showed a different soil composition in all five terminals. The soil mineralogical composition showed predominance of the non-expansive clay minerals illita and kaolinita. By means of the permeability tests, the permeated liquid mobility was found to have an influence on the permeability coefficient value. For example, the samples permeated by combustible oil or diesel oil - high viscosity products - had permeability coefficient at the order 10^{-8} cm/s, while the same samples showed permeability values for water ranging from 10^{-7} to 10^{-3} cm/s. In 52% of the secondary containments, the permeability coefficient measured using product was higher than the permeability coefficient measured using water. This research showed that the criteria established by NBR 17505-2 for secondary containment impermeability do not offer complete protection to soils and groundwaters. On the basis of the results, new procedures were proposed for evaluating the secondary containment impermeability capacity. Those procedures were based on the forecast of contaminated soil depth as a function of the compound migration time, in case of spills. This scenario forecast study serves as an excellent tool for managing areas with a large contamination potential, and allows the evaluation of the secondary containment impermeability capacity, considering the idiosyncrasies of each site.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. REFERÊNCIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS RELACIONADAS À IMPERMEABILIZAÇÃO DE BACIAS DE CONTENÇÃO	7
2.2. ALTERNATIVAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO E SUAS LIMITAÇÕES.....	12
2.2.1. <i>Revestimentos de Concreto</i>	12
2.2.2. <i>Geomembranas</i>	13
2.2.3. <i>Outras alternativas de impermeabilização</i>	14
2.3. PRINCIPAIS CAUSAS DE DERRAMAMENTOS E VAZAMENTOS EM TANQUES VERTICAIS DE ARMAZENAMENTO E MEDIDAS PREVENTIVAS	15
2.4. PERMEABILIDADE DE COMPOSTOS ORGÂNICOS EM SOLOS ARGILOSOS	19
2.5. TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	29
3.1.1. <i>Terminal 1</i>	29
3.1.2. <i>Terminal 2</i>	30
3.1.3. <i>Terminal 3</i>	31
3.1.4. <i>Terminal 4</i>	31
3.1.5. <i>Terminal 5</i>	32
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DAS BACIAS DE CONTENÇÃO	33
3.2.1. <i>Procedimentos de coleta de amostras indeformadas e deformadas de solo</i>	34
3.2.2. <i>Procedimentos analíticos</i>	36
3.2.2.1. <i>Análise granulométrica</i>	36
3.2.2.2. <i>Análise de raios-X</i>	37
3.2.2.3. <i>Análise do coeficiente de permeabilidade</i>	38

3.2.2.4.	Determinação da porosidade total	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS	43
4.1.1.	<i>Análise granulométrica</i>	<i>43</i>
4.1.2.	<i>Análise de raios-X</i>	<i>47</i>
4.2.	AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DAS BACIAS DE CONTENÇÃO	51
4.2.1.	<i>Avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção segundo os critérios estabelecidos pela norma NBR 17505-2.....</i>	<i>53</i>
4.2.2.	<i>Avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção considerando os coeficientes de permeabilidade referenciados aos produtos armazenados</i>	<i>55</i>
4.3.	PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DAS BACIAS DE CONTENÇÃO	60
4.3.1.	<i>Modelo matemático simplificado para o cálculo da migração vertical dos produtos na zona não saturada do solo das bacias de contenção</i>	<i>60</i>
4.3.2.	<i>Procedimentos propostos para a avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção</i>	<i>63</i>
4.3.3.	<i>Aplicação da proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção nos cinco estudos de caso.....</i>	<i>66</i>
4.3.4.	<i>Recomendações complementares na avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção.....</i>	<i>78</i>
5.	CONCLUSÕES.....	81
6.	RECOMENDAÇÕES	86
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICES.....		94
APÊNDICE A –	TABELAS DE RESULTADOS DAS ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	95
APÊNDICE B –	TABELAS DE RESULTADOS DAS ANÁLISES DE RAIOS-X	100
APÊNDICE C –	TABELAS DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	105
APÊNDICE D –	TABELAS DE RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE POROSIDADE	110

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Possíveis falhas na impermeabilização em sistemas de contenção: A) Aplicação inadequada da geomembrana, com exposição aos raios solares, podendo resultar em rápida depreciação pela ação do tempo; B e C) Pontos em que as geomembranas não podem conter possíveis vazamentos, como em juntas, conexões e estruturas cravadas no solo; D) Fissuras e juntas de dilatação que podem ser pontos vulneráveis na impermeabilização com concreto.....	14
FIGURA 2.2 – Parque de armazenamento de combustíveis em que são identificados os tanques de armazenamento, os sistemas de contenção primários e os secundários (bacias de contenção delimitadas pelos diques).....	16
FIGURA 2.3 – Modelo conceitual da distribuição de hidrocarbonetos de petróleo na subsuperfície. FONTE: Adaptado de API (2001)	25
FIGURA 2.4 – Coeficiente de permeabilidade relativo do LNAPL em função do grau de saturação do solo em água. FONTE: API (2001).....	28
FIGURA 3.1 – Procedimento de coleta de amostra de solo.....	36
FIGURA 3.2 – Esquema dos permeômetros utilizados nos ensaios de laboratório	40
FIGURA 3.3 – Vista geral dos permeômetros montados no laboratório.....	41
FIGURA 3.4 – Seqüência de montagem das células dos permeômetros. A) Serração da resina que mantém as características de umidade do solo; B) Retirada de uma camada de 1,0 cm de solo nas superfícies inferior e superior da amostra, deixando as faces planas, e medição do comprimento da camada de solo; C) Colocação dos anéis e borrachas de vedação; D) Colocação das telas de nylon e pérolas de vidro; E) Montagem do permeômetro e abertura do registro que permite o fluxo do líquido analisado através do solo.	41
FIGURA 4.1 – Valores médios das frações granulométricas do solo de cada bacia de contenção: A) Terminais 1, 2 e 3. B) Terminais 4 e 5.....	46
FIGURA 4.2 – Difratogramas típicos resultantes da análise de raios-X: A) amostra B3 do Terminal 1, B) amostra M1 do Terminal 2, C) amostra S30 do Terminal 3, D) amostra C10 do Terminal 4, E) amostra P8 do Terminal 5.....	50
FIGURA 4.3 – Frações das bacias de contenção que atendem aos critérios de permeabilidade estabelecidos pela norma NBR 17505-2.....	53
FIGURA 4.4 – Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados à água.	54
FIGURA 4.5 – Frações das bacias de contenção que atendem aos critérios de permeabilidade, considerando os coeficientes de permeabilidade referenciados aos produtos.	55

FIGURA 4.6 – Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados aos produtos.	56
FIGURA 4.7 – Frações das bacias de contenção que atendem aos dois critérios de permeabilidade, coeficientes de permeabilidade referenciados à água e ao produto.	57
FIGURA 4.8 – Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados ao produto e à água.	58
FIGURA 4.9 – Comparação entre o número de bacias de contenção que apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade ao produto maior que à água.	59
FIGURA 4.10 – Modelo conceitual do derramamento de LNAPL em uma bacia de contenção.	60
FIGURA 4.11 – Valores de porosidade total mínima do solo de cada bacia de contenção.	68
FIGURA 4.12 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 1.	70
FIGURA 4.13 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 2.	71
FIGURA 4.14 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 3.	72
FIGURA 4.15 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 4.	73
FIGURA 4.16 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 5.	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Normas técnicas que substituem a NBR 7505-1.	8
TABELA 2.2 – Coeficiente de permeabilidade máximo.	11
TABELA 2.3 – Densidade (ρ), viscosidade dinâmica (μ), constante dielétrica do produto (ϵ_p) e da água (ϵ_w), e a razão obtida entre permeabilidade intrínseca para o produto e a água pela equação de Budhu et al (1991).	24
TABELA 3.1 – Número de bacias de contenção e amostras de solo coletadas por terminal.	34
TABELA 3.2 – Propriedades dos produtos armazenados nos terminais.	39
TABELA 4.1 – Resumo das nas análises granulométricas de solos dos terminais.	44
TABELA 4.2 – Argilominerais presentes nos solos das bacias de contenção.	48
TABELA 4.3 – Descrição das classificações dos locais, cenários previstos em caso de derramamento, avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção e ações de resposta.	65
TABELA 4.4 – Parâmetros de cálculo da carga aplicado às bacias de contenção.	69
TABELA 4.5 – Classificação das bacias de contenção em função da profundidade de solo contaminado, segundo a Tabela 4.4, e os respectivos produtos armazenados e permeabilidades máximas.	77

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A indústria petrolífera está no centro do sistema produtivo contemporâneo, uma vez que serviu de base para o desenvolvimento de vários e poderosos setores industriais: automobilístico, aeronáutico, químico, sintéticos, adubos e etc. Além disso, o petróleo ainda é a principal matriz energética em uso (ROSA, 2004). O Brasil produz, armazena, distribui e revende grandes quantidades de petróleo e derivados, sendo uma das principais indústrias do país. A magnitude da indústria do petróleo no Brasil pode ser avaliada por meio dos dados do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2006. Conforme este Anuário (ANP, 2006), as reservas totais brasileiras de petróleo atingiram a marca de 16,1 bilhões de barris e a produção alcançou um volume de 1,7 mil barris por dia em 2005. Das reservas, 91,6% localizam-se no mar e 8,4% em jazidas terrestres. Apesar da predominância de reservas marinhas no Brasil, dos 8.002 poços de exploração existentes, 90,9% estão localizados em terra. Para viabilizar a movimentação de petróleo, derivados e etanol no território nacional, o Brasil dispunha, em 2005, de 9 centros coletores de etanol, 53 terminais aquaviários e 27 terrestres. Esses terminais possuem uma capacidade nominal de armazenamento de 11,0 milhões de m³ distribuída em 1.392 tanques, dos quais 24 em centros coletores de etanol, 1.063 em terminais aquaviários e 305 em terrestres. A infra-estrutura dutoviária nacional é composta de 446 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos, que somam 15,1 mil km de extensão. O Brasil conta ainda com 551 bases de distribuição e 35.585 postos revendedores de combustíveis automotivos. Devido aos milhões de barris de petróleo e derivados estocados ao longo do país, o potencial de ocorrer vazamentos é muito significativo, e os efeitos destas contaminações podem acarretar impactos ambientais graves, tanto pela magnitude como pela dificuldade de recuperação dos ecossistemas, ameaçando solos, águas subterrâneas, águas superficiais e o ar atmosférico.

Segundo Cheremisinoff (1996), uma das principais fontes de contaminação de solos e águas subterrâneas têm sido os vazamentos de tanques de armazenamento de produtos químicos. O Programa Federal UST (*Underground Storage Tank*), da Agência

de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), cadastrou, até setembro de 2006, mais de 460 mil casos de derramamentos em tanques de armazenamento subterrâneo (USEPA, 2006). No Brasil, a Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é o único órgão de controle ambiental que dispõe de informações detalhadas sobre áreas impactadas. A CETESB vem cadastrando constantemente os registros de áreas contaminadas chegando a totalizar, em novembro de 2006, um número de 1.822 áreas contaminadas cadastradas. Os principais grupos de contaminantes encontrados nas áreas contaminadas são: solventes aromáticos, combustíveis líquidos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), metais e solventes halogenados. Os postos de combustíveis e as atividades industriais destacam-se na lista de áreas contaminadas da CETESB como principais responsáveis pelos impactos, representando 74% e 15% dos casos, respectivamente. A contaminação do solo pode gerar problemas como danos à saúde humana, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, restrições ao uso do solo e danos ao patrimônio público e privado, como a desvalorização das propriedades, além de danos ao meio ambiente (CETESB, 2006).

Além dessas problemáticas, a remediação de solos contaminados geralmente envolve altos custos e longos períodos de tempo. Os custos para remediar os impactos causados são da ordem de 100 mil dólares em locais onde se verifica contaminação de solo e de 250 mil dólares em locais com contaminação de solo e água subterrânea (CATALDO e MOYER, 2001). Segundo relatório publicado pela empresa Redox Tech e FMC Corporation (2004), os custos de remediação de uma área contaminada com DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquid*) na zona vadosa e saturada foram de, aproximadamente, 7 dólares por tonelada de solo contaminado. No Brasil, a remediação de uma área contaminada em uma região central de uma cidade qualquer custa, em média, até 20% do valor do terreno recuperado (INSTITUTO EKOS BRASIL, 2004).

Devido aos altos custos de recuperação de áreas impactadas, as metas de remediação geralmente são decididas baseadas em estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e ao Meio Ambiente. A seleção de soluções corretivas baseadas no risco à saúde humana e ao meio ambiente permite destinar de forma eficiente os recursos humanos e financeiros às áreas a serem remediadas. Portanto, a Avaliação de Risco é uma importante ferramenta no gerenciamento ambiental de áreas de armazenamento de combustíveis, utilizada para determinação do perigo potencial para a saúde humana e meio ambiente, antes mesmo da ocorrência de derramamento, auxiliando a definição de planos de contingência e emergência (PEDROZO et al., 2002).

Um dos problemas enfrentados no Brasil na revitalização de áreas contaminadas é a ausência de mecanismos para financiar a remediação quando estas não têm um responsável facilmente identificável. Nesses casos é necessária uma presença maior do Estado no financiamento da remediação enquanto se buscam na Justiça os responsáveis por cada contaminação. Alguns países desenvolvidos mantêm fundos especiais para remediação de áreas impactadas, como é o caso do programa norte-americano *Superfund* (USEPA, 2007). Na Europa, dependendo do país, os gastos anuais desses fundos com remediação variam de 2 a 35 euros *per capita* (EEA, 2003).

Com o crescente e elevado número de áreas impactadas, e os altos custos de remediação destas áreas, surge a necessidade de se desenvolver mecanismos de proteção e prevenção de solos e águas subterrâneas que apresentam grande potencial de contaminação. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde as demandas sociais e de infra-estrutura são muito altas e a questão ambiental é freqüentemente relegada a um segundo plano por ausência de alocação de recursos para este fim, mecanismos de prevenção devem ser avaliados como a estratégia mais adequada para essas áreas.

Um dos principais mecanismos de prevenção de contaminação de solos e águas subterrâneas é o solo argiloso compactado. Esse solo tem uma ampla aplicação na impermeabilização de açudes, lagoas de estabilização, células de aterros sanitários e núcleos de argila para proteção de tanques subterrâneos de combustíveis contra vazamentos. No caso de terminais de armazenamento e distribuição de petróleo e derivados, bacias de contenção são construídas ao redor dos tanques verticais de armazenamento para conter lateralmente e verticalmente eventuais vazamentos. O solo argiloso compactado é o material empregado predominantemente na impermeabilização de estruturas das bacias de contenção devido à eficiência comprovada na retenção da água e ao baixo custo de implementação.

No Brasil, o conjunto de normas ABNT NBR 17505/2006, substituto da ABNT NBR 7505-1/2000, cancelada em 03/07/2006, é a principal referência utilizada na construção e operação de parques de tanques de armazenamento de produtos inflamáveis ou combustíveis. Desse conjunto de normas, a NBR 17505-2/2006 apresenta os critérios construtivos das estruturas de controle de derramamento de tanques verticais. A NBR 17505-2 exige que os diques e bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento tenham coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-6} cm/s, referenciado à água a 20°C, de forma análoga à norma cancelada NBR 7505-1, ou

de 10^{-4} cm/s, também referenciado à água a 20°C, para as bacias de contenção que possuem canaletas de drenagem com área de escoamento mínimo de 900 cm².

Na utilização de solo para impermeabilização de áreas de bacias de contenção, o coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} cm/s (referenciado à água) é facilmente alcançado através de recobrimento do local com material argiloso compactado. No entanto, vários pesquisadores (MESRI e OLSON, 1971; GILLIGAN e CLEMENCE, 1984; BROWN e THOMAS, 1984; FERNANDEZ e QUIGLEY, 1985; ANDERSON et al., 1985; UPPOT e STEPHENSON, 1989; OLIVEIRA, 2001; MELEGARI, 2005) reportaram que solos argilosos submetidos à infiltração de compostos orgânicos (gasolina, querosene, óleo diesel, tetracloreto de carbono, dentre outros) apresentaram coeficientes de permeabilidade superiores aos obtidos em ensaios com água. Em solos arenosos não saturados este mesmo fenômeno não ocorreu.

McCaulou e Huling (1999) reportam a utilização de barreiras de argila expansiva (bentonita) em sítios de resíduos perigosos, para separar líquidos densos e imiscíveis em água (DNAPLs). Os autores demonstraram em seu trabalho de pesquisa que DNAPLs, em alta concentração, podem comprometer a integridade estrutural da barreira argilosa e concluíram que as normas vigentes recomendadas pela USEPA em 1992, para construção de revestimento de poços e barreiras para contenção de resíduos em sítios de resíduos perigosos, poderiam estar inadequadas.

Em outro estudo, Melegari (2005) avaliou o coeficiente de permeabilidade em bacias de contenção do Terminal de Cubatão - SP aos produtos específicos armazenados nos tanques. Das 15 bacias de contenção avaliadas, 4 apresentaram coeficiente de permeabilidade do solo ao produto maior que a permeabilidade do solo à água. Como os resultados indicaram que a permeabilidade do solo ao produto (ex. gasolina, diesel, óleo combustível, etc.) pode ser diferente da permeabilidade do solo à água, concluiu-se que o coeficiente de permeabilidade referenciado à água não é um critério único e suficiente para definir a eficiência das bacias de contenção.

Em 2005, a USEPA divulgou o guia SPCC *Guidance for Regional Inspectors* com o objetivo de orientar os inspetores regionais sobre procedimentos de controle e prevenção da poluição por derramamentos de óleo em áreas de armazenamento de combustíveis (USEPA, 2005). A USEPA (2005) orienta que a adequação do solo como material da bacia de contenção pode depender das propriedades dos produtos armazenados nos tanques e do tipo de solo empregado na contenção. Por isso, a USEPA (2005) não fixa um parâmetro de permeabilidade, mas orienta que as bacias de contenção devem ser suficientemente impermeáveis, ou seja, capazes de conter

derramamentos até que o produto derramado seja removido da bacia de contenção, considerando fatores específicos do local.

Mesmo nesse contexto, diversos órgãos ambientais estaduais do Brasil têm exigido que bacias de contenção em terminais de armazenamento de petróleo e derivados atendam aos critérios de impermeabilização estabelecidos pela NBR 17505-2, o qual se baseia no coeficiente de permeabilidade referenciado à água. Para que as bacias fiquem em conformidade com a norma, muitos terminais teriam que utilizar alternativas convencionais de melhoria na impermeabilização como solo argiloso expansivo compactado, concretagem, geomembranas, entre outras alternativas, que alterem a permeabilidade à água dos solos naturais, demandando custos da ordem de milhões de reais para os terminais. Além de essas medidas mitigadoras apresentarem elevados custos de implantação, o critério baseado nessa tomada de decisão não leva em consideração o produto armazenado na bacia de contenção e as especificidades do local, podendo gerar desperdício de recursos financeiros em áreas sem potencial de poluição.

Com isso, uma das principais questões a ser respondida através do estudo de avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção talvez não seja “Quais devem ser os valores máximos de coeficiente de permeabilidade, referenciado à água, das bacias de contenção?”, mas sim “Qual deve ser o tempo máximo que o petróleo e seus derivados podem ficar retidos nas bacias de contenção de forma que seja possível o acionamento dos planos de emergência sem que o produto derramado cause maiores prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente?”.

Tendo em vista o exposto acima, faz-se necessário avaliar a segurança dos mecanismos de proteção ambiental de tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis exigidos pela norma vigente no país. Para atender essa necessidade, este trabalho identificou objetivos bem definidos, que serão descritos a seguir. Este estudo foi realizado pelo Laboratório de Remediação de Solos e Águas Subterrâneas (REMAS) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e com a parceria da PETROBRAS.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste estudo foi avaliar se os critérios estabelecidos pela Norma Brasileira ABNT NBR 17505-2/2006 são suficientes para a tomada de decisão sobre a impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos, considerando o estudo de caso de cinco terminais de armazenamento associados a possíveis derramamentos.

Os objetivos específicos foram:

1. Avaliar a influência da composição mineralógica dos solos das bacias de contenção dos cinco terminais estudados em relação aos coeficientes de permeabilidade dos solos percolados por água e produtos armazenados;
2. Avaliar a influência do líquido percolado na determinação do coeficiente de permeabilidade dos solos amostrados nas bacias de contenção de cinco terminais de armazenamento através de ensaios de permeabilidade referenciados à água e aos produtos neles armazenados;
3. Avaliar se as bacias de contenção das áreas de estudo atendem aos critérios de impermeabilização exigidos pela norma NBR 17505-2;
4. Propor um modelo matemático simplificado para o cálculo de previsão da profundidade de solo contaminado na zona não saturada em função do tempo de migração vertical dos produtos armazenados nas bacias de contenção, considerando as especificidades de cada local;
5. Propor procedimentos para avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos associados a possíveis derramamentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Referências nacionais e internacionais relacionadas à impermeabilização de bacias de contenção

No Brasil não existe uma legislação federal específica estabelecendo os critérios de impermeabilização das bacias de contenção de áreas de armazenamento de combustíveis. O Estado da Bahia é uma das únicas unidades da Federação que possui uma legislação com foco na eficiência de retenção das bacias de contenção, estabelecendo, no Artigo 111 do Decreto Estadual nº 7.967, de junho de 2001, que “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, 2001). Apesar de não existir uma legislação federal específica, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou um conjunto de instrumentos normativos que define os critérios de construção e impermeabilização de bacias e diques de contenção em áreas de armazenamento de líquidos inflamáveis. A Norma Brasileira NBR 7505-1, criada pela ABNT, foi a principal referência utilizada na construção e operação de parques de tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis até julho de 2006. Em 03/07/2006 a NBR 7505-1 foi cancelada e substituída pelo conjunto de normas ABNT NBR 17505 (Tabela 2.1).

TABELA 2.1 – Normas técnicas que substituem a NBR 7505-1.

Norma	Descrição	Fase
NBR7505-1	Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários	Cancelada em 03/07/2006
NBR17505-1	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 1: Disposições gerais	Publicadas em 03/07/2006 e entram em vigor em 03/08/2006
NBR17505-2	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 2: Armazenamento em tanques e em vasos	
NBR17505-3	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 3: Sistemas de tubulações	
NBR17505-4	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 4: Armazenamento em recipientes em tanques portáteis	
NBR17505-5	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 5: Operações	
NBR17505-6	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 6: Instalações e equipamentos elétricos	
NBR17505-7	Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 7: Proteção contra incêndio para parques de armazenamento com tanques estacionários	

FONTE: ABNT NET: <<http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=25203>>

O conjunto de normas ABNT NBR 17505 tem como objetivo geral fixar os requisitos exigíveis para os projetos de instalações de armazenamento, manuseio e uso de líquidos inflamáveis e combustíveis (produtos) 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 tanque de superfície. Esta parte da ABNT NBR 17505 fixa as condições exigíveis para projetos de instalações de armazenagem de produtos contidos em tanques estacionários com capacidade superior a 450 L, à pressão manométrica igual ou inferior a 103,4 kPa, medida no topo do tanque.

As bacias de contenção, nas quais os tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis ou combustíveis estão inseridos, devem ter capacidade volumétrica no mínimo igual à capacidade do maior tanque armazenado, de acordo com o item 5.2.3.2 da NBR 17505-2, sendo que a altura máxima do dique, medida pela parte interna da bacia, deve ser de 3 m. Em relação à impermeabilização das bacias de contenção, esse item da NBR 17505-2, de forma análoga a NBR 7505-1, ainda especifica que as paredes internas dos diques e os pisos das bacias de contenção de tanques estacionários de produtos devem ter coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-6} cm/s referenciado à água a 20°C. Nos casos em que as bacias de contenção possuam canaletas de drenagem em concreto armado com área de escoamento mínimo de 900 cm² em torno dos tanques

será admitida a permeabilidade 10^{-4} cm/s, referenciado à água. Ressalta-se que os valores do coeficiente de permeabilidade do solo das bacias de contenção recomendados pela norma, assim como na NBR 7505-1, são referenciados à água a 20°C e não aos produtos armazenados nos tanques. A NBR 17505-2 recomenda que as bacias e diques de contenção sejam projetados para serem estanques, com materiais de impermeabilização como terra, concreto, aço ou alvenaria sólida.

Nos Estados Unidos a principal regulamentação que faz referência à impermeabilização de bacias de contenção é o Registro Federal 40 CFR 112 da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA), intitulada “*Oil Pollution Prevention*” de julho de 2002. O parágrafo 112.7(c) desta regulamentação estabelece 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 (USEPA, 2002). Vários estados americanos elaboraram as regulamentações baseadas na 40 CFR 112, são os casos da Flórida, através do documento “*Underground Storage Tank Systems*” desenvolvido pelo Departamento de Proteção Ambiental da Flórida, de Massachusetts, através do “*Massachusetts Rules on the Prevention and Control of Oil Pollution (314 CMR 15.00)*”, de New Jersey (“*New Jersey Spill Compensation and Control Act*” (N.J. Stat. Ann. 58:10-23.11), desenvolvido pelo Departamento de Proteção Ambiental e Energia (DEPE) deste estado), do Oregon através do “*Oregon Oil and Hazardous Materials Spill Act*” (Or. Rev. Stat. §468B.300) e da Virginia (“*Facility and Aboveground Storage Tank Regulations*” (9 VAC 25-91-10), adotado pelo Conselho de Controle de Água do Estado da Virginia).

0A USEPA divulgou, em novembro de 2005, o seu mais recente guia com orientações aos inspetores regionais sobre procedimentos de controle e prevenção da poluição por derramamentos de óleo em áreas de armazenamento de combustíveis. O *SPCC Guidance for Regional Inspectors* (USEPA, 2005) orienta que a adequação do solo como material da bacia de contenção pode depender das propriedades dos produtos armazenados nos tanques e do tipo de solo empregado na contenção. Por exemplo, o solo compactado do local pode ser impermeável a derramamento de líquidos viscosos como cimento asfáltico líquido, ou óleo combustível, mas não ser adequado a conter gasolina. Por este motivo, a USEPA não fixa um parâmetro de permeabilidade, mas orienta que as bacias de contenção devem ser capazes de conter derramamentos até que o produto derramado seja removido da bacia de contenção, considerando fatores específicos do local.

Outros documentos normativos também são empregados em diferentes estados dos EUA. Na Califórnia os diques e bacias de contenção são especificados no documento *Health & Safety Codes - Underground Storage of Hazardous Substances* (CALIFORNIA CODES, 2003). O parágrafo 25290.1 (c.2) descreve que “a contenção secundária deve ser capaz de armazenar as substâncias perigosas por um período de tempo máximo necessário para a recuperação do local caso ocorra algum vazamento” sem referência aos tipos de materiais impermeabilizantes. Em Minnesota, a Agência de Controle de Poluição Estadual (MPCA) estabelece os critérios para impermeabilização de bacias de contenção através do documento “*Minn. Rules 7151, Aboveground Storage of Liquid Substances*”. Para os tanques aéreos instalados depois de 1º de novembro de 1998, o material de contenção deve ter uma impermeabilidade aceitável. Se utilizada argila compactada, a permeabilidade à água deve ser igual ou menor a 10^{-7} cm/s; para os tanques instalados antes desta data, a permeabilidade deve estar na faixa de 10^{-5} a 10^{-3} cm/s, dependendo da toxicidade e da mobilidade da substância armazenada (MPCA, 2004). Segundo este documento, as substâncias armazenadas nos tanques podem ser classificadas como:

- Substâncias tipo A incluem gasolina, gasolina de aviação, nafta, etanol, materiais perigoso e mistura ou blendas destas substâncias (anticongelante é considerado substâncias do tipo A).
- Substâncias tipo B incluem petróleo, diesel, querosene, óleo combustível dos tipos 1,2,3 e 4, resíduos oleosos, e mistura destas substâncias com substâncias da classe tipo C.
- Substâncias tipo C incluem cimento asfáltico, óleo combustível dos tipos 5 e 6, e outras substâncias regulamentadas.

A partir dessa classificação é definido um valor de coeficiente de permeabilidade em função da tipologia da substância armazenada e da profundidade em que se encontra a água subterrânea, conforme apresentado na Tabela 2.2 (MPCA, 2004).

TABELA 2.2 – Coeficiente de permeabilidade máximo.

Classificação da Substância	Prof. da água subterrânea menor que 3 m em relação à base do tanque	Prof. da água subterrânea maior que 3 m em relação à base do tanque
Tipo A	Mínimo de 1 m de solo c/ coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-5} cm/s	Mínimo de 1 m de solo c/ coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-4} cm/s
Tipo B	Mínimo de 1 m de solo c/ coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-4} cm/s	Mínimo de 1 m de solo c/ coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-3} cm/s
Tipo C	Mínimo de 1 m de solo c/ coeficiente de permeabilidade de 1×10^{-3} cm/s	Não especificado

FONTE: MPCA (2004)

Nos estados do Alaska e de Maryland, a permeabilidade do fundo e das paredes de contenção deve ser de, no máximo, 10^{-4} cm/s. Estas especificações seguem as regulamentações prescritas nos seguintes documentos, respectivamente: “*Alaska Admin. Code tit. 18, 75.075*” e “*Md. Code Ann. Env. Section 4-401, Water Pollution Control and Abatement*”. Já os estados de Nova York, Rhode Island e South Dakota determinam que, se barreiras de contenção secundárias são utilizadas, então elas devem ter uma permeabilidade à água igual ou menor que 10^{-6} cm/s. O estado de Nova York também orienta para o uso de concreto na impermeabilização das bacias de contenção e o estado de South Dakota, a construção dos sistemas de contenção em concreto, argila, solo nativo, membranas sintéticas ou outros materiais.

O estado de New Hampshire estabelece que a barreira impermeável que protege os tanques aéreos deve ser desenvolvida em polietileno de alta densidade, ou com manta de material similar. Além disso, tais barreiras devem ser construídas de forma que derramamentos não penetrem o solo mais do que um pé (30,48 cm) em 72 horas (NH CAR, 2005). Da mesma forma, o estado de Wisconsin, através das regulamentações apresentadas no documento “*Flammable and Combustible Liquids Code*” (Wis. Admin. Code §ILHR 10), especifica que os diques de contenção podem ser construídos de terra, concreto, alvenaria sólida ou com aço, desde que sejam estanques ao líquido armazenado. Se o material do dique for permeável, eles devem ser protegidos com concreto, asfalto, manta sintética ou manufaturada, ou mesmo com uma bacia pré-fabricada (WAC, 2002).

Em Alberta (Canadá) a alternativa de impermeabilização das bacias de contenção com solo argiloso compactado requer que o coeficiente de permeabilidade do solo seja menor ou igual a 1×10^{-6} cm/s determinado *in situ* ou menor ou igual a 1×10^{-7} cm/s se 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 da camada de solo argiloso (AEUB, 2001).

Na Inglaterra, o armazenamento de óleos é regularizado pelo “*Control of Pollution (Oil Storage) Regulations 2001*”. Esta regulamentação não especifica o material com o qual a contenção secundária deve ser construída, apenas ressalva que “sua base e paredes devem ser impermeáveis à água e ao óleo”. Recomenda-se um coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-9} m/s (ou 10^{-7} cm/s) referenciado à água (DEFRA, 2001).

2.2. Alternativas de impermeabilização e suas limitações

Diques e bacias de contenção são estruturas normalmente utilizadas em áreas com grande potencial para derramamentos ou vazamentos de produtos químicos. Além do solo argiloso compactado, os principais materiais empregados na impermeabilização dessas estruturas são: concreto, geomembranas sintéticas, asfalto e combinações destes materiais, por exemplo, argila e geomembranas. A seguir são apresentadas as principais características e limitações do emprego desses materiais.

2.2.1. Revestimentos de Concreto

O concreto é um material que pode oferecer uma grande área impermeável, no entanto, seu custo de implantação é geralmente muito elevado. Além disso, a mistura de cimento Portland, água e agregados minerais, é permeável a líquidos e está susceptível a intemperismos químicos a partir do contato com certos produtos, como os solventes, compostos orgânicos e ácidos. O Guia para Gerenciamento de Sistemas de Contenção Secundária para Resíduos Perigosos do Departamento de Ecologia do Estado de Washington – EUA (WSDE, 1995) apresenta algumas limitações sobre o uso do concreto. Por exemplo, substâncias ácidas reagem com os componentes do Portland, gerando compostos solúveis de cálcio, facilmente retirados pela ação de chuvas. O cimento apresenta restrições a compostos como xilenos, peróxido de hidrogênio e ácidos como ácido nítrico. De maneira semelhante, substâncias alcalinas reagem com a areia, aumentando ainda mais a permeabilidade do concreto e conseqüente transporte de contaminantes para o solo e águas subterrâneas. Esses intemperismos podem ser

identificados através de inspeção visual, podendo ser diagnosticadas a presença de lascas e a corrosão do concreto.

Também, é relevante indicar que os reforços de aço do concreto armado podem sofrer oxidação, dependendo do produto em contato, principalmente se as ferragens não são recobertas adequadamente. Com isto, além de ter sua resistência mecânica diminuída, seu volume é aumentado pela ferrugem, causando fissuras à estrutura de concreto. As possíveis trincas nas estruturas de concreto e juntas de dilatação devem ser preenchidas com materiais de vedação compatíveis aos produtos armazenados nos tanques e ao meio ambiente onde são empregados. Resinas Epóxi são comumente utilizadas. Quando propriamente aplicadas, oferecem boa durabilidade e resistência a substâncias ácidas, cáusticas e solventes. Outra desvantagem do uso de concreto para impermeabilização de bacias de contenção é grande área impermeabilizada, acumulando águas das chuvas, sobrecarregando os sistemas de drenagem.

2.2.2. Geomembranas

O emprego de geomembranas, mantas plásticas para revestimento do solo, é outra opção freqüentemente utilizada na impermeabilização. No entanto, para o caso de armazenagem de compostos orgânicos, como petróleo e derivados, verifica-se incompatibilidade química em relação à maioria dos polímeros utilizados na produção de geomembranas. A NFESC (1998) recomenda que sejam observadas alguns procedimentos em relação à compatibilidade dos materiais de impermeabilização com os produtos armazenados. Borrachas cloradas e cloreto de polivinila (PVC) são comprovadamente reativos em relação aos hidrocarbonetos (WSDE, 1995). O polietileno de baixa densidade mostra-se incompatível com produtos como gasolina, querosene, etilbenzeno, naftaleno, fenol e tolueno. Outra variedade de material aplicada à fabricação de geomembranas é o polietileno de alta densidade. Este material é utilizado mundialmente em bacias de contenção, pois possui inércia química à maioria dos hidrocarbonetos, segundo fabricantes. Entretanto, existem restrições em relação às juntas de termofusão que unem as mantas produzidas em tamanho limitado. As geomembranas sintéticas podem apresentar falhas da ordem de 30 cm²/ha. King et al. (1997) avaliou que falhas de impermeabilização da ordem de 15 cm²/ha podem ser consideradas equivalentes a valores de coeficiente de permeabilidade igual a 10⁻⁵ cm/s. As fotos A, B, C e D da Figura 2.1 ilustram algumas limitações sobre o uso das geomembranas sintéticas e dos revestimentos de concreto.



FIGURA 2.1 – Possíveis falhas na impermeabilização em sistemas de contenção: A) Aplicação inadequada da geomembrana, com exposição aos raios solares, podendo resultar em rápida depreciação pela ação do tempo; B e C) Pontos em que as geomembranas não podem conter possíveis vazamentos, como em juntas, conexões e estruturas cravadas no solo; D) Fissuras e juntas de dilatação que podem ser pontos vulneráveis na impermeabilização com concreto.

2.2.3. Outras alternativas de impermeabilização

Existem várias alternativas para a melhoria da eficiência da impermeabilização de bacias de contenção recobertas por solos naturais, geomembranas ou áreas concretadas. As técnicas mais utilizadas são:

- Colmatação através de biofilme: o crescimento biológico é estimulado em áreas de contenção de forma que um filme biológico gelatinoso seja desenvolvido, colmatando o solo e reduzindo a permeabilidade;
- Colmatação química: é o processo de redução da permeabilidade através da adição de compostos químicos como ferro, cálcio e magnésio que causam a colmatação da superfície do solo. Outro exemplo de agente colmatante dos solos, bastante estudado pelas ciências agrárias, é o sódio. A infiltração da água de chuva em solos salino-sódicos, por exemplo, lixívia os sais solúveis e provoca a dispersão, promovendo redução na permeabilidade (MCNEAL e COLEMAN, 1966; MINHAS e SHARMA, 1986, apud FREIRE, 2003).

- Adição de bentonita: a adição de bentonita ao solo auxilia na redução da permeabilidade de compostos polares como a água, no entanto, o mesmo não acontece quando os líquidos a serem contidos forem compostos orgânicos (apolares);
- Solo com cimento: é uma mistura de solo com cimento Portland e água, compactados a uma alta densidade, de forma que a camada superficial seja impermeável. Nessa técnica, o emprego de solos arenosos é preferível para a economia de cimento e aumento da durabilidade.

2.3. Principais causas de derramamentos e vazamentos em tanques verticais de armazenamento e medidas preventivas

Dentro da logística de abastecimento e de distribuição de petróleo e derivados, os terminais e bases são unidades com a função de recebimento, armazenamento e distribuição destes produtos. Inerente à atividade desenvolvida nos terminais e bases estão os eventuais acidentes que podem resultar na liberação de compostos do petróleo para o meio ambiente. Mesmo com a existência de uma infra-estrutura dotada de sistemas de controle e gerenciamento de riscos, a possibilidade de catástrofes não é totalmente inexistente, muito embora exista pouco histórico de colapso de tanques de armazenamento ou catástrofes em terminais de armazenamento. Os tanques de armazenamento de petróleo e derivados dos terminais são estruturas metálicas cilíndricas verticais, instaladas na superfície do solo, e cercadas por diques de terra compactada que formam uma bacia para contenção de eventuais derramamentos (Figura 2.2).

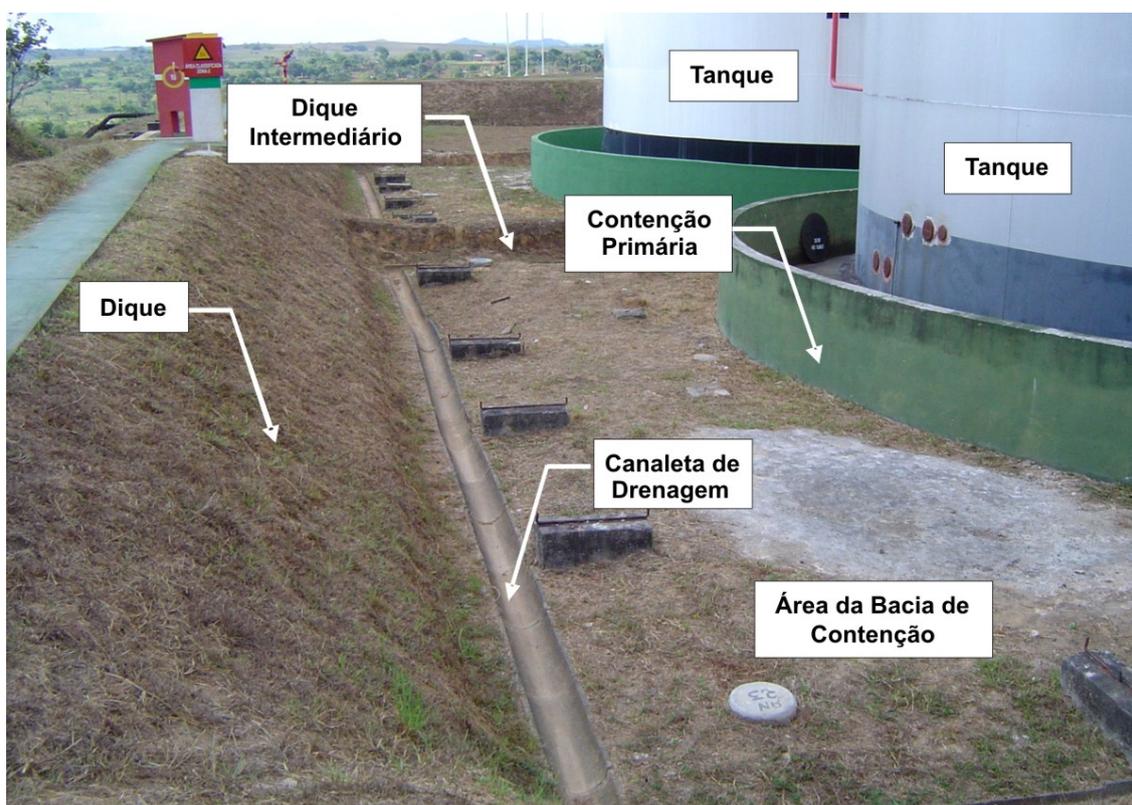


FIGURA 2.2 – Parque de armazenamento de combustíveis em que são identificados os tanques de armazenamento, os sistemas de contenção primários e os secundários (bacias de contenção delimitadas pelos diques).

Devido ao grande volume de material armazenado, as áreas de estocagem de combustíveis são definidas como potencialmente perigosas em relação à ocorrência de derramamentos. Os problemas mais comuns que podem contribuir para essas ocorrências incluem extravasamentos, rupturas de dutos, vazamentos em registros e válvulas, rupturas por corrosão, e outros. Dentre os problemas menos comuns estão os cenários catastróficos, como problemas geológicos ou incêndios que venham a colapsar o tanque, resultando na liberação de grandes quantidades do produto armazenado, podendo resultar na inundação das bacias de contenção. A seguir são apresentados os principais eventos acidentais que podem resultar no derramamento de combustíveis nas bacias de contenção (LIEB, 2001):

1) Vazamentos devido à corrosão: O risco deste tipo de vazamento é praticamente nulo quando o tanque é novo, mas aumenta com o avanço da “idade” do tanque. O vazamento por corrosão é, geralmente, caracterizado por ser lento e por pequenas quantidades do total da carga armazenada quando detectado rapidamente. Entretanto, grandes quantidades podem ocorrer quando o vazamento não é rapidamente detectado, como no caso de corrosão das placas de fundo dos tanques que não ficam visíveis e não são equipadas com dispositivos ou sistemas de detecção de vazamentos.

2) Vazamentos ou derramamentos devido à operação: O risco deste tipo de derrame ou vazamento geralmente não depende da “idade” do tanque, embora as conseqüências possam ser mais severas se o tanque estiver em condições precárias. Exemplos incluem eventos tais como transbordamento, vazamentos nas conexões entre tubos, válvulas ou bombas, e vazamentos durante a transferência de produto devido a falhas do operador ou do equipamento. A quantidade de produto liberada ou derramada pode variar conforme a natureza do vazamento ou derrame.

3) Vazamentos ou derramamentos devido a falhas no tanque: Este tipo de vazamento ou derramamento depende, principalmente, da qualidade do projeto e construção do tanque. Fraturas em tanques dispostos em regiões de clima frio aconteceram quando os materiais de construção não tiveram dureza e ductilidade adequadas. Embora raras, quando estas fraturas ocorrem, os resultados são, geralmente, a falência do tanque, derramamento total do produto estocado, além de extensos danos à propriedade e ao meio ambiente. Abalos sísmicos também podem causar rupturas nos tanques e/ou sistemas de tubulações associados, resultando num significativo ou total vazamento do produto do tanque.

4) Manutenção imprópria ou falta de manutenção: A carência de manutenção ou sua realização de forma inadequada pode levar a vazamentos resultantes da não detecção de corrosão ou outros danos.

5) Sabotagem ou vandalismo: Alguns vazamentos podem resultar de ataques intencionais aos tanques de armazenamento de combustíveis. Os riscos de ocorrência destes eventos são normalmente mitigados pelo aumento das medidas de segurança em lugar de providências com relação aos padrões de projeto e construção dos tanques.

6) Sistemas de tubulações mal projetados e/ou mantidos: Vazamentos a partir de componentes do sistema de tubulações são as maiores fontes de liberação de produtos em comparação às demais categorias.

7) Incêndio e explosão: Incêndios e explosões são freqüentemente atribuíveis a projetos e/ou operação impróprios. Apesar de estes eventos serem considerados mais como um resultado de derramamentos ou vazamentos do que uma causa deles, um incêndio ou explosão provavelmente resultará em derramamento adicional do conteúdo do tanque afetado ou propagará aos tanques adjacentes.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos faz algumas recomendações preventivas a derramamentos e vazamentos em terminais de

armazenamento em seu Guia para Inspectores Regionais (USEPA, 2005). A seguir são apresentadas algumas ações indicadas no documento.

1) Prevenção geral a vazamentos: O programa de manutenção deve garantir que todos os equipamentos estejam projetados e em condições para prevenir descargas de produtos. Além disso, deve haver sinalização adequada para prevenir danos mecânicos aos dutos sobre-superficiais. O programa de manutenção deve garantir operação apropriada dos equipamentos de segurança tais como sensores de baixa pressão e válvulas para mitigar a continuidade de vazamentos decorrentes da ruptura de dutos.

2) Proteção à corrosão: Corrosão interna deve ser prevenida por meio do uso de materiais compatíveis ao armazenamento (PVC, fibra de vidro, revestimentos) ou pela adição de inibidores de corrosão. Da mesma maneira, deve-se prevenir o desgaste externo dos dutos. Sugere-se ainda a proteção catódica como alternativa à corrosão externa. A USEPA recomenda que se consulte um profissional em corrosões para a avaliação quanto a adequação da técnica de proteção catódica e sistemas de prevenção a corrosão em terminais de armazenamento. Em alguns casos, esta técnica pode acelerar processos corrosivos em equipamentos desprotegidos. Onde a proteção catódica não se adequar por motivos específicos do local, configuração do terminal ou outras limitações técnicas, devem ser adotados métodos alternativos, como a utilização de dupla parede nas tubulações e sistemas de detecção de vazamentos. A USEPA indica que a proteção catódica previne contra vazamentos, enquanto o método alternativo detecta e contém os pequenos vazamentos antes que a situação se agrave.

3) Vistoria Periódica: A verificação visual dos equipamentos deve ser incluída no plano de manutenção para que ocorra a rápida detecção de vazamentos e ativação do plano de contingência do terminal de armazenamento. A vistoria deve abranger dutos, emendas, válvulas, tanques, bacias de contenção primária e outros elementos funcionais do terminal. Deve-se atentar a processos corrosivos, vazamentos, mau funcionamento de máquinas e outros problemas que possam causar derrames de produtos. A frequência das inspeções pode variar de acordo com seus objetivos, presença de bacias de contenção secundárias e capacidade de contenção necessária para garantir o tempo de aplicação do plano de contingência. Pode-se incluir às vistorias, a aplicação de técnicas não destrutivas de avaliação dos equipamentos como teste de ultra-som para determinação de espessura de parede ou teste hidrostático a pressões acima das pressões normais de operação.

2.4. Permeabilidade de compostos orgânicos em solos argilosos

Os solos são formados de partículas resultantes do intemperismo de rochas, através dos fenômenos de decomposição química ou desintegração mecânica. Dependendo do tipo de agente formador, o solo pode apresentar partículas com variados tamanhos. De acordo com a escala granulométrica brasileira (ABNT), as partículas dos solos podem ser classificadas segundo as dimensões como: pedregulhos (diâmetros das partículas compreendidas entre 76 e 4,8 mm), areias (entre 4,8 e 0,05 mm), siltes (entre 0,05 e 0,005 mm) e/ou argilas entre (inferiores a 0,005 mm). Em relação à natureza das partículas dos solos, as frações grossas são constituídas predominantemente de grãos silicosos, enquanto que as frações argilosas são constituídas de pequeníssimos minerais cristalinos, chamados de argilominerais (CAPUTO, 1988).

Os argilominerais distinguem-se, principalmente, nas seguintes formas: os silicatos cristalinos com reticulado em camadas, ou forma lamelar; também chamados de filossilicatos; e os silicatos com reticulado de estrutura fibrosa (SANTOS, 1975). Os filossilicatos são os argilominerais encontrados com maior frequência na natureza. Segundo Krauskopf (1972), os filossilicatos são formados por lâminas constituídas por hidroxilas, átomos de alumínio e átomos de magnésio arranjados na forma de octaedros, e de átomos de oxigênio e átomos de silício arranjados na forma de tetraedros. As associações entre essas lâminas formam os seguintes subgrupos: caulinita; esmectita (montmorilonita); vermiculita; mica hidratada (hidrômica); clorita; e interestratificadas (argilominerais de camadas mistas).

De acordo com o arranjo dessas lâminas, os argilominerais são divididos em dois grandes grupos: bilaminares e trilaminares. Os argilominerais bilaminares apresentam camadas constituídas de uma lâmina tetraédrica e uma lâmina octaédrica, sendo a caulinita um exemplo típico deste tipo de argila. Os argilominerais trilaminares apresentam camadas formadas por uma lâmina octaédrica entre duas lâminas tetraédricas, entre os quais se destacam as esmectitas e as ilitas. Os minerais bilaminares do grupo da caulinita têm menor capacidade de adsorver íons e água, ao passo que os trilaminares, do grupo das montmorilonitas, cujas camadas são mais facilmente separáveis, apresentam maior capacidade de adsorver um maior volume de íons e água. Conseqüentemente, os argilominerais trilaminares, como esmectita, são muito mais expansivos do que os bilaminares, como a caulinita (KRAUSKOPF, 1972).

Apesar de a ilita ter um arranjo trilaminar, é importante ressaltar que a mesma não terá um grau de expansividade tão expressivo, quando comparado com a esmectita

(MOORE e REYNOLDS, 1997). A superfície específica do argilomineral esmectita é muito grande (entre 500 – 800 m²/g). Já a superfície específica da illita (entre 60 – 120 m²/g) é bem menor que da esmectita, e um pouco maior que da caulinita (entre 20 – 40 m²/g) (GHILDYAL e TRIPATHI, 1987). A superfície específica favorece uma interatividade entre o mineral e o líquido, afetando as propriedades como densidade de cargas superficiais, sorção e troca catiônica, expansividade e retenção de água (VARGAS, 1981). Com isso, a illita terá a expansividade um pouco maior do que a caulinita, porém desprezível quando comparada com a esmectita.

O grau de expansividade dos argilominerais em contato com a água deve-se principalmente à característica polar deste líquido, ou seja, ao alto valor da constante dielétrica, favorecendo a sua sorção no espaço interplanar basal dos argilominerais. Outros líquidos podem também ser sorvidos pelas argilas, variando em quantidade em função do grau de polaridade dos mesmos, porém apresentando comportamentos distintos (KRAUSKOPF, 1972).

A propriedade do solo de permitir o escoamento de líquidos através dos poros é chamada de *coeficiente de permeabilidade*. A determinação do coeficiente de permeabilidade de um solo é feita baseada na Lei de Darcy (CAPUTO, 1988). O coeficiente de permeabilidade depende tanto da porosidade do meio e do tamanho, distribuição e forma das partículas, quanto das propriedades do fluido que o atravessa, e é uma propriedade determinada facilmente em ensaios de laboratório através de permeâmetros, ou em ensaios de campo. Uma vez conhecido o coeficiente de permeabilidade e as propriedades do fluido no qual foi determinado, empregando-se a Equação de Nutting (1930), Equação 2.1, é possível calcular a *permeabilidade intrínseca* do solo. A permeabilidade intrínseca também é uma propriedade que mede a capacidade de um meio poroso de transmitir um fluido, porém é uma propriedade inerente a matriz porosa e independente das propriedades dos fluidos (NUTTING, 1930; BEAR, 1972; LOHMAN, 1977; FREEZE e CHERRY, 1979; TODD, 1980; KAVIANY, 1995). No Brasil e na Europa o coeficiente de permeabilidade, condutividade hidráulica e permeabilidade são utilizados como sinônimos. No entanto, a literatura americana emprega o termo *hydraulic conductivity* para representar a constante de proporcionalidade da Lei de Darcy, e o termo *permeability* ou *intrinsic permeability* para definir a permeabilidade intrínseca.

$$K = k \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad \text{Equação (2.1)}$$

onde K : coeficiente de permeabilidade (L/T); k : permeabilidade intrínseca (L²); μ : viscosidade dinâmica (M/L.T); g : aceleração da gravidade (L/T²), e ρ : densidade (M/L³). A relação $\frac{\rho}{\mu}$ também é descrita na literatura como mobilidade do líquido.

Mcwhorter e Sunada (1977) utilizam uma metodologia de normalização para se obter o coeficiente de permeabilidade de um determinado óleo (K_o), conhecendo-se a densidade e a viscosidade do óleo (ρ_o e μ_o) e da água (ρ_A e μ_A) e utilizando-se a Equação 2.2. Para isto, basta igualar-se a permeabilidade intrínseca do solo obtida com a água, àquela obtida com o óleo, utilizando a Equação 2.1, já que a permeabilidade intrínseca supõe-se independer do líquido. Disso resulta:

$$K_o = K_A \left(\frac{\mu_A}{\mu_o} \right) \left(\frac{\rho_o}{\rho_A} \right) \quad \text{Equação (2.2)}$$

Devido às propriedades dos argilominerais, descritas acima, os solos argilosos geralmente apresentam baixos valores de coeficiente de permeabilidade percolados à água (CAPUTO, 1988). Com isso, os solos argilosos têm sido amplamente utilizados como materiais de impermeabilização para contenção de líquidos orgânicos e inorgânicos em vários empreendimentos, considerando a eficiência comprovada na retenção da água. No entanto, pesquisadores como Mesri e Olson (1971), Gilligan e Clemence (1984), Brown e Thomas (1984), Fernandez e Quigley (1985), Anderson et al. (1985), Uppot e Stephenson (1989), Oliveira (2001) e Melegari (2005) têm verificado que solos argilosos permeados por líquidos orgânicos podem resultar numa permeabilidade maior, quando comparados com os mesmos solos saturados e permeados pela água.

Brown e Thomas (1984) compararam valores de coeficiente de permeabilidade de argilas, percoladas com derivados de petróleo, com valores calculados utilizando-se a formulação matemática de Nutting (1930) (Equação 2.1), no qual a permeabilidade intrínseca foi medida tendo a água como o líquido de referência. Foi constatado que os coeficientes de permeabilidade apresentaram valores experimentais diferentes em até quatro ordens de grandeza dos valores calculados, verificando a limitação da equação de Nutting (1930) para solos argilosos.

Oliveira (2001) concluiu no seu estudo que o coeficiente de permeabilidade de solos argilosos é fortemente influenciado pelas propriedades físico-químicas dos líquidos percolados e pelas características dos argilominerais do meio. Nesse estudo também foi verificado que a equação de Nutting (1930), válida com grande precisão

para solos granulares, torna-se incompleta para quantificar a mesma propriedade nos solos argilosos, quando se adota líquidos de diferentes polaridades como referência, devido ao fenômeno de expansividade dos argilominerais.

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. Isso representa que, em caso de eventuais derramamentos, os produtos poderão migrar mais rapidamente que a água. Com esses resultados, a pesquisadora ponderou que a eficiência das bacias de contenção não deve ser baseada exclusivamente em critérios de permeabilidade em relação à água, mas sim considerar 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.

Fernandez e Quigley (1985) indicaram que os coeficientes de permeabilidade de líquidos orgânicos em solos naturais argilosos da região de Sarnia, Ontário - Canadá, foram aproximadamente cinco ordens de grandeza (10^5) maiores do que os valores dos coeficientes de permeabilidade medidos com a água. Os pesquisadores encontraram uma boa correlação entre os valores do coeficiente de permeabilidade e a polaridade dos líquidos, através do inverso da constante dielétrica dos líquidos investigados. Mesri e Olson (1971) também verificaram relação inversa entre a permeabilidade e a polaridade dos líquidos permeados em testes de consolidação. Segundo Kinsky et al. (1971), quanto menor a constante dielétrica do líquido menor será a espessura da dupla camada nas superfícies dos minerais do solo argiloso e maior será a permeabilidade do meio.

Anderson et al. (1982), e Brown e Anderson (1983) avaliaram as alterações da permeabilidade e estrutura de solos argilosos nativos percolados por líquidos orgânicos. Os solos percolados por líquidos orgânicos apresentaram alterações físicas na estrutura e as permeabilidades medidas nos mesmos foram de 2 a 3 ordens de magnitude maiores que aqueles valores medidos com a água. Budhu et al. (1991) também verificou que as interações dos líquidos orgânicos com os argilominerais do solo podem causar alterações na estrutura do mesmo, de forma a aumentar a permeabilidade dos solos. Gilligan e Clemence (1984) sugeriram que a percolação de líquidos orgânicos em solos argilosos causa a formação de tactoides ou agregados com estrutura planar que se formam através do processo de condensação de placas. A formação dos tactoides cria uma estrutura mais granular que facilita a passagem dos líquidos.

Essas pesquisas indicam que a estrutura do meio poroso de um solo constituído de argilominerais é alterada ao ser percolado por líquidos de diferentes polaridades devido ao fenômeno de expansividade dos argilominerais ou de formação dos tactoides. Como a permeabilidade intrínseca é uma propriedade específica do meio poroso, esta propriedade é alterada. Por isso, quando se trata de solos contendo argilominerais, existe forte limitação em aplicar-se a definição de Nutting (1930) para se calcular o coeficiente de permeabilidade saturada do meio, considerando-se que a permeabilidade intrínseca independe do líquido percolado. Na tentativa de modelar matematicamente essas alterações da permeabilidade intrínseca medidas para os líquidos orgânicos e para a água, Budhu et al (1991) utilizaram dados experimentais obtidos em testes de consolidação e propuseram uma equação empírica relacionando a razão das permeabilidades intrínsecas (k_p/k_w), onde p representa o produto e w representa a água, e a razão das constantes dielétricas (ϵ_p/ϵ_w), dada por:

$$\frac{k_p}{k_w} = e^{\lambda \left(1 - \frac{\epsilon_p}{\epsilon_w}\right)} \quad \text{Equação (2.3)}$$

O parâmetro λ é uma constante que depende do tipo de solo e do histórico do estresse aplicado sobre o mesmo. Através de dados experimentais, Budhu et al. (1991) definiram o valor de λ igual a 8 para os dados da argila, e Fernandez e Quigley (1985) λ igual a 4,5. Esses pesquisadores não conseguiram definir quais propriedades do solo que determina o valor de λ , ponderando a necessidade de desenvolver mais pesquisas para entender melhor este parâmetro. Com relação à influência da constante dielétrica, embora Budhu et al. (1991) tenham sugerido que este seja um dos parâmetros responsáveis pelo aumento na permeabilidade dos fluidos orgânicos em solos argilosos, concluíram que este parâmetro pode não ser o único fator responsável por esse comportamento. A fim de exemplificar a utilização da Equação 2.3, a Tabela 2.3 apresenta alguns cálculos da relação entre a permeabilidade intrínseca de alguns produtos com a água. Foram utilizados os valores de propriedades dos líquidos descritas na Tabela 2.3 e valor de $\lambda = 8,0$ citado no estudo de Budhu et al. (1991).

TABELA 2.3 – Densidade (ρ), viscosidade dinâmica (μ), constante dielétrica do produto (ϵ_p) e da água (ϵ_w), e a razão obtida entre permeabilidade intrínseca para o produto e a água pela equação de Budhu et al (1991).

Líquidos	ρ (g/cm ³) ⁽¹⁾	μ (cP) ⁽¹⁾	ρ / μ	ϵ_p ⁽¹⁾	ϵ_w	λ	k_p / k_w
Água	0,995	0,81	1,229	80,08	80,08	8,0	1
Etanol	0,806	1,24	0,650	39,08	80,08	8,0	6,22E+01
Gasolina com etanol	0,743	0,54	1,376	9,06	80,08	8,0	1,22E+03
Gasolina Pura	0,731	0,40	1,828	2,07	80,08	8,0	2,43E+03
Óleo Diesel	0,832	3,75	0,222	2,13	80,08	8,0	2,41E+03
Tetracloroeto de Carbono	1,582	0,85	1,862	2,2	80,08	8,0	2,40E+03

NOTA: (1) Oliveira (2001).

Os valores de razão das permeabilidades intrínsecas (k_p/k_w) descritas na Tabela 2.3 apresentam diferença de ordens de grandeza semelhante às citadas pelos pesquisadores Fernandez e Quigley (1985), Anderson et al. (1982), e Brown e Anderson (1983). O etanol teve diferença de uma ordem de grandeza na permeabilidade intrínseca do produto e água, ou seja, a permeabilidade ao etanol é 10 vezes maior do que para a água, no mesmo meio. Para os outros produtos orgânicos, que apresentam constante dielétrica mais baixa, essa diferença variou até três ordens de grandeza. Esse modelo reforça que solos argilosos naturais utilizados na impermeabilização em sistemas de contenção de líquidos orgânicos, dependendo das propriedades do líquido percolado, podem apresentar diferentes velocidades de migração dos líquidos orgânicos através do solo em casos de derramamentos.

2.5. Transporte de hidrocarbonetos de petróleo na zona não saturada do solo

A distribuição de hidrocarbonetos de petróleo na subsuperfície, provenientes de derramamentos de tanques de armazenamento, pode ser representada através do modelo conceitual ilustrado na Figura 2.3. O modelo representa um caso de vazamento de um tanque subterrâneo de armazenamento de combustível. Em um vazamento ou derramamento na subsuperfície, uma pequena fração do combustível se transfere para a fase de vapor, caso o composto seja volátil, e o restante se acumula e se infiltra no solo através dos poros da zona vadosa, podendo atingir as águas subterrâneas. Os hidrocarbonetos de petróleo, compostos imiscíveis e de densidade menor que a água, em contato com a água subterrânea formam uma fase denominada LNAPL, ou seja, *Líquido Leve de Fase Não Aquosa* (ou, em inglês, *Light Nonaqueous-Phase Liquid*).

Nesse caso, a infiltração vertical do LNAPL é interrompida e o LNAPL se espalhará lateralmente formando uma poça flutuante sob o lençol freático, na região da franja capilar (VOUDRIAS et al., 1994). O contato do LNAPL com o fluxo da água subterrânea e a precipitação atmosférica ocasiona a dissolução dos compostos solúveis, formando uma pluma de contaminantes dissolvidos na água subterrânea (NEWELL et al., 1995).

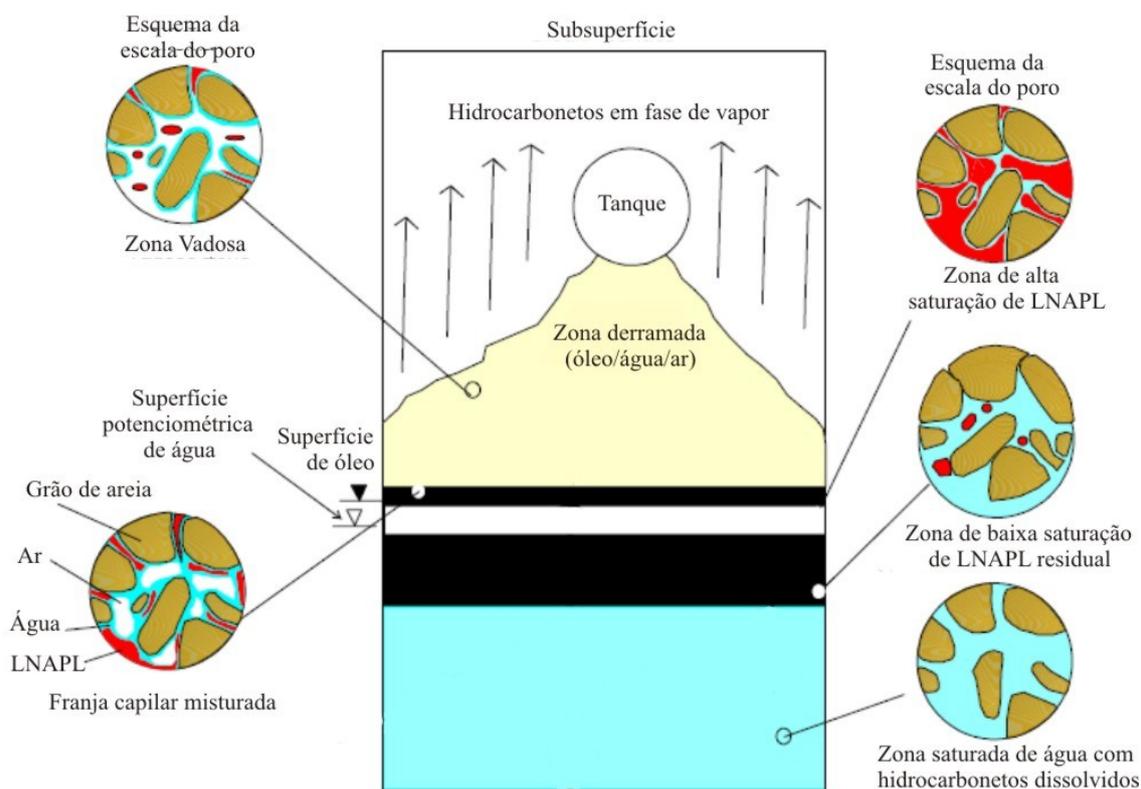


FIGURA 2.3 – Modelo conceitual da distribuição de hidrocarbonetos de petróleo na subsuperfície. FONTE: Adaptado de API (2001)

Entender o potencial do movimento e persistência do LNAPL no ambiente são fatores decisivos para a caracterização e análise de locais impactados com LNAPL. O LNAPL também é conhecido como fase livre ou produto puro, e na subsuperfície pode ocorrer como LNAPL residual ou LNAPL móvel. O LNAPL retido nos espaços intersticiais do solo pelas forças interfaciais e/ou capilares é chamado de LNAPL residual. O LNAPL móvel ocorre quando existe uma fase contínua de LNAPL entre os poros da matriz do solo, e o grau de saturação de LNAPL excede capacidade de retenção residual do solo. Este volume de LNAPL móvel pode migrar verticalmente ou lateralmente (API, 2004). A migração, distribuição e persistência do LNAPL na subsuperfície são governadas por fatores como volume e área derramada, taxa de liberação dos contaminantes, litologia local, permeabilidade do solo, porosidade,

umidade, pressão capilar, pressão do fluido acima e abaixo do nível d'água, e flutuações do nível d'água no aquífero. Na zona não saturada do solo o movimento do LNAPL é controlado, inicialmente, pela densidade e viscosidade do contaminante que se move verticalmente em direção ao nível freático sob força da gravidade e capilar (API, 2001). A partir da superfície do solo o LNAPL migra pela zona não saturada do solo, percorrendo caminhos preferenciais, preenchendo fraturas e os espaços intersticiais menores. O LNAPL residual gerado pode ficar retido nos poros do solo por longos períodos, da ordem de décadas ou séculos. Desta forma, as massas residuais podem se tornar fontes de contaminação da água subterrânea por longos períodos via infiltração por lixiviação (POWERS et al., 1991).

Devido às diversas fases de interesse, como solo, água e ar, a modelagem do fluxo de líquidos na zona não saturada do solo é mais complexa do que na zona saturada. O fluxo unidimensional da água na zona saturada pode ser descrita pela Lei de Darcy, conforme Equação 2.4 (CAPUTO, 1988):

$$v_i = -\frac{K}{n_e} \frac{dH}{dh} \quad \text{Equação (2.4)}$$

onde v_i é a velocidade intersticial do líquido através dos poros do solo, K é o coeficiente de permeabilidade, dH/dh é o gradiente hidráulico, e n_e é a porosidade efetiva do solo. Já a modelagem do fluxo unidimensional da água na zona não saturada pode ser descrita pela Equação de Richards, conforme Equação 2.5.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial h} \left[K \left(\frac{\partial H}{\partial h} - 1 \right) \right] \quad \text{Equação (2.5)}$$

onde θ é o grau de saturação do solo; t é o tempo; H é o potencial causado pela coluna do líquido; K é o coeficiente de permeabilidade; e h é a profundidade em relação à superfície do solo (LEIJ et al, 2007). A Lei de Darcy também pode ser estendida para fluxo não saturado, no entanto, o coeficiente de permeabilidade ($K(\theta)$) passa a ser função do grau de saturação do solo e a carga hidráulica é acrescida do poder motor da tensão capilar de sucção, conforme Equação 2.6:

$$v_i = -\frac{K(\theta)}{n_e} \frac{\partial(H' + \Psi)}{\partial h} \quad \text{Equação (2.6)}$$

onde v_i é a velocidade intersticial, $K(\theta)$ é o coeficiente de permeabilidade para um solo com grau de saturação θ , h é a espessura do solo filtrante, H' é o potencial causado pela

coluna do líquido, Ψ é o potencial causado pela tensão capilar de sucção, e n_e é a porosidade efetiva do solo (BEDIENT, 1994).

O fenômeno de infiltração de um fluido na zona não saturada também foi bastante estudado por Philip (1957). Philip (1957) deduziu matematicamente uma equação para modelar a descida vertical de um fluido na zona não saturada, nas condições de contorno representadas por carga constante ou variável na superfície do solo, válida para todos os solos. Esta equação é dada por:

$$I(t) = S \cdot t^{1/2} + A \cdot t \quad \text{Equação (2.7)}$$

onde $I(t)$ é a infiltração acumulada do fluido no solo no tempo t , S é a absorvidade do solo, representada por $S = \sqrt{2K \cdot (H' + \psi) \cdot \Delta\theta}$, A é o fator de transmissividade, representado por $A = \frac{2}{3}K$, K é o coeficiente de permeabilidade, H' é o potencial causado pela coluna do líquido, Ψ é o potencial causado pela tensão capilar de sucção, e $\Delta\theta$ é a diferença entre o grau de saturação de campo e inicial do solo.

As equações de fluxo não saturado descritas acima consideram somente a percolação de uma fase líquida através do solo. No entanto, a modelagem da migração do LNAPL no solo deve levar em conta a interação de mais uma fase líquida de interesse, ou seja, entre as fases solo, água, ar e LNAPL, tornando a modelagem do transporte do LNAPL na zona não saturada mais complexa do que da água. Segundo a API (2001) e API (2003), a Lei de Darcy pode ser adaptada para sistemas multifásico (solo, água, ar e LNAPL), representada pela equação:

$$v_i = \frac{k_r}{S_f n} \frac{k \rho_f g}{\mu_f} \frac{H_f}{h} = \frac{k_r}{S_f n} K_f \frac{H_f}{h} \quad \text{Equação (2.8)}$$

onde v_i é a velocidade intersticial do fluido através do solo, k_r é o coeficiente de permeabilidade relativo, S_f é o grau de saturação do fluido no solo, n é a porosidade, k é a permeabilidade intrínseca, ρ_f é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido, K_f é o coeficiente de permeabilidade ao fluido e H_f/h é o gradiente hidráulico.

O termo k_r adicionado na expressão de fluxo multifásico é um coeficiente de permeabilidade relativo. Os valores de k_r estão na faixa de 0 a 1, e representam o decréscimo da mobilidade do fluido com o aumento do grau de saturação do solo em água (Figura 2.4). Então, quando o solo está seco, a taxa de migração do fluido é

máxima e quando o solo está 100% saturado, a taxa de migração é mínima, ou seja, não há migração.

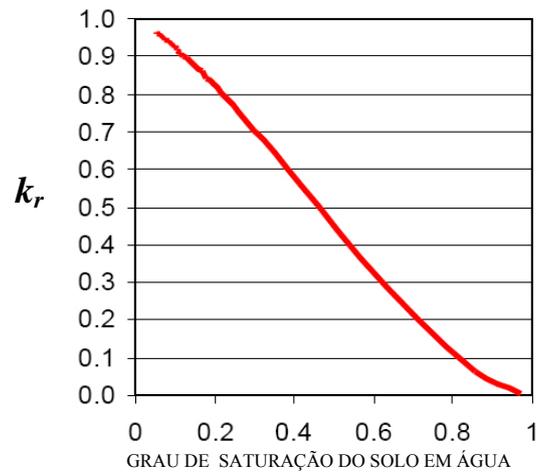


FIGURA 2.4 – Coeficiente de permeabilidade relativo do LNAPL em função do grau de saturação do solo em água. FONTE: API (2001)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi baseado em resultados experimentais de pesquisas realizadas pelo Laboratório de Remediação de Solos e Águas Subterrâneas (REMAS/UFSC), por meio da parceria com a TRANSPETRO/PETROBRAS. Nessas pesquisas foram realizados estudos de avaliação da eficiência de bacias de contenção de cinco terminais de armazenamento de petróleo e derivados da TRANSPETRO/PETROBRAS, localizados em diferentes regiões do país. O levantamento de dados de campo e a elaboração dos estudos foram realizados durante o período de 2004 a 2006, envolvendo um grande número de pessoas do REMAS/UFSC, CENPES/PETROBRAS e TRANSPETRO/PETROBRAS.

Para a avaliação dos critérios da Norma Brasileira ABNT NBR 17505-2/2006 relacionados à impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento, utilizou-se os resultados de caracterização do solo das bacias de contenção, tais como: (i) análise granulométrica do solo; (ii) análise de raios-X da fração argilosa; (iii) ensaios de permeabilidade à água e aos produtos armazenados nas bacias de contenção; e (v) determinação da porosidade do solo.

3.1. Identificação das áreas de estudo

As caracterizações dos cinco terminais descritas neste item foram retiradas de Relatórios de Diagnóstico Ambiental fornecidos pelo corpo técnico da TRANSPETRO/PETROBRAS. As localizações, denominações e identificações dos terminais em estudo não serão apresentadas por solicitação do contratante dos trabalhos efetivados.

3.1.1. Terminal 1

O Terminal 1 está instalado numa área aproximada de 12 ha e corresponde a uma unidade de armazenamento e de carregamento de vagões ferroviários de derivados de petróleo. A estrutura física do terminal inclui instalações do setor administrativo,

setor de operação e distribuição, setor de armazenamento de produtos e setor de emergências. O setor de armazenamento possui, no total, 12 tanques para o armazenamento de diesel, gasolina e etanol, atingindo a capacidade aproximada de 36.400 m³. Os tanques de armazenamento estão distribuídos dentro de 5 bacias de contenção, ocupando uma área superficial total de impermeabilização de um hectare, aproximadamente.

Os dois principais grupos geológicos que constituem a área do terminal são: (i) aterro e (ii) embasamento rochoso, composto por folhelhos alterados ou não. As coberturas de aterro possuem espessura entre 0 e 13 m e suas composições não diferem significativamente do substrato, pois foram obtidos em cortes adjacentes, uma vez que a irregularidade topográfica do terreno exigiu que fossem efetuados cortes e aterros para a construção dos tanques e prédios. As cotas do terreno variam de 53 a 100 m. Os perfis do solo dos diferentes pontos da área mostraram que os grãos variam de argila a grânulos médios, caracterizando um solo de grande heterogeneidade.

A área possui duas unidades aquíferas na área de investigação: (i) o aquífero poroso e livre, formado no aterro e (ii) o aquífero instalado no folhelho. O aquífero livre e poroso enquadra-se na faixa de condutividade hidráulica de terrenos compostos por areias bem selecionadas possuindo valores de condutividade hidráulica da ordem de 10⁻² cm/s e possui uma velocidade média do fluxo da água subterrânea na ordem de 38 m/ano. O fluxo da água subterrânea ocorre de forma, aproximadamente, radial a partir da área de recarga identificada na porção central do terminal. A profundidade do lençol freático nas bacias de contenção atinge valores de 0,80 m nas áreas baixas a valores maiores que 8 m nas cotas elevadas.

3.1.2. Terminal 2

O Terminal 2 possui uma área aproximada de 36 ha. A estrutura do terminal conta com 29 tanques aéreos de armazenamento de produtos, com uma capacidade nominal de 324.096 m³ e uma capacidade operacional de 303.563 m³. Os tipos de produtos armazenados são nafta petroquímica, querosene de aviação (QAV-1), gasolina, diesel, diesel marítimo, marine fuel 380 cst (Bunker), lubrificantes PNL 30 (neutro leve), PNM 55 (neutro médio) e PNM 80 (neutro médio). Existe também um tanque para o armazenamento de resíduos oleosos. Os tanques de armazenamento estão distribuídos dentro de 11 bacias de contenção, ocupando uma área superficial total de impermeabilização de 5,8 ha, aproximadamente. O Terminal conta ainda com estruturas

para navios atracarem, com 4 píeres principais e 2 secundários. Os estudos geológicos e hidrogeológicos do Terminal 2 não foram disponibilizados.

3.1.3. Terminal 3

A estrutura física do Terminal 3 conta com o setor administrativo, o setor de serviços, setor operacional, setor de prevenção, setor de armazenamento e a área de lazer para funcionários, totalizando uma área aproximada de 36 ha. Os produtos armazenados são óleo combustível, gasóleo e gasolina, em 11 tanques com capacidade nominal de 295.500 m³. Cada tanque está instalado sobre uma bacia de contenção diferente. A área superficial total de impermeabilização das bacias é de 9 ha.

Os perfis geológicos da espessura da cobertura total apresentaram os horizontes denominados aterro e depósitos flúvio-marinhos. Considerando o horizonte denominado aterro, verifica-se que sua espessura varia entre 0 e 4m. Já para os depósitos flúvio-marinhos, a espessura varia entre 0,5 e 11,9 m. Os três grupos geológicos principais são: (i) o aterro composto por material terrígeno mal selecionado (argila a cascalho) contendo fragmentos diversos de rocha e artefatos em geral (entulho) (ii) depósitos flúvio-marinhos compostos por sedimentos de granulometria predominantemente fina (argila a areia), com presença de camadas ou lentes de conchas carbonáticas e, (iii) embasamento rochoso, composto por folhelhos alterados ou não. Na faixa de solo de 0 a 4 m de profundidade constatou-se que os grãos variam de argila a areias. Os perfis geológicos ainda indicaram valores de profundidade do lençol freático nas bacias de contenção entre 0,3 e 2,0 metros.

O aquífero é enquadrado na faixa de condutividade hidráulica de terrenos compostos basicamente por areias com siltes e areias finas possuindo valores da ordem de 10⁻³ cm/s. As velocidades médias de fluxo foram calculadas através das fórmulas de cálculo de vazão e da Lei de Darcy, considerando uma porosidade efetiva de 21% (areia com granulometria média). A velocidade média do fluxo da água subterrânea é da ordem de 15,8 m/ano.

3.1.4. Terminal 4

O Terminal 4 corresponde a uma unidade de recebimento, armazenamento e transferência de petróleo e derivados com área útil de 47 ha. O transporte do produto armazenado é realizado via oleodutos para outros terminais e refinarias. As principais

substâncias químicas operadas no terminal são gasolina, óleo combustível, diesel e petróleo. As instalações operacionais ocupam 24 ha e é constituída de um parque com 18 tanques de armazenamento distribuídos em 16 bacias de contenção, um sistema para geração de vapor e um sistema de tratamento de efluentes hídricos. As bacias de contenção ocupam uma área superficial total de impermeabilização de 13 ha, aproximadamente. As demais instalações estão divididas em casas de bombas, prédios da administração, oficina mecânica, centro de controle a poluição, entre outros.

O terminal está assentado sobre um extenso aterro, sobre um curso original de rio desviado, configurando assim uma planície de inundação. Com isso, freqüentemente, nos períodos de chuva, ocorrem pequenas inundações nas áreas dos diques. A topografia do local é predominantemente de planície, destacando-se algumas elevações, e o restante da superfície é constituída de encosta. A altitude varia ao nível do mar até 3 metros, subindo pela encosta até 700 metros.

O contexto geológico local é caracterizado pela sobreposição de aterro a depósitos aluvionares e coluvionares assentados sobre gnaisses e migmatitos, que compõem o embasamento rochoso regional. Assentado sobre esta cobertura encontra-se um volume de aterro que foi disposto por, praticamente, toda a área do terminal. A espessura total do manto de cobertura na área investigada varia entre 6 e 20 metros, e o aterro possui espessura variando entre 0,1 e 10,0 metros. O perfil de solo identificou camadas de granulometria variando de seixos a argila. O nível freático é raso, variando de 1,7 a 4,0 m.

A partir da geologia local duas unidades aquíferas foram identificadas para a área de investigação: (i) o aquífero poroso e livre desenvolvido sobre a cobertura detrítica e (ii) o aquífero fraturado desenvolvido no embasamento rochoso. O aquífero livre e poroso enquadra-se na faixa de condutividade hidráulica de terrenos predominantemente de material arenoso e permeável possuindo valores da ordem de 10^{-3} cm/s. O gradiente hidráulico e a porosidade efetiva apresentam valores da ordem de 0,007 m/m e 30%, respectivamente. A velocidade intersticial média da água subterrânea na área avaliada, calculada através da Lei de Darcy, é de 37 m/ano.

3.1.5. Terminal 5

O Terminal 5 é responsável pelo recebimento, armazenagem e transferência de petróleo e derivados de petróleo através de rede de dutos para outros terminais, unidades industriais, carga e descarga de navios e barcaças em dois píeres. Dentre os principais

produtos movimentados estão óleo combustível e óleo diesel naval. A área total ocupada pelo terminal é de 30 ha, sendo que as instalações operacionais ocupam 26 ha. A área operacional do terminal é constituída de um parque de 8 tanques de armazenamento (um em cada bacia de contenção), um sistema de estocagem de GLP pressurizado e refrigerado, tubovias, área para atracação de navios e barcas, uma área de armazenamento de resíduos e um separador água-óleo. As edificações de apoio administrativo ficam em área contígua ao terminal. As bacias de contenção ocupam uma área superficial total de impermeabilização de 5 ha, aproximadamente.

O terminal foi edificado sobre um aterro, localizado em uma extensa área de mangue. Devido à proximidade de um canal e da costa, a área está sujeita a variações de maré e freqüentemente, nos períodos de chuva, ocorrem pequenas inundações nas áreas dos diques. A topografia é predominantemente de planície, em cota altimétrica de, aproximadamente, 3 metros em relação ao nível do mar. Ao todo existem 17 morros que cortam a cidade, sendo que o ponto mais alto fica localizado a 205 metros de altitude.

A estrutura geológica local é dada pela sobreposição de uma camada de aterro, com espessura variando entre 2,5 e 7,0 m, a uma camada de sedimentos flúvio-marinhos que se assenta sobre o embasamento cristalino, o qual se encontra entre 25 e 30 m de profundidade. O perfil de solo permitiu identificar camadas com granulometria variando de seixos a argila. O nível freático é raso, variando de 0,1 a 2,3 m.

A partir do contexto geológico local identificaram-se três unidades aquíferas para a área de investigação: (i) o aquífero poroso e livre, desenvolvido sobre a camada de aterro, (ii) o aquífero poroso, desenvolvido nos depósitos flúvio-marinhos e (iii) o aquífero fraturado, desenvolvido no embasamento rochoso. Das características hidrodinâmicas, os resultados enquadram o aquífero livre na faixa de condutividade hidráulica de terrenos compostos basicamente por siltes ou por misturas de silte e areia, e areia e argila, variando na ordem de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s. O gradiente hidráulico e porosidade efetiva apresentam valores da ordem de 0,001 m/m e 15%, respectivamente. A velocidade intersticial da água subterrânea na área avaliada, calculada através da Lei de Darcy, varia de 0,5 a 1,5 m/ano.

3.2. Caracterização dos solos das bacias de contenção

Os solos das bacias de contenção foram caracterizados por intermédio de ensaios de permeabilidade, análises granulométricas, análises de raios-X, e cálculos de

porosidade. Para a realização dessas caracterizações, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas de todas as bacias de contenção dos cinco terminais em estudo, conforme a Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Número de bacias de contenção e amostras de solo coletadas por terminal.

Terminal	Nº Bacias	Nº Amostras de solo	Área superficial de impermeabilização (ha)
1	5	22	1,0
2	11	40	5,8
3	11	48	9,0
4	16	48	13,0
5	8	8	5,0

A coleta das amostras de solo das bacias de contenção dos cinco terminais foi realizada pela equipe do Laboratório de Remediação de Solos e Águas Subterrâneas (REMAS/UFSC). A contribuição deste trabalho na determinação dos dados experimentais ficou restrita nas análises dos coeficientes de permeabilidade à água e aos produtos das amostras de solos dos terminais 1, 2 e 3. Os valores dos coeficientes de permeabilidade do Terminal 4 foram determinados por Melegari (2005), e do Terminal 5, pela equipe do REMAS/UFSC, em 2004.

3.2.1. Procedimentos de coleta de amostras indeformadas e deformadas de solo

As coletas das amostras indeformadas de solo foram realizadas segundo metodologia apresentada por Melegari (2005). O sistema de coleta de amostra indeformada era constituído de um amostrador cilíndrico de aço inox, de diâmetro e comprimento iguais a 7,4 cm e 20 cm, respectivamente, com uma abertura central e abraçadeiras do mesmo material, posicionadas nas extremidades; um *macaco* mecânico e uma estrutura de hastes metálicas que davam estabilidade ao *macaco* (Figura 3.1.A). No momento da coleta, a camada superficial de solo da bacia de contenção era removida e o amostrador era posicionado a 15 cm de profundidade abaixo da superfície do solo. O *macaco* mecânico era, então, colocado entre o amostrador e as hastes metálicas. Como as hastes estavam fixas no solo, em resposta ao acionamento contínuo do *macaco*, o amostrador penetrava no solo, preenchendo seu interior com a amostra. Enquanto esse processo era realizado, ao redor da região onde o amostrador era inserido, amostras deformadas de solo eram coletadas para posteriores análises de

granulometria, umidade higroscópica e raios-X (Figura 3.1.B). Após o preenchimento total de solo, o amostrador era retirado do solo, as abraçadeiras desapertadas e a amostra retirada de dentro do cilindro (Figura 3.1.C). As extremidades da amostra eram cortadas e, em seguida, realizada a medição da altura e massa da amostra de solo coletada (Figura 3.1.D). Com a amostra ainda sobre a balança, após a pesagem, um copo plástico de formato semelhante ao da amostra, era colocado em torno da mesma e o espaço entre a amostra e o copo plástico eram completados com resina, formando o corpo de célula do permeâmetro (Figura 3.1.E). Assim que a resina secava, a amostra já estava pronta para ser submetida ao ensaio de permeabilidade.

Essa metodologia é chamada de *coleta a frio*, pois, ao contrário das metodologias tradicionais, esta não necessita aquecer o material isolante. É uma metodologia muito indicada para coletas de solo realizadas nessas áreas de armazenamento de produtos inflamáveis. Outro benefício dessa metodologia é que a resina é suficientemente capaz de manter fixa a parede da amostra, evitando o efeito parede, além disto a resina facilita a visualização da percolação do líquido por entre a amostra de solo, por ser transparente (Figura 3.1.F).

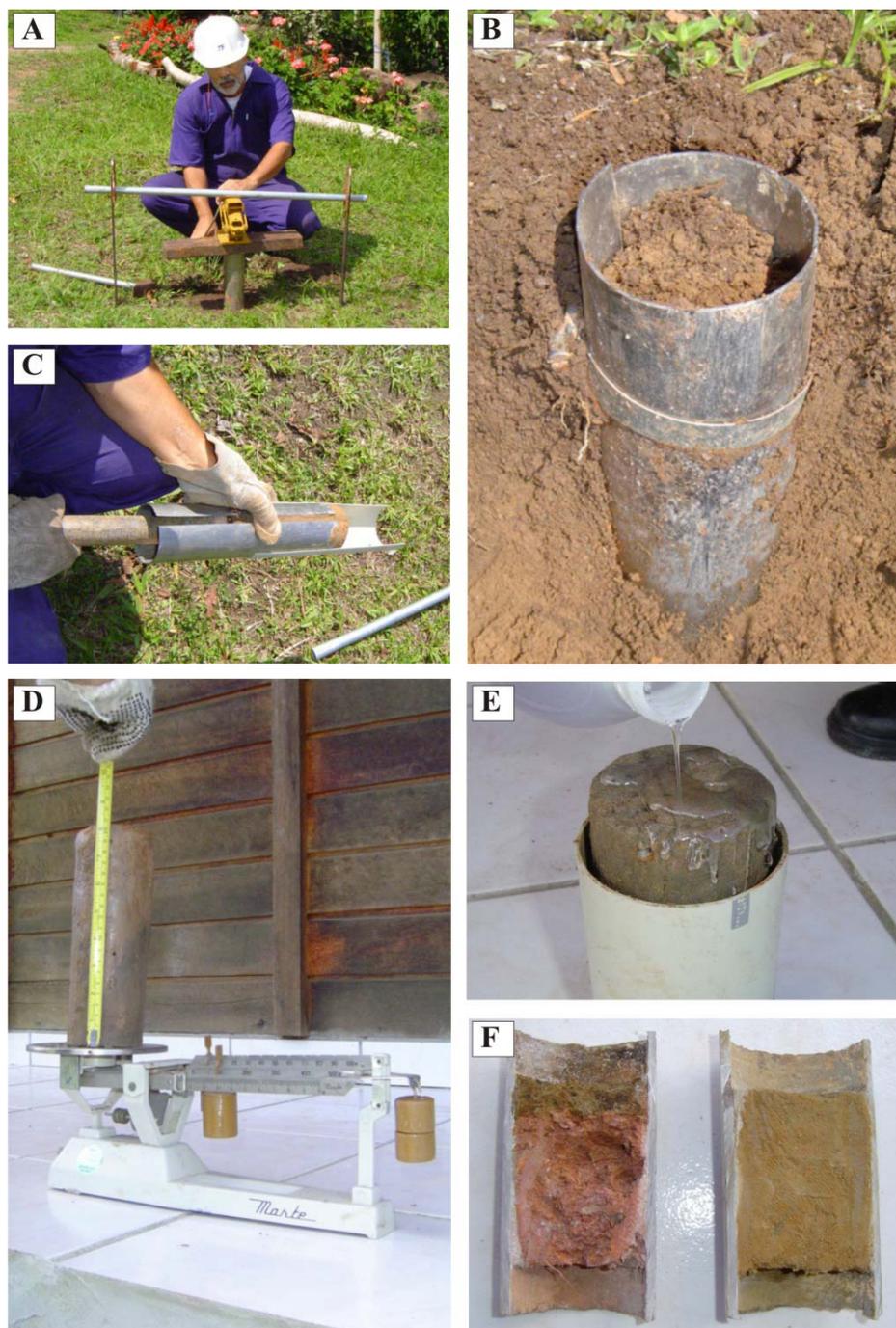


FIGURA 3.1 – Procedimento de coleta de amostra de solo.

3.2.2. Procedimentos analíticos

3.2.2.1. Análise granulométrica

A análise da distribuição das dimensões dos grãos, denominada análise granulométrica, objetiva determinar os tamanhos dos diâmetros equivalentes das partículas sólidas em conjunto com a proporção de cada fração constituinte do solo em relação ao peso de solo seco. A representação gráfica das medidas realizadas é denominada de curva granulométrica.

Os ensaios de granulometria das amostras deformadas dos terminais de armazenamento 1, 2 e 3 foram realizados pela empresa Geodésia Estudos, Projetos e Assessoria LTDA., e dos terminais 4 e 5 pelo Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Os ensaios foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7181, de dezembro de 1984. Para a realização dos ensaios segundo esta metodologia da ABNT, as amostras, após as etapas de preparação (secagem ao ar, quartejamento e destorroamento), passaram por ensaio de peneiramento e sedimentação, além de determinação da umidade higroscópica.

3.2.2.2. Análise de raios-X

As técnicas de difratometria de raios-X têm como objetivo a determinação das propriedades mineralógicas das frações de argilas presentes nos solos amostrados das bacias e diques de contenção dos terminais para o experimento de permeabilidade. As análises de difratometria de raios-X nas amostras deformadas dos terminais foram feitas pelo Laboratório de Difração de Raios X, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A metodologia foi aplicada através de um difratômetro SIEMENS BRUKER AXS, Modelo D5000, com goniômetro θ - θ . A radiação foi $K\alpha$ em tubo de cobre nas condições de 40 kV e 25 mA. Todas as amostras foram submetidas à análise via difração de raios-X sob a forma de amostra orientada, a partir da fração $<4\mu\text{m}$ (fração argila), que foi analisada na sua forma natural, expandida por saturação com etilenoglicol e calcinada a 550°C durante duas horas.

Os argilominerais são identificados através da medida das distâncias interplanares (valores de “d”) e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas. Os argilominerais identificados apresentam-se comparados com padrões do banco de dados do computador (JCPDS) e indicado/referenciado sobre o pico mais importante e diagnóstico do argilomineral. As análises são interpretadas através do programa DIFFRACPLUS em que os picos são indexados no difratograma. Por exemplo, quando as propriedades expansivas das argilas são investigadas, sabe-se, que a esmectita têm seu espaço basal aumentado de 12 - 14 Å para 17 Å, com a adição de glicol, e que a mesma esmectita, quando aquecida a 490°C , perde água do espaço interplanar e este espaçamento diminui de 12 - 14 Å para 10 Å (FORMOSO, 1984). Por outro lado, a caulinita apresenta um espaço interlamelar em torno de 7 Å, porém, quando calcinada essa argilomineral perde suas hidroxilas e não é mais detectável pelo método. No

entanto, salienta-se que o método dificilmente identifica estruturas cristalinas que ocorram em quantidades inferiores a 3 - 5% na amostra analisada.

3.2.2.3. Análise do coeficiente de permeabilidade

A determinação dos coeficientes de permeabilidade dos solos a partir da percolação de diferentes líquidos tem como finalidade considerar as especificidades de cada bacia de contenção, bem como avaliar os critérios de impermeabilização estabelecidos pela NBR 17505-2. O líquido utilizado no ensaio de permeabilidade em cada amostra de solo foi o produto mais crítico, ou seja, de maior mobilidade armazenado na bacia de contenção na qual a amostra de solo foi coletada. Para as cinco áreas de estudo, os produtos utilizados nos experimentos de permeabilidade foram etanol, nafta, gasolina (sem etanol), diesel, lubrificante PNL30, petróleo, óleo combustível e gasóleo. Além desses produtos, as amostras de solo também foram submetidas ao ensaio de permeabilidade com água. Para a determinação dos coeficientes de permeabilidade à água e ao produto em uma mesma amostra, primeiramente foram realizados os ensaios de permeabilidade à água e depois aos produtos armazenados. Entre os ensaios a amostra era seca na condição ambiente até atingir o grau de saturação inicial, sendo que o controle do grau de saturação foi realizado por meio da pesagem das amostras. Os ensaios de permeabilidade foram realizados com os líquidos à temperatura ambiente, variando de 20 a 25°C. A Tabela 3.2 apresenta algumas propriedades físico-químicas dos produtos armazenados nos terminais. A caracterização dos produtos é importante, pois as propriedades físicas (densidade, viscosidade, mobilidade e constante dielétrica) são parâmetros que interferem na migração dos produtos através do solo.

TABELA 3.2 – Propriedades dos produtos armazenados nos terminais.

Produto	Densidade ρ (g/cm ³) a 20°C	Viscosidade μ (cP)	Mobilidade $\rho \bar{\gamma} \mu$ (g/cm ³ .cP)	Constante Dielétrica ϵ (-)
Água	1,00 ⁽¹⁾	0,81 a 20°C ⁽¹⁾	1,23	80,08 ⁽¹⁾
Etanol	0,81 ⁽¹⁾	1,24 a 20°C ⁽¹⁾	0,65	39,08 ⁽¹⁾
Nafta Petroquímica	0,60 ⁽²⁾	0,97 a 25°C ⁽³⁾	0,61	-
Gasolina	0,73 ⁽¹⁾	0,40 a 20°C ⁽¹⁾	1,82	2,07 ⁽¹⁾
Diesel	0,83 ⁽¹⁾	3,75 a 20°C ⁽¹⁾	0,22	2,13 ⁽¹⁾
Diesel Marítimo	0,82 – 0,88 ⁽⁴⁾	2,0 – 4,8 a 20°C ⁽⁴⁾	0,18 – 0,40	-
Petróleo	0,81 ⁽⁵⁾	100 a 10.000 ⁽⁶⁾	8E-05 – 8E-03	-
Óleo Combustível	0,88 ⁽⁷⁾	3000 a 40°C ⁽⁸⁾	3E-03	-
Gasóleo	0,85 ⁽⁹⁾	-	-	-
Querosene de Aviação	0,80 ⁽¹⁾	0,90 a 20°C ⁽¹⁾	0,89	-
Marine Fuel 380 cst	0,99 ⁽¹⁰⁾	5313 a 20°C ⁽¹⁰⁾	1E-04-	-
Lubrificante PNL 30	≈0,90 ⁽¹¹⁾	≈2,0 a 20°C ⁽¹¹⁾	≈0,45	-
Lubrificante PNM 55	≈0,90 ⁽¹¹⁾	≈2,0 a 20°C ⁽¹¹⁾	≈0,45	-
Lubrificante PNM 80	≈0,90 ⁽¹¹⁾	≈2,0 a 20°C ⁽¹¹⁾	≈0,45	-

FONTE: (1) Oliveira (2001); (2) NLM (2007); (3) ARB (2007); (4) RRP (2007); (5) CEPA (1999); (6) NAP (1995); (7) Silva (2001); (8) DEMEC (2004), (9) Portugal Telecom (2005); (10) Nascimento (2003); (11) Palma (2007).

A medição dos coeficientes de permeabilidade (K) foi realizada por meio de ensaios de laboratório utilizando dois tipos de permeômetros: um de nível variável (Figura 3.2.A) e outro de nível constante (Figura 3.2.B). O permeômetro de nível constante foi construído segundo Oliveira (2001) e empregado para as amostras permeadas com líquidos de baixa viscosidade como água, gasolina, etc. O valor de K foi determinado medindo-se a quantidade do líquido, mantida a nível constante, que atravessa a amostra de solo de seção A e altura L em um tempo t . A quantidade de líquido que atravessa a amostra e acumula é chamada de Q . Sendo H o desnível entre a superfície de entrada do líquido e a superfície de saída, determina-se K pela equação:

$$K = \frac{Q.L}{A.H.t} \quad \text{Equação (3.1)}$$

O permeômetro de nível variável foi empregado para as amostras permeadas com líquidos de alta viscosidade como o óleo combustível e gasóleo. No teste de nível variável, um elevado nível hidráulico é inicialmente aplicado para o topo da amostra saturada (H_0) e mede-se a quantidade de líquido que atravessa a amostra por diferenças de níveis no tubo vertical de monitoramento. Pelo monitoramento da queda de nível ao longo do tempo e pela medição da seção do tubo vertical de monitoramento do nível a , K é calculado pela equação:

$$K = \frac{L.a}{A.t} \ln \frac{H_0}{H_1}$$

Equação (3.2)

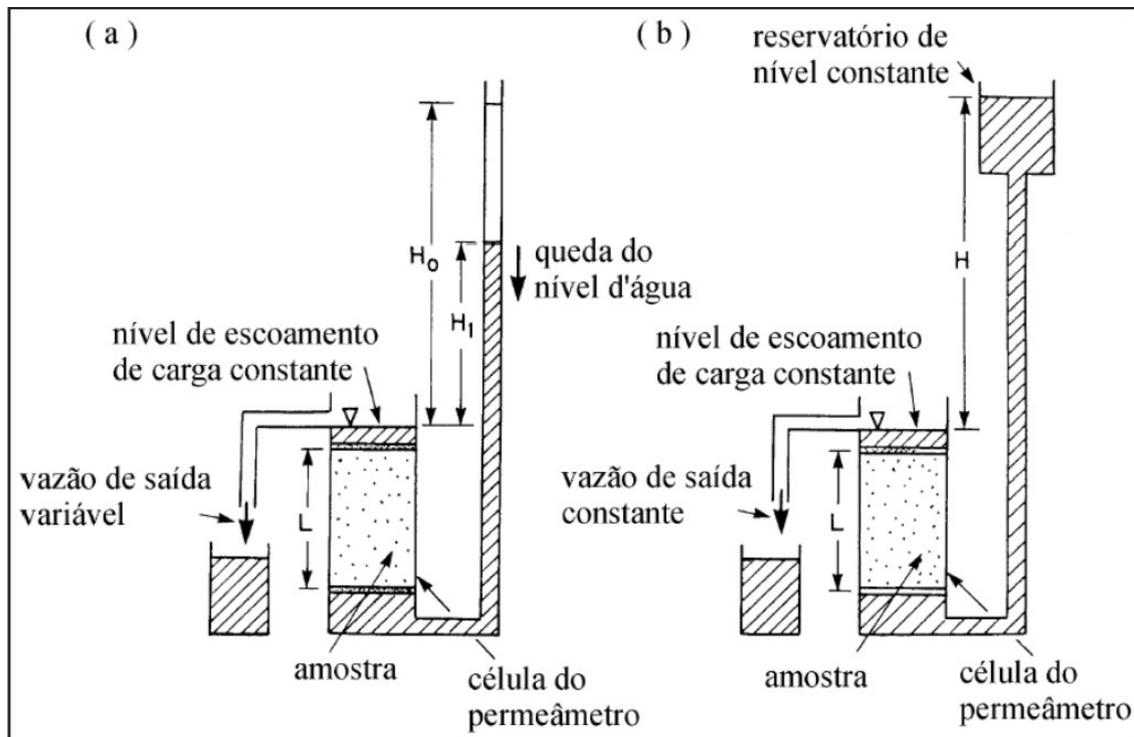


FIGURA 3.2 – Esquema dos permeômetros utilizados nos ensaios de laboratório

Nos ensaios de permeabilidade de nível constante utilizou-se o permeômetro com reservatório de líquido do tipo Garrafa de Mariotte. Para os ensaios com o permeômetro de nível variável foram utilizadas as mesmas estruturas do permeômetro de nível constante, porém removeu-se o reservatório. A Figura 3.3 mostra as quatro unidades de permeômetros juntamente com a estrutura de segurança montadas no laboratório. Os permeômetros foram montados com materiais resistentes, tendo em vista a utilização de produtos muito agressivos nos ensaios. As amostras indeformadas de solo foram utilizadas para constituir as células dos permeômetros. A Figura 3.4 ilustra a seqüência de montagem da célula do permeômetro.

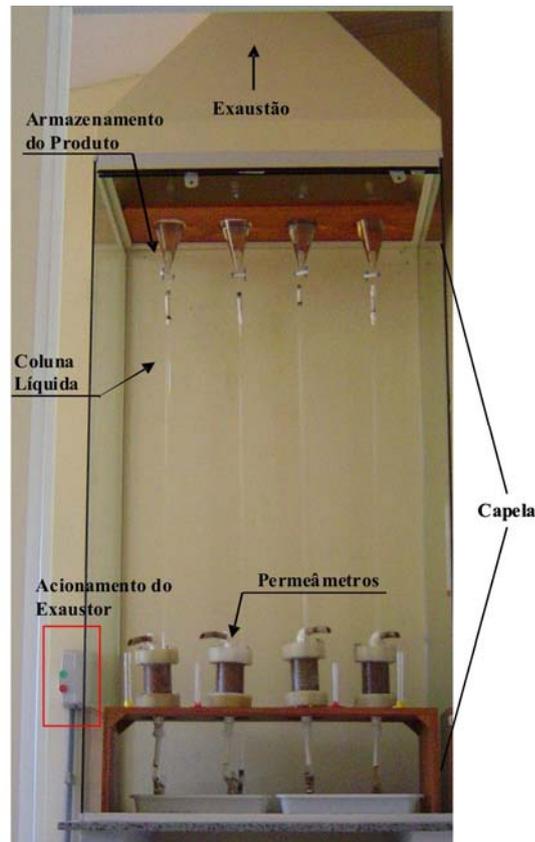


FIGURA 3.3 – Vista geral dos permeômetros montados no laboratório.



FIGURA 3.4 – Seqüência de montagem das células dos permeômetros. A) Serração da resina que mantém as características de umidade do solo; B) Retirada de uma camada de 1,0 cm de solo nas superfícies inferior e superior da amostra, deixando as faces planas, e medição do comprimento da camada de solo; C) Colocação dos anéis e borrachas de vedação; D) Colocação das telas de nylon e pérolas de vidro; E) Montagem do permeômetro e abertura do registro que permite o fluxo do líquido analisado através do solo.

Com o permeâmetro montado, primeiramente realizava-se a medição do tempo que o líquido levava para saturar o meio. Após a saturação da amostra, nos experimentos de carga constante, media-se o volume de líquido coletado num determinado intervalo de tempo e calculava-se a vazão. Este procedimento foi repetido dez vezes para cada amostra, alternando-se os intervalos de tempo. Então, se utilizou a média das vazões para os cálculos do coeficiente de permeabilidade de cada amostra.

3.2.2.4. Determinação da porosidade total

A porosidade total do meio, dada pela razão entre o volume de vazios e o volume total de uma determinada amostra (HILLEL, 1980), é um parâmetro importante nos processos de retenção e migração de líquidos ou gases no solo. A porosidade total foi calculada através das relações entre os índices físicos do solo apresentados abaixo.

Segundo Caputo (1988), o volume total (V) de uma amostra porosa é composto de material sólido (V_s) e de espaços vazios ou poros (V_v), tal que $V = V_s + V_v$. Logo, a porosidade é determinada pela relação abaixo:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \text{Equação (3.3)}$$

Utilizando as relações entre os índices físicos do solo tais como massa específica seca do solo (ρ_s) e massa específica dos grãos (ρ_g), a porosidade pode ser determinada pela equação:

$$n = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_g} \quad \text{Equação (3.4)}$$

A massa específica seca do solo (ρ_s) pode ser calculada através da Equação 3.5 relacionando massa específica aparente do solo (ρ_a) e a umidade higroscópica do solo (θ):

$$\rho_s = \frac{\rho_a}{1 + \theta} \quad \text{Equação (3.5)}$$

No campo, a determinação da massa específica aparente do solo (ρ_a) foi feita pelo método gravimétrico. Durante a coleta, determinou-se o volume da amostra pela medida da altura e do diâmetro da amostra, e a massa da amostra pela medida numa balança de precisão durante a coleta. A massa específica dos grãos (ρ_g) e a umidade higroscópica do solo (θ) foram determinadas no ensaio de granulometria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização mineralógica dos solos

O comportamento hidráulico dos solos é influenciado pelo arranjo, tamanho e tipo das partículas minerais que formam um solo. A caracterização mineralógica dos solos das bacias de contenção dos cinco terminais de armazenamento foi realizada a partir dos resultados das análises granulométricas e análises de raios-X das amostras deformadas coletadas. Estas análises auxiliaram na determinação da distribuição das partículas e identificação dos argilominerais que constituem os solos. A seguir são apresentados os resultados de cada análise realizada.

4.1.1. Análise granulométrica

As análises granulométricas permitiram a determinação do percentual em peso dos constituintes dos solos das bacias de contenção dos terminais segundo as dimensões das partículas do solo, apresentando seis frações granulométricas distintas: argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e material grosseiro. A Tabela 4.1 resume os resultados das frações granulométricas encontradas nas análises dos solos dos terminais, bem como os valores de umidade higroscópica e massa específica dos grãos.

TABELA 4.1 – Resumo das nas análises granulométricas de solos dos terminais.

TERMINAL 1				
Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Argila + Silte (%) ⁽¹⁾	13,4	81,8	51,0	14,7
Areia Fina (%)	6,4	74,2	34,4	17,6
Areia Média(%)	2,7	19,4	9,2	4,7
Areia Grossa (%)	0,0	9,7	3,1	2,9
Material Grosseiro (%)	0,0	24,9	2,3	5,5
Umidade (%) ⁽²⁾	0,0			
Massa Específica (g/cm ³) ⁽³⁾	2,67			
Classificação do solo ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	Franco-arenoso, Franca, Franco-argilo-arenoso ou Argilo-arenoso			
TERMINAL 2				
Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Argila + Silte (%) ⁽¹⁾	2,9	80,3	42,8	15,9
Areia Fina (%)	9,1	60,5	33,5	11,8
Areia Média(%)	1,2	37,6	16,6	10,0
Areia Grossa (%)	0,0	25,1	5,0	4,0
Material Grosseiro (%)	0,0	18,7	2,1	3,7
Umidade (%) ⁽²⁾	0,0			
Massa Específica (g/cm ³) ⁽³⁾	2,67			
Classificação do solo ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	Franco-arenoso ou Franco-argilo-arenoso			
TERMINAL 3				
Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Argila + Silte (%) ⁽¹⁾	4,4	55,7	28,1	13,4
Areia Fina (%)	18,9	84,6	46,4	17,4
Areia Média(%)	0,0	55,3	21,8	15,8
Areia Grossa (%)	0,0	14,9	2,7	3,0
Material Grosseiro (%)	0,0	7,0	1,0	1,6
Umidade (%) ⁽²⁾	0,0			
Massa Específica (g/cm ³) ⁽³⁾	2,67			
Classificação do solo ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	Areia franca, Franco-arenoso ou Franco-argilo-arenoso			
TERMINAL 4				
Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Argila (%)	0,0	17,3	7,4	3,6
Silte (%)	20,0	78,7	55,4	14,2
Areia Fina (%)	6,4	35,4	18,1	6,9
Areia Média(%)	0,7	38,9	11,6	9,2
Areia Grossa (%)	0,3	14,9	6,0	3,8
Material Grosseiro (%)	0,0	12,2	1,4	2,8
Umidade (%)	0,5	6,5	1,5	0,9
Massa Específica (g/cm ³) ⁽³⁾	2,67			
Classificação do solo ⁽⁴⁾	Franco-siltoso			
TERMINAL 5				
Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Argila (%)	3,1	12,5	6,1	3,6
Silte (%)	13,1	61,2	35,9	15,5
Areia Fina (%)	10,3	71,4	23,4	20,0
Areia Média(%)	6,8	31,1	14,2	8,8
Areia Grossa (%)	1,2	15,5	9,2	4,7
Material Grosseiro (%)	2,5	24,0	11,2	8,6
Umidade (%)	0,7	7,3	2,2	2,2
Massa Específica (g/cm ³) ⁽³⁾	2,67			
Classificação do solo ⁽⁴⁾	Franco-argiloso			

NOTAS: (1) não foram realizados ensaios de sedimentação nas amostras de solo para separar as frações de argila e silte; (2) não foram realizados ensaios de umidade higroscópica nas amostras de solo. Tendo em vista as condições secas de campo no momento das coletas, adotou-se a umidade igual a zero para o cálculo da porosidade total; (3) foi adotado o valor da massa específica dos grãos igual a 2,67 g/cm³ a todas as amostras para a realização dos ensaios de sedimentação; (4) classificação dos solos segundo Triângulo Textural, utilizando os dados das frações granulométricas médias de cada terminal; (5) A classificação do solo segundo o Triângulo Textural ficou limitado pois nestes terminais não houve separação das frações de argila e silte nos ensaios de granulometria. As classificações citadas nestes terminais representam os campos predominantes do solo no Triângulo Textural.

Os resultados das análises granulométricas de cada amostra, agrupados por bacias, são apresentados no APÊNDICE A, e ilustrados na Figura 4.1 onde são representados os valores médios das frações granulométricas do solo de cada bacia de contenção. Os resultados das análises granulométricas demonstraram que os solos das bacias de contenção dos terminais apresentam composições granulométricas distintas. Os solos das bacias do Terminal 1 possuem uma fração predominante de argila + silte, constituindo 51% da fração do solo. Nos terminais 2, 3 e 5, a areia é a fração predominante, constituindo 55%, 70%, 47% da fração do solo, respectivamente. O Terminal 4 possui a fração predominante de silte, compondo 55% da fração do solo. Os solos das bacias dos terminais 4 e 5 são compostos com baixas frações de argila, em média 7% e 6% da fração total do solo, respectivamente. Algumas amostras apresentaram material grosseiro em pequena quantidade. Esse material pode ser desconsiderado para fins de caracterização do solo, uma vez que não faz parte da composição inicial, sendo resultado das manutenções realizadas nas bacias de contenção.

A presença de argila expansiva, mesmo em baixas frações, poderá ter um efeito significativo no coeficiente de permeabilidade quando o solo for permeado por água. Portanto, mesmo as análises granulométricas indicando que em alguns terminais não foram predominantes as frações de argila ou que as frações de argila e silte não foram discriminadas, deve-se investigar a constituição dos argilominerais da fração existente. Neste sentido, foram realizadas análises de raios-X. A caracterização dos argilominerais dos solos das bacias de contenção será apresentada no item 4.1.2.

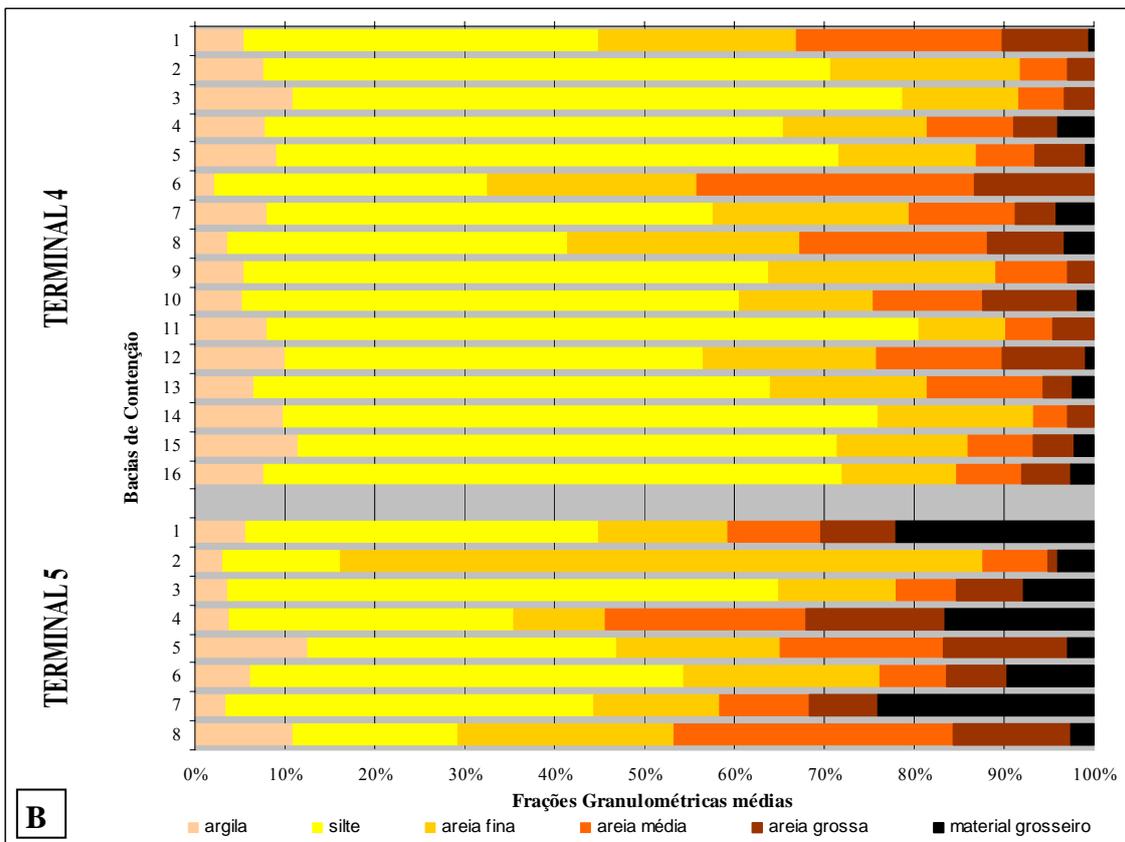
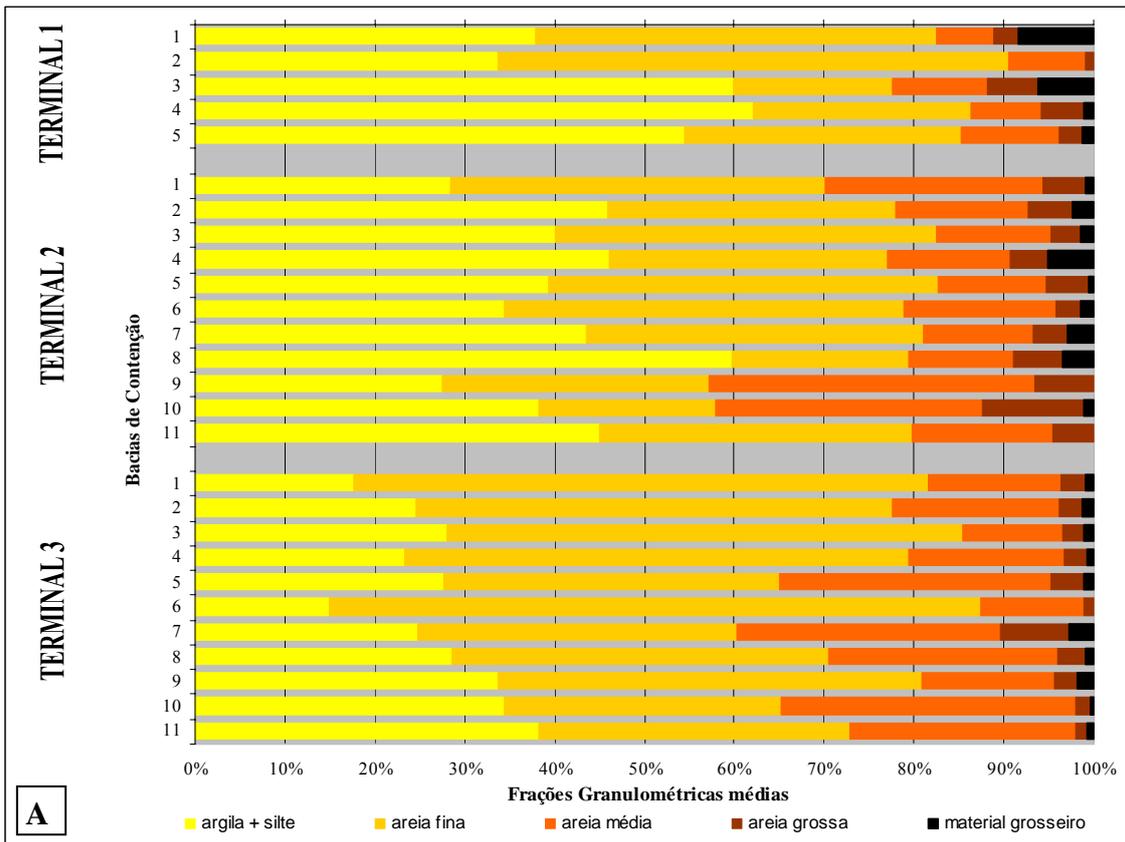


FIGURA 4.1 – Valores médios das frações granulométricas do solo de cada bacia de contenção: A) Terminais 1, 2 e 3. B) Terminais 4 e 5.

4.1.2. Análise de raios-X

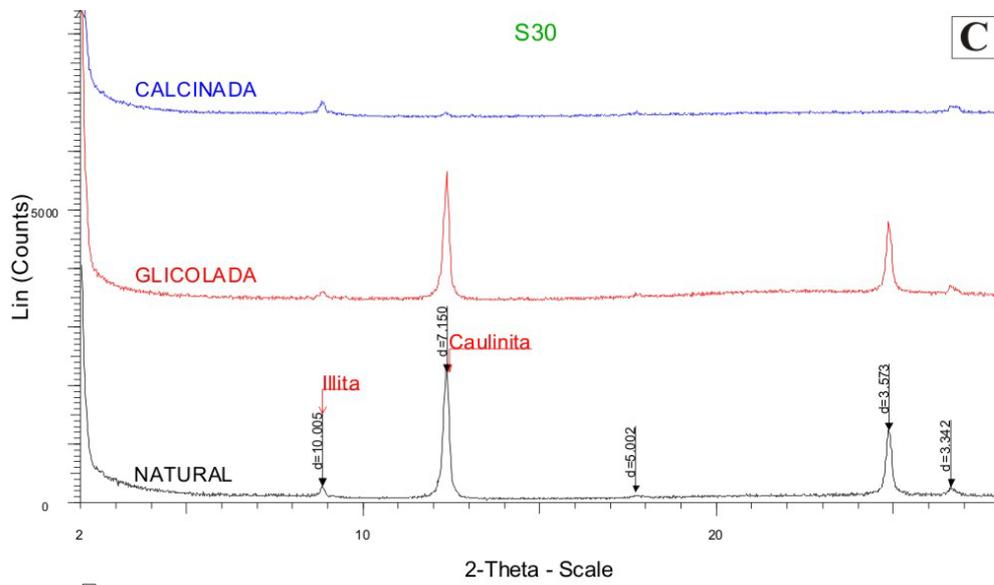
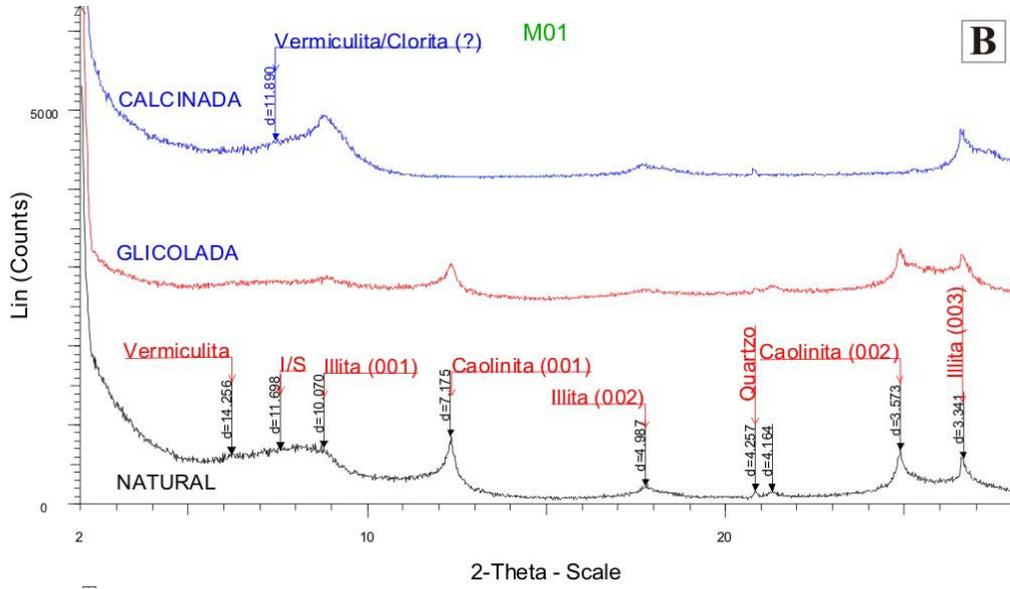
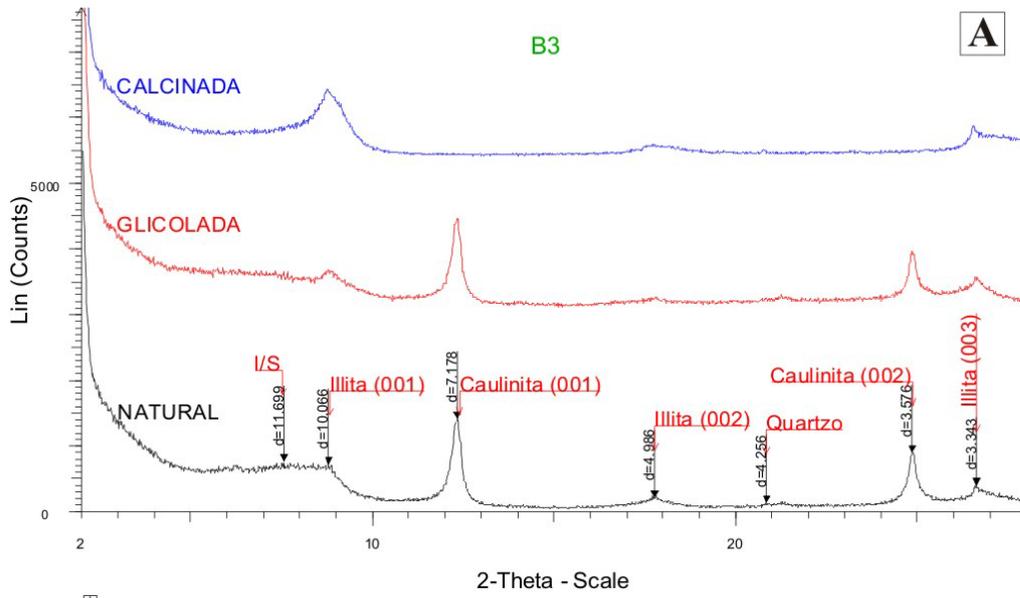
A análise de raios-X foi realizada a fim de determinar as propriedades mineralógicas da fração argilosa dos solos das bacias de contenção. A Tabela 4.2 apresenta quais os argilominerais detectados nos difratogramas de raios-X dos solos das bacias de contenção dos terminais. Os resultados das análises de raios-X revelaram a presença de argilominerais com características semelhantes nas cinco áreas de estudo, predominando em todas as bacias de contenção os argilominerais Caulinita e Ilita. No Terminal 1 foram verificadas em todas as amostras a Ilita, Caulinita, Interestratificado Ilita-Esmectita (I/S) e Vermiculita, e eventualmente o Quartzo e Feldspato Alcalino. No Terminal 2 foram verificadas em todas as amostras a Vermiculita, Interestratificado Ilita-Esmectita, Ilita e Caulinita, e eventualmente o Quartzo, Gipso, Plagioclásio e Feldspato Alcalino. No Terminal 3 foram verificadas em todas as amostras a Ilita e Caulinita, e eventualmente o I/S, Gibbsita, Vermiculita, Quartzo e Anatásio, e somente em uma amostra a Esmectita. No Terminal 4 predominaram em todas as amostras a Caulinita, Ilita, Gibbsita e Vermiculita, e eventualmente a Goetita e Clorita, e em uma única amostra o Quartzo. No Terminal 5 foram verificadas em todas as amostras a Caulinita, Ilita e Gibbsita, e em quase todas as amostras a Esmectita e Goetita, e em apenas uma amostra a Vermiculita. A Figura 4.2 apresenta o difratograma de raios-X característico de uma amostra de cada terminal, no qual os picos representam a presença dos argilominerais. Os difratogramas das amostras selecionadas são representativos das demais amostras de cada terminal. A relação dos argilominerais encontrados nas análises de difratometria de raios-X de cada amostra de solo está apresentada nas tabelas do APÊNDICE B.

TABELA 4.2 – Argilominerais presentes nos solos das bacias de contenção.

	Bacias	ARGILOMINERAIS												
		Cau	Ili	Ver	Gib	Clo	Qua	Fel	Gip	Goe	Ana	Pla	I/S	Esm
TERMINAL 1	1	X	X				X						X	
	2	X	X				X						X	
	3	X	X				X	X					X	
	4	X	X				X						X	
	5	X	X	X			X						X	
TERMINAL 2	1	X	X	X			X						X	
	2	X	X	X			X						X	
	3	X	X	X			X						X	
	4	X	X	X			X						X	
	5	X	X	X			X						X	
	6	X	X	X			X					X	X	
	7	X	X	X			X						X	
	8	X	X	X			X						X	
	9	X	X	X			X						X	
	10	X	X	X			X						X	
	11	X	X	X			X						X	
TERMINAL 3	1	X	X	X			X							
	2	X	X	X			X							
	3	X	X	X			X						X	
	4	X	X	X			X							
	5	X	X	X	X		X		X					
	6	X	X	X			X						X	
	7	X	X				X						X	
	8	X	X	X			X				X		X	
	9	X	X	X			X				X		X	X
	10	X	X				X							
	11	X	X				X							
TERMINAL 4	1	X	X	X	X	X			X	X				
	2	X	X	X	X	X			X					
	3	X	X	X	X	X			X					
	4	X	X	X	X	X			X					
	5	X	X	X	X	X			X	X				
	6	X	X	X	X	X			X					
	7	X	X	X	X	X			X					
	8	X	X	X	X	X			X	X				
	9	X	X	X	X	X			X	X				
	10	X	X	X	X	X			X	X				
	11	X	X	X	X	X			X	X				
	12	X	X	X	X	X			X	X				
	13	X	X	X	X	X			X	X				
	14	X	X	X	X	X	X		X	X				
	15	X	X			X								
	16	X	X	X	X	X			X					
TERMINAL 5	1	X	X		X				X					X
	2	X	X		X				X					X
	3	X	X											
	4	X	X							X				
	5	X	X		X				X	X				
	6	X	X		X				X	X				X
	7	X	X		X				X					X
	8	X	X	X	X				X	X				

LEGENDA: Cau – caulinita; Ili – ilita; Ver – vermiculita; Gib – gibbsita; Clo – clorita; Qua – quartzo; Fel – feldspato Alcalino; Gip – gipso; Goe – goetita; Ana – anatásio; Pla – plagioclásio; I/S – interestratificado de ilita/esmectita; Esm – esmectita.

NOTA: X – argilomineral presente na bacia de contenção.



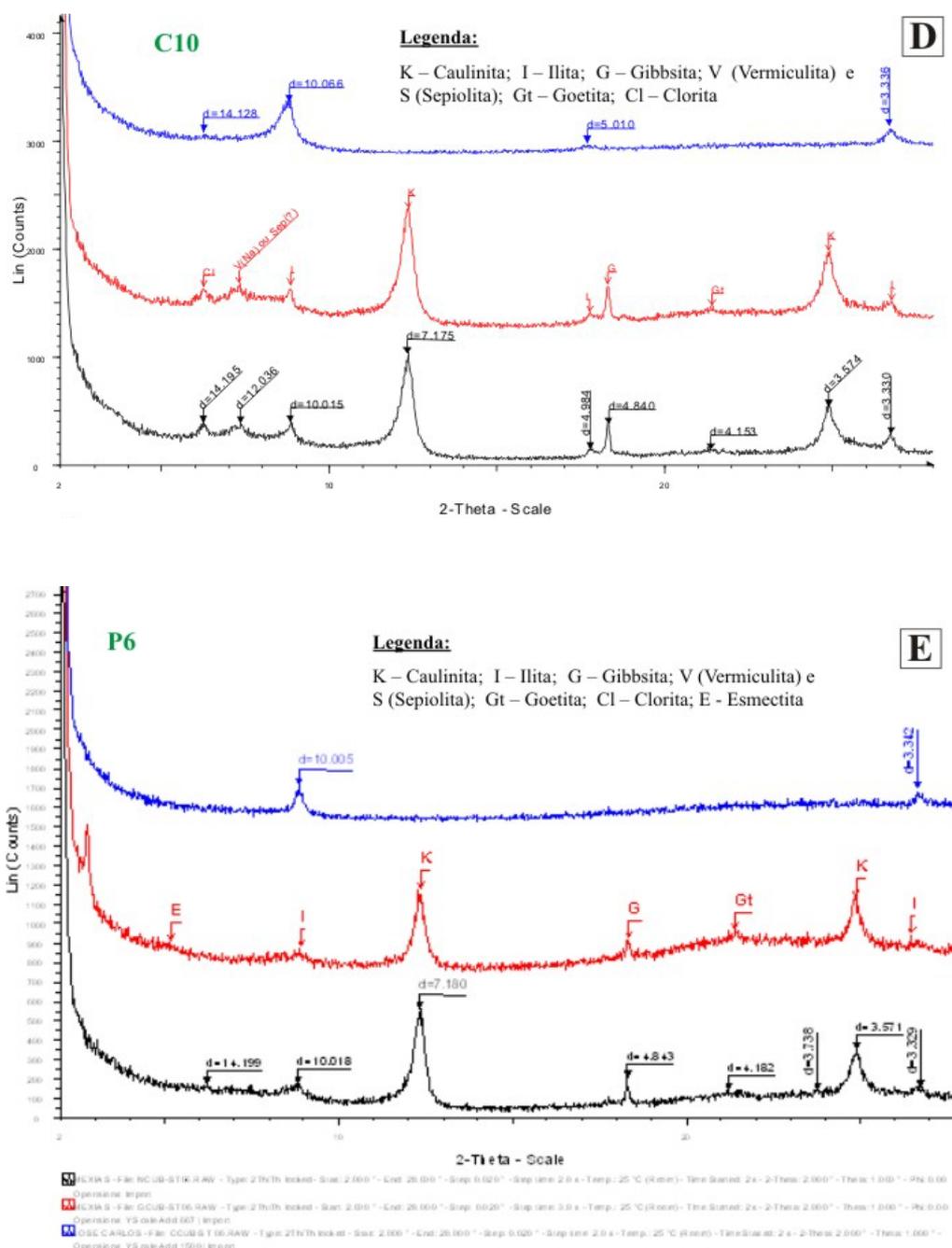


FIGURA 4.2 – Difratoformas típicos resultantes da análise de raios-X: A) amostra B3 do Terminal 1, B) amostra M1 do Terminal 2, C) amostra S30 do Terminal 3, D) amostra C10 do Terminal 4, E) amostra P8 do Terminal 5.

Os argilominerais constituintes dos solos das bacias de contenção dos terminais são caracterizados como não expansivos, com exceção da Esmectita e do I/S, ou seja, apresentam baixa expansividade devido a menor capacidade de adsorver íons e água. Nesses casos, a equação de Nutting (1930) pode-se ser usada com precisão para quantificar o coeficiente de permeabilidade nos solos argilosos das bacias de contenção, adotando líquidos de diferentes polaridades como referência.

A Esmectita, argilomineral com característica expansiva, foi detectada em metade das amostras de solo do Terminal 5 e em somente uma amostra de solo do Terminal 3. No entanto, os difratogramas das amostras dos terminais 1, 2 e 3 apresentaram com frequência a presença do argilomineral I/S. Esse argilomineral apresenta certo grau de expansibilidade, em função da presença da esmectita no interstratificado. Apesar de o grau de expansão do I/S ser menor que o apresentado pela esmectita pura, este argilomineral caracteriza-se como levemente expansivo (MOORE e REYNOLDS, 1997). Dessa forma, a presença do argilomineral Esmectita ou I/S pode fazer com que o coeficiente de permeabilidade medido com a água e produto possuam ordens de grandeza bastante diferenciados tal que seja impossível prever-se a permeabilidade dos produtos utilizando-se a equação de Nutting (1930) e dados de permeabilidade medidos com água, como apresentado na Equação 2.2, como foi provado em Oliveira (2001).

4.2. Avaliação da permeabilidade das bacias de contenção

Para a avaliação da permeabilidade do solo das bacias de contenção foram realizados ensaios de permeabilidade à água com amostras de solo coletado nas bacias de contenção. No caso da avaliação das bacias dos terminais 4 e 5, utilizaram-se os coeficientes de permeabilidade à água determinados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT, 2003). Também foram realizados ensaios de permeabilidade das amostras de solo percoladas com os produtos armazenados nas bacias de contenção a fim de considerar as condições específicas de funcionamento de cada bacia, bem como avaliar a influência do líquido percolado na determinação dos coeficientes de permeabilidade. As tabelas do APÊNDICE C apresentam os resultados dos ensaios de permeabilidade das amostras de solo de cada bacia de contenção.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade dos solos percolados por produto variaram de 10^{-8} cm/s a 10^{-3} cm/s. O amplo intervalo nos resultados pode estar relacionado às diferentes composições entre os solos das bacias de contenção, verificadas nos resultados de granulometria, bem como as diferentes características físico-químicas dos produtos percolados nos ensaios de permeabilidade. Nos ensaios de permeabilidade dos solos permeados por água, os resultados também apresentaram variações de 10^{-8} cm/s a 10^{-3} cm/s. Cabe ressaltar que das 51 bacias de contenção estudadas, sete não apresentaram amostras permeadas por água.

Além dessas variações nos resultados de permeabilidade entre diferentes solos, é possível verificar discrepância entre os valores dos coeficientes de permeabilidade à água e ao produto de um mesmo solo. Os produtos chamados escuros como gasóleo, óleo combustível e petróleo possuem valores de viscosidade na ordem de 100 vezes maior que da água e dos produtos claros como gasolina, nafta e diesel. Assim, os produtos escuros apresentam baixíssimas mobilidades no solo (MELEGARI, 2005). Essa influência da mobilidade também foi verificada nos resultados dos ensaios de permeabilidade. A exemplo, pode-se citar os resultados dos ensaios de permeabilidade das amostras B16, BD14, C17 e P4. Essas amostras apresentaram os valores do coeficiente de permeabilidade à água na ordem de 10^{-6} cm/s. No entanto, os seus valores de coeficiente de permeabilidade ao produto foram: B16 igual a $1,3 \times 10^{-4}$ cm/s ao diesel, BD14 igual a $4,5 \times 10^{-4}$ cm/s à gasolina, C17 igual a $4,2 \times 10^{-6}$ cm/s ao petróleo, e P4 igual a $1,0 \times 10^{-8}$ cm/s ao óleo combustível. Essa influência da mobilidade do líquido percolado no valor do coeficiente de permeabilidade é muito mais visível nos ensaios de permeabilidade das amostras de solo submetidas aos produtos óleo combustível e gasóleo. Todos os valores do coeficiente de permeabilidade das amostras percoladas por óleo combustível ou gasóleo ficaram na ordem de 10^{-8} cm/s, independente de essas amostras apresentarem valores de permeabilidade à água entre as ordens de grandeza 10^{-7} a 10^{-3} cm/s. Com isso, foi possível verificar que a redução da mobilidade do líquido percolado influenciou diretamente na redução do coeficiente de permeabilidade do meio, como descrito por Nutting (1930).

Segundo Oliveira (2001), a presença de argilominerais expansivos em solos permeados por água pode resultar em uma diminuição na permeabilidade em até 10^7 vezes, quando comparados com solos isentos de argilominerais expansivos, limitando a aplicação da equação de Nutting (1930) para estes casos. Nos resultados de permeabilidade pôde-se verificar que 6 amostras percoladas por diesel (B16, B19, B21, MD19, MD33 e M36) apresentaram coeficiente de permeabilidade à água menor que ao diesel em até 100 vezes, mesmo a mobilidade da água sendo, aproximadamente, 6 vezes maior que a do diesel. Este fenômeno pode ter ocorrido devido à presença do argilomineral levemente expansivo I/S na fração argilosa dessas amostras, detectado nas análises de raios-X. Como a água é muito mais polar que o diesel, verificado pela constante dielétrica destes líquidos ($\epsilon_{\text{água}}$ é, aproximadamente, 38 vezes maior que ϵ_{diesel}), os argilominerais se expandem com mais intensidade quando percolado por água do que por diesel, invalidando a equação de Nutting (1930). Assim, além da composição distinta dos solos das bacias de contenção e das diferentes mobilidade dos

líquidos percolados, a ampla variação encontrada nos resultados de permeabilidade também pode estar relacionada ao efeito da polaridade do líquido percolado na expansividade de argilominerais existentes na composição dos solos.

4.2.1. Avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção segundo os critérios estabelecidos pela norma NBR 17505-2

A NBR 17505-2 especifica que as bacias de contenção devem ter coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-6} cm/s, referenciado à água. No entanto, a norma é menos restritiva em casos de bacias de contenção que possuem canaletas de drenagem com seção transversal maior que 900 cm^2 , exigindo um coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-4} cm/s, referenciado à água. Nos cinco terminais em estudo, a maioria das bacias de contenção possuía canaleta de drenagem com a seção transversal mínima (ver Figura 2.2) e, nas bacias que não possuíam, as canaletas estavam em processo de construção.

Como visto no item 3.2, algumas bacias de contenção dos terminais tiveram mais de uma amostra de solo ensaiada no permeâmetro. A fim de avaliar a situação mais conservadora, foi adotado como coeficiente de permeabilidade característico para cada bacia o valor máximo medido entre as amostras coletadas na mesma, permeadas por água. Comparando os critérios da Norma com os valores máximos de permeabilidade à água de cada bacias de contenção, considerando que todas as bacias possuem canaletas de drenagem, 30 das 44 bacias de contenção, para as quais foram realizados ensaios de permeabilidade à água, atenderiam aos critérios de permeabilidade estabelecidos, ou seja, 68% apresentaram o coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-4} cm/s, referenciado a água (Figura 4.3). A Figura 4.4 ilustra os valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados à água.

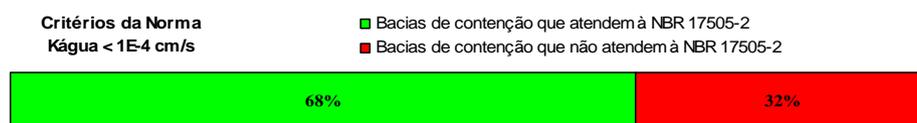


FIGURA 4.3 – Frações das bacias de contenção que atendem aos critérios de permeabilidade estabelecidos pela norma NBR 17505-2.

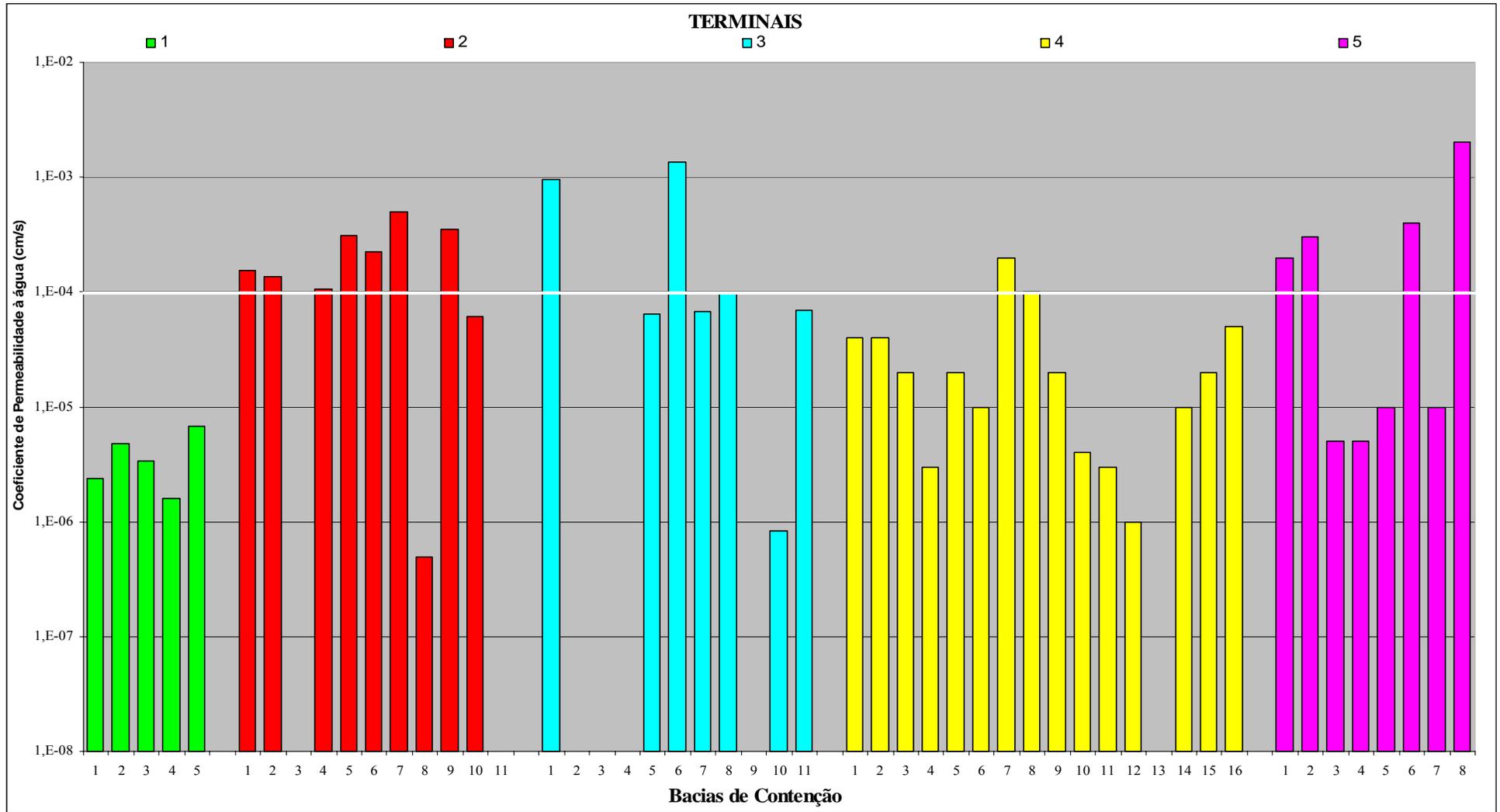


FIGURA 4.4 – Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados à água.

A norma cancelada NBR 7505-1 apresentava somente um critério de impermeabilização, o qual exigia que os solos das bacias de contenção tivessem coeficiente de permeabilidade máximo de 10^{-6} cm/s, referenciado à água. A norma substituta NBR 17505-2 além de manter o mesmo critério da NBR 7505-1, também passou a admitir, para as bacias que possuam canaleta de drenagem, um coeficiente de permeabilidade mais tolerante, menor que 10^{-4} cm/s. Nos resultados dos ensaios de permeabilidade à água pode-se verificar que somente 7% (3 de 44) das bacias atenderiam aos critérios de 10^{-6} cm/s. Para as bacias ficarem em conformidade com a Norma, como medida mitigadora, geralmente são construídas canaletas de drenagem nas mesmas por esta ser uma solução de menor custo. Assim, a junção de canaleta de drenagem e coeficiente de permeabilidade 10^{-4} cm/s é o critério que prepondera na impermeabilização dessas bacias de contenção.

4.2.2. Avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção considerando os coeficientes de permeabilidade referenciados aos produtos armazenados

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade, referenciados aos produtos armazenados, possibilitaram avaliar qual seria a eficiência de impermeabilização das bacias de contenção, caso fossem considerados os critérios de permeabilidade da Norma referenciados ao produto armazenado na bacia de contenção, e não à água. O coeficiente de permeabilidade característico para cada bacia de contenção foi adotado como sendo o valor máximo medido entre as amostras coletadas na mesma, referenciado ao produto com maior mobilidade armazenado. A avaliação das bacias de contenção, considerando a presença de canaletas de drenagem, indicou que 33 das 51 bacias atenderiam aos critérios hipotéticos de permeabilidade, ou seja, 65% apresentaram o coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-4} cm/s, referenciado ao produto armazenado na bacia de contenção (Figura 4.5). A Figura 4.6 ilustra os valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados ao produto armazenado.

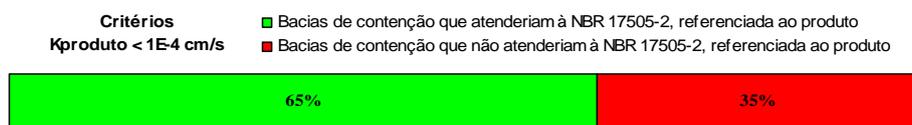


FIGURA 4.5 – Frações das bacias de contenção que atendem aos critérios de permeabilidade, considerando os coeficientes de permeabilidade referenciados aos produtos.

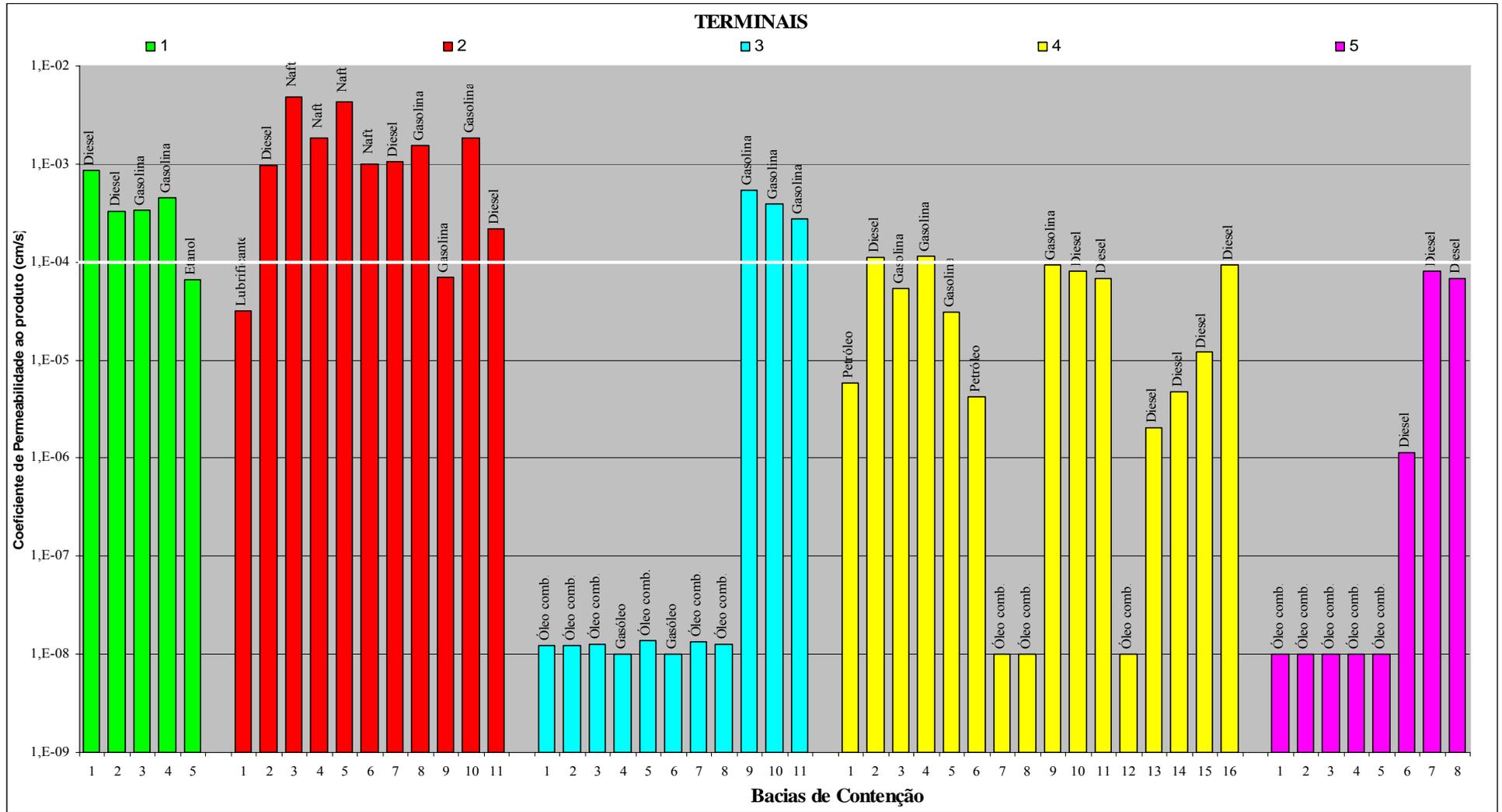


FIGURA 4.6 – Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados aos produtos.

Ao confrontar os resultados de avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção segundo a NBR 17505-2 assumindo como critério o coeficiente de permeabilidade ora referenciado à água, ora ao produto, foi possível verificar divergência entre esses resultados. Os resultados mostraram que 45% (20 de 44) das bacias de contenção possuem o coeficiente de permeabilidade referenciado à água e ao produto menor que 10^{-4} cm/s, concomitantemente (Figura 4.7). Desses 55% (24 de 44) de bacias que não atendem aos dois critérios concomitantemente, 43% (19 de 44) possuem o coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-4} cm/s à água ou ao produto. Além disso, os resultados, ilustrados na Figura 4.8, revelam que das 44 bacias de contenção permeadas com água, 23 apresentaram o coeficiente de permeabilidade aos produtos armazenados maior que o coeficiente determinado para água, ou seja, 52% dos casos (Figura 4.9). Esse elevado número de bacias com o coeficiente de permeabilidade aos produtos armazenados maior que o coeficiente determinado para água pode estar relacionado a presença dos argilominerais com características levemente expansivas detectados na análise de raios-X, pois esse fenômeno foi mais freqüente nas amostras de solo dos terminais 1, 2 e 3.

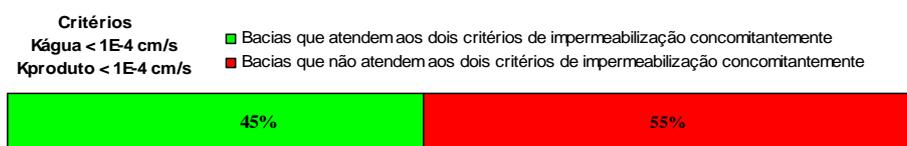


FIGURA 4.7 – Frações das bacias de contenção que atendem aos dois critérios de permeabilidade, coeficientes de permeabilidade referenciados à água e ao produto.

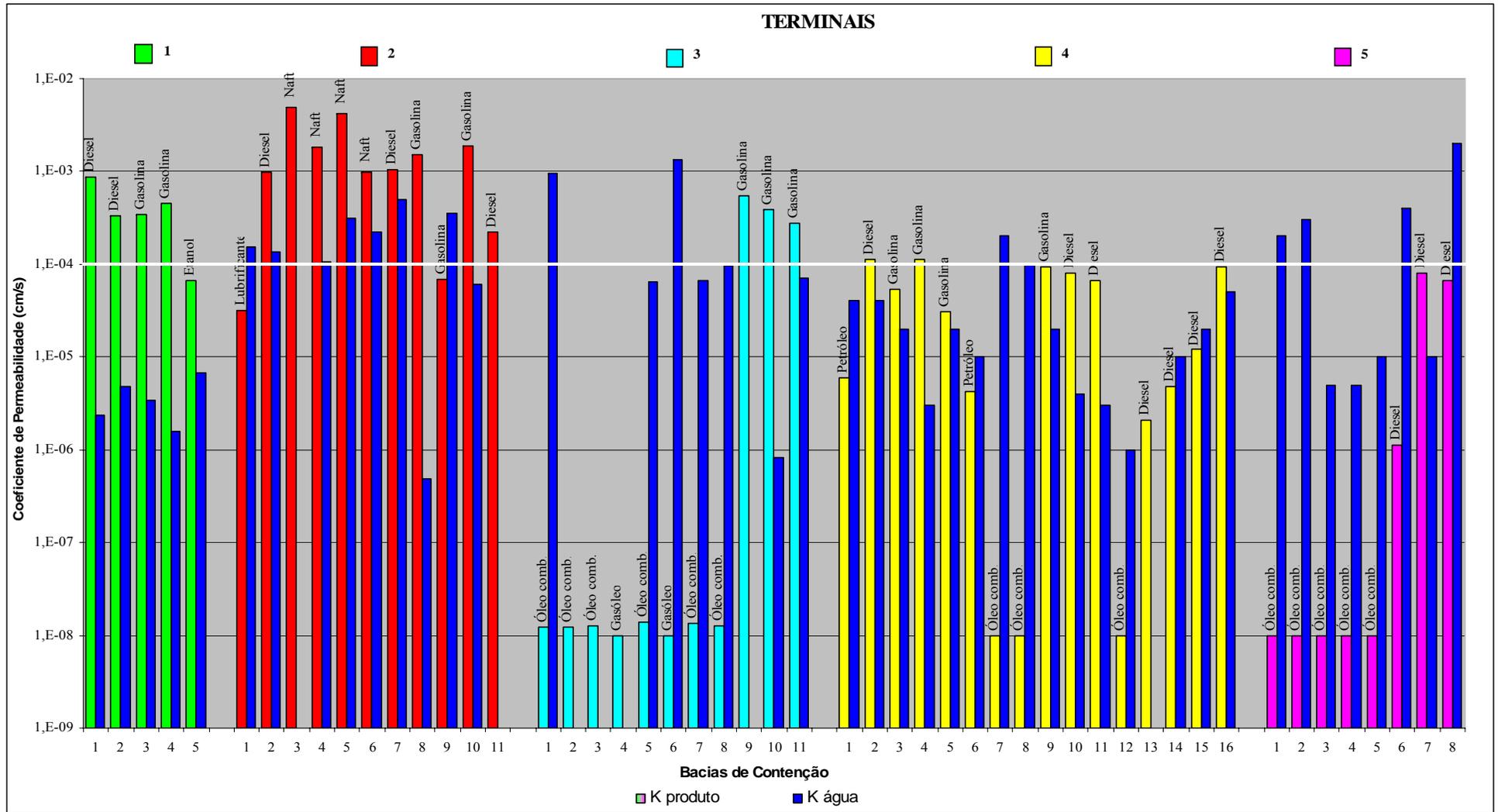


FIGURA 4.8 – Valores máximos dos coeficientes de permeabilidade de cada bacia de contenção, referenciados ao produto e à água.



FIGURA 4.9 – Comparação entre o número de bacias de contenção que apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade ao produto maior que à água

Em resumo, os resultados corroboram os dados da literatura demonstrando que os valores dos coeficientes de permeabilidade variam em função da mobilidade ($\frac{\rho}{\mu}$) e da polaridade (ε) do líquido percolado, bem como da estrutura do solo e seu teor de argilominerais presentes na constituição. Também foi visto que a avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção segundo a NBR 17505-2 assumindo como critério o coeficiente de permeabilidade referenciado à água e ao produto apresentaram divergência; e que em 52% das bacias de contenção os produtos armazenados migrarão no solo mais rápido que a água em eventuais derramamentos. Com isso, verificou-se que não é seguro definir critérios de impermeabilização baseados no coeficiente de permeabilidade referenciado à água, como exige a norma NBR 17505-2. Ainda é sugerido que o coeficiente de permeabilidade referenciado ao produto armazenado na bacia de contenção também não deve ser um critério único e suficiente para avaliar a impermeabilização das bacias de contenção. A avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção deve ser realizada por meio do cálculo da migração vertical do produto nos solos das bacias de contenção, o que possibilitaria prever a profundidade de solo contaminado e o tempo de migração do produto necessário para atingir o lençol freático, em caso de derramamento. Com essa previsão do cenário, em caso de derramamento, esse modelo de migração torna-se uma importante ferramenta para tomada de decisão no gerenciamento dessas áreas com grande potencial de contaminação. Para isso, é necessário levar em consideração as especificidades de cada local, como orienta o guia *SPCC Guidance for Regional Inspectors* (USEPA, 2005). Essa proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção, bem como dos cálculos de migração do produto no solo são descritos no item a seguir.

4.3. Proposta para avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção

4.3.1. Modelo matemático simplificado para o cálculo da migração vertical dos produtos na zona não saturada do solo das bacias de contenção

A contaminação da subsuperfície por derramamentos de petróleo e derivados em bacias de contenção de terminais de armazenamento pode ser representada pelo modelo conceitual ilustrado na Figura 4.10. Em caso de vazamento de combustível proveniente de um tanque vertical de superfície, o produto escoa e se acumula na superfície da bacia. Dependendo do volume derramado, forma-se uma coluna líquida do produto sobre a superfície da bacia, a qual é limitada pela altura do dique de contenção. Conforme visto no item 2.5, uma fração menor do produto se transfere para a atmosfera, se o composto for volátil, e o restante pode se infiltrar através da zona não saturada do solo até alcançar as águas subterrâneas. O contato da fase livre de LNAPL com o fluxo contínuo da água subterrânea ocasiona a dissolução de hidrocarbonetos de maior solubilidade para a água subterrânea, formando uma pluma de contaminantes dissolvidos.

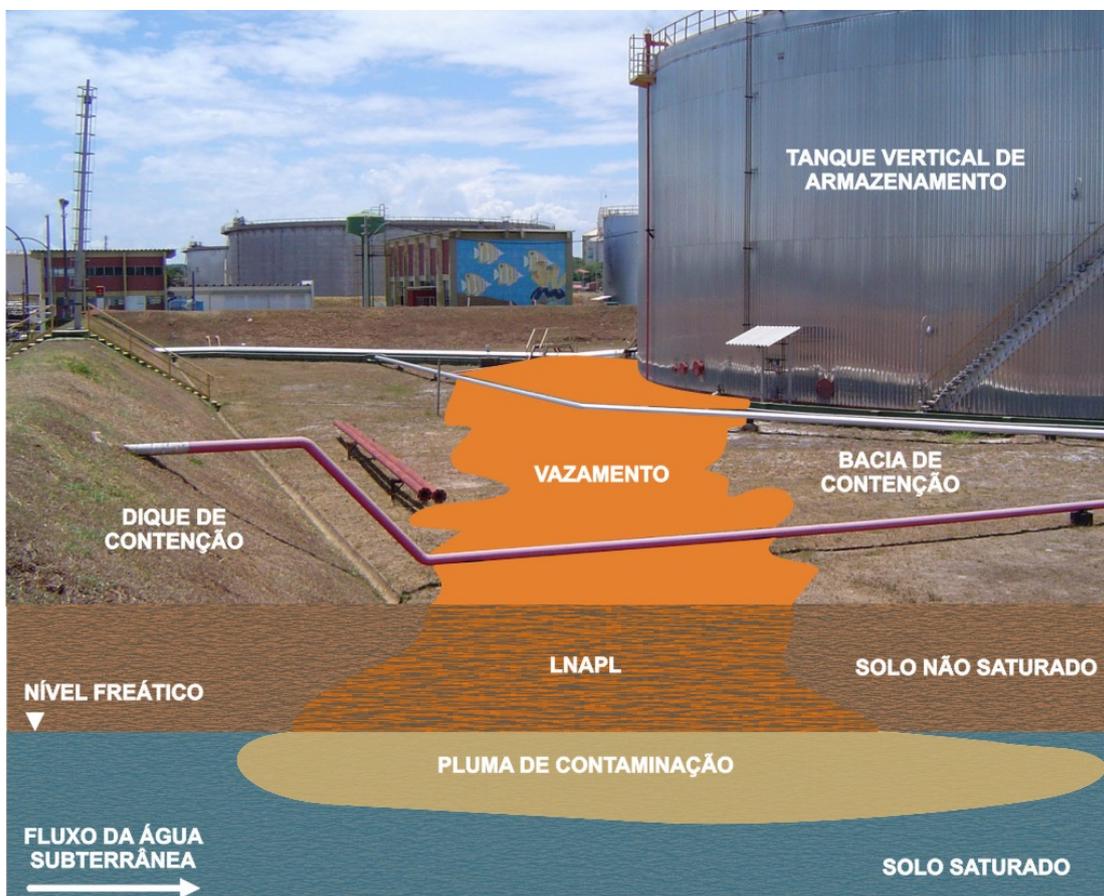


FIGURA 4.10 – Modelo conceitual do derramamento de LNAPL em uma bacia de contenção.

Plano de Contingência é o conjunto de procedimentos e ações que visa evitar ou minimizar impactos ambientais através de definição de recursos humanos, materiais e equipamentos complementares de prevenção, controle e combate da poluição (ITOPF, 2007). Em caso de vazamento ou derramamento de produtos em uma bacia de contenção, o tempo previsto em um plano de contingência para conter e remover o produto livre da superfície da bacia é chamado de tempo de resposta. Conhecendo-se os tempos de resposta dos terminais e as velocidades de migração dos produtos nos solos das bacias de contenção é possível estimar a profundidade de solo que poderá ser contaminado em cada bacia, em eventuais derramamentos. Nesse intuito, foi proposto um modelo matemático simplificado de migração vertical relacionando a profundidade de solo contaminado na zona não saturada em função do tempo de migração do produto na bacia de contenção.

Para a dedução do modelo de migração vertical do produto foram consideradas condições simplificadoras como: (i) o solo a montante da frente de migração está próximo da saturação e a jusante, praticamente seco, ou seja, a dispersão longitudinal do produto nos limites verticais (efeito de borda) do volume de controle simulado é nula. A dispersão do produto nos limites do volume de controle é denominada efeito de borda. Tendo em vista a dimensão superficial da bacia de contenção muito maior que a espessura de solo percolado, também se considera a dispersão transversal do produto nos limites laterais do volume de controle simulado nula, ou seja, o efeito de borda desprezível; e (ii) a migração dos compostos orgânicos através da zona não saturada do solo foi modelada como um movimento vertical unidimensional aplicando a Lei de Darcy para sistemas multifásicos (Equação 2.8), considerando o coeficiente de permeabilidade máximo igual ao de saturação. Segundo Bedient (1994), o gradiente hidráulico (dH/dh) pode ser modelado segundo a equação:

$$\frac{dH}{dh} = \frac{P/\rho_w g + \Psi}{h} = \frac{H_f}{h} \quad \text{Equação (4.1)}$$

onde P é a pressão exercida na frente de migração do produto no solo, causada pela altura da coluna líquida na bacia. Para o cálculo do gradiente hidráulico foi considerada uma coluna líquida de produto constante ao longo do tempo e igual à altura máxima do dique de contenção, por ser a condição mais crítica. ρ_w é a densidade da água e g é a aceleração da gravidade. Ψ é a pressão capilar de sucção do solo exercida na frente de migração do produto no solo. Portanto, o termo $\left[\frac{P}{\rho_w g} + \Psi \right]$, descrito por H_f ,

representa a carga exercida sobre a frente de migração no solo. O h representa a espessura de solo percolado pelo produto. O valor de h aumenta à medida que a frente de migração avança no solo, caracterizando um gradiente hidráulico variável ao longo do tempo.

O modelo de migração vertical do produto foi deduzido em analogia à equação de permeâmetro de nível variável, reportada em Fetter (1994), e descreve uma curva de profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração vertical do produto através do solo da bacia de contenção (Equação 4.6). As Equações 4.2 e 4.3 representam a velocidade de migração vertical dos produtos na zona não saturada do solo.

$$v_i = \frac{dh}{dt} \quad \text{Equação (4.2)}$$

$$v_i = \frac{k_r}{S_f} \frac{K_f}{n} \frac{H_f}{h} \quad \text{Equação (4.3)}$$

Igualando as Equações 4.2 e 4.3, e integrando, tem-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k_r}{S_f} \frac{K_f}{n} \frac{H_f}{h} \quad \text{Equação (4.4)}$$

$$\int_0^h h' dh = \int_0^t \frac{k_r}{S_f} \frac{K_f}{n} H_f dt \quad \text{Equação (4.5)}$$

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot k_r \cdot K_f \cdot H_f}{S_f \cdot n}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação (4.6)}$$

onde h é a profundidade de solo contaminado na zona não saturada após o tempo de migração t ; dh é a espessura de solo infinitesimal percolada pelo produto, num intervalo de tempo infinitesimal dt ; n é a porosidade do solo; k_r é o coeficiente de permeabilidade relativo, S_f é o grau de saturação do fluido no solo; K_f é o coeficiente de permeabilidade do solo percolado com produto; H_f é a carga exercida sobre a frente de migração no solo. Para esse modelo, foi adotado que H_f não varia ao longo do tempo ou com o aumento da profundidade de solo percolado, por se tratar da situação mais crítica em casos de vazamentos de bacias de contenção. A Equação 4.6 deduzida acima se assemelha ao termo $S \cdot t^{1/2}$ da Equação de Philip (1957) (Equação 2.7). Esse termo é o que predomina na equação para os tempos mais curtos de infiltração, durante o qual as forças capilares ainda desempenham papel importante.

Villela e Mattos (1977) também estudaram o escoamento da água em solos não

saturados. Esses pesquisadores propuseram um modelo matemático empírico para o escoamento considerando que: (i) o escoamento pode ser descrito como um movimento vertical unidimensional, (ii) o solo a montante da frente de migração está saturado, e (iii) o solo a jusante da frente de migração está seco, obtendo a seguinte equação:

$$x_f = \sqrt{\frac{K \cdot \Delta H}{n}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação (4.7)}$$

onde x_f é o deslocamento da frente de umidade no tempo t ; K é o coeficiente de permeabilidade da Lei de Darcy; ΔH é a variação da tensão de umidade entre a frente de umidade e a fonte de água; n é a porosidade do solo. Os resultados dos pesquisadores demonstraram que o modelo do escoamento para esse caso mais simples se ajustou bem aos resultados experimentais. Esse modelo proposto por Villela e Mattos (1977), Equação 4.7, também se assemelha ao modelo deduzido neste trabalho (Equação 4.6) para simular a frente de migração do contaminante na zona não saturada do solo das bacias de contenção, o qual reforça a validade desta Equação.

Para o cálculo da migração vertical dos produtos no solo, para cada bacia de contenção, por meio da Equação 4.6, deve-se considerar as especificidades de cada local tais como propriedades do solo, produto armazenado, geometria dos diques, nível do lençol freático, corpos hídricos superficiais próximos e tempo de resposta do plano de contingência do terminal. As simulações dos impactos dos produtos derramados nas bacias são simplificações da realidade, no entanto permite a avaliação expedita da eficiência de impermeabilização das mesmas. Com isso, o estudo de previsão de cenário deve ser usado como ferramenta para tomada de decisão no gerenciamento dessas áreas com grande potencial de contaminação.

4.3.2. Procedimentos propostos para a avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção

Conforme apresentado no item 2.1, em muitos estados brasileiros assume-se que a avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção seja realizado de acordo com as especificações da norma brasileira NBR 17505-2, que estabelece critérios assumindo um único valor de coeficiente de permeabilidade, referenciado à água, para todas as bacias de contenção. No entanto, os resultados deste trabalho, bem como os dados da literatura, demonstram que os valores dos coeficientes de permeabilidade variam em função das características do líquido percolado (mobilidade e

constante dielétrica) e da constituição do solo que compõe as bacias (presença de argilominerais expansivos e não expansivos). Desta forma, neste estudo foi proposto que a avaliação da eficiência de impermeabilização não seja realizada com base em um critério único como, por exemplo, o coeficiente de permeabilidade, e sim, nas especificidades do local tais como propriedades do solo, propriedades do produto armazenado, geometria dos diques de contenção, nível do lençol freático, corpos hídricos superficiais próximos e também considerar o tempo de resposta do plano de contingência da área de armazenamento.

As bacias de contenção geralmente são grandes estruturas, construídas com áreas superficiais impermeabilizadas na ordem de 1 ha. Conseqüentemente, em casos de derramamentos, seriam gerados grandes volumes de solo impactado, acarretando elevados custos de remediação. Em casos onde se verifica ainda a contaminação da água subterrânea, os custos de remediação podem ser muito mais elevados e demandar longos períodos de tempo. Dependendo do cenário, a contaminação da água subterrânea pode proporcionar elevados riscos à saúde humana. No caso de um derramamento atingir a água subterrânea, a variação espacial e temporal da concentração dos contaminantes dissolvidos na água subterrânea é função dos mecanismos de transportes (advecção, dispersão e sorção) e transformação (biodegradação). No entanto, a existência de risco à saúde humana e ao meio ambiente, pela exposição a compostos tóxicos em uma área impactada, é baseado em um modelo conceitual caracterizado por três elementos: a fonte de contaminação, os mecanismos de transporte e os receptores (USEPA, 1989). Por isso, em águas subterrâneas impactadas, a Avaliação de Risco é uma das etapas mais importantes do processo de gerenciamento ambiental para definição de ações mitigadoras do perigo à saúde humana e ao meio ambiente. A avaliação de risco também é utilizada para áreas não impactadas na definição de medidas preventivas para mitigação dos riscos e na determinação das áreas mais críticas (CETESB, 2001).

Para a avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção foi proposta uma classificação dos locais em função dos cenários previstos em caso de derramamento, como profundidade de solos contaminados e contaminação de águas subterrâneas ou superficiais, calculados pela Equação 4.6. A norma norte americana ASTM E1739-95 (*Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*) é um guia de Ação Corretiva Baseada no Risco, também conhecido como metodologia RBCA, recomendado pelos órgãos de controle ambiental como metodologia para avaliação de risco à saúde humana e ao meio ambiente de áreas

impactadas por derramamentos de petróleo e derivados. Nos procedimentos da Ação Corretiva Baseada no Risco, a ASTM (1995) classifica os locais e propõe ações de respostas iniciais baseadas no corrente e projetado grau de perigo à saúde humana e ao meio ambiente. Segundo critérios e cenários prescritos, classificam-se os locais de acordo com a urgência de resposta inicial devido à ameaça à saúde humana e ao meio ambiente. Locais de *Classificação 1* estão associados com imediata ameaça à saúde humana e ao meio ambiente; locais de *Classificação 2* estão associados com ameaça a curto prazo (0 a 2 anos) à saúde humana e ao meio ambiente; locais de *Classificação 3* estão associados com ameaça a longo prazo (mais que 2 anos) à saúde humana e ao meio ambiente. Tomando como referência o processo de classificação definido pela ASTM (1995), foi proposto classificar a eficiência de impermeabilização de bacias de contenção em quatro níveis segundo cenários previstos em casos de derramamentos, determinados através da simulação da migração vertical dos produtos nos solos nas bacias de contenção (Tabela 4.3). Para cada nível de classificação é proposta uma avaliação da eficiência de impermeabilização da bacia de contenção e uma ação de resposta. Os cenários previstos são baseados na profundidade de solo contaminado e na contaminação de águas subterrâneas e superficiais para um tempo de migração do produto no solo da bacia de contenção igual ao tempo de resposta do plano de contingência do terminal. Tempo de resposta é o tempo previsto em um plano de contingência para conter e remover o produto livre da superfície da bacia de contenção em casos de derramamentos ou vazamentos.

TABELA 4.3 – Descrição das classificações dos locais, cenários previstos em caso de derramamento, avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção e ações de resposta.

Classificações dos Locais e Cenários Previstos em casos de derramamentos nas bacias de contenção ⁽¹⁾	Avaliação da Eficiência de Impermeabilização das Bacias de Contenção e Ações de Resposta
0. Contaminaria as águas subterrâneas e/ou superficiais no tempo igual ao Tempo de Resposta ⁽²⁾ .	Bacia de contenção insuficientemente impermeabilizada. O cenário necessita de estudo de Avaliação de Risco.
1. Não contaminaria as águas subterrâneas e/ou superficiais no tempo igual ao Tempo de Resposta ⁽²⁾ , porém contaminaria uma espessura de solo maior que um metro.	Bacia de contenção com baixa eficiência de impermeabilizada. O cenário necessita de estudo de Avaliação de Risco.
2. Não contaminaria as águas subterrâneas e/ou superficiais no tempo igual ao Tempo de Resposta ⁽²⁾ , porém contaminaria uma espessura de solo maior que 30 cm e menor que um metro.	Bacia de contenção com regular eficiência de impermeabilização. Baseado no conhecimento do potencial de contaminação da área e dos custos de remediação, a tomada de decisão para manter ou melhorar a eficiência de impermeabilização da bacia de contenção é de responsabilidade da gerência do terminal.
3. Não contaminaria as águas subterrâneas e/ou superficiais no tempo igual ao Tempo de Resposta ⁽²⁾ , porém contaminaria uma espessura de solo menor que 30 cm.	Bacia de contenção devidamente impermeabilizada. A bacia de contenção não necessita de melhoria na impermeabilização.

⁽¹⁾ Sugere-se uma espessura mínima de camada impermeabilizante em relação ao nível do lençol freático igual a 1,5 m de solo, segundo recomendado pelas normas ABNT NBR 10157 (1987) – “Aterros de Resíduos Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação” e ABNT NBR 13896 (1987) – “Aterros de Resíduos Não-Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação”; ⁽²⁾ Tempo de Resposta é o tempo previsto no Plano de Contingência do terminal de armazenamento para conter e remover o produto livre da superfície da bacia de contenção em caso de derramamento.

Segundo a norma NBR 17505-2, as bacias de contenção que não atenderem aos critérios de impermeabilização têm como única medida mitigadora a redução do valor do coeficiente de permeabilidade da bacia, referenciado à água, até o nível exigido pela Norma. Para isso, seria necessário implementar nas bacias de contenção alternativas de impermeabilização convencionais como solo argiloso expansivo compactado, concretagem, geomembranas, entre outras alternativas. Além dessas medidas mitigadoras apresentarem elevados custos de implantação, o critério baseado nessa tomada de decisão não leva em consideração as especificidades dos locais, podendo gerar desperdício de recursos financeiros em áreas sem risco de poluição. Neste trabalho foi proposto um procedimento de avaliação da eficiência de impermeabilização da bacia de contenção mais flexível do que a Norma, pois não engessa a avaliação em um único parâmetro. Para melhorar a eficiência de impermeabilização de uma bacia de contenção, seguindo proposto na Tabela 4.3, podem ser implementadas as seguintes medidas mitigadoras: (i) alterar as características do solo local a fim de reduzir seu coeficiente de permeabilidade referenciado ao produto de maior mobilidade armazenado na bacia de contenção; (ii) alterar o produto armazenado crítico na bacia por um produto de menor mobilidade; ou (iv) investir na estrutura do plano de contingência, a fim de reduzir o tempo de resposta em caso de derramamento. Essas medidas tornam mais flexíveis às tomadas de decisões, possibilitando uma melhor locação de recursos financeiros nas áreas com real potencial de contaminação.

4.3.3. Aplicação da proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção nos cinco estudos de caso

A proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização sugere classificar as bacias de contenção de acordo com os cenários previstos, em caso de derramamento, determinado através da simulação da migração vertical dos produtos nos solos das bacias de contenção. O cálculo da migração vertical dos produtos através da zona não saturada dos solos das bacias de contenção foi realizado utilizando-se a Equação 4.6. A fim de modelar a situação mais conservadora possível, foram adotados os valores mais desfavoráveis para todas as variáveis da equação. Para o coeficiente de permeabilidade, foi adotado como valor característico o valor máximo medido entre as amostras coletadas de uma mesma bacia, referenciado ao produto com maior mobilidade armazenado. Esses valores estão apresentados nas tabelas do APÊNDICE C. Para a porosidade foi adotado o valor mínimo entre as porosidades das amostras

correspondentes a mesma bacia. A condição de saturação do solo após a percolação do produto foi adotada $S_f = 1$, ou seja, o produto preenche 100% da porosidade do solo percolado. O coeficiente de permeabilidade relativo também foi adotado $k_r = 1$, considerando a condição de solo seco no momento do derramamento. Isto permitiu modelar a profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração vertical dos produtos armazenados nas bacias de contenção e, assim, estimar, em função dos tempos de resposta previstos nos terminais, a espessura de solo contaminado nas bacias de contenção em caso de derramamentos.

Para o cálculo de porosidade total, foi utilizada a relação entre índices físicos do solo proposta pela Equação 3.4. As porosidades dos solos dos terminais 1, 2 e 3 foram calculadas adotando-se a umidade higroscópica das amostras igual a zero, tendo em vista que não foram realizados estes ensaios nas mesmas. Cabe ressaltar que essas amostras foram coletadas num período de estiagem, em que a umidade de campo da camada superficial de solo das bacias de contenção aparentava-se mínima. Os valores de porosidade calculados apresentaram variações de 16,4 a 41,0%. Apesar da ampla faixa de valores de porosidade, os resultados demonstram uma distribuição homogênea da porosidade entre as bacias de contenção do mesmo terminal, como pode ser visto na Figura 4.11. Os valores calculados de porosidade total de cada amostra de solo estão apresentados no APÊNDICE D.

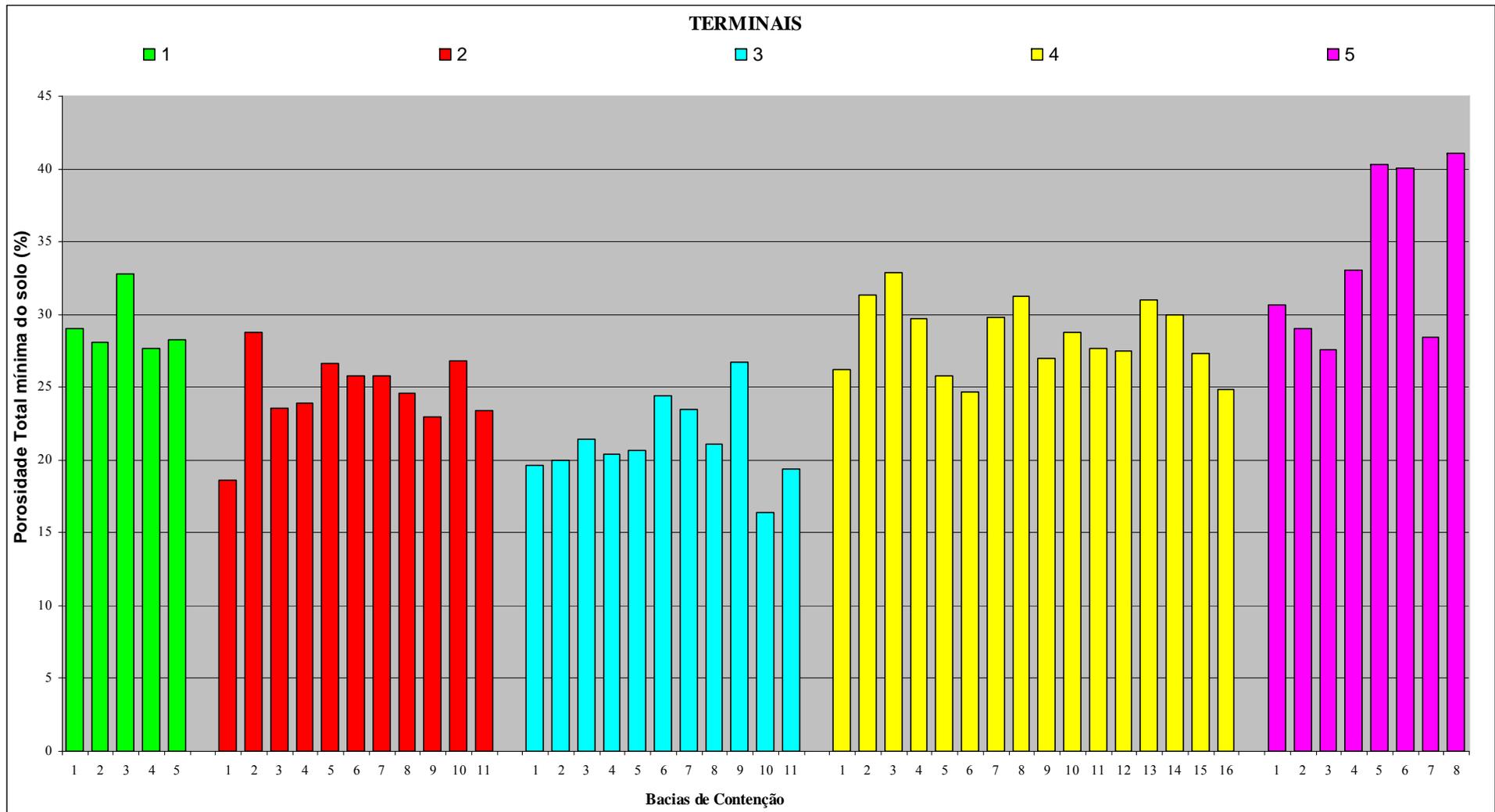


FIGURA 4.11 – Valores de porosidade total mínima do solo de cada bacia de contenção.

A carga exercida na frente de migração (H_f) foi calculada considerando a pressão capilar de sucção (Ψ) igual a um metro para todas as bacias de contenção, tendo em vista as características granulométricas e mineralógicas dos solos (Bedient, 1994). A altura da coluna líquida de produto em cada bacia de contenção em casos de vazamentos é dada pela maior diferença de cota entre a base da bacia e o topo do dique de contenção. Como essas informações dos terminais não foram fornecidas, a altura da coluna líquida de produto em cada bacia de contenção foi assumida igual a três metros, altura máxima dos diques de contenção permitida pela NBR 17505-2. A simulação também foi realizada considerando uma espessura de solo contaminado variando até a profundidade máxima de um metro, a fim de ilustração. Cabe ressaltar que as amostras de solo com 20 cm de altura foram coletadas 15 cm abaixo da superfície, e que as propriedades mineralógicas dessas amostras estão sendo extrapoladas para a profundidade até 1,0 m. No entanto, para profundidades maiores que 35 cm, os perfis dos solos das bacias de contenção podem apresentar outras composições mineralógicas, as quais não foram avaliadas neste estudo. A Tabela 4.4 lista os parâmetros utilizados para o cálculo da carga aplicado às bacias de contenção para cada produto simulado.

TABELA 4.4 – Parâmetros de cálculo da carga aplicado às bacias de contenção

Produto	ρ (g/cm ³)	$\frac{P}{\rho_w g}$ (cm)	Ψ (cm)	H_f (cm)	h (cm)
Etanol	0,81	243	100	343	0 – 100
Nafta	0,60	180	100	280	0 – 100
Gasolina	0,73	219	100	319	0 – 100
Diesel	0,83	249	100	349	0 – 100
Lubrificante	0,90	270	100	370	0 – 100
Petróleo	0,81	243	100	343	0 – 100
Óleo Combustível	0,88	264	100	364	0 – 100
Gasóleo	0,85	255	100	355	0 – 100

Na Equação 4.6, h é profundidade de solo percolado pelo produto no tempo de migração vertical t . O cálculo da migração vertical pode ser utilizado para a estimativa dos tempos de resposta máximos das bacias em função da espessura de solo contaminado tolerável. As curvas de previsão da profundidade de solo contaminado das bacias dos cinco terminais em função do tempo de migração foram calculadas através da Equação 4.6 e estão ilustradas nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16.

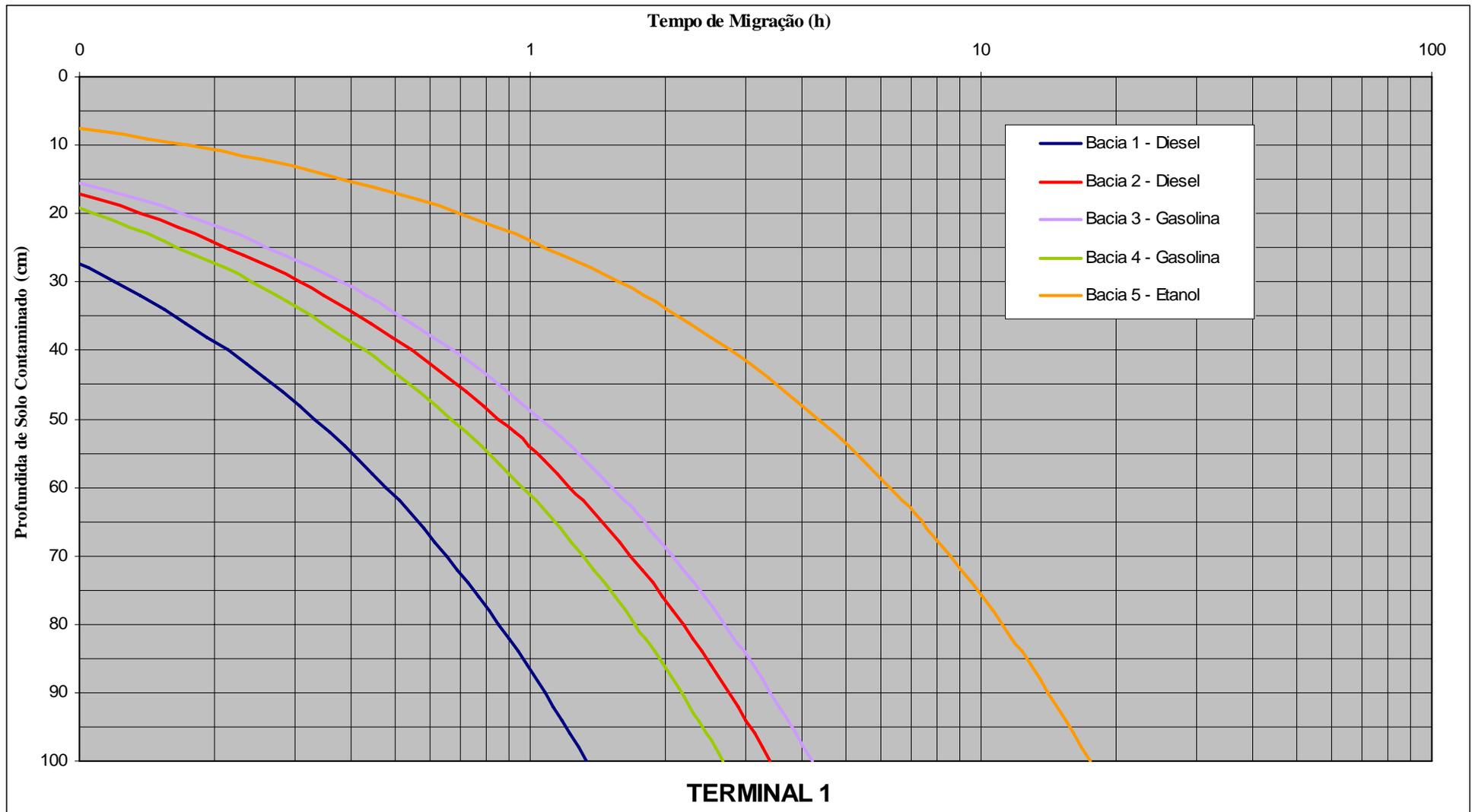


FIGURA 4.12 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 1.

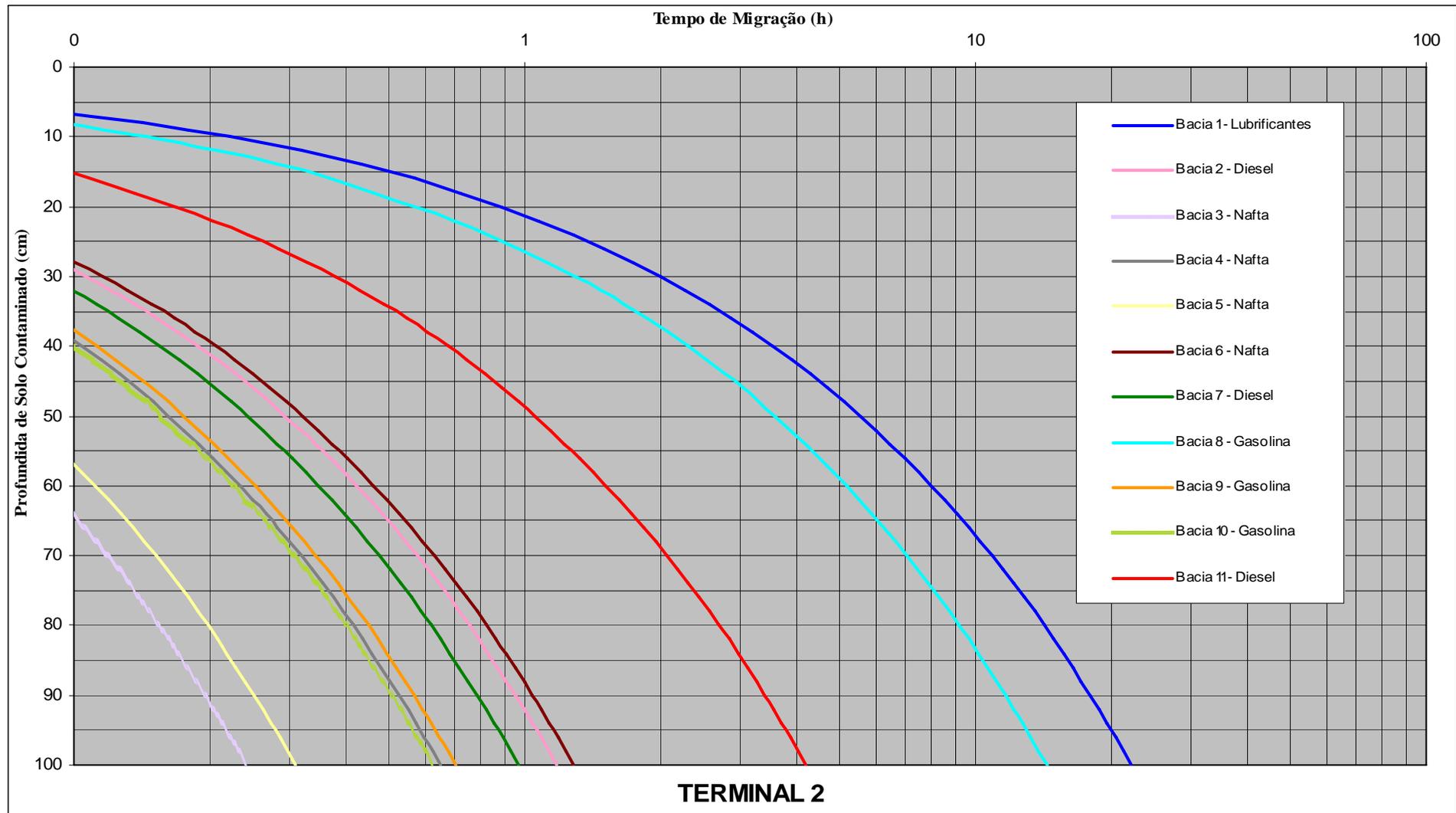


FIGURA 4.13 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 2.

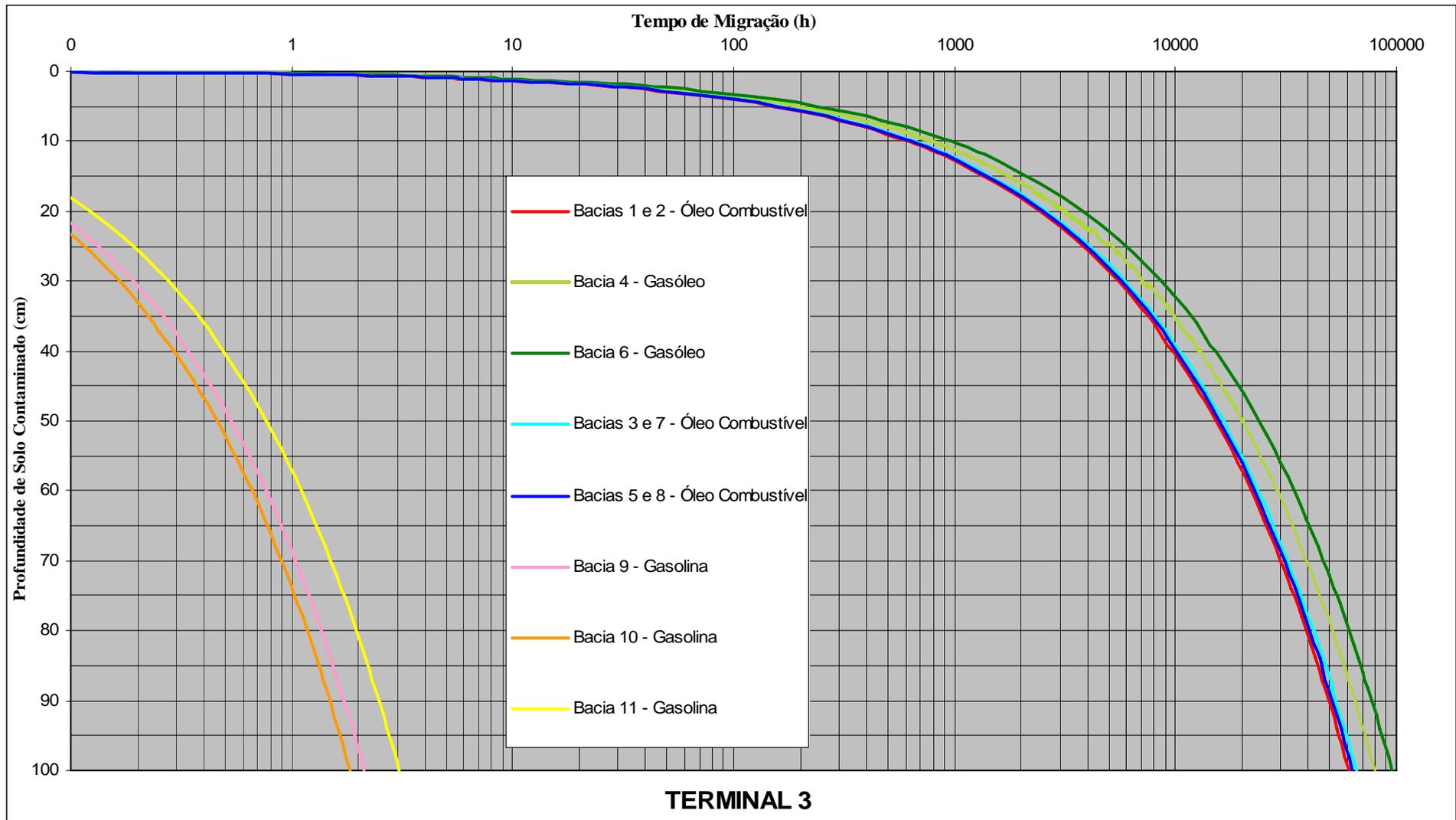


FIGURA 4.14 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 3.

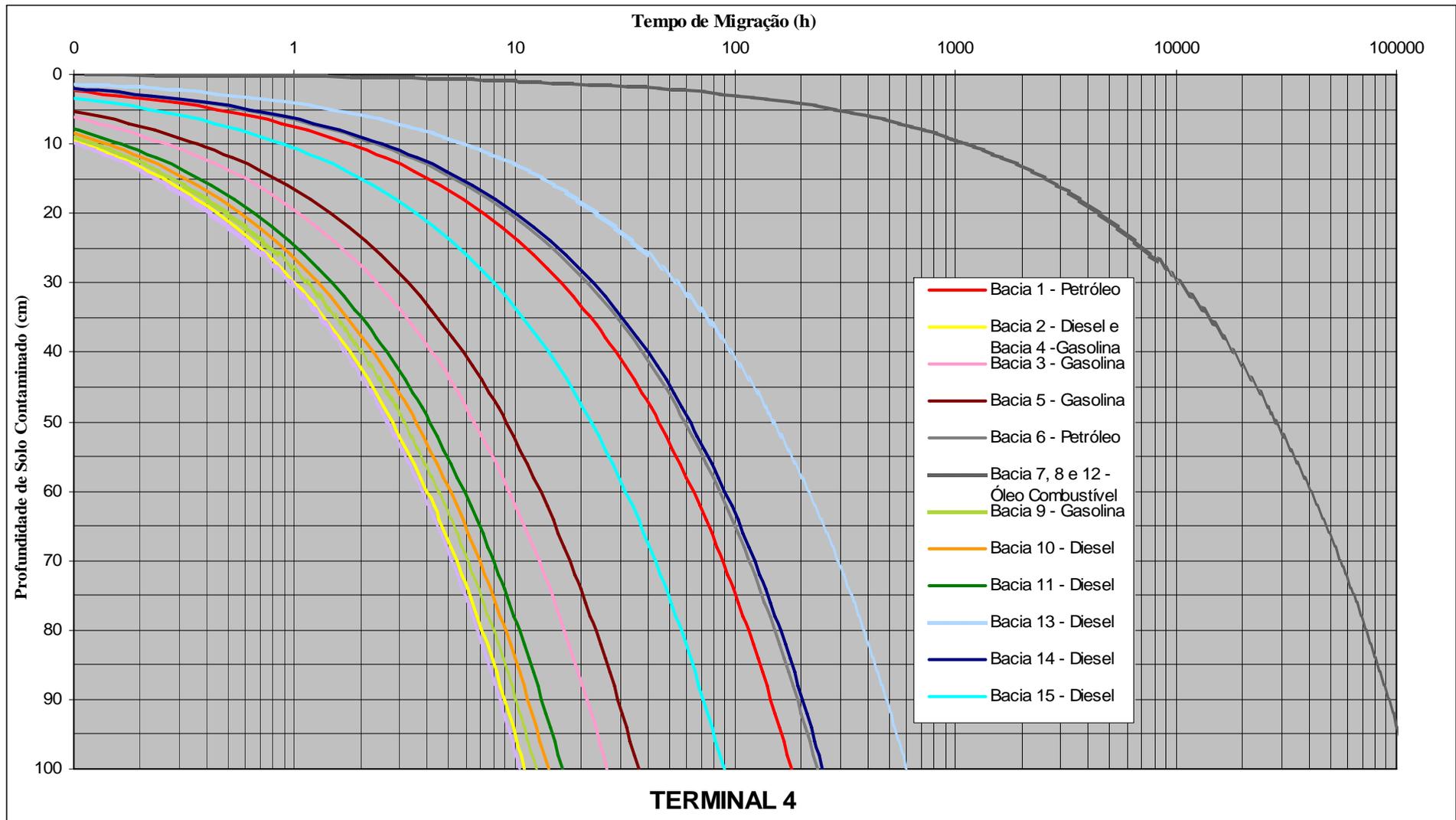


FIGURA 4.15 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 4.

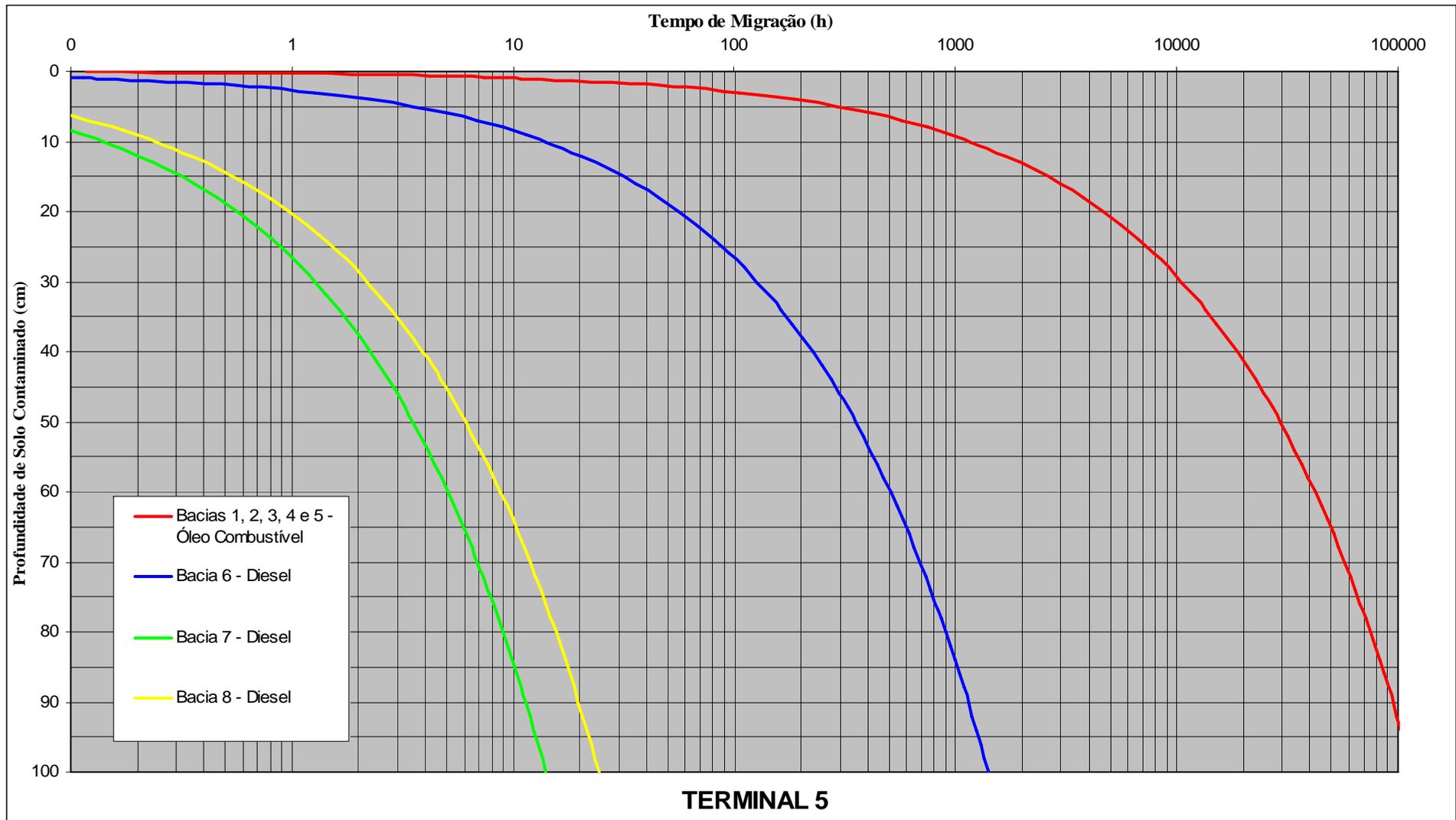


FIGURA 4.16 – Curva da profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração dos produtos nas bacias de contenção do Terminal 5

A migração vertical do produto em solos argilosos depende principalmente das propriedades físico-químicas do produto derramado (densidade, viscosidade e polaridade, representada pela constante dielétrica), propriedades do solo e características das bacias de contenção (Equação 4.6). Os resultados mostram que o tempo necessário para que os produtos derramados infiltrem um metro de profundidade nas bacias de contenção variam em até 4 ordens de grandeza entre os terminais. No Terminal 1 o tempo de migração variou de 1,3 horas para o produto diesel a 17,4 horas para o produto etanol. No Terminal 2 o tempo de migração variou de 0,2 horas para a nafta a 22,2 horas para o lubrificante. Os terminais 3, 4 e 5 apresentaram os resultados muito discrepantes quando comparados com os terminais 1 e 2 devido à grande diferença de mobilidade entre os produtos armazenados. No Terminal 3 o tempo de migração variou de 1,8 horas para o produto gasolina a 95.462 horas (10,9 anos) para o produto gasóleo. O tempo de migração no Terminal 4 variou de 10,5 horas para o diesel a 119.318 horas (13,6 anos) para o óleo combustível. No Terminal 5 a variação do tempo de migração foi de 14,1 horas para o diesel a 153.730 horas (17,5 anos) para o óleo combustível.

A velocidade de migração dos produtos sofre alteração em função do grau de saturação em água do solo, como visto no item 2.5. Quando o produto atinge o nível do lençol freático, encontrando o solo em condição de 100% de saturação em água, a migração vertical é cessada, representada na Equação 2.8 como $k_r = 0$. Os produtos imiscíveis de densidade relativa menor que a água (LNAPL) tenderão a flutuar no topo do lençol freático. As profundidades dos lençóis freáticos descritas de alguns terminais no item 3.1 correspondem aos dados obtidos a partir de um único dia de monitoramento do nível potenciométrico nos terminais. É conhecido que os lençóis freáticos sofrem flutuações ao longo do tempo causadas pelas variações meteorológicas locais. Para se avaliar a amplitude de variação do nível do lençol freático nos terminais, seria necessário o monitoramento periódico do nível d'água nos piezômetros locados nas áreas durante um período mínimo de um ano. Como esses monitoramentos não estão disponíveis nos relatórios de diagnóstico ambiental dos terminais, não foi considerada a influência do nível do lençol freático na migração vertical dos produtos no primeiro um metro de solo nas bacias de contenção.

A partir das curvas de migração, ilustradas da Figura 4.12 a 4.16, foi possível avaliar a eficiência de impermeabilização das bacias de contenção dos cinco terminais estudados. Cruzando os valores dos tempos de resposta dos planos de contingência de cada terminal com as curvas de migração, foram calculadas as espessuras dos solos

previstas que seriam contaminados em cada bacia de contenção, em caso de derramamento. Com esses cenários previstos, as bacias de contenção foram classificadas baseadas na Tabela 4.3.

Os tempos de resposta dos planos de contingência dos terminais estudados não foram informados pela equipe técnica dos terminais. O Departamento de Serviços Ambientais do estado de New Hampshire (EUA) estabelece que bacias de contenção para tanques de armazenamento aéreos devem ser construídas de forma que derramamentos não penetrem o solo mais do que 30 cm em 72 horas. Portanto, foi considerado o tempo de 72 horas (3 dias) como sendo o tempo de resposta médio dos planos de contingência para os terminais. Cruzando esse valor de tempo de resposta com as curvas das Figuras 4.12 a 4.16, verificou-se a espessura de solo que seria contaminado em casos de derramamentos nas bacias. Com isso, foi possível classificar as bacias de contenção de acordo com a proposta da Tabela 4.3, como indicado na Tabela 4.5. Nessa avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção não foi considerada a influência do nível do lençol freático na migração vertical dos produtos. Os valores de profundidade de solo contaminado estimados para o tempo de migração igual ao tempo de resposta 72 horas, também descrito na Tabela 4.5, foram calculados, através da Equação 4.6, considerando as propriedades dos solos constantes ao longo do perfil geológico.

TABELA 4.5 – Classificação das bacias de contenção em função da profundidade de solo contaminado, segundo a Tabela 4.4, e os respectivos produtos armazenados e permeabilidades máximas.

	Bacia de contenção	Produto Armazenado	K produto (cm/s) máximo por bacia	Profundidade (cm) de solo contaminado em 72 horas	Classificação das bacias			
					0	1	2	3
TERMINAL 1	1	Diesel	8,7E-04	735		X		
	2	Diesel	3,3E-04	459		X		
	3	Gasolina	3,4E-04	413		X		
	4	Gasolina	4,5E-04	519		X		
	5	Etanol	6,6E-05	203		X		
TERMINAL 2	1	Lubrificante	3,1E-05	180		X		
	2	Diesel	9,7E-04	781		X		
	3	Nafta	4,9E-03	1729		X		
	4	Nafta	1,8E-03	1052		X		
	5	Nafta	4,3E-03	1523		X		
	6	Nafta	9,9E-04	748		X		
	7	Diesel	1,1E-03	861		X		
	8	Gasolina	1,5E-03	224		X		
	9	Gasolina	7,0E-05	1013		X		
	10	Gasolina	1,9E-03	1073		X		
	11	Diesel	2,2E-04	413		X		
TERMINAL 3	1	Óleo Combustível	1,2E-08	3				X
	2	Óleo Combustível	1,2E-08	3				X
	3	Óleo Combustível	1,3E-08	3				X
	4	Gasóleo	1,0E-08	3				X
	5	Óleo Combustível	1,4E-08	4				X
	6	Gasóleo	1,0E-08	3				X
	7	Óleo Combustível	1,4E-08	3				X
	8	Óleo Combustível	1,3E-08	3				X
	9	Gasolina	5,4E-04	581		X		
	10	Gasolina	3,9E-04	626		X		
	11	Gasolina	2,7E-04	484		X		
TERMINAL 4	1	Petróleo	5,9E-06	63			X	
	2	Diesel	1,1E-04	254		X		
	3	Gasolina	5,4E-05	165		X		
	4	Gasolina	1,1E-04	252		X		
	5	Gasolina	3,1E-05	141		X		
	6	Petróleo	4,2E-06	55			X	
	7	Óleo Combustível	1,0E-08	3				X
	8	Óleo Combustível	1,0E-08	2				X
	9	Gasolina	9,4E-05	240		X		
	10	Diesel	8,1E-05	225		X		
	11	Diesel	6,7E-05	210		X		
	12	Óleo Combustível	1,0E-08	3				X
	13	Diesel	2,1E-06	35			X	
	14	Diesel	4,8E-06	54			X	
	15	Diesel	1,2E-05	90			X	
	16	Diesel	9,4E-05	261		X		
TERMINAL 5	1	Óleo Combustível	1,0E-08	2				X
	2	Óleo Combustível	1,0E-08	3				X
	3	Óleo Combustível	1,0E-08	3				X
	4	Óleo Combustível	1,0E-08	2				X
	5	Óleo Combustível	1,0E-08	2				X
	6	Diesel	1,1E-06	23				X
	7	Diesel	8,0E-05	226		X		
	8	Diesel	6,7E-05	172		X		

Com a classificação das bacias de contenção segundo proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização, foi possível verificar que solos com coeficientes de permeabilidade ao produto menor que 10^{-6} cm/s apresentariam espessuras de solos contaminados inferiores a 30 centímetros em 72 horas, em caso de derramamento. Nesse caso, as bacias foram classificadas como 3, ou seja, devidamente impermeabilizadas. Já as bacias de contenção com coeficientes de permeabilidade ao produto maior que 10^{-4} cm/s foram classificadas como 1, ou seja, baixa eficiência de impermeabilização, pois em caso de derramamento seriam contaminadas profundidades de solo maiores que dois metros em 72 horas. Com isso, verifica-se que a norma NBR 17505-2 não é conservadora ao admitir que bacias de contenção com canaletas de drenagem e coeficiente de permeabilidade igual a 10^{-4} cm/s estão em conformidade.

Todas as bacias de contenção que armazenam gás-óleo ou óleo combustível, ou seja, 16 de 51 (31%) apresentavam-se devidamente impermeabilizadas. Devido à elevada viscosidade, esses produtos apresentam baixíssima mobilidade nos solos. Para o tempo de resposta de 72 horas, a espessura máxima prevista de contaminação do solo seria de três centímetros. Assim, gás-óleo e óleo combustível podem ser caracterizados de baixo potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas em caso de armazenamento em bacias de contenção impermeabilizadas com solos argilosos compactados.

4.3.4. Recomendações complementares na avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção

- a) As bacias de contenção classificadas como 3 são consideradas devidamente impermeabilizadas para as condições avaliadas. Para as bacias de contenção classificadas como 2, a tomada de decisão para manter ou melhorar a eficiência de impermeabilização é de responsabilidade da gerência do terminal. As bacias de contenção classificadas como 0 ou 1 devem ser avaliadas segundo estudo de avaliação de risco.
- b) Recomenda-se revisar a eficiência de contenção volumétrica das bacias de contenção, verificando se são capazes de acumular todo o volume do maior tanque acrescido da precipitação pluviométrica recorrente.

- c) Caso ocorra a troca de produtos nos tanques, por exemplo, de um produto A para um produto B, recomenda-se que os resultados do estudo sejam reavaliados. Se os produtos armazenados forem substituídos por outros é possível corrigir a permeabilidade determinada para um produto A para um produto B, se ambos os produtos têm constante dielétrica semelhante. Em geral, a constante dielétrica dos combustíveis derivados do petróleo é muito semelhante (em torno de 2 e 4), ou seja, muito inferior à água cuja constante dielétrica igual a 80, por ser um líquido polar. A correção do coeficiente de permeabilidade pode ser efetuada utilizando-se a Equação de Nutting:

$$K = k \frac{\rho \cdot g}{\mu}, \text{ onde } K \text{ é o coeficiente de permeabilidade [L/T], } k \text{ é a}$$

permeabilidade intrínseca de um determinado solo [L²], ρ é a densidade do líquido [M/L³], μ é a viscosidade do líquido [M/L.T] e g é a aceleração da gravidade [L/T²]. Para isto, basta igualar-se a permeabilidade intrínseca do solo obtida com o produto A àquela obtida com o produto B, já que a permeabilidade intrínseca supõe-se independe do líquido, somente do tipo de

solo, resultando em: $K_B = K_A \left(\frac{\mu_A}{\mu_B} \right) \left(\frac{\rho_B}{\rho_A} \right)$. Portanto, não há necessidade de se

realizar ensaios de permeabilidade, para cada bacia de contenção, para todos os produtos que podem ser armazenados nos tanques;

- d) A coleta das amostras de solo para os ensaios de permeabilidade deve ser realizada no período de máxima estiagem por ser a condição mais crítica do local;
- e) Na escolha das medidas mitigadoras para melhoria da eficiência de retenção das bacias de contenção, recomenda-se que sejam realizados estudos de viabilidade técnica-econômica que consideram as limitações tecnológicas e os custos das alternativas disponíveis. Existem disponíveis medidas convencionais de impermeabilização, como geomembranas e concreto, ou métodos alternativos como impermeabilização biológica, aumento e conservação da umidade do solo, emprego de solos especiais, métodos físico-químicos de impermeabilização do solo, alteração do produto armazenado crítico na bacia por um produto de menor mobilidade, ou redução do tempo de resposta do plano de contingência através da melhoria dos equipamentos e recursos humanos. Independente do método escolhido, todos deverão

considerar as características específicas de cada bacia de contenção e o produto armazenado nos tanques.

- f) Recomenda-se a inspeção periódica das bacias de contenção com o objetivo de observar a presença de gretas de contração (trincas de ressecamento) no fundo da bacia e nos seus diques laterais de contenção. As gretas encontradas deverão ser devidamente preenchidas com material suficientemente impermeável.
- g) Recomenda-se que qualquer tomada de decisão sobre a impermeabilização das bacias a partir dos resultados deste estudo seja aprovada pelo órgão ambiental.
- h) Recomenda-se a realização do monitoramento periódico do nível d'água nos piezômetros locados na área durante um período mínimo de um ano, a fim de avaliar a amplitude de variação do nível do lençol freático e o do fluxo da água subterrânea nos terminais. O conhecimento da variação do nível do lençol freático da bacia de contenção permite avaliar sua influência em casos de derramamentos em que o lençol seja atingido, bem como os fenômenos de transporte advectivo e dispersivo do contaminante na água subterrânea. Deve ser observado que, em casos em que o nível do lençol freático estiver suficientemente elevado, o solo saturado com água impede a migração do produto derramado. Cabe ressaltar que nesses casos em que o produto atinge o lençol freático deve-se realizar estudos de avaliação de risco, para avaliação do real impacto desse cenário aos possíveis receptores.

5. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que os critérios estabelecidos pela Norma Brasileira ABNT NBR 17505-2/2006 relacionados à impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos não oferecem proteção efetiva aos solos e as águas subterrâneas. As conclusões deste estudo foram baseadas nas análises de 118 amostras de solos coletadas de 51 bacias de contenção em cinco terminais de armazenamento. As amostras de solo foram submetidas à análise da composição mineralógica através de ensaios de granulometria e raios-X, e determinação do coeficiente de permeabilidade referenciado à água e aos produtos armazenados nas bacias de contenção. As conclusões obtidas dos resultados deste trabalho de pesquisa são relatadas a seguir:

- O Brasil não possui legislação federal específica estabelecendo critérios de impermeabilização das bacias de contenção de áreas de armazenamento de combustíveis. A Bahia é um dos únicos estados brasileiros que possui uma legislação referente à eficiência de retenção das bacias de contenção.
- As análises granulométricas indicaram que entre os terminais as composições granulométricas apresentam-se bastante distintas, porém as bacias de um mesmo terminal apresentam composição semelhante. Os solos das bacias do Terminal 1 possuem uma fração predominante de argila + silte. Nos terminais 2, 3 e 5, a fração predominante é a areia, e no Terminal 4, o silte.
- A composição mineralógica dos solos das bacias de contenção dos terminais apresentou características semelhantes. Os argilominerais predominantes nas amostras são Ilita e Caulinita. A maior parte dos argilominerais constituintes dos solos é caracterizado como não expansivo, ou seja, por apresentarem menor capacidade de adsorver íons e água, pouco se expandem quando em contato com os mesmos. Alguns destes argilominerais encontrados nos difratogramas foram Ilita, Caulinita, Vermiculita, Gibbssita, Sepolita, Goetita, Clorita, Gipso, Plagioclásio, Anatásio, Quartzo e Feldspato Alcalino. O argilomineral Esmectita, de característica expansiva, foi detectado em metade das amostras de solo do Terminal 5 e somente em uma amostra de solo do Terminal 3. No

entanto, os difratogramas das amostras dos terminais 1, 2 e 3 apresentaram com frequência a presença do argilomineral Interestratificado Ilita-Esmectita (I/S). Este argilomineral apresenta certo grau de expansibilidade, em função da presença da esmectita no interestratificado.

- Nos ensaios de permeabilidade, os valores dos coeficientes de permeabilidade dos solos permeados pelos produtos armazenados nas bacias de contenção variaram entre $1,0 \times 10^{-8}$ a $4,9 \times 10^{-3}$ cm/s. Os valores dos coeficientes de permeabilidade dos solos permeados por água apresentaram variações de $1,0 \times 10^{-8}$ a $5,0 \times 10^{-4}$ cm/s. Essas amplas variações nos resultados dos ensaios de permeabilidade entre amostras de solos de diferentes bacias está relacionada com a diversidade mineralógica dos solos encontrados nas bacias de contenção (frações granulométricas e a presença dos argilominerais de características expansivas em algumas amostras), bem como às diferentes características físico-químicas dos líquidos percolados.
- Além dessas grandes variações entre os valores de coeficientes de permeabilidade entre amostras de solos de diferentes bacias de contenção, foi possível verificar discrepância entre os valores dos coeficientes de permeabilidade à água e ao produto de um mesmo solo. O aumento da mobilidade do líquido percolado influenciou diretamente no aumento da permeabilidade do meio, como descrito por Nutting (1930). A exemplo disso, tem-se que todos os valores do coeficiente de permeabilidade das amostras percoladas por óleo combustível ou gasóleo ficaram na ordem de 10^{-8} cm/s, independente dessas amostras apresentarem valores de permeabilidade à água entre as ordens de grandeza 10^{-7} a 10^{-3} cm/s. Essa ampla variação encontrada nos resultados de permeabilidade também pode estar relacionada ao efeito da polaridade do líquido percolado na expansividade de argilominerais existentes na composição dos solos, pois em 6 amostras contendo o argilomineral I/S o coeficiente de permeabilidade à água foi menor que ao diesel, mesmo a água tendo maior mobilidade que o diesel.
- Verificou-se que 30 das 44 (64%) bacias de contenção que apresentaram ensaios de permeabilidade à água atenderiam aos critérios de permeabilidade estabelecidos segundo os critérios da Norma 17505-2, considerando a presença de canaletas de drenagem nas mesmas. Caso a Norma 17505-2 considerasse os critérios de permeabilidade referenciados ao produto armazenado na bacia de

retenção, e não à água, 33 das 51 bacias (65%) atenderiam aos critérios de permeabilidade hipotéticos para bacias com canaletas de drenagem, ou seja, possuem coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-4} cm/s referenciado ao produto.

- Relacionando os resultados de avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de retenção segundo a NBR 17505-2 assumindo como critério o coeficiente de permeabilidade ora referenciado à água, ora ao produto, 45% das bacias de retenção possuem o coeficiente de permeabilidade referenciado à água e ao produto menor que 10^{-4} cm/s, concomitantemente. Desses 55% de bacias que não atendem aos dois critérios concomitantemente, 43% (19 de 44) possuem o coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-4} cm/s à água ou ao produto.
- Os resultados revelam ainda que 23 das 44 (52%) bacias de retenção que tiveram amostras de solo permeadas com água, o coeficiente de permeabilidade para os produtos armazenados foi maior que o coeficiente determinado para água. Com isso, em 23 bacias de retenção os produtos armazenados migrarão no solo mais rápido que a água em eventuais derramamentos. Isso pode estar relacionado, principalmente, com a presença dos argilominerais com características levemente expansivas detectados no ensaio de raios-X, pois esse fenômeno foi mais frequente nas amostras de solo dos terminais 1, 2 e 3.
- Em vista desses resultados, verifica-se que a norma NBR 17505-2 não é adequada por definir critérios de impermeabilização baseados no coeficiente de permeabilidade referenciado à água. Neste estudo foi proposto que o coeficiente de permeabilidade referenciado ao produto armazenado na bacia de retenção também não deve ser um critério único e suficiente para avaliar a impermeabilização das bacias de retenção.
- Para a avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de retenção foi proposto um modelo matemático simplificado para o cálculo da migração vertical, através da zona não saturada do solo, dos produtos armazenados nas bacias de retenção. O modelo considera as especificidades de cada local tais como propriedades do solo, produto armazenado, geometria dos diques, nível do lençol freático, corpos hídricos superficiais próximos e tempo de resposta do plano de contingência do terminal. Com isso, as simulações dos impactos dos produtos derramados nas bacias são mais próximas da realidade, permitindo a

avaliação mais segura da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção.

- Empregado o modelo de migração do produto no solo, dos produtos armazenados nas bacias de contenção, verificou-se que o tempo previsto para que os produtos derramados infiltrem um metro de profundidade nas bacias de contenção variam muito entre os terminais. A bacia 3 do Terminal 2 armazena nafta e apresenta o tempo mais crítico, igual a 0,2 horas para o nafta infiltrar um metro de profundidade no solo em caso de derramamento. Já a bacia 5 do Terminal 5 armazena óleo combustível e apresenta o maior tempo de migração igual a 17,5 anos para o óleo combustível infiltrar um metro de profundidade.
- Através da proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização foi possível avaliar que bacias de contenção com coeficientes de permeabilidade ao produto menor que 10^{-6} cm/s foram classificadas como 3, ou seja, devidamente impermeabilizadas. Já bacias de contenção com coeficientes de permeabilidade ao produto maior que 10^{-4} cm/s foram classificadas como 1, ou seja, baixa eficiência de impermeabilização. Nessas bacias de contenção, em caso de derramamento seriam contaminadas profundidades de solo maiores que dois metros em 72 horas. Com isso, verificou-se que a norma NBR 17505-2 não é conservadora ao admitir que bacias de contenção com canaletas de drenagem e coeficiente de permeabilidade igual a 10^{-4} cm/s estão em conformidade.
- Devido à elevada viscosidade dos produtos gasóleo ou óleo combustível, todas as bacias de contenção que os armazenam (31%) apresentaram-se devidamente impermeabilizadas. Com isso, esses produtos foram caracterizados de baixo potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas em caso de armazenamento em bacias de contenção impermeabilizadas com solos compactados.
- Como a nova proposta de avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção considera as especificidades do local, as tomadas de decisões nas avaliações das bacias não precisam ser engessadas em um único parâmetro, como exige a Norma vigente. Essas medidas podem tornar mais flexíveis as tomadas de decisões, possibilitando uma melhor locação de recursos financeiros nas áreas com real potencial de contaminação.

Com isso, pondera-se que o Decreto Estadual da Bahia nº 7.967/2001 é mais adequado do que a NBR 17505-2, exigindo que as bacias de contenção devam estar “devidamente impermeabilizadas”. Assim, este estudo evidencia 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, atual norma vigente no país, de forma que considere as especificidades de cada local. É importante ressaltar que as conclusões deste estudo vêm a fomentar os objetivos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina, por ampliar o conhecimento sobre problemas ambientais, bem como promover a produção e disseminação de conhecimentos em tecnologias e metodologias para o gerenciamento ambiental de áreas potenciais de contaminação, visando um desenvolvimento sustentável.

6. RECOMENDAÇÕES

- a) Devido à crescente demanda de armazenamento de biodiesel nos terminais do Brasil, recomenda-se realizar estudos de permeabilidade com diferentes tipos de biodiesel a fim de se avaliar a real interação deste produto nos solos argilosos;
- b) Recomenda-se considerar a influência da temperatura na avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção, tendo em vista a ampla variação climática entre as regiões do Brasil;
- c) Realizar estudo de estatística de ocorrência de derramamentos em áreas de armazenamento de líquidos inflamáveis a fim de incorporá-lo na avaliação da impermeabilização de bacias de contenção e na avaliação de risco;
- d) O modelo matemático simplificado proposto para o cálculo da migração vertical dos produtos na zona não saturada do solo pode apresentar erros inerentes à simulação, uma vez que foram adotadas condições simplificadoras para sua dedução como (i) dispersão transversal e longitudinal nos limites do volume de controle nula; e (ii) modelar a migração como um movimento vertical unidimensional aplicando a Lei de Darcy para sistemas multifásicos, considerando o coeficiente de permeabilidade máximo igual ao de saturação. Portanto, recomenda-se realizar estudos experimentais para verificar a validação desse modelo, bem como suas limitações e aplicações.
- e) Avaliar se o procedimento proposto de avaliação da eficiência de impermeabilização das bacias de contenção, baseada nos cenários previstos de contaminação, é suficiente para assegurar a proteção ambiental dos solos, e águas subterrâneas e superficiais. Uma das intenções dessa proposta é estimular e promover a discussão da necessidade de se estabelecer normas e legislações nacionais a fim de propor critérios de avaliação da eficiência de impermeabilização baseadas nas especificidades dos locais, como sugerido na proposta, e não somente em um critério como, por exemplo, o coeficiente de permeabilidade à água, exigido pela ABNT NBR 17505-2/2006.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis**. Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários. NBR 7505-1. Agosto de 2000.

_____. **Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis**. Parte 2: Armazenamento em tanques e em vasos. NBR 17505-2. Agosto de 2006.

_____. **Aterros de Resíduos Não-Perigosos**. Critérios para Projeto, Implantação e Operação NBR 13896. 1987.

_____. **Aterros de Resíduos Perigosos**. Critérios para Projeto, Implantação e Operação NBR 10157. 1987.

_____. **Solos - Análise Granulométrica**. NBR 7181. Dezembro de 1984.

AEUB - ALBERTA ENERGY AND UTILITIES BOARD. **Storage Requirements for the Upstream Petroleum Industry**. 2001. Disponível em: <<http://www.eub.gov.ab.ca/BBS/requirements/Guides/g55.htm>>. Acesso em: 17 agosto 2004.

ANDERSON, D. C.; BROWN, K. W.; GREEN J. W. Effect of organic fluids on the permeability of clay soil liners. In: Land disposal of hazardous waste. **Edited by D. W. Schultz Proceedings on the 9th Annual Research Symposium**, Ft. Mitchel, KY, EPA – 600/9-83-018. p. 114-125, 1982.

ANDERSON, D. C.; BROWN, K. W.; THOMAS, J. C. Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids. **Waste Management & Research**, v. 3, p. 339-349, 1985.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Dados referentes ao desempenho da indústria do petróleo, gás natural e biocombustíveis e do sistema de abastecimento nacionais no período 1996-2005. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2006**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2006.asp>. Acesso em: 06 março 2007.

API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Answers to Frequently Asked Questions About Managing Risk at LNAPL Sites**. API Soil and Groundwater Research Bulletin Number. 2003. Disponível em: <<http://www.api.org/ehs/groundwater/lnapl/index.cfm>>. Acesso em: 15 março 2007.

_____. **API Interactive LNAPL Guide: mobility, stability and recoverability**. Environmental Systems & Technology. Virginia, 2004. Disponível em: <<http://www.api.org/ehs/groundwater/lnapl/index.cfm>>. Acesso em: 15 março 2007.

_____. **Evaluating Hydrocarbon Removal From Source Zones: Tools To Assess Concentration Reduction**. HUNTLEY, D. Washington, 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ehs/groundwater/lnapl/index.cfm>>. Acesso em: 15 março 2007.

ARB - California Air Resources Board. **Solvents data bases: VM&P Naptha, Type II**. Disponível em: <http://www.arb.ca.gov/db/solvents/solvent_pages/Hydrocarbon-HTML/vmp-ii.htm>. Acesso em: 01 abril 2007.

ASTM – AMERICAM SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. E1739-95: **Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites**. Philadelphia, 1995.

BAHIA. **Decreto n. 7.967, de 05 de junho de 2001**. Institui a Política Estadual de Administração de Recursos Ambientais e dá outras providências. 2001. Disponível em: <http://www.mp.ba.gov.br/nucleo/legislacoes/ambiental/politica/DEC_EST_7967_01.pdf>. Acesso em: 15 março 2007.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. Dover Publications, Inc. N.Y., 1972. 764 p.

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

BROWN, K. W.; ANDERSON, D. C. Effects of organic solvents on the permeability of clay soils. **Environmental Protection Agency (U.S.A)**, EPA-600/S2-83-016, 1983.

BROWN, K. W.; THOMAS, J. C. Conductivity of three commercially available clays to petroleum products and organic solvents. **J. of Hazardous Wastes**, v.1, p. 545-553, 1984.

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

BUNCHAFT, G.; KELLNER, S. R. O. Estatística sem mistérios. Vol. 1. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Vozes, 1998.

CALIFORNIA CODES. **Health & Safety Codes: Underground Storage of Hazardous Substances**, 2003. Disponível em: <http://www.swrcb.ca.gov/cwphome/ust/regulatory/docs/hs_chp7_w_additions.pdf>. Acesso em: 05 março 2005.

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

CATALDO R.; MOYER, E. Remediation of Releases Containig MTBE at Gas Station Sites. **The AEHS Magazine, Soil, Sediment, & Water**, Spring 2001, Special Oxygenated Fuels, Issue 2001. Disponível em: <<http://www.aehsmag.com/issues/2001/spring/mtbegasstations.htm>>. Acesso em: 11 março 2007.

CEPA – Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (USP). **Energia - A Essência dos Fenômenos: reservas mundiais**. 1999. Disponível em: <

<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/reservasmundiais.html>. Acesso em: 10 janeiro 2007.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. Projeto de cooperação Técnica Brasil – Alemanha e GTZ – Geutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit. 2ª Ed. São Paulo, CETESB, 2001.

_____. **Relação de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo**. Novembro de 2006. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp>. Acesso em: 03 março 2007.

CHEREMISINOFF, P.N. **Storage Tanks: Advances in Environmental Control Technology Series**. 1. ed. Texas: Gulf Publishing Company, 1996. 303 p.

DEFRA – DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD E RURAL AFFAIRS. **Guidance note for the Control of Pollution (Oil Storage) (England) Regulations 2001**. October, 2001. Disponível em: <http://www.defra.gov.uk/environment/water/quality/oilstore/pdf/oil_store.pdf>. Acesso em: 10 abril 2007.

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica (UFMG). **Sistemas Térmicos I: Óleo Combustível**. 2004. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/oleocomb/oleos.htm>>. Acesso em: 10 janeiro 2007.

EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Europe's environment: the third assessment – Chapter 9 – Soil degradation**. Ukraine on 21-23 may 2003. Disponível em: <http://reports.eea.europa.eu/environmental_assessment_report_2003_10/en/kiiev_chapt_09.pdf>. Acesso em: 08 março 2007.

FERNANDEZ, F.; QUIGLEY, R. W. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 22, p. 205-214, 1985.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994. 691p.

FORMOSO, M. L. L. 1984. Difractometria de Raios X in Gomes, C.B. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1984.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1979.

FREIRE, M. B. S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ V., V. H.; FREIRE, F. J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG. v. 7, n. 1, p. 45-52, 2003.

GHILDYAL, B. P.; TRIPATHI, R. P. **Soil Physics**. New York: John Wiley, 1987. 656 p.

GILLIGAN, E. D.; CLEMENCE, S. P. Fabric and engineering behavior of organic-saturated clays. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, v. 21, p. 515-529, 1984.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. San Diego, USA: Academic Press., 1980. 413p.

INSTITUTO EKOS BRASIL. **III Seminário Internacional sobre Remediação In-Situ de Sites Contaminados**. 2004. Disponível em: <http://www.ekosbrasil.org/default.asp?site_Acao=mostraPagina&paginaId=154>. Acesso em: 12 março 2007.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico nº 65 187: Coleta de amostras indeformadas em poços e ensaios de permeabilidade em laboratório**. São Paulo, Abril de 2003.

ITOPF – INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED. **Contingency Planning**. London, 9 march 2007. Disponível em: <<http://www.itopf.com/contplan.html>>. Acesso em: 15 março 2007.

KING, T.D., HAFFNER, J., SANGLERAT, T.R., HADJ-HAMOU, T., WILLIAMSON, T.A. **Aboveground Storage Tank (AST) Secondary Containment Enhancement**, American Petroleum Institute 62nd Spring Refining Meeting, Environmental Symposium, San Diego, 7-9. April, 1997.

KAVIANY, M. **Principles of Heat Transfer in Porous Media**. 2 ed. New York: Springer-Verlag, 1995. 798 p.

KINSKY, J., FRYDMAN, S., AND ZASLAVSKY, D. **The effect of different dielectric liquids on the engineering properties of clay**. Proceedings, 4th Asian regional Conference on SMFE, v. 1, p. 369-372, 1971.

KRAUSKOPF, K. B. **Introdução à Geoquímica**. São Paulo: Editora Polígono, 1972.

LEIJ, F. J.; SCIORTINO, A; HAVERKAMP, R.; UGALDE, J. M.. S. Aggregation of Vertical Flow in the Vadose Zone with Auto- and Cross-Correlated Hydraulic Properties. **Journal of Hydrology**. Fevereiro 2007.

LIEB, John M. Recent Developments in API Storage Tank Standards to Improve Spill Prevention and Leak Detection/Prevention. **Tank Industry Consultants**. November, 2001.

LOHMAN, S.W. **Hidráulica Subterránea**. Barcelona: Editorial Eriel, S.A. Esplugues de Llobregat, 1977. 191 p.

MCCAULOU, D. R.; HULING, S. G. Compatibility of Bentonite and DNAPs. **Ground Water Monitoring Review**, v. 78, Sprig., p. 78-85, 1999.

McWHORTER, D. B.; SUNADA D. K. **Ground-Water Hydrology and Hydraulics**. Colorado: Water Resources Publications, 1997. 290 p.

MCNEAL, B. L.; COLEMAN, N. T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Proceedings**. Madison, v. 30, p. 308-312, 1966.

MELEGARI, S. P. **Eficiência das bacias de contenção em áreas de armazenamento de petróleo e derivados em caso de derramamentos superficiais.** 2005. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2005.

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

MINHAS, P. S.; SHARMA, D. R. Hydraulic conductivity and clay dispersion as affected by application sequence of saline and simulated rain water. **Irrigation Science**. Berlin, v. 63, p. 159-167, 1986.

MOORE, D. M.; REYNOLDS JR., R. C. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals.** 2 ed. New York: Oxford University Press, 1997. 396 p.

MPCA - MINNESOTA POLLUTION CONTROL AGENCY. **Secondary Containment For Aboveground Storage Tanks.** April 2004. Disponível em: <<http://www.pca.state.mn.us/publications/t-a4-01.pdf>> Acesso em: julho de 2006.

NAP – The National Academies Press. **Coal: Energy for the Future. 1995.** Disponível em: <http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=4918&page=53>. Acesso em: 13 março 2007.

NASCIMENTO, A. R. **Avaliação do desempenho do método de determinação de TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) em areia por detecção no infravermelho.** 2003. Tese Eletrônica. Biblioteca Digital Maxwell da PUC, Rio de Janeiro. 2003. Disponível em: <<http://oasisbr.ibict.br/index.php/record/view/59845>>. Acesso em: 12 janeiro de 2007.

NEWELL, C.J.; ACREE, S.D.; ROSS, R.R.; HULING, S.G. **Light Nonaqueous Phase Liquids.** U.S.EPA. Ground water Issue, EPA/540/S-95/500. 1995.

NFESC - NAVAL FACILITIES ENGINEERING SERVICE CENTER. **Spill Prevention Guidance Document - User Guide.** California. October, 1998. Disponível em: <<http://enviro.nfesc.navy.mil/ps/spillprev/>>. Acesso em: 20 setembro 2004.

NHCAR - NEW HAMPSHIRE CODE OF ADMINISTRATIVE RULES: DIVISION OF WASTE MANAGEMENT. **Petroleum Storage Facilities.** Chapter Env-Wm 1400, 2005. Disponível em: <<http://www.des.state.nh.us/rules/envwm1402.pdf>>. Acesso em: 03 março 2006.

NLM – United States National Library of Medicine. **HSDB - Hazardous Substances Data Bank: Naphtha.** Disponível em: <<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~hF6iu2:1>>. Acesso em: 13 fevereiro 2007.

NUTTING, P.G. Physical analysis of oil sands. **Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.** v. 14, p. 1337-1349, 1930.

OLIVEIRA, J. C. S. **Contaminação de sedimentos argilosos por combustíveis automotivos. Problema de avaliação da permeabilidade.** 2001. 102 f. Tese

(Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2001.

PALMA, E. S. **Elementos de Máquinas I – Mancais – Deslizamento**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PUC). Disponível em: <<http://mea.pucminas.br/palma/elemaqapostdesliz.pdf>>. Acesso em: 12 janeiro 2007.

PEDROZO, M. F. M.; BARBOZA, E. M.; CORSEUIL, H. X.; SCHNEIDER, M. R.; LINHARES, M. M. **Ecotoxicologia e Avaliação de Risco do Petróleo**. Salvador: Centro de Recursos Ambientais, 2002. 246p. Série Cadernos de Referência Ambiental, v. 12.

PHILIP, J. R. **The theory of infiltration** - 3: moisture profiles and relation to experiment. *Soil Science*. v. 84, p. 163–178, 1957.

POWERS, S. E.; LOUREIRO, C. O.; ABRIOLA, L. M.; WEBER, W. J. 1991. Theoretical Study of the Significance of Nonequilibrium Dissolution of Nonaqueous Phase Liquids in Subsurface Systems. **Water Resources Research**. v. 27, n. 4, p. 463-477, 1991.

Portugal Telecom. **Relatório de Sustentabilidade**. 2005. Disponível em: <<http://www.telecom.pt/NR/rdonlyres/2E9CF81B-0C66-4D0D-80A9-9F449EEEEAF2E/1367426/RS05ultimaversaoportug.pdf>>. Acesso em: 12 janeiro 2007.

REDOX TECH e FMC CORPORATION. **Oxidação Química In Situ com Persulfato Ativado Klozur™: Pluma Co-Misturada de Solventes Clorados e 1,4 Dioxano**. 2004. Disponível em: <http://envsolutions.fmc.com/Portals/fao/Content/Docs/39291A_Chlorinated%20Solvenst.pdf>. Acesso em: 12 março 2007.

ROSA, R. N. A Idade do Petróleo. **Resistir.info**, 13 agosto 2004. Disponível em: <http://resistir.info/rui/idade_petroleo.html>. Acesso em: 11 março 2007

RRP - Rudipel Rudnick Petróleo Ltda. **Ficha de Segurança sobre Produto Químico: óleo diesel marítimo**. Disponível em: <http://www.rudipel.com.br/fispq_03.htm>. Acesso em: 10 janeiro 2007.

SANTOS, P. S. **Tecnologia das Argilas**. São Paulo, SP Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 802 p.

SILVA, R. A. M. **Transporte Urbano de Passageiros e Qualidade do Ar: O Caso da Implementação de um Novo Sistema Hidroviário na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2001. 46 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2001.

TODD, D.K. **Groundwater Hydrogeology**. 2 ed. New York: Wiley, 1980.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **FY 2006 Semi-Annual End-of-Year Activity Report**. Memorandum, November 14, 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov/swrust1/cat/ca_06_34.pdf>. Acesso em: 08 março 2007.

_____. **Risk assessment guidance for superfund**. V. 1, Human Health Evaluation Manual, Part A, EPA/540/1-89/002, NTIS No, PB90-155581, 1989.

_____. **SPCC Guidance for Regional Inspectors**. Office of Emergency Management (EPA/550/B-05/001). Version 1.0, 28 November 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oilspill/guidance.htm>>. Acesso em: 15 março 2007.

_____. **Superfund**. Cleaning up the Nation's Hazardous Waste Sites. Disponível em: <<http://www.epa.gov/superfund/>>. Acesso em: 29 março 2007.

_____. 40 CFR Part 112. **Oil Pollution Prevention and Response**. Non-Transportation-Related Onshore and Offshore Facilities; Final Rule. July, 2002.

UPPOT, J. O.; STEPHENSON, R. W. Permeability of clays under organic permeants. **ASCE Journal of Geotechnical Engineering**. v. 115, n. 1, p. 115-131, 1989.

VARGAS, M. **Introdução a Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill Book Company, 1981.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Prentice Hall PTR, 1977. 245 p.

VOUDRIAS, E. A.; NZENGUNG, V.; LI, C. Removal of Light Nonaqueous Phase Liquids (LNAPLS) by Aquifer Flushing. **Waste Management**. v. 14, n. 2, p. 115-129, 1994.

WAC - WISCONSIN ADMINISTRATIVE CODE. **Flammable and Combustible Liquids Code**: Chaper Comm 10. July, 2002. Disponível em: <<http://www.legis.state.wi.us/rsb/code/comm/comm010.pdf>>. Acesso em: 13 abril 2006.

WSDE - WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY. **Guidance for Assessing Dangerous Waste Secondary Containment Systems**. 1995. Disponível em: <<http://www.ecy.wa.gov/pubs/95420.pdf>>. Acesso em: 13 junho 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas de resultados das análises granulométricas

APÊNDICE B – Tabelas de resultados das análises de raios-X

APÊNDICE C – Tabelas de resultados dos ensaios de permeabilidade

APÊNDICE D – Tabelas de resultados dos cálculos de porosidade

APÊNDICE A – Tabelas de resultados das análises granulométricas

TERMINAL 1											
Bacia	Amostra	VALOR POR AMOSTRA					MÉDIA POR BACIA				
		Argila + Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosso (%)	Argila + Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosso (%)
1	B21	21,7	70,7	7,6	0,0	0,0	38,0	44,5	6,4	2,9	8,3
	BD22	38,0	56,4	5,6	0,0	0,0					
	B20	54,2	6,4	5,9	8,6	24,9					
2	BD18	38,6	52,2	9,2	0,0	0,0	33,8	56,8	8,5	0,9	0,0
	B19	13,4	74,2	8,6	3,7	0,0					
	B16	45,2	48,1	6,7	0,0	0,0					
	BD17	37,9	52,9	9,3	0,0	0,0					
3	B9	53,5	12,4	18,5	9,7	5,9	59,8	17,7	10,6	5,6	6,2
	BD15	66,2	23,0	2,7	1,5	6,6					
4	B10	81,8	11,0	4,8	2,4	0,0	62,2	24,2	7,8	4,7	1,1
	B11	54,8	27,2	9,2	8,7	0,0					
	B12	43,4	35,4	15,7	4,2	1,4					
	BD13	66,1	25,4	5,4	3,1	0,0					
	BD14	64,9	21,9	4,1	4,8	4,3					
5	B1	55,1	34,2	9,3	1,5	0,0	54,5	30,8	10,8	2,7	1,2
	BD7	50,7	42,5	5,0	1,8	0,0					
	B2	64,7	19,3	11,9	4,0	0,0					
	BD6	60,0	35,1	4,9	0,0	0,0					
	BD8	51,1	31,5	13,9	3,6	0,0					
	B3	43,5	33,2	9,4	3,8	10,1					
	BD6	60,0	35,1	4,9	0,0	0,0					
	BD8	51,1	31,5	13,9	3,6	0,0					
	B4	48,7	28,3	15,6	5,9	1,5					
BD5	60,1	17,4	19,4	2,5	0,6						

TERMINAL 2											
Bacia	Amostra	VALOR POR AMOSTRA					MÉDIA POR BACIA				
		Argila + Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosso (%)	Argila + Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosso (%)
1	M13	2,9	60,5	29,6	3,6	3,4	28,4	41,7	24,3	4,6	1,0
	M14	44,9	31,1	19,1	4,9	0,0					
	M15	21,7	42,8	30,9	4,6	0,0					
	MD20	36,9	40,6	19,0	3,4	0,0					
	MD21	35,8	33,4	22,8	6,6	1,5					
2	M16	46,5	29,7	19,1	3,8	0,9	45,8	32,2	14,7	5,0	2,3
	M17	16,2	37,8	37,6	6,6	1,8					
	M18	72,0	26,8	1,2	0,0	0,0					
	MD19	51,6	33,3	9,8	5,3	0,0					
	MD22	42,8	33,4	5,7	9,1	9,0					
3	M1	36,4	42,4	16,2	3,1	1,9	40,2	42,4	12,7	3,3	1,5
	M2	43,9	42,4	9,2	3,5	1,0					
4	M3	39,2	28,1	9,8	4,3	18,7	46,2	30,8	13,8	4,1	5,1
	M4	45,1	18,1	30,8	6,1	0,0					
	MD5	56,7	33,8	6,4	3,1	0,0					
	MD6	43,8	43,4	8,0	3,0	1,8					
5	M7	31,9	52,8	13,1	2,2	0,0	39,3	43,5	11,9	4,8	0,6
	M8	40,1	44,5	9,9	3,8	1,7					
	MD12	45,9	33,0	12,7	8,4	0,0					
6	M9	12,0	60,1	25,1	1,7	1,1	34,5	44,3	16,9	2,8	1,5
	M10	36,4	39,2	17,2	3,7	3,5					
	M11	55,0	33,7	8,5	2,9	0,0					
7	M32	42,2	38,1	14,2	2,5	3,0	43,5	37,5	12,1	3,9	2,9
	MD33	56,4	36,5	5,1	2,0	0,0					
	M34	32,7	33,6	18,3	7,3	8,1					
	MD35	52,2	32,1	11,8	3,8	0,0					
	M36	34,0	47,3	11,3	3,8	3,6					
8	M23	80,3	9,1	5,4	5,1	0,0	59,8	19,6	11,6	5,6	3,4
	M24	44,3	19,2	14,5	12,8	9,2					
	M25	58,1	16,2	14,5	4,3	6,9					
	MD29	64,6	18,7	5,2	8,2	3,3					
	MD30	52,5	22,1	23,5	1,9	0,0					
	MD31	59,1	31,9	6,8	1,3	0,9					
9	M37	27,5	29,7	36,2	6,6	0,0	27,5	29,7	36,2	6,6	0,0
10	M26	67,2	11,0	16,1	5,6	0,0	38,2	19,7	29,8	11,3	1,1
	M27	24,3	32,2	37,2	3,1	3,2					
	M28	23,0	15,8	36,1	25,1	0,0					
11	M38	47,9	23,7	23,8	4,5	0,0	44,9	34,8	15,7	4,5	0,0
	M39	40,8	38,0	16,3	5,0	0,0					
	MD40	46,0	42,8	7,1	4,0	0,0					

TERMINAL 3											
Bacia	Amostra	VALOR POR AMOSTRA					MÉDIA POR BACIA				
		Argila + Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grossoiro (%)	Argila + Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grossoiro (%)
1	S33	6,4	84,6	8,3	0,6	0,0	17,7	63,8	14,9	2,7	0,9
	S34	4,4	76,8	13,9	4,9	0,0					
	S35	13,7	44,3	34,1	4,4	3,5					
	SD45	46,2	49,6	3,4	0,8	0,0					
2	S36	11,2	51,6	30,7	4,7	1,8	24,5	53,1	18,5	2,7	1,2
	S37	31,5	68,5	0,0	0,0	0,0					
	S38	14,8	40,2	40,1	4,0	0,9					
	SD46	40,5	52,0	3,4	2,0	2,1					
3	S42	27,7	59,3	8,0	1,5	3,5	28,1	57,4	11,0	2,4	1,1
	S43	17,7	66,7	12,7	2,0	0,9					
	S44	26,1	49,7	19,1	5,1	0,0					
	SD48	40,8	53,9	4,3	0,9	0,0					
4	S39	14,2	57,5	26,5	1,8	0,0	23,3	56,2	17,2	2,5	0,8
	S40	26,3	45,1	24,0	3,6	1,0					
	S41	8,9	75,6	13,9	1,6	0,0					
	SD47	43,7	46,5	4,5	3,2	2,1					
5	SD23	47,9	50,0	2,0	0,0	0,0	27,7	37,4	30,2	3,6	1,1
	S24	9,1	47,4	40,9	1,7	1,0					
	S25	18,5	27,0	46,7	6,6	1,3					
	S26	14,9	18,9	55,3	8,3	2,5					
	SD27	48,0	43,6	6,3	1,1	1,0					
6	S20	17,7	78,0	4,3	0,0	0,0	15,0	72,4	11,5	1,1	0,0
	S21	13,5	63,7	19,4	3,4	0,0					
	S22	13,8	75,4	10,8	0,0	0,0					
7	SD17	27,4	50,8	18,4	3,4	0,0	24,8	35,4	29,3	7,8	2,6
	S18	25,0	25,3	29,4	14,9	5,4					
	S19	22,2	30,2	40,1	5,0	2,5					
8	SD28	52,5	42,4	3,6	1,4	0,0	28,5	42,0	25,5	3,0	0,9
	SD29	38,4	48,0	13,6	0,0	0,0					
	S30	8,7	63,3	25,0	3,0	0,0					
	S31	24,7	26,7	43,0	4,7	0,9					
	S32	18,2	29,5	42,5	6,1	3,7					
9	S13	39,6	60,4	0,0	0,0	0,0	33,8	47,0	14,8	2,6	1,7
	S14	20,6	21,9	40,8	9,7	7,0					
	SD15	29,7	70,3	0,0	0,0	0,0					
	SD16	45,2	35,5	18,5	0,8	0,0					
10	S1	37,1	29,4	33,5	0,0	0,0	34,4	30,8	32,8	1,6	0,4
	S2	37,6	27,3	35,1	0,0	0,0					
	S3	30,0	26,2	39,7	4,1	0,0					
	SD7	33,5	31,0	33,0	2,0	0,5					
	SD8	33,9	40,1	22,8	1,9	1,3					
11	S4	55,7	44,3	0,0	0,0	0,0	38,3	34,6	25,1	1,3	0,7
	S5	33,6	36,4	30,0	0,0	0,0					
	S6	32,1	30,7	37,3	0,0	0,0					
	SD9	39,9	21,9	30,9	3,8	3,5					
	SD10	45,2	54,8	0,0	0,0	0,0					
	SD11	32,2	23,9	39,3	3,5	1,1					
	SD12	29,6	30,3	38,1	1,6	0,4					

TERMINAL 4													
Bacia	Amostra	VALOR POR AMOSTRA						MÉDIA POR BACIA					
		Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosseiro (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosseiro (%)
1	C1	1,6	39,4	20,8	25,6	10,8	1,8	5,4	39,5	22,0	22,9	9,6	0,6
	C2	11,4	48,3	22,9	12,5	5,0	0,0						
	C3	3,3	30,8	22,3	30,7	12,9	0,0						
2	C4	9,9	64,2	13,9	6,8	5,3	0,0	7,6	63,2	21,0	5,5	2,8	0,0
	C5	5,7	57,2	30,4	5,4	1,3	0,0						
	C6	7,2	68,2	18,6	4,2	1,9	0,0						
3	C7	11,7	65,1	12,3	5,7	5,2	0,0	11,0	67,8	12,8	5,1	3,3	0,0
	C8	8,3	59,6	19,7	8,5	4,0	0,0						
	C9	12,9	78,7	6,4	1,2	0,8	0,0						
4	C10	10,8	67,9	13,3	4,6	3,4	0,0	7,9	57,5	16,1	9,7	4,8	4,1
	C11	3,9	46,4	17,6	14,1	5,9	12,2						
	C12	9,1	58,1	17,3	10,5	5,1	0,0						
5	C13	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	9,1	62,5	15,3	6,6	5,5	0,9
	C14	7,7	56,9	20,5	8,0	6,8	0,0						
	C15	10,4	68,2	10,0	5,2	4,3	1,9						
6	C16	4,2	24,3	20,1	36,8	14,3	0,0	2,2	30,4	23,4	30,8	13,3	0,0
	C17	1,6	37,2	24,7	24,6	11,6	0,0						
	C18	0,7	29,6	25,4	31,1	14,1	0,0						
7	C19	10,4	49,6	15,7	12,0	6,0	6,3	8,0	49,6	21,8	11,8	4,7	4,1
	C20	8,2	54,3	17,7	8,9	4,8	6,0						
	C21	5,5	44,9	32,1	14,3	3,2	0,0						
8	C22	4,4	43,6	34,5	11,9	5,5	0,0	3,6	37,9	25,8	21,0	8,4	3,3
	C23	0,0	20,0	24,2	38,9	12,6	4,4						
	C24	6,4	50,2	18,7	12,1	7,1	5,6						
9	C25	6,6	72,3	11,4	5,3	4,4	0,0	5,5	58,3	25,3	8,0	2,9	0,0
	C26	6,1	56,9	29,1	6,9	1,0	0,0						
	C27	3,8	45,8	35,4	11,8	3,2	0,0						
10	C28	4,3	67,1	12,7	7,0	8,9	0,0	5,3	55,2	14,9	12,2	10,6	1,9
	C29	6,9	59,8	16,5	8,9	7,9	0,0						
	C30	4,7	38,6	15,5	20,6	14,9	5,7						
11	C31	8,3	77,6	10,5	2,8	0,9	0,0	8,1	72,5	9,7	5,2	4,6	0,0
	C32	9,4	69,0	8,4	6,8	6,5	0,0						
	C33	6,5	70,9	10,2	5,9	6,5	0,0						
12	C34	12,4	41,5	19,4	16,5	10,2	0,0	10,0	46,5	19,4	14,0	9,2	0,9
	C35	9,2	50,2	19,4	9,8	8,8	2,6						
	C36	8,3	47,8	19,5	15,8	8,7	0,0						
13	C37	8,8	65,5	9,6	4,0	5,1	7,0	6,6	57,5	17,4	12,9	3,3	2,3
	C38	3,4	66,2	19,0	7,0	4,5	0,0						
	C39	7,5	40,7	23,8	27,6	0,3	0,0						
14	C40	15,5	53,4	17,7	8,6	4,9	0,0	9,7	66,3	17,3	3,8	2,9	0,0
	C41	10,2	77,5	9,2	2,3	0,8	0,0						
	C42	3,5	68,0	25,0	0,7	2,9	0,0						
15	C43	17,3	58,3	12,7	7,9	3,7	0,0	11,5	59,9	14,6	7,3	4,5	2,2
	C44	7,3	61,4	14,4	6,0	4,2	6,7						
	C45	9,8	60,1	16,6	8,0	5,4	0,0						
16	C46	8,9	71,6	12,8	3,8	2,9	0,0	7,6	64,4	12,8	7,2	5,6	2,5
	C47	5,5	58,6	12,0	8,7	7,7	7,4						
	C48	8,3	62,9	13,6	9,2	6,1	0,0						

TERMINAL 5							
Bacia	Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Material Grosseiro (%)
1	P1	5,6	39,4	14,3	10,4	8,3	22,0
2	P2	3,1	13,1	71,4	7,3	1,2	3,9
3	P3	3,7	61,2	13,1	6,8	7,4	7,8
4	P4	3,7	31,7	10,3	22,2	15,5	16,6
5	P5	12,5	34,5	18,2	18,1	13,9	2,8
6	P6	6,1	48,2	21,9	7,4	6,8	9,6
7	P7	3,4	41,1	13,9	10,1	7,7	24,0
8	P8	11,0	18,2	24,1	31,1	13,2	2,5

NOTA: n.a - não analisado.

APÊNDICE B – Tabelas de resultados das análises de raios-X

TERMINAL 1							
Bacia	Amostra	Argilominerais					
		Caulinita	Ilita	Vermiculita	Interestratificado ilita/esmectita	Quartzo	Feldspato Alcalino
1	B21	X	X		X	X	
	BD22	X	X		X	X	
	B20	X	X		X	X	
2	BD18	X	X		X	X	
	B19	X	X		X	X	
	B16	X	X		X	X	
	BD17	X	X		X	X	
3	B9	X	X		X	X	X
	BD15	X	X		X		
4	B10	X	X		X	X	
	B11	X	X		X		
	B12	X	X		X		
	BD13	X	X		X	X	
	BD14	X	X		X		
5	B1	X	X	X	X	X	
	BD7	X	X		X		
	B2	X	X		X		
	BD6	X	X		X		
	BD8	X	X		X	X	
	B3	X	X		X	X	
	BD6	X	X		X	X	
	BD8	X	X		X	X	
	B4	X	X		X	X	
	BD5	X	X		X	X	

TERMINAL 2								
Bacia	Amostra	Argilominerais						
		Caulinita	Ilita	Vermiculita	Interestratificado ilita/esmectita	Quartzo	Gipso	Plagioclásio
1	M13	X	X					
	M14	X	X	X	X	X		
	M15	X	X	X	X	X		
	MD20	X	X	X	X	X		
	MD21	X	X	X	X	X		
2	M16	X	X	X	X	X		
	M17	X	X	X	X			
	M18	X	X	X	X	X		
	MD19	X	X	X	X	X		
	MD22	X	X	X	X	X		
3	M1	X	X	X	X	X		
	M2	X	X	X	X	X		
4	M3	X	X	X	X	X		
	M4	X	X	X	X	X		
	MD5	X	X	X	X	X		
	MD6	X	X	X	X	X		
5	M7	X	X	X	X	X		
	M8	X	X	X	X	X		
	MD12	X	X	X	X	X		
6	M9	X	X				X	X
	M10	X	X	X	X	X		
	M11	X	X	X	X	X		
7	M32	X	X	X	X	X		
	MD33	X	X	X	X	X		
	M34	X	X	X	X	X		
	MD35	X	X	X	X	X		
	M36	X	X	X	X	X		
8	M23	X	X	X	X	X		
	M24	X	X	X	X	X		
	M25	X	X	X	X	X		
	MD29	X	X	X	X	X		
	MD30	X	X	X	X	X		
	MD31	X	X	X	X	X		
9	M37	X	X	X	X	X		
10	M26	X	X	X	X	X		
	M27	X	X	X	X	X		
	M28	X	X	X	X	X		
11	M38	X	X	X	X	X		
	M39	X	X		X	X		
	MD40	X	X	X	X	X		

TERMINAL 3									
Bacia	Amostra	Argilominerais							
		Caulinita	Ilita	Vermiculita	Interestratificado ilita/esmectita	Esmectita	Quartzo	Gibbsita	Anatásio
1	S33	X	X						
	S34	X	X						
	S35	X	X				X		
	SD45	X	X	X			X		
2	S36	X	X						
	S37	X	X						
	S38	X	X						
	SD46	X	X	X			X		
3	S42	X	X	X			X		
	S43	X	X	X			X		
	S44	X	X	X			X		
	SD48	X	X	X	X		X		
4	S39	X	X				X		
	S40	X	X	X			X		
	S41	X	X				X		
	SD47	X	X	X			X		
5	SD23	X	X	X			X	X	
	S24	X	X						
	S25	X	X						
	S26	X	X						
	SD27	X	X	X			X		
6	S20	X	X	X			X		
	S21	X	X		X				
	S22	X	X	X			X		
7	SD17	X	X		X		X		
	S18	X	X						
	S19	X	X						
8	SD28	X	X	X			X		X
	SD29	X	X		X		X		
	S30	X	X						
	S31	X	X						
	S32	X	X						
9	S13	X	X	X			X		
	S14	X	X		X				
	SD15	X	X				X		X
	SD16	X	X			X	X		
10	S1	X	X						
	S2	X	X						
	S3	X	X						
	SD7	X	X						
	SD8	X	X				X		
11	S4	X	X				X		
	S5	X	X						
	S6	X	X						
	SD9	X	X				X		
	SD10	X	X						
	SD11	X	X						
	SD12	X	X						

TERMINAL 4								
Bacia	Amostra	Argilominerais						
		Caulinita	Ilita	Vermiculita	Gibbsita	Quartzo	Goetita	Clorita
1	C1	X	X	X	X			X
	C2	X	X		X		X	
	C3	X	X	X	X			
2	C4	X	X		X			
	C5	X	X	X	X			X
	C6	X	X	X	X			X
3	C7	X	X		X			
	C8	X	X	X	X			X
	C9	X	X	X	X			X
4	C10	X	X		X		X	X
	C11	X	X	X	X			
	C12	X	X	X	X		X	X
5	C13	X	X	X	X			X
	C14	X	X		X			X
	C15	X	X	X	X			X
6	C16	X	X		X			
	C17	X	X	X	X			X
	C18	X	X	X	X			X
7	C19	X	X	X	X			X
	C20	X	X	X	X			X
	C21	X	X	X	X			X
8	C22	X	X	X	X			X
	C23	X	X	X	X			X
	C24	X	X	X	X		X	
9	C25	X	X	X	X			X
	C26	X	X	X	X			X
	C27	X	X	X	X		X	
10	C28	X	X	X	X		X	X
	C29	X	X	X	X			X
	C30	X	X	X	X			X
11	C31	X	X	X	X			X
	C32	X	X		X		X	X
	C33	X	X	X	X			X
12	C34	X	X				X	
	C35	X			X		X	
	C36	X	X	X	X			X
13	C37	X	X		X		X	
	C38	X	X	X	X			
	C39	X	X		X			X
14	C40	X	X		X			X
	C41	X	X	X	X			X
	C42	X	X		X	X	X	
15	C43	X	X					X
	C44	X	X					X
	C45	X	X					X
16	C46	X	X	X	X			
	C47	X	X	X	X			X
	C48	X	X		X			

TERMINAL 5							
Bacia	Amostra	Argilominerais					
		Caulinita	Ilita	Vermiculita	Gibbsita	Esmectita	Goetita
1	P1	X	X		X	X	
2	P2	X	X		X	X	
3	P3	X	X				
4	P4	X	X				X
5	P5	X	X		X		X
6	P6	X	X		X	X	X
7	P7	X	X		X	X	
8	P8	X	X	X	X		X

NOTA: X – a análise de difratometria de raios-X indicou a presença do argilomineral na amostra.

APÊNDICE C – Tabelas de resultados dos ensaios de permeabilidade

TERMINAL 1						
Bacia	Produto crítico armazenado na bacia	Amostra	k produto (cm/s) por amostra	k produto (cm/s) máximo por bacia	k água (cm/s) por amostra	k água (cm/s) máximo por bacia
1	Diesel	B21	8,7E-04	8,7E-04	2,4E-06	2,4E-06
		BD22	6,6E-05		n.a	
		B20	5,0E-05		n.a	
2	Diesel	BD18	6,3E-05	3,3E-04	n.a	4,8E-06
		B19	3,3E-04		4,8E-06	
		B16	1,3E-04		1,2E-06	
		BD17	3,3E-05		n.a	
3	Gasolina	B9	3,5E-05	3,4E-04	3,4E-06	3,4E-06
		BD15	3,4E-04		n.a	
4	Gasolina	B10	3,6E-06	4,5E-04	n.a	1,6E-06
		B11	4,9E-05		n.a	
		B12	1,1E-04		n.a	
		BD13	1,9E-04		n.a	
		BD14	4,5E-04		1,6E-06	
5	Etanol	B1	1,8E-05	6,6E-05	n.a	6,7E-06
		BD7	3,9E-05		n.a	
		B2	3,0E-05		n.a	
		BD6	4,0E-05		n.a	
		BD8	3,1E-07		n.a	
		B3	5,9E-05		6,7E-06	
		BD6	4,0E-05		5,8E-06	
		BD8	3,1E-07		n.a	
		B4	3,7E-05		n.a	
BD5	6,6E-05	4,4E-06				

TERMINAL 2						
Bacia	Produto crítico armazenado na bacia	Amostra	k produto (cm/s) por amostra	k produto (cm/s) máximo por bacia	k água (cm/s) por amostra	k água (cm/s) máximo por bacia
1	Lubrificante PNL 30	M13	2,2E-05	3,1E-05	n.a	1,6E-04
		M14	3,1E-05		n.a	
		M15	2,6E-05		n.a	
		MD20	n.a		1,6E-04	
		MD21	8,8E-06		n.a	
2	Diesel	M16	1,9E-04	9,7E-04	n.a	1,4E-04
		M17	4,3E-05		1,4E-04	
		M18	6,5E-04		n.a	
		MD19	3,6E-04		1,3E-04	
		MD22	9,7E-04		n.a	
3	Nafta Petroquímica	M1	n.a	4,9E-03	n.a	-
		M2	4,9E-03		n.a	
4	Nafta Petroquímica	M3	n.a	1,8E-03	1,0E-08	1,1E-04
		M4	6,0E-04		n.a	
		MD5	1,8E-03		1,1E-04	
		MD6	n.a		4,3E-05	
5	Nafta Petroquímica	M7	1,6E-03	4,3E-03	3,1E-04	3,1E-04
		M8	1,2E-03		9,3E-06	
		MD12	4,3E-03		n.a	
6	Nafta Petroquímica	M9	9,9E-04	9,9E-04	3,6E-05	2,2E-04
		M10	n.a		2,2E-04	
		M11	4,6E-04		n.a	
7	Diesel	M32	5,9E-04	1,1E-03	n.a	5,0E-04
		MD33	1,1E-03		4,3E-04	
		M34	7,8E-04		n.a	
		MD35	1,2E-04		n.a	
		M36	8,0E-04		5,0E-04	
8	Gasolina	M23	n.a	1,5E-03	1,0E-08	4,9E-07
		M24	2,5E-04		n.a	
		M25	1,5E-03		4,9E-07	
		MD29	n.a		n.a	
		MD30	1,4E-04		n.a	
		MD31	2,8E-04		n.a	
9	Gasolina	M37	7,0E-05	7,0E-05	3,5E-04	3,5E-04
10	Gasolina	M26	9,0E-05	1,9E-03	n.a	6,1E-05
		M27	n.a		6,1E-05	
		M28	1,9E-03		n.a	
11	Diesel	M38	n.a	2,2E-04	n.a	-
		M39	2,2E-04		n.a	
		MD40	1,2E-04		n.a	

TERMINAL 3						
Bacia	Produto crítico armazenado por bacia	Amostra	k produto (cm/s) por amostra	k produto (cm/s) máximo por bacia	k água (cm/s) por amostra	k água (cm/s) máximo por bacia
1	Óleo Combustível	S33	1,1E-08	1,2E-08	9,5E-04	9,5E-04
		S34	1,2E-08		6,7E-04	
		S35	1,2E-08		n.a	
		SD45	1,0E-08		n.a	
2	Óleo Combustível	S36	1,2E-08	1,2E-08	n.a	-
		S37	1,1E-08		n.a	
		S38	1,2E-08		n.a	
		SD46	1,2E-08		n.a	
3	Óleo Combustível	S42	1,1E-08	1,3E-08	n.a	-
		S43	1,3E-08		n.a	
		S44	1,2E-08		n.a	
		SD48	1,3E-08		n.a	
4	Gasóleo	S39	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	< 1,0E-08	n.a	-
		S40	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
		S41	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
		SD47	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
5	Óleo Combustível	SD23	1,4E-08	1,4E-08	n.a	6,4E-05
		S24	1,2E-08		n.a	
		S25	1,3E-08		5,7E-05	
		S26	1,3E-08		n.a	
		SD27	1,1E-08		6,4E-05	
6	Gasóleo	S20	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	< 1,0E-08	n.a	1,4E-03
		S21	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		1,4E-03	
		S22	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
7	Óleo Combustível	SD17	1,4E-08	1,4E-08	6,7E-05	6,7E-05
		S18	1,3E-08		n.a	
		S19	1,3E-08		n.a	
8	Óleo Combustível	SD28	1,0E-08	1,3E-08	n.a	9,8E-05
		SD29	1,2E-08		n.a	
		S30	1,3E-08		n.a	
		S31	1,1E-08		n.a	
		S32	1,3E-08		9,8E-05	
9	Gasolina	S13	2,4E-05	5,4E-04	n.a	-
		S14	2,4E-05		n.a	
		SD15	5,4E-04		n.a	
		SD16	2,1E-05		n.a	
10	Gasolina	S1	9,4E-06	3,9E-04	8,3E-07	8,3E-07
		S2	1,2E-05		n.a	
		S3	1,9E-05		n.a	
		SD7	3,9E-04		n.a	
		SD8	1,9E-04		n.a	
11	Gasolina	S4	2,5E-05	2,7E-04	9,4E-06	7,0E-05
		S5	1,0E-05		n.a	
		S6	2,9E-06		n.a	
		SD9	8,0E-05		n.a	
		SD10	2,6E-04		n.a	
		SD11	2,7E-04		n.a	
		SD12	n.a		7,0E-05	

TERMINAL 4						
Bacia	Produto crítico armazenado por bacia	Amostra	k produto (cm/s) por amostra	k produto (cm/s) máximo por bacia	k água (cm/s) por amostra ⁽²⁾	k água (cm/s) máximo por bacia
1	Petróleo	C1	3,5E-06	5,9E-06	3,0E-05	3,4E-05
		C2	1,4E-06		4,0E-05	
		C3	5,9E-06		n.a	
2	Diesel	C4	7,8E-06	1,1E-04	4,0E-05	2,7E-05
		C5	1,1E-04		2,0E-05	
		C6	8,8E-05		n.a	
3	Gasolina	C7	1,2E-06	5,4E-05	2,0E-05	2,0E-05
		C8	4,3E-05		2,0E-05	
		C9	5,4E-05		n.a	
4	Gasolina	C10	4,8E-06	1,1E-04	3,0E-06	1,9E-07
		C11	1,1E-04		1,0E-07	
		C12	8,4E-06		n.a	
5	Gasolina	C13	8,6E-06	3,1E-05	2,0E-05	1,3E-05
		C14	4,4E-06		1,0E-05	
		C15	3,1E-05		n.a	
6	Petróleo	C16	3,8E-06	4,2E-06	1,0E-05	3,3E-06
		C17	4,2E-06		2,0E-06	
		C18	2,8E-06		n.a	
7	Óleo Combustível	C19	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	< 1,0E-08	2,0E-05	3,6E-05
		C20	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		2,0E-04	
		C21	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
8	Óleo Combustível	C22	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	< 1,0E-08	1,0E-04	1,0E-04
		C23	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		1,0E-04	
		C24	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
9	Gasolina	C25	1,3E-05	9,4E-05	2,0E-05	2,0E-05
		C26	3,8E-06		2,0E-05	
		C27	9,4E-05		n.a	
10	Diesel	C28	4,7E-05	8,1E-05	4,0E-06	2,0E-07
		C29	5,4E-07		1,0E-07	
		C30	8,1E-05		n.a	
11	Diesel	C31	2,5E-06	6,7E-05	3,0E-06	1,4E-07
		C32	6,7E-05		7,0E-08	
		C33	n.a		n.a	
12	Óleo Combustível	C34	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	< 1,0E-08	1,0E-06	1,9E-06
		C35	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		2,0E-05	
		C36	< 1,0E-08 ⁽¹⁾		n.a	
13	Diesel	C37	2,1E-06	2,1E-06	n.a	-
		C38	n.a		n.a	
		C39	n.a		n.a	
14	Diesel	C40	3,5E-06	4,8E-06	1,0E-05	1,0E-05
		C41	4,8E-06		1,0E-05	
		C42	2,0E-06		n.a	
15	Diesel	C43	1,1E-05	1,2E-05	2,0E-05	2,0E-05
		C44	1,2E-05		2,0E-05	
		C45	5,5E-06		n.a	
16	Diesel	C46	5,9E-06	9,4E-05	5,0E-05	2,9E-05
		C47	3,8E-05		2,0E-05	
		C48	9,4E-05		n.a	

TERMINAL 5					
Bacia	Produto crítico armazenado na bacia	Amostra	k produto (cm/s) por amostra	k água (cm/s) por amostra ⁽²⁾	k água (cm/s) máximo por bacia
1	Óleo combustível	P1	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	2,0E-04	2,0E-04
				3,0E-05	
2	Óleo combustível	P2	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	3,0E-05	3,0E-04
				3,0E-04	
3	Óleo combustível	P3	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	4,0E-07	5,0E-06
				5,0E-06	
4	Óleo combustível	P4	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	5,0E-06	5,0E-06
				5,0E-06	
5	Óleo combustível	P5	< 1,0E-08 ⁽¹⁾	1,0E-05	1,0E-05
				2,0E-06	
6	Diesel	P6	1,1E-06	4,0E-04	4,0E-04
				3,0E-05	
7	Diesel	P7	8,0E-05	3,0E-07	1,0E-05
				1,0E-05	
8	Diesel	P8	6,7E-05	1,0E-04	2,0E-03
				2,0E-03	

NOTAS: n.a - não analisado; (1) valor de K adotado, pois após 4 dias de ensaio no permeâmetro de carga variável, o nível do produto não variou; (2) valores de K obtidos pelo IPT (2003)

APÊNDICE D – Tabelas de resultados dos cálculos de porosidade

TERMINAL 1										
Bacia	Amostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Vol. (cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_g (g/cm ³)	Umidade (%) ⁽¹⁾	n (%)	n mínima (%)
1	B21	7,4	10,5	773	451,4	1,71	2,67	0,00	35,9	29,0
	BD22	7,4	10,5	821	451,4	1,82	2,67	0,00	31,9	
	B20	7,4	13,8	1124	593,2	1,89	2,67	0,00	29,0	
2	BD18	7,4	15,5	1195	666,3	1,79	2,67	0,00	32,8	28,1
	B19	7,4	14,6	1205	627,6	1,92	2,67	0,00	28,1	
	B16	7,4	10,5	836	451,4	1,85	2,67	0,00	30,6	
	BD17	7,4	14,0	1123	601,8	1,87	2,67	0,00	30,1	
3	B9	7,4	14,3	1098	614,7	1,79	2,67	0,00	33,1	32,8
	BD15	7,4	11,1	856	477,2	1,79	2,67	0,00	32,8	
4	B10	7,4	13,6	1099	584,6	1,88	2,67	0,00	29,6	27,7
	B11	7,4	14,4	1121	619,0	1,81	2,67	0,00	32,2	
	B12	7,4	14,6	1136	627,6	1,81	2,67	0,00	32,2	
	BD13	7,4	14,5	1204	623,3	1,93	2,67	0,00	27,7	
	BD14	7,4	12,5	1031	537,3	1,92	2,67	0,00	28,1	
5	B1	7,4	13,3	1040	571,7	1,82	2,67	0,00	31,9	28,3
	BD7	7,4	13,4	1035	576,0	1,80	2,67	0,00	32,7	
	B2	7,4	12,4	1021	533,0	1,92	2,67	0,00	28,3	
	BD6	7,4	14,1	1106	606,1	1,82	2,67	0,00	31,7	
	BD8	7,4	12,2	986	524,4	1,88	2,67	0,00	29,6	
	B3	7,4	14,2	1125	610,4	1,84	2,67	0,00	31,0	
	BD6	7,4	14,1	1127	606,1	1,86	2,67	0,00	30,4	
	BD8	7,4	12,2	986	524,4	1,88	2,67	0,00	29,6	
	B4	7,4	14,5	1098	623,3	1,76	2,67	0,00	34,0	
BD5	7,4	14,3	1124	614,7	1,83	2,67	0,00	31,5		

TERMINAL 2										
Bacia	Amostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Vol. (cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_g (g/cm ³)	Umidade (%) ⁽¹⁾	n (%)	n mínima (%)
1	M13	7,4	15,5	1233	666,3	1,85	2,67	0,00	30,7	18,6
	M14	7,4	16,0	1495	687,8	2,17	2,67	0,00	18,6	
	M15	7,4	15,5	1200	666,3	1,80	2,67	0,00	32,5	
	MD20	7,4	16,0	1266	687,8	1,84	2,67	0,00	31,1	
	MD21	7,4	16,5	1267	709,3	1,79	2,67	0,00	33,1	
2	M16	7,4	15,5	1267	666,3	1,90	2,67	0,00	28,8	28,8
	M17	7,4	16,0	1300	687,8	1,89	2,67	0,00	29,2	
	M18	7,4	16,5	1285	709,3	1,81	2,67	0,00	32,1	
	MD19	7,4	19,0	1422	816,7	1,74	2,67	0,00	34,8	
	MD22	7,4	15,5	1138	666,3	1,71	2,67	0,00	36,0	
3	M1	7,4	14,5	1223	623,3	1,96	2,67	0,00	26,5	23,6
	M2	7,4	14,5	1271	623,3	2,04	2,67	0,00	23,6	
4	M3	7,4	15,0	1287	644,8	2,00	2,67	0,00	25,2	23,9
	M4	7,4	17,0	1436	730,8	1,97	2,67	0,00	26,4	
	MD5	7,4	16,0	1253	687,8	1,82	2,67	0,00	31,8	
	MD6	7,4	16,0	1398	687,8	2,03	2,67	0,00	23,9	
5	M7	7,4	18,0	1478	773,8	1,91	2,67	0,00	28,5	26,6
	M8	7,4	17,0	1432	730,8	1,96	2,67	0,00	26,6	
	MD12	7,4	16,0	1273	687,8	1,85	2,67	0,00	30,7	
6	M9	7,4	15,0	1278	644,8	1,98	2,67	0,00	25,8	25,8
	M10	7,4	16,0	1329	687,8	1,93	2,67	0,00	27,6	
	M11	7,4	13,5	1076	580,3	1,85	2,67	0,00	30,6	
7	M32	7,4	16,0	1362	687,8	1,98	2,67	0,00	25,8	25,8
	MD33	7,4	16,0	1295	687,8	1,88	2,67	0,00	29,5	
	M34	7,4	13,0	1020	558,8	1,83	2,67	0,00	31,6	
	MD35	7,4	17,5	1338	752,3	1,78	2,67	0,00	33,4	
	M36	7,4	16,0	1276	687,8	1,86	2,67	0,00	30,5	
8	M23	7,4	15,0	1236	644,8	1,92	2,67	0,00	28,2	24,6
	M24	7,4	16,0	1385	687,8	2,01	2,67	0,00	24,6	
	M25	7,4	17,0	1413	730,8	1,93	2,67	0,00	27,6	
	MD29	7,4	16,0	1218	687,8	1,77	2,67	0,00	33,7	
	MD30	7,4	16,0	1278	687,8	1,86	2,67	0,00	30,4	
	MD31	7,4	16,0	1250	687,8	1,82	2,67	0,00	31,9	
9	M37	7,4	17,0	1502	730,8	2,06	2,67	0,00	23,0	23,0
10	M26	7,4	16,0	1277	687,8	1,86	2,67	0,00	30,5	26,8
	M27	7,4	16,0	1345	687,8	1,96	2,67	0,00	26,8	
	M28	7,4	16,0	1314	687,8	1,91	2,67	0,00	28,4	
11	M38	7,4	15,0	1319	644,8	2,05	2,67	0,00	23,4	23,4
	M39	7,4	16,0	1346	687,8	1,96	2,67	0,00	26,7	
	MD40	7,4	17,0	1345	730,8	1,84	2,67	0,00	31,1	

TERMINAL 3										
Bacia	Amostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Vol. (cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_g (g/cm ³)	Umidade (%) ⁽¹⁾	n (%)	n mínima (%)
1	S33	7,4	14,2	1142	610,4	1,9	2,67	0,00	29,9	19,6
	S34	7,4	14,5	1142	623,3	1,8	2,67	0,00	31,4	
	S35	7,4	13,2	1105	567,4	1,9	2,67	0,00	27,1	
	SD45	7,4	14,2	1310	610,4	2,1	2,67	0,00	19,6	
2	S36	7,4	12,5	1124	537,3	2,1	2,67	0,00	21,7	20,0
	S37	7,4	13,8	1204	593,2	2,0	2,67	0,00	24,0	
	S38	7,4	12,6	1095	541,6	2,0	2,67	0,00	24,3	
	SD46	7,4	14,6	1341	627,6	2,1	2,67	0,00	20,0	
3	S42	7,4	14,2	1274	610,4	2,1	2,67	0,00	21,8	21,4
	S43	7,4	13,5	1189	580,3	2,0	2,67	0,00	23,3	
	S44	7,4	14,2	1198	610,4	2,0	2,67	0,00	26,5	
	SD48	7,4	13,8	1245	593,2	2,1	2,67	0,00	21,4	
4	S39	7,4	13,4	1125	576,0	2,0	2,67	0,00	26,9	20,4
	S40	7,4	14,2	1241	610,4	2,0	2,67	0,00	23,9	
	S41	7,4	14,5	1125	623,3	1,8	2,67	0,00	32,4	
	SD47	7,4	14,5	1325	623,3	2,1	2,67	0,00	20,4	
5	SD23	7,4	14,7	1209	631,9	1,9	2,67	0,00	28,3	20,7
	S24	7,4	14,4	1107	619,0	1,8	2,67	0,00	33,0	
	S25	7,4	12,4	1128	533,0	2,1	2,67	0,00	20,7	
	S26	7,4	11,9	1035	511,5	2,0	2,67	0,00	24,2	
	SD27	7,4	11,5	1025	494,3	2,1	2,67	0,00	22,3	
6	S20	7,4	12,8	1098	550,2	2,0	2,67	0,00	25,3	24,4
	S21	7,4	13,0	1128	558,8	2,0	2,67	0,00	24,4	
	S22	7,4	14,5	1241	623,3	2,0	2,67	0,00	25,4	
7	SD17	7,4	12,5	1035	537,3	1,9	2,67	0,00	27,9	23,5
	S18	7,4	14,4	1265	619,0	2,0	2,67	0,00	23,5	
	S19	7,4	13,5	1124	580,3	1,9	2,67	0,00	27,5	
8	SD28	7,4	11,9	1028	511,5	2,0	2,67	0,00	24,7	21,1
	SD29	7,4	12,6	1141	541,6	2,1	2,67	0,00	21,1	
	S30	7,4	14,2	1145	610,4	1,9	2,67	0,00	29,7	
	S31	7,4	13,5	1095	580,3	1,9	2,67	0,00	29,3	
	S32	7,4	13,8	1123	593,2	1,9	2,67	0,00	29,1	
9	S13	7,4	9,8	760	421,3	1,8	2,67	0,00	32,4	26,7
	S14	7,4	12,4	1043	533,0	2,0	2,67	0,00	26,7	
	SD15	7,4	12,2	966	524,4	1,8	2,67	0,00	31,0	
	SD16	7,4	13,5	1121	580,3	1,9	2,67	0,00	27,7	
10	S1	7,4	17,0	1631	730,8	2,2	2,67	0,00	16,4	16,4
	S2	7,4	8,0	744	343,9	2,2	2,67	0,00	19,0	
	S3	7,4	8,0	736	343,9	2,1	2,67	0,00	19,8	
	SD7	7,4	12,0	1021	515,8	2,0	2,67	0,00	25,9	
	SD8	7,4	12,5	1001	537,3	1,9	2,67	0,00	30,2	
11	S4	7,4	7,0	600	300,9	2,0	2,67	0,00	25,3	19,4
	S5	7,4	8,6	796	369,7	2,2	2,67	0,00	19,4	
	S6	7,4	9,4	812	404,1	2,0	2,67	0,00	24,7	
	SD9	7,4	13,4	1211	576,0	2,1	2,67	0,00	21,3	
	SD10	7,4	12,0	1022	515,8	2,0	2,67	0,00	25,8	
	SD11	7,4	12,5	1003	537,3	1,9	2,67	0,00	30,1	
	SD12	7,4	11,5	953	494,3	1,9	2,67	0,00	27,8	

TERMINAL 4										
Bacia	Amostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Vol. (cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_g (g/cm ³)	Umidade (%)	n (%)	n mínima (%)
1	C1	7,4	16,0	1334	687,8	1,940	2,67	0,93	28,0	26,2
	C2	7,4	16,5	1415	709,3	1,99	2,67	1,23	26,2	
	C3	7,4	18,0	1425	773,8	1,84	2,67	0,76	31,5	
2	C4	7,4	17,0	1365	730,8	1,87	2,67	1,93	31,4	31,4
	C5	7,4	17,0	1336	730,8	1,83	2,67	1,20	32,3	
	C6	7,4	19,0	1515	816,7	1,85	2,67	1,29	31,4	
3	C7	7,4	16,0	1262	687,8	1,83	2,67	2,38	32,9	32,9
	C8	7,4	17,0	1296	730,8	1,77	2,67	1,35	34,5	
	C9	7,4	17,0	1267	730,8	1,73	2,67	6,49	39,0	
4	C10	7,4	16,5	1325	709,3	1,87	2,67	1,79	31,3	29,7
	C11	7,4	17,0	1376	730,8	1,88	2,67	0,91	30,1	
	C12	7,4	17,0	1392	730,8	1,90	2,67	1,48	29,7	
5	C13	7,4	17,0	1448	730,8	1,98	2,67	0,00 ⁽¹⁾	25,8	25,8
	C14	7,4	17,0	1407	730,8	1,93	2,67	1,36	28,9	
	C15	7,4	18,0	1457	773,8	1,88	2,67	1,56	30,6	
6	C16	7,4	15,5	1113	666,3	1,67	2,67	0,95	38,0	24,7
	C17	7,4	17,0	1478	730,8	2,02	2,67	0,57	24,7	
	C18	7,4	16,5	1224	709,3	1,73	2,67	0,54	35,7	
7	C19	7,4	17,0	1383	730,8	1,89	2,67	1,02	29,8	29,8
	C20	7,4	17,0	1381	730,8	1,89	2,67	1,06	30,0	
	C21	7,4	16,5	1345	709,3	1,90	2,67	1,25	29,9	
8	C22	7,4	17,0	1305	730,8	1,79	2,67	1,29	34,0	31,3
	C23	7,4	17,0	1350	730,8	1,85	2,67	0,67	31,3	
	C24	7,4	17,0	1311	730,8	1,79	2,67	1,42	33,8	
9	C25	7,4	17,0	1282	730,8	1,75	2,67	2,01	35,6	27,0
	C26	7,4	17,0	1446	730,8	1,98	2,67	1,51	27,0	
	C27	7,4	17,0	1393	730,8	1,91	2,67	1,20	29,5	
10	C28	7,4	17,0	1395	730,8	1,91	2,67	1,72	29,7	28,8
	C29	7,4	16,0	1254	687,8	1,82	2,67	1,63	32,8	
	C30	7,4	17,0	1403	730,8	1,92	2,67	0,94	28,8	
11	C31	7,4	17,0	1420	730,8	1,94	2,67	1,37	28,2	27,6
	C32	7,4	16,5	1311	709,3	1,85	2,67	1,43	31,7	
	C33	7,4	17,0	1442	730,8	1,97	2,67	2,13	27,6	
12	C34	7,4	17,0	1435	730,8	1,96	2,67	1,95	27,9	27,5
	C35	7,4	17,0	1432	730,8	1,96	2,67	1,17	27,5	
	C36	7,4	17,0	1346	730,8	1,84	2,67	1,69	32,2	
13	C37	7,4	17,0	1365	730,8	1,87	2,67	1,43	31,0	31,0
	C38	7,4	17,0	1325	730,8	1,81	2,67	1,15	32,9	
	C39	7,4	16,5	1327	709,3	1,87	2,67	1,68	31,1	
14	C40	7,4	17,0	1371	730,8	1,88	2,67	1,83	31,0	29,9
	C41	7,4	17,5	1339	752,3	1,78	2,67	1,99	34,6	
	C42	7,4	16,5	1342	709,3	1,89	2,67	1,15	29,9	
15	C43	7,4	16,5	1373	709,3	1,94	2,67	1,83	28,8	27,4
	C44	7,4	17,0	1429	730,8	1,96	2,67	1,14	25,9	
	C45	7,4	17,0	1445	730,8	1,98	2,67	1,94	24,5	
16	C46	7,4	17,0	1386	730,8	1,90	2,67	1,56	27,9	22,8
	C47	7,4	17,0	1316	730,8	1,80	2,67	1,72	31,4	
	C48	7,4	17,0	1486	730,8	2,03	2,67	1,39	22,8	

TERMINAL 5						
Bacia	Amostra	Diâmetro (cm)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_g (g/cm ³)	Umidade (%)	<i>n</i> (%)
1	P1	7,4	1,89	2,67	2,04	30,6
2	P2	7,4	1,91	2,67	0,88	29,0
3	P3	7,4	1,95	2,67	0,70	27,5
4	P4	7,4	1,81	2,67	1,08	33,0
5	P5	7,4	1,71	2,67	7,28	40,3
6	P6	7,4	1,62	2,67	1,29	40,0
7	P7	7,4	1,94	2,67	1,36	28,4
8	P8	7,4	1,62	2,67	3,23	41,0

NOTA: (1) não foram realizados ensaios de umidade higroscópica nas amostras de solo. Tendo em vista as condições secas de campo no momento das coletas, adotou-se a umidade igual a zero para o cálculo da porosidade total.