

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS CONTAMINADOS ENCAPSULADOS

Rodrigo Caberlon Cruz

*Dissertação apresentada ao corpo docente do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA**.*

Porto Alegre, 18 de Março de 2004.

*Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA** e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFRGS.*

*Prof. Nilo César Consoli, Ph.D.
Orientador*

*Profª Karla Salvagni Heineck, D.Sc.
Orientadora*

*Prof. Américo Campos Filho, D.Sc.
Coordenador PPGEC*

BANCA EXAMINADORA

*Profª Maria Cláudia Barbosa
D.Sc. COPPE / UFRJ – Rio de Janeiro*

*Prof. Antônio Thomé
D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

*Prof. Juan Antonio Altamirano Flores
D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul
D.Sc. Université de Poitiers, França*

*Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica
Ph.D. University of Surrey – UK*

*Dedico este trabalho
aos meus pais,
Luiz e Dina.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por sempre estar presente em minha vida, e a minha família pelo apoio incondicional.

Em especial aos professores Nilo César Consoli e Karla Salvagni Heineck pela orientação, dedicação e entusiasmo demonstrados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS e todos os funcionários que contribuíram de alguma forma para o êxito deste trabalho. Ao CNPq e a CAPES pela concessão de bolsa e apoio financeiro.

Aos bolsistas de iniciação científica César Alberto Ruver, Roberto Marteleite Blum, Lucas Festugato, Juliana Farias Horlle e Daiani P. Trisch.

Ao professor Juan Antonio Altamirano Flores pelo auxílio na análise, na caracterização morfológica dos materiais e pela atenção dispensada a este trabalho. Ao Laboratório de Petrologia Metamórfica coordenado pelo professor Marcus Vinícius Dorneles Remus onde foram realizadas as fotomicrografias.

À Refinaria Alberto Pasqualini REFAP S.A., pelo fornecimento do óleo combustível para esta pesquisa.

Ao funcionário João Nelson Diniz pela amizade, apoio e dedicação em todas as horas, e Jair Floriano da Silva pelo apoio. Aos amigos, em especial Alexandre Knop, Prof^ª Anna Laura Nunes, Leandro Scheffer, Rodrigo Malysz, Rodrigo Lovato, Rodrigo Silveira, Raymundo Ferreira Filho, Diana Azambuja, Danielle Clerman, Ana Cecília Librelotto, Eli Costa, Uziel Medeiros, Daniel Sias, Rafael Azambuja, Diego Vendramin, Carolina Feuerharmel, Diego Nacci, Fernando Maria Mantaras, Reinaldo Gambim, Cláudio Dias, e Vinícius Aguiar.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 DEFINIÇÕES BÁSICAS.....	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
INTRODUÇÃO.....	5
2.1 TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO	8
2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	15
2.2.1 Medição de Condutividade Hidráulica.....	15
2.2.2 Permeâmetro de parede rígida x Permeâmetro de parede flexível.....	18
2.2.3 Diferentes procedimentos de ensaio.....	19
2.2.4 Fatores que interferem na condutividade hidráulica.....	21
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE SOLOS CIMENTADOS.....	31
2.4 DERIVADOS DE PETRÓLEO E SUAS INTERAÇÕES COM O SOLO.....	32

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
3.1 ENSAIOS PARA VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	35
3.2 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS.....	36
MATERIAIS	42
3.3 ARENITO BOTUCATU	42
3.4 CIMENTO PORTLAND.....	45
3.5 ÓLEO DIESEL.....	47
3.6 ÁGUA.....	48
MÉTODOS.....	48
3.7 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	48
3.8 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	48
3.9 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	49
3.10 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL.....	50
3.10.1 Procedimento de Ensaio.....	55
3.11 ANÁLISES PETROGRÁFICAS.....	59
3.12 SEPARAÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA DIFRAÇÃO DE RAIOS X	59
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS E ANÁLISES.....	61

4.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	61
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	62
4.3 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SEGUNDO A NORMA ASTM D 5084 – PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL.....	64
4.3.1 Validação do Equipamento.....	64
4.3.2 Verificação da técnica de Solidificação e Estabilização.....	65
4.4 RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	68
4.4.1 Resultados Condutividade hidráulica x Resistência à compressão simples (7 dias de cura).....	69
4.5 RESULTADOS LIXIVIAÇÃO X CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	70
4.5.1 Comparação com ensaios de lixiviação segundo a norma ASTM D 4874.....	71
4.5.2 Comparação com ensaios de lixiviação segundo a norma ABNT NBR 10005.....	72
4.6 ANÁLISES PETROGRÁFICAS.....	73
4.7 DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X.....	79

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	82
INTRODUÇÃO.....	82
5.1 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	82
5.2 MÉTODO DE SOLIDIFICAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	83
5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	83
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Mistura profunda do subsolo para estabilização in-situ. (Suthersan, 1997).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.2 Mistura do subsolo para estabilização in-situ superficial. (Suthersan, 1997).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.3 Diagrama esquemático para solidificação estabilização ex-situ (unidade de mistura). (Suthersan, 1997).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.4 Modelo de sobreposição de furos para estabilização in-situ. (Suthersan, 1997).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.5 Dupla camada de íons e o seu efeito na condutividade hidráulica (Daniel, 1994).....</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 2.6 Estrutura química de hidrocarbonetos policíclicos (Young et al. 1999).....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 2.7 Micela.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.1 Jazida de arenito Botucatu (Vila Scharlau).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.2 Localização da jazida de solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.3 Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.4 Evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento portland. (ABCP).....</i>	<i>46</i>

<i>Figura 3.5 Moldagem de corpos de prova.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.6 Prancha 1 e 2 projeto da câmara acrílica e base e tampa da câmara.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.7 Prancha 3 e 4 projeto dos acumuladores de pressão e da base e top cap do corpo de prova.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.8 Permeâmetro de Parede Flexível desenvolvido no ENVIRONGEO/ UFRGS.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.9 Esquema do equipamento Permeâmetro de Parede Flexível construído no ENVIRONGEO / UFRGS.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.10 Câmara Acrílica triaxial.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.11 Detalhe da pedra porosa de bronze.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.12 Acumuladores de pressão em aço inox.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.13 Câmara triaxial de pressão com a amostra de solo instalada.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.14 Equipamento executando ensaio.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.1 Curvas de compactação para o SRAB.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.2 Resistência à compressão não confinada aos três dias de cura.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.3 Resistência à compressão não confinada aos sete dias de cura.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.4 Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para validação do equipamento (Comparação com resultados de Heineck (2002)).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.5 Condutividade Hidráulica para verificação da técnica de Solidificação/ Estabilização.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.6 Resistência à compressão simples (7 dias de cura) x condutividade hidráulica.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.7 Lixiviação ASTM (Knop, 2003) x Condutividade Hidráulica.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.8 Lixiviação ABNT (Knop, 2003) x Condutividade Hidráulica.....</i>	<i>73</i>

<i>Figura 4.9 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 0% de óleo diesel.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.10 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 10% de óleo diesel.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.11 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 40% de óleo diesel.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.12 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 0% de óleo diesel.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.13 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 10% de óleo diesel.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.14 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 40% de óleo diesel. Lente de 5 x que corresponde a 48x de aumento real.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.15 Corpos-de-prova com 10% de cimento e com 0%, 10% e 40% de óleo diesel.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.16 Corpos-de-prova com 20% de cimento para as porcentagens de 0%, 10% e 40% de óleo diesel.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.17 Difratoograma da amostra de solo residual do Arenito Botucatu sem adição de óleo diesel. Amostra natural.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.18 Difratoograma da amostra de solo residual do Arenito Botucatu sem adição de óleo diesel. Amostra glicolada.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.19 Difratoograma da amostra de solo residual do Arenito Botucatu sem adição de óleo diesel. Amostra calcinada.....</i>	<i>81</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 – Ensaio de resistência à compressão simples (proporções dos materiais)...</i>	36
<i>Tabela 3.2 – Ensaio de condutividade hidráulica (proporções dos materiais).....</i>	39
<i>Tabela 3.3 – Análise Petrográfica das amostras (proporções dos materiais).....</i>	41
<i>Tabela 3.4 – Classificação granulométrica do SRAB (Thomé, 1999).....</i>	43
<i>Tabela 3.5 – Propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu.....</i>	45
<i>Tabela 3.6 - Composição do cimento portland de alta resistência inicial (adapt. de ABCP).....</i>	46
<i>Tabela 3.7 – Componentes do óleo diesel (REFAP, 2003).....</i>	47
<i>Tabela 4.1 – condutividade hidráulica para validação do equipamento.....</i>	64
<i>Tabela 4.2 – Condutividade Hidráulica para verificação da técnica Solidificação/Estabilização.</i>	66
<i>Tabela 4.3 - Resistência à compressão simples (7 dias) x Condutividade hidráulica.....</i>	70

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

<i>ABCP</i>	<i>Associação Brasileira de Cimento Portland</i>
<i>ABNT</i>	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing Materials</i>
<i>ARI</i>	<i>Alta Resistência Inicial</i>
<i>B</i>	<i>Parâmetro de poro-pressão de Skempton</i>
<i>CP – V</i>	<i>Cimento Portland</i>
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protection Agency</i>
<i>k</i>	<i>Condutividade Hidráulica</i>
<i>NBR</i>	<i>Norma Brasileira</i>
<i>PHC</i>	<i>Hidrocarboneto de Petróleo</i>
<i>RCS</i>	<i>Resistência à Compressão Simples</i>
<i>SRAB</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu</i>
<i>S/S</i>	<i>Stabilization/Solidification</i>
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	<i>Peso específico aparente seco máximo</i>
$\omega_{\acute{o}t}$	<i>Umidade ótima de compactação</i>

RESUMO

No presente trabalho, a técnica de solidificação/estabilização de solos contaminados, foi analisada por meio de ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível. O solo residual de arenito Botucatu (SRAB) foi utilizado como matriz, o óleo diesel foi utilizado como contaminante, e o cimento Portland CP V – ARI foi utilizado como o agente cimentante. Foram realizadas microscopias petrográficas dos materiais encapsulados, no intuito de analisar a estrutura do material para diferentes porcentagens de óleo diesel. Para os ensaios de condutividade hidráulica foi projetado e construído um permeâmetro de parede flexível, conforme a norma Americana ASTM D 5084/90, com adaptações para ensaiar amostras contaminadas, percoladas com água ou com percolados químicos. Para os ensaios de resistência à compressão simples utilizou-se de 0 a 50% de cimento (em relação ao peso de solo seco) e de 0 a 100% de contaminante (em relação ao peso de líquidos na amostra), correspondente à umidade ótima da amostra obtida através do ensaio de compactação. Para os ensaios de condutividade hidráulica foram utilizados os percentuais de 0 a 30% de cimento e 0 a 40% de óleo diesel. A resistência à compressão simples aumenta quanto maior for a quantidade de cimento, e diminui quanto maior for a quantidade de contaminante. Em amostras sem óleo diesel, a condutividade hidráulica diminui quanto maior for a quantidade de cimento. Para amostras sem cimento, a condutividade hidráulica diminui para quantidades de até 20% de óleo diesel, voltando a aumentar para quantidades maiores de 20% de óleo. Para o SRAB com adição de cimento e óleo diesel, verifica-se uma tendência no comportamento, onde inicialmente a condutividade hidráulica diminui e volta a aumentar com o aumento da quantidade de óleo diesel. Foi observado que quanto maior a quantidade de cimento, menor a quantidade de óleo diesel necessária para a obtenção do mínimo valor de condutividade hidráulica para o material.

ABSTRACT

Flexible-wall hydraulic conductivity and unconfined compressive strength tests (UCS) were carried out in order to evaluate the efficiency of remediation of a residual soil contaminated by hydrocarbons, through stabilization/solidification method. The soil used throughout the present research was Botucatu Residual Sandstone soil (BRS). The diesel oil was used as contaminant agent and Portland cement CP V was used as a cementing agent. An investigation was undertaken based on thin section micrographs in order to study the effect of the cement and oil inclusion on the structure of the admixtures. Hydraulic conductivity tests were constructed on a flexible wall permeameter following ASTM D 5084/90 standard, which was adapted to test contaminated samples. For the UCS tests, the amount of Portland cement tested ranged from 0% to 50% in relation to the soil amount, whereas the amount of contaminant ranged from 0% to 100% in relation to the total amount of liquids, which corresponds to optimum moisture content determined in the compaction test. For the hydraulic conductivity tests, the amounts of contaminant (diesel oil) ranged from 0% to 40% and quantities of Portland cement ranged from 0% to 30%. The UCS of the contaminated soil increases according to growing Portland cement content, decreasing with rising contents of oil. In samples without diesel oil, hydraulic conductivity decreases with cement content addition. In samples without Portland cement, the hydraulic conductivity decreases up to 20% of diesel oil and increases for higher quantities. For the BRS with cement and diesel oil additions, it is possible to verify a similar behavior, where the conductivity initially decreases, followed by an increase for higher diesel oil content. It was also possible to detect that the minimum value of hydraulic conductivity for growing cement additions was obtained with reducing diesel oil amount.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A crescente preocupação mundial com a preservação do meio ambiente e com a escassez dos recursos naturais faz com que cada vez mais empresas potencialmente poluidoras juntamente com órgãos ambientais e universidades busquem soluções adequadas para reutilização de resíduos gerados sem danos ao ambiente, soluções estas como tratamento, queima e destinação adequada dos resíduos.

No Brasil, como no resto do mundo, esta preocupação vem aumentando gradativamente, onde se observam empresas com setores especiais e programas de tratamento ambiental de seus próprios rejeitos, para posterior devolução ao ambiente ou armazenamento, caso não possa ser devolvido ao lugar de origem.

Tratando-se mais especificamente de indústrias de petróleo, sabe-se que as mesmas lidam diariamente com problemas decorrentes de vazamentos, derrames e acidentes durante a exploração, refinamento, transporte e operações de armazenamento do petróleo e seus derivados (Corseuil e Marins, 1997). Sabe-se também que as indústrias petroquímicas geram, inevitavelmente, um grande volume de resíduos, cuja tendência é aumentar devido à contínua ampliação destes pólos industriais. Por este motivo o controle ou a remediação adequada dos resíduos e das áreas degradadas, sob o ponto de vista ecológico, representa um grande desafio para as indústrias de petróleo.

Existem inúmeros processos de controle e remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos, dentre estes processos a maioria das soluções passa pela remoção do solo supostamente contaminado, confinando o material em aterros de resíduos sólidos ou dispendo em landfarmings (Heineck, 2002).

Um destes processos é o de solidificação ou encapsulamento de contaminantes, que é utilizado para transformar materiais sólidos ou líquidos potencialmente poluentes em materiais sólidos menos poluentes ou não poluentes.

O encapsulamento do material contaminado pode ser feito através da utilização de agentes cimentantes disponíveis no comércio, tal como cimento Portland. Também podem ser adotados sub produtos de atividades industriais, tais como a cal de carbureto e a cinza volante, em detrimento do cimento Portland, resultando em uma economia de recursos financeiros e também na utilização dos resíduos acima citados [Ibáñez et al., 1998; Jacobson e Osborn, 1991; Donelly e Webster, 1996; Bruce, et al., 1998; Carraro e Consoli, 1997; Consoli e Carraro, 1997; Prietto et al., 1997; Thomé et al., 1998; Consoli et al., 1998; Consoli et al., 2001 (a,b); Consoli et al., 2002 (a,b)].

Com respeito à aplicação da técnica de solidificação, ela pode ser feita de duas maneiras: através da retirada do material, adição de agentes cimentantes e disposição final, ou através da técnica de mistura no local, ou “deep-mixing”, que consiste na utilização de um equipamento capaz de injetar e misturar os agentes cimentantes in situ. Tal técnica possui algumas limitações, principalmente no que diz respeito ao tipo de solo (Bruce et al., 1998), entretanto pode ser aplicada com muito sucesso em lagoas de despejo contaminadas com hidrocarbonetos.

Muitos contaminantes orgânicos são insolúveis em água, permanecendo associados com a fase sólida. Uma baixa condutividade hidráulica da matriz sólida pode fisicamente retardar a lixiviação de alguns contaminantes orgânicos. A baixos níveis, muitos compostos orgânicos podem ser estabilizados, mas alguns

compostos podem interferir no processo de solidificação e estabilização (Suthersan, 1997).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo complementar o estudo da metodologia de encapsulamento de contaminantes no solo através de ensaios de condutividade hidráulica em amostras de solo contaminado, encapsulado com diferentes quantidades de agente cimentante. Utilizando-se para isto um permeâmetro de parede flexível.

A construção de um “permeâmetro de parede flexível” foi um dos objetivos deste trabalho, desde a etapa de projeto, calibração do equipamento, até a etapa de ensaios e validação de resultados obtidos. O equipamento utilizado para os ensaios foi adaptado para receber percolados químicos. Outro objetivo foi a avaliação do teor de agente cimentante e a avaliação da resistência não confinada do material solidificado após sete dias de cura, e por fim a avaliação da quantidade máxima de borra oleosa que pode estar presente no solo para que a solidificação seja efetiva.

1.3 DEFINIÇÕES BÁSICAS

Solidificação ou Encapsulamento: Solidificação se refere à técnica que encapsula o rejeito em um sólido monolítico de alta integridade estrutural. O encapsulamento pode ser de finas partículas de rejeito (microencapsulamento) ou até de grandes blocos de contaminantes (macroencapsulamento). Solidificação não necessariamente envolve interação química entre o rejeito e os agentes solidificantes, mas pode mecanicamente tornar o rejeito monolítico.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está composta por cinco capítulos, tendo início por este capítulo introdutório (Capítulo 1), logo após está composta por uma revisão da bibliografia existente (Capítulo 2) que compreende os principais assuntos abordados nesta dissertação.

O Capítulo 3 é composto pelo programa experimental, onde serão citados os ensaios realizados nesta pesquisa.

Ainda no Capítulo 3 são apresentados e caracterizados os materiais utilizados na pesquisa, o método utilizado na realização de cada ensaio e também a descrição dos equipamentos utilizados na realização do programa experimental. O próximo capítulo está composto pelos resultados e análises obtidas a partir dos ensaios realizados na pesquisa (Capítulo 4). Resultados estes que compreendem desde ensaios de compactação, resistência à compressão simples das misturas até o comportamento hidráulico dos mesmos, analisando-se o comportamento da matriz de solo residual de arenito Botucatu com a adição do contaminante e adição do agente cimentante, respectivamente, o Óleo Diesel e o Cimento Portland.

No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões da pesquisa bem como sugestões para trabalhos futuros neste segmento de pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

INTRODUÇÃO

Nesta revisão será abordada primeiramente a técnica de solidificação/estabilização para posteriormente serem apresentados tópicos sobre condutividade hidráulica. Este por sua vez será subdividido em outros quatro: condutividade hidráulica, uma comparação entre permeâmetro de parede rígida e permeâmetro de parede flexível, diferentes procedimentos de ensaio e fatores que afetam a condutividade hidráulica. Os itens posteriores a este abordarão assuntos tais como comportamento mecânico e hidráulico de solos cimentados e, por fim, o tópico “derivados de petróleo e suas interações com o solo”.

De acordo com Yong & Rao (1991), o petróleo cru e seus derivados representam uma complexa mistura de hidrocarbonetos que levam uma grande herança tóxica. Indústrias estimam que de 4 a 12% dos 5 a 8 milhões de tanques subterrâneos na América do Norte que estocam produtos de petróleo e substâncias químicas estão vazando e contaminando o subsolo e o lençol freático (Pei Associados Inc. 1988).

Tecnologias de tratamento in situ para mitigação de contaminação de hidrocarbonetos de petróleo de locais contaminados estão em estágio de desenvolvimento ou sendo testadas. Elas envolvem métodos físicos, químicos e biológicos ou combinações dos mesmos. Tratamentos químicos in situ que utilizam a imobilização dos contaminantes de petróleo no substrato de solo

envolvem precipitação, e outras reações químicas no subsolo contaminado (Yong & Rao, 1991).

Em geral, solos com grandes quantidades de argila e conseqüentemente com baixa condutividade hidráulica, são freqüentemente usados em barreiras naturais e artificiais para limitar a liberação de lixiviado para o ambiente (Budhu et al., 1991).

Dentre as propriedades de maior importância na análise de problemas geotécnicos em solos de granulometria fina, a mais influenciada pela estrutura é a condutividade hidráulica (Mitchell, 1976).

Segundo Pinto (2000), solos residuais e solos evoluídos pedologicamente apresentam estrutura com macroporos, pelos quais a água percola com maior facilidade. Nestes solos, ainda que as partículas sejam pequenas, os vazios entre as aglomerações das partículas são grandes e é por eles que a água flui. O solo arenoso fino, existente em extensa área em São Paulo, por exemplo, apresenta no estado natural condutividade hidráulica da ordem de 10^{-5} m/s. Se a estrutura for desfeita mecanicamente e o solo for recolocado com o mesmo índice de vazios, a condutividade hidráulica passa a ser da ordem de 10^{-7} m/s. Se este mesmo solo for compactado, o coeficiente de condutividade hidráulica ficará entre 10^{-8} e 10^{-9} m/s.

Note-se que os valores acima representam só uma ordem de grandeza, pois o que determina o coeficiente de condutividade hidráulica são os finos do solo e não a predominância do tamanho de grãos. Uma areia grossa com finos pode ter uma menor condutividade hidráulica que uma areia fina uniforme. Por outro lado, a condutividade hidráulica depende não só do tipo de solo como também de sua estrutura e da compacidade ou consistência.

Segundo Broderick e Daniel (1990), a argila compactada é largamente utilizada para liners e para confinamento no intuito de isolar contaminantes e outros tipos de rejeitos do meio ambiente do entorno. Dos tipos de estabilização existentes, dois são enfatizados, um deles através de misturas com aditivos e outro é a estabilização mecânica. Na mistura com aditivos espera-se estabilizar o solo por cimentação das partículas de argila, pelo aumento da resistência do solo e pelo fechamento parcial dos poros da massa de solo. Mais importante, na mistura com aditivos espera-se fazer o solo resistir por reorientação das partículas (floculação e quebra por encolhimento) e assim eliminar os efeitos adversos da permeação com químicos orgânicos.

Ainda Broderick e Daniel (1990) ressaltam que a estabilização mecânica, usando uma grande energia de compactação (Proctor modificado) ou aplicando uma tensão de compressão maior ou igual a 70 kPa (10 psi), é utilizada para tornar uma argila compactada invulnerável ao ataque de químicos orgânicos. Um aumento da resistência proporcionado pela alteração estrutural do solo pode também ser obtido mecanicamente, densificando a massa de solo, promovendo a reorientação das partículas e evitando a quebra das partículas.

Mesri e Olson (1971) analisaram alguns ensaios de condutividade hidráulica com adição de cal e obtiveram, para água como permeante, uma condutividade hidráulica reduzida, contrariando a idéia de que a cal aumenta a quantidade de cátions polivalentes (Ca^{+2}) na água do solo, na qual deveria aumentar a condutividade hidráulica. A baixa condutividade hidráulica de solos tratados com cal foi provavelmente influenciada pelo bloqueio de alguns poros no solo com cimento pozolânico.

A adição de aproximadamente 7% (em peso) de cal, cimento Portland, ou cal mais silicato de sódio aumentam muito a habilidade da argila compactada para resistir para contra o ataque de químicos orgânicos concentrados. Em alguns

casos solos tratados são menos permeáveis a químicos orgânicos concentrados do que solos não tratados. A adição de cimento Portland melhora grandemente a resistência química do solo ao ataque de químicos orgânicos. Em muitos casos, a condutividade hidráulica do solo estabilizado com cimento e permeado com químicos orgânicos é menor que a condutividade hidráulica do solo não estabilizado permeado com água. Da mesma forma que acontece com a Cal, acredita-se que a ação da cimentação das misturas com adições de cimento Portland é responsável pela estabilização do solo contra ataque químico. Os autores observam que o tratamento com cimento aumenta a condutividade hidráulica porque isto aumenta a quantidade de cátions divalentes (Ca^{+2}) na água do solo, mas o material cimentado formado durante a interação argila-cimento aparentemente bloqueou alguns dos poros e assim reduziu a condutividade hidráulica (Broderick e Daniel, 1990).

2.1 TÉCNICA DE SOLIDIFICAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A solidificação/estabilização é conhecida como uma das tecnologias mais populares para o tratamento e disposição de rejeitos perigosos. Esta tecnologia usando materiais cimentícios tem sido usada há décadas no tratamento final para a disposição de rejeitos químicos ou radioativos (Mayers & Eappi, 1992).

Define-se a solidificação como a técnica de encapsular o rejeito em um sólido monolítico de alta integridade estrutural (USACE, 1995).

A estabilização altera o rejeito para uma forma física ou quimicamente mais estável, resultando numa melhor aceitação ambiental. A melhoria das propriedades de engenharia como trafegabilidade, capacidade de suporte e permeabilidade dos rejeitos estabilizados é referida como estabilização física. A estabilização química é responsável pela alteração da forma química dos

contaminantes onde a lixiviabilidade é eliminada ou substancialmente reduzida (Mayers & Eappi, 1992).

Segundo (USACE, 1995) a técnica de solidificação/estabilização é aplicada para o tratamento de líquidos e solos contaminados, tendo por objetivo melhorar as características físicas do material contaminado, diminuir a área superficial da massa de contaminante frente à perda de contaminação que pode ocorrer e reduzir a solubilidade dos constituintes perigosos no contaminante.

A solidificação/estabilização com cimento Portland ou outro cimentante hidráulico é geralmente sugerida como melhor tratamento para rejeitos que não podem ser reduzidos ou reciclados (Stegemann & Buenfeld, 2002).

Segundo (USACE, 1995) o produto final desta técnica pode variar de granular, material semelhante a um solo até um sólido coesivo dependendo da quantidade de reagentes adicionados e do tipo de contaminante tratado.

A solidificação é o processo de eliminação da água livre pela hidratação do agente cimentante. Na década de 50 o cimento Portland era utilizado para solidificação de rejeitos nucleares e até hoje é utilizado como principal agente cimentante nesta técnica de solidificação/estabilização (Park, 2000).

A adição de cinza volante, cal, escória, argila ou outros aditivos ao cimento Portland é uma modificação que pode ser feita para melhor adequar a técnica ao tipo de contaminante (Mayers & Eappi, 1992; Glasser, 1993).

Segundo (USACE, 1995) existem dois tipos básicos de reagentes para a técnica de solidificação/estabilização, os orgânicos e os inorgânicos. Reagentes orgânicos raramente são utilizados para a recuperação de locais contaminados.

Portanto, será ressaltado nesta revisão o uso de reagentes inorgânicos. As etapas inerentes ao processo utilizando reagentes inorgânicos são:

- 1) Reagir quimicamente com toda água presente;*
- 2) reagir quimicamente com os contaminantes para torná-los insolúveis e, por fim,*
- 3) encapsular o contaminante.*

Os reagentes inorgânicos que são freqüentemente utilizados para a técnica de solidificação/estabilização incluem cimento Portland, cinza volante, cal, fosfatos e restos da queima da cal e produção de cimento. Todos estes reagentes têm basicamente o mesmo tipo de ingredientes ativos que levam às reações de solidificação/estabilização. Estes ingredientes ativos incluem SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

O emprego de cinza tem objetivo ambiental por se tratar de um resíduo e econômico por proporcionar redução no consumo de cimento. A cinza volante possui alta concentração de sulfatos, cloratos e metais pesados, o que limita seu uso a no máximo 15 a 20% de peso em adição ao cimento. O tempo de cura pode ser retardado devido à presença de grande quantidade destes materiais (Mangialardi et al., 1999).

Pesquisas demonstram que metais pesados podem reagir quimicamente com o cimento e afetar o enrijecimento e desenvolvimento de resistência no estágio de hidratação do cimento (Li et al., 2001).

A substituição do cimento por cinza volante na técnica de solidificação/estabilização reduz a velocidade nas reações de cimentação e enrijecimento a curto prazo, mas é extremamente favorável pois proporciona uma inertização mais econômica (Valls & Vásquez, 2000).

O pH e a aptidão de um produto solidificado em neutralizar ácidos são importantes aspectos porque a solubilidade dos contaminantes é freqüentemente dependente do pH, e porque a matriz física está dissolvida e vulnerabilizada pelo ácido (Stegemann & Buenfeld, 2002).

O pH tem uma clara influência no potencial lixiviante da forma constituinte (Valls & Vázquez, 2000; Van Der Sloot et al., 1997), controlando a solubilidade de diferentes agentes químicos (Goumans et al., 1991; Van Der Sloot et al., 1997).

Solidificações com base de cimento estão vulneráveis as mesmas degradações físico-químicas de um concreto, ou outros materiais cimentados (Klich, 1999). A permeabilidade, composição química e mineralógica, microestrutura da pasta de cimento, bem como o tipo de cimento e agregados do contaminante são fatores dos quais depende a vulnerabilidade do método de solidificação/ estabilização (Klich, 1999).

Em estudo realizado por Valls & Vasquez (2000), foram utilizados percentuais de 50 a 75% de reagentes e 50 a 25% de material a ser solidificado e estabilizado. Dentro deste percentual de reagentes foram utilizados ainda percentuais de 5 a 25% de cinza volante para diminuir o consumo de cimento.

A condutividade hidráulica da massa solidificada e dos materiais que a envolvem vão determinar se o fluxo de lixiviado se dará através do resíduo ou pelo seu entorno. Onde a condutividade hidráulica do contaminante solidificado for menor do que a das camadas que o envolvem, o fluxo de lixiviado se dará preferencialmente pelo entorno da massa solidificada. Já se a condutividade hidráulica do material solidificado for maior que a do entorno, o fluxo de lixiviado se dará através da massa solidificada (Poon et al., 2001).

O fluxo através da amostra solidificada é associado com difusão, dispersão, reações químicas e adsorção. Difusão e dispersão são os mecanismos de transferência primária num fluxo através do composto solidificado, podendo estes ser analisados quantitativamente. Reações químicas, como a adsorção, não podem ser ignoradas devido a sua natureza complexa (Poon et al., 2001).

Segundo (USACE, 1995) os processos utilizados para este tipo de tratamento podem ser *in-situ* (Fig. 2.1 e 2.2) ou com a retirada do material contaminado sendo o mesmo escavado e tratado em uma unidade de mistura (Fig. 2.3). O encapsulamento pode ser de finas partículas (microencapsulamento) ou de grandes blocos ou containeres de rejeito (macroencapsulamento). A figura 2.4 apresenta um modelo de sobreposição de furos para tratamento *in situ*.

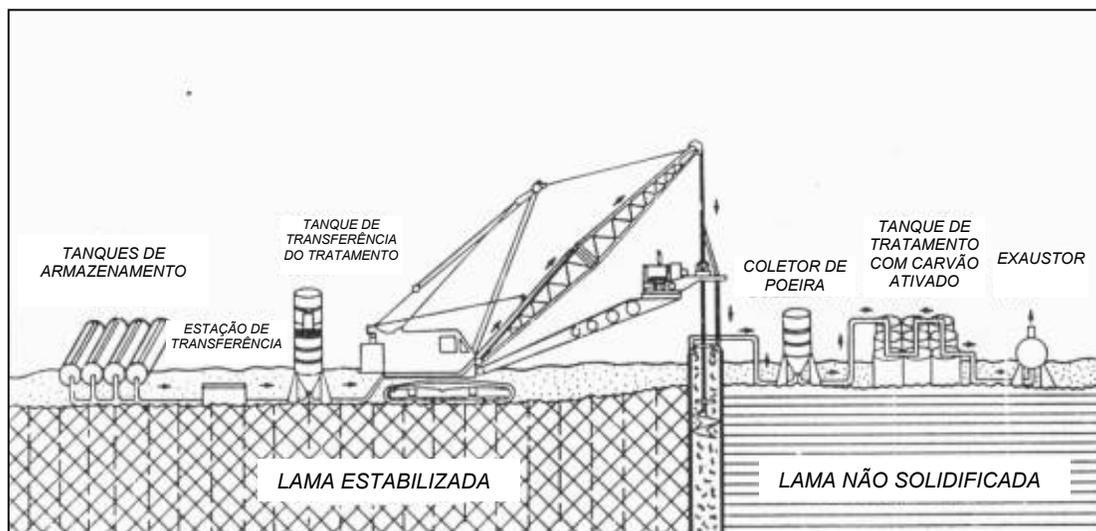


Figura 2.1 – Mistura profunda do subsolo para estabilização *in-situ*. (Suthersan, 1997)

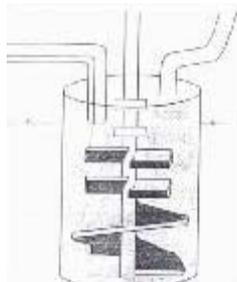


Figura 2.2 – Mistura do subsolo para estabilização in-situ superficial. (Suthersan, 1997)

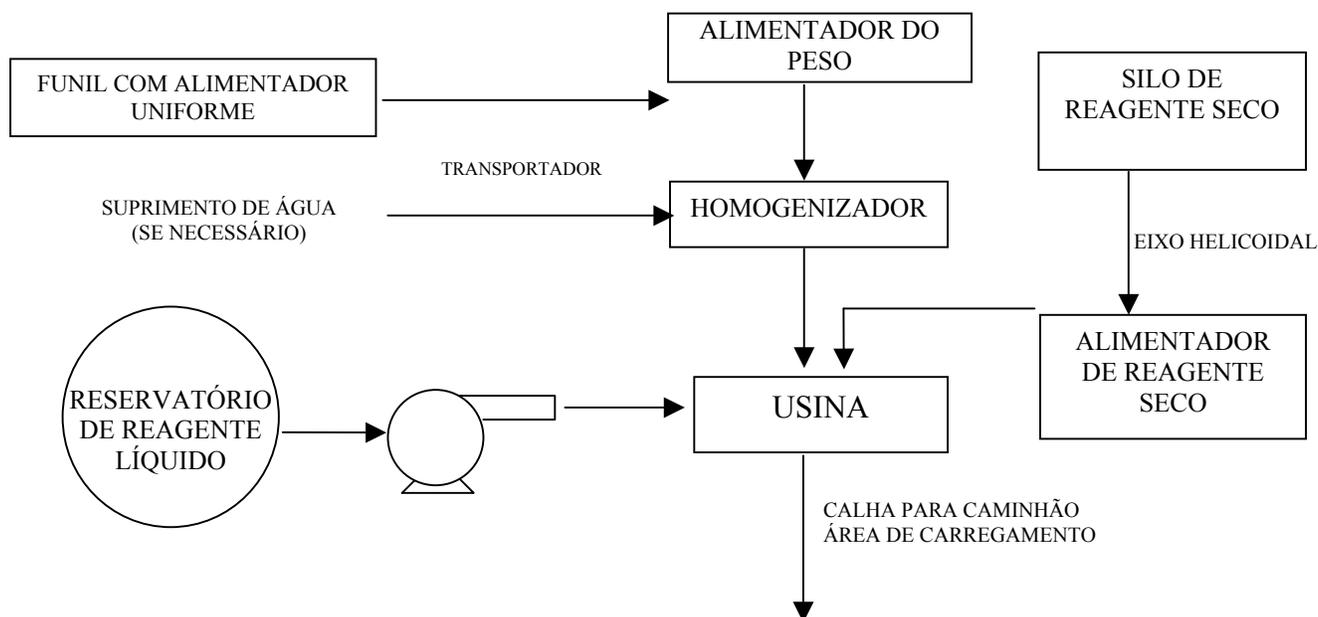


Figura 2.3 – Diagrama esquemático para solidificação estabilização ex-situ (unidade de mistura). (Suthersan, 1997)

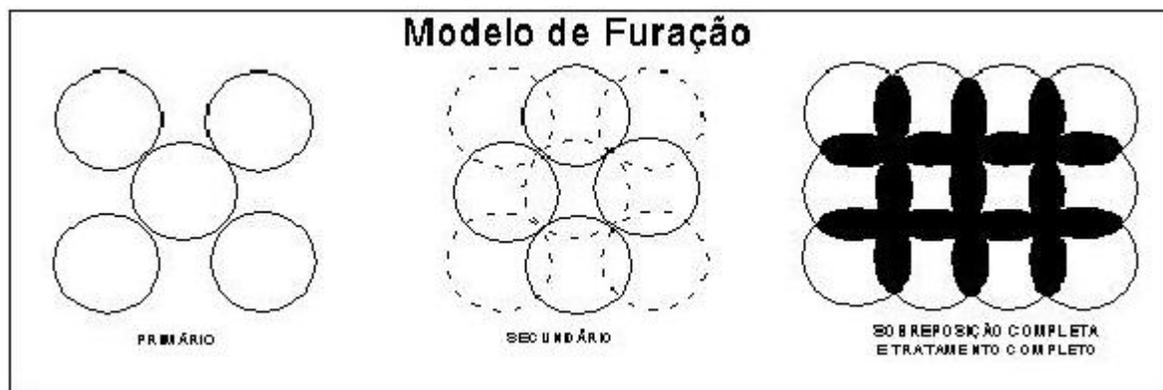


Figura 2.4 – Modelo de sobreposição de furos para estabilização in-situ. (Suthersan, 1997)

Segundo Wiles (1987), as vantagens e desvantagens do processo de solidificação variam conforme o agente cimentante utilizado, o contaminante, as condições do local, do solo e de outros fatores. Uma desvantagem do emprego da solidificação com cimento é o grande aumento de volume do material final. Alguns fatores como características do contaminante e do solo, tipos de processos e reagentes utilizados, fatores econômicos e fatores específicos como condições locais, clima e hidrologia afetam o desempenho da técnica. O custo do processo de solidificação geralmente é considerado baixo se comparado a outras técnicas de remediação. O que torna caro o custo desta técnica é o emprego de aditivos, muitas vezes necessários dependendo do tipo de contaminante. Para determinar os custos da execução de uma remediação por solidificação deve-se considerar:

- a) As características do contaminante: dependendo do tipo de contaminante pode ser necessário um pré-tratamento do local, como remoção do excesso de água, ou demais constituintes do solo contaminado;*
- b) Transporte: distância de transporte de solo contaminado até a usina e novamente até o local (mistura em usinas) ou do transporte de reagentes até o local da contaminação (misturas in situ);*
- c) Processo: tipo de processo adotado. Por exemplo, a utilização de cimento e cinza volante aumenta e muito o volume da massa e conseqüentemente os gastos com transporte em misturas em usinas.*

Segundo Suthersan (1997), alguns ensaios são necessários para avaliar a contaminação antes e depois da solidificação/estabilização. Estes ensaios são

divididos em físicos e químicos. Os ensaios físicos mais comuns são: o de índices físicos, densidade, ensaios de permeabilidade, resistência, durabilidade e compactação. O ensaio químico realizado é o ensaio de lixiviação. O ensaio de lixiviação é influenciado por alguns fatores, tais como: composição química do contaminante, propriedades físicas, gradiente hidráulico imposto ao contaminante, polaridade da solução lixiviante, condições de oxidação e redução e reações cinéticas, difusão química do contaminante com a matriz, concentração de compostos reativos e acumulação de contaminante em solução nos poros da superfície da partícula.

2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS

2.2.1 Medição de condutividade hidráulica

A permeabilidade é a propriedade que um solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele, propriedade esta que varia de acordo com os diversos tipos de solos encontrados, tais como areia , argila, entre outros. Já a condutividade hidráulica depende invariavelmente da viscosidade do fluido permeante no solo, que por sua vez depende da temperatura (Daniel, 1994).

No caso das areias , o solo pode ser visto como um material constituído por diversos canais , interconectados uns aos outros, nos quais a água está armazenada em equilíbrio hidrostático, ou está fluindo dentro deles por ação da gravidade. A baixa compressibilidade dos solos arenosos possibilita pouca transferência de pressões entre grãos e água, assim este tipo de solo tem as características de ser um solo muito permeável. Já no caso das argilas o modelo dos canais da areia perde a validade, pois o pequeníssimo diâmetro e a forma dos grãos da argila produzem uma interação entre a água e a fase sólida do solo. Sendo tais canais tão pequenos, existe uma alta compressibilidade neste meio,

diferente das areias, impedindo que o líquido saia do solo. Essas características determinam um solo de baixa permeabilidade (Vargas, 1977).

Outro fator que contribui para compor as características da condutividade hidráulica de um solo é a força atrativa das partículas a que está sujeita a água . A uma distância de algumas moléculas , a força atrativa entre o grão sólido e os íons da água é da ordem de milhares de atmosferas, mesmo a temperaturas de 15°C a 25°C, formando assim uma camada de água com um vínculo muito forte com os grãos. Uma segunda camada iônica contribui, embora com menor intensidade, para a coesão dos solos. A espessura dessa dupla camada iônica de água vai expressar as propriedades físicas do solo em nível macroscópico através da coesão e capilaridade (Vargas, 1977).

Estes dois exemplos tão contrastantes fornecem uma idéia básica do que é condutividade hidráulica, cujo conhecimento é importante para resolução de diversos problemas práticos de Engenharia, como as drenagens, rebaixamento de nível de água, recalques por adensamento, represas de rios, etc...

O coeficiente de condutividade hidráulica não só varia de acordo com os tipos de solos, como podemos perceber pela simples descrição das características dos dois exemplos de solos acima, mas também em um mesmo solo, dependendo essencialmente da temperatura (Daniel, 1994).

Henry Darcy , um engenheiro francês , realizou experimentos sobre o escoamento laminar através de um meio poroso. Estes experimentos foram feitos com filtros de areia , os quais foram atravessados por água na direção vertical. O escoamento foi linear, isto é, a área da seção transversal da camada de filtro era constante com respeito à altura (Lambe, 1969).

A água pode percolar livremente por uma massa de solo permeável sob a ação da gravidade. No caso de um fluxo permanente de um fluido não-viscoso, aplica-se à equação de Bernoulli expressa por:

$$\frac{p}{\gamma_0} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{cte} \quad (1)$$

onde p é a pressão piezométrica num ponto qualquer,

γ_0 é a massa específica da água;

z é a cota do ponto,

g é a aceleração da gravidade e

v é a velocidade de percolação nesse ponto.

Sendo que a velocidade de percolação num ponto é a razão entre a vazão Q de água que atravessa uma seção transversal A em um determinado tempo Δt ; assim :

$$v = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Na maioria dos problemas de percolação de água através dos solos o último termo da equação de Bernoulli pode ser desprezado, pois o valor de v é muito pequeno. Entretanto aparece uma perda de carga devido a uma deflexão nas alturas entre os fluxos de dois pontos quaisquer Δh . Esta deflexão, vai representar a perda de carga do fluxo na distância Δs . Com esta duas grandezas define-se uma relação que chama-se de gradiente hidráulico :

$$i = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (3)$$

,que representa a dissipação de energia por unidade de peso de fluxo, uma distância Δs .

Os resultados de Darcy levaram a seguinte expressão: $v = k i$, onde k represente o coeficiente de condutividade hidráulica, que a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico.

Um dos pontos fracos da lei de Darcy é que esta é limitada a um escoamento vertical de um líquido de massa específica constante através de um meio permeável de seção transversal constante. Para diminuir estas restrições, seria necessário formular relações diferenciais, pois somente os resultados de Darcy não revelariam os efeitos se a permeabilidade fosse variável. Entretanto, é comum generalizar a lei de Darcy, da seguinte forma:

$$v = k \cdot i \quad (4)$$

2.2.2 Permeâmetro de parede rígida X Permeâmetro de parede flexível

A condutividade hidráulica pode ser influenciada pelo tipo de permeâmetro utilizado. Daniel (1994) e Boynton e Daniel (1985) descrevem um estudo abrangente sobre os diferentes tipos de permeâmetros e seus respectivos desempenhos.

Um permeâmetro pode ser classificado como permeâmetro de parede rígida ou flexível. Existem alguns tipos de permeâmetro de parede rígida, um deles é o chamado "Compaction mold permeameter", onde o solo é compactado dentro do tubo e o teste de condutividade hidráulica é conduzido através da aplicação de uma carga hidráulica. As desvantagens do sistema são a não saturação da amostra, a impossibilidade de saturação por contra pressão, a não existência de controle sobre pressões atuantes na amostra e a existência da possibilidade de haver fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro.

O permeâmetro de parede flexível é mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona ao redor de toda a amostra. Por causa de todas as

dificuldades encontradas nos ensaios com permeâmetros de parede rígida, prefere-se a utilização de permeâmetros de parede flexível.

O permeâmetro de parede flexível possui várias vantagens: amostras indeformadas podem ser facilmente testadas, a contra-pressão pode ser utilizada para saturar a amostra e as tensões verticais e horizontais podem ser facilmente monitoradas.

Dixon et al. (1999) resumiu as dificuldades inerentes ao ensaio de condutividade hidráulica. Estas incluem saturação incompleta, fluxo entre o corpo de prova e a parede da célula no caso de ensaio em parede rígida, vazamento na membrana no ensaio de parede flexível, vazamento na tubulação, bolhas de ar e efeito do menisco na tubulação e no sistema de medição de fluxo, mudanças na estrutura do solo produzida pelos altos gradientes hidráulicos em ambos ensaios de carga constante e ensaio de adensamento, amostras não uniformes, mudanças químicas na argila, crescimento de bactérias, variações na temperatura e mudanças na estrutura do solo pela reversão da direção de fluxo.

2.2.3 Diferentes procedimentos de ensaio

A realização de testes nos permeâmetros deve ser feita com controle de entrada de líquido na amostra. A lei de Darcy relaciona a taxa de fluxo com o gradiente hidráulico. Assume-se que a área transversal da amostra (A) e a altura da amostra (L) sejam conhecidas. Então, para a determinação da condutividade hidráulica é necessária a medição da taxa de fluxo (q) e da carga hidráulica aplicada na amostra (ΔH). O controle de entrada de líquido na amostra pode ser feito de três diferentes formas: testes com carga constante, carga variável e com taxa de fluxo constante, descritos a seguir:

Carga Constante: existem várias maneiras de manter a carga hidráulica constante, dentre elas a utilização de reservatórios ou com tubo de Mariotti. Possui a vantagem da simplicidade de cálculo e pressão constante na amostra, o que evita a sua variação volumétrica.

Carga Variável: pode ser feito de duas maneiras: (1) com carga hidráulica de entrada variável e carga hidráulica de saída constante (atmosfera). Recomendado para solo com condutividade hidráulica maior que 1×10^{-5} m/s. (2) com cargas hidráulicas de entrada e de saída variáveis, recomendado para solos com baixa condutividade hidráulica. Possui a desvantagem de que a variação de carga pode liberar bolhas de gás dissolvidas e também pode causar variações na tensão efetiva, resultando em consolidação da amostra.

Fluxo constante: é realizado através do bombeamento do líquido através da amostra a uma taxa de fluxo constante e medição de perda de pressão ocasionada pela passagem do líquido pela amostra através de um transdutor diferencial de pressão. Possui a vantagem da possibilidade de realização de ensaios em curto espaço de tempo e automação total do equipamento. Por outro lado, é um equipamento caro e existe a possibilidade do desenvolvimento de gradientes hidráulicos altíssimos, se a taxa de fluxo utilizada for alta.

Quando os solos são permeados com água, existem alguns critérios que devem ser observados para determinar quando um teste pode ser finalizado. (1) os fluxos de entrada e saída de água da amostra devem ser razoavelmente iguais; (2) a condutividade hidráulica deve estar razoavelmente estável e (3) devem ser coletados pontos suficientes para que um resultado representativo seja obtido. Quando um solo é permeado com compostos químicos, critérios adicionais aos citados anteriormente devem ser aplicados: (1) o ensaio deverá continuar até que o volume de líquido permeado corresponda a dois volumes de poros da amostra; (2) o ensaio deverá ocorrer até que a composição química do líquido de entrada

seja igual à composição química do líquido de saída da amostra; (3) deve-se plotar a concentração de todos os íons críticos do líquido efluente.

A utilização de compostos químicos como líquido permeante ou misturados ao solo apresentam desafios adicionais, os quais incluem considerações quanto a cuidados na moldagem e no ensaio e considerações quanto à compatibilidade do líquido com o material do equipamento. A compatibilidade do líquido com o equipamento normalmente é feita com a utilização de aço inox e nylon nos componentes que estão em contato com o líquido permeante.

2.2.4 Fatores que interferem na condutividade hidráulica

Sabe-se que um grande número de fatores influencia a condutividade hidráulica de uma argila compactada. Eles incluem o teor de umidade na moldagem, o grau de saturação, o método de compactação, o esforço de compactação, o gradiente hidráulico, o tamanho dos aglomerados de partículas de solo, a distribuição dos tamanhos dos poros, a composição química do líquido permeante, a idade da amostra a ser testada, o índice de vazios e outros (Boynton e Daniel, 1985).

Segundo Huang et al. (1998) o coeficiente de permeabilidade de um solo saturado pode ser descrito como uma função do índice de vazios. O coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado com estrutura relativamente incompressível pode ser descrito como uma função do grau de saturação (Fredlund e Rajardo, 1993). No entanto do ponto de vista de engenharia, os solos são deformáveis, e a função do coeficiente de condutividade hidráulica para um solo não saturado e deformável deve incorporar a influência das mudanças em ambos índice de vazios e o grau de saturação.

Na prática de engenharia civil convencional, onde água é o permeante, são identificados muitos fatores que afetam fortemente a permeabilidade de solos ricos

em argila: tamanho dos grãos, a estrutura ou arranjo das partículas, grau de saturação, índice de vazios, concentração eletrolítica, composição e natureza de cátions adsorvidos e tensão atuante na amostra (Mitchell, 1976).

Os minerais de argila ou minerais secundários pertencem a uma família de minerais chamada filossilicatos. Os filossilicatos são minerais com estrutura em folhas constituídas por tetraedros de sílica e octaedros de alumínio ou magnésio. Os três principais grupos de minerais de argila são as caolinitas, esmectitas e ilitas.

A caolinita possui carga elétrica negativa e fraco poder de retenção para a água, em comparação com os minerais dos outros grupos; praticamente não apresenta expansibilidade e torna-se plástica em teores de umidade relativamente baixos. As esmectitas ou montmorilonitas são caracterizadas pelo seu poder de retenção de água, expansibilidade elevada e por se tornar plástica em um teor de umidade superior ao correspondente ao da caolinita. As propriedades da ilita são intermediárias entre a caolinita e a esmectita (Maciel Filho, 1997).

Os diferentes minerais de argila são compostos de diferentes combinações entre os tetraedros de sílica e os octaedros de Al e Mg. As dimensões quase idênticas dos tetraedros e octaedros ocasionam o compartilhamento dos átomos de oxigênio entre os mesmos, dando origem aos minerais 1:1. Quando os octaedros compartilham os oxigênios com dois tetraedros de sílica, originam-se os minerais 2:1.

As caolinitas são argilominerais 1:1 e não apresentam cátions entre as camadas. A não existência de cátions e espaço para as moléculas de água entrarem entre as camadas fazem com que estas argilas não expandam. As ilitas são argilominerais 2:1 que tem o potássio como cátion entre as camadas. Este cátion satisfaz a deficiência de cargas, diminuindo o potencial de expansão destas

argilas. Por outro lado, os íons de sódio e cálcio presentes nos argilominerais 2:1 movem-se da superfície da argila na presença de água, ocasionando a entrada de água entre as camadas e conferindo alto poder de expansão ao argilomineral. O poder de expansão está relacionado à proporção de cátions trocáveis em tais argilas. As argilas montmorilonita são os argilominerais 2:1 que exibem maior poder de expansão (Mitchell, 1993).

Além dos fatores já citados anteriormente, existem outros parâmetros que afetam a condutividade hidráulica. A densidade da argila compactada, o grau de flocculação e dispersão das plaquetas de argila são outros parâmetros importantes que afetam o arranjo estrutural das partículas e que produzem efeitos na condutividade hidráulica.

Existem na bibliografia duas explicações para a influência do teor de umidade de moldagem na condutividade hidráulica de solos argilosos compactados. A primeira, proposta por Lambe (1958), relaciona a condutividade hidráulica do solo compactado com a orientação das partículas de solo. A teoria dos agregados de partículas, proposta por Olsen (1962), sugere que a maior parte do fluxo de água em argilas compactadas ocorre nos espaços existentes entre os aglomerados de partículas de argila.

Pinto (2000) destaca o grau de saturação como outro fator de grande importância já que a percolação de água não remove todo ar existente num solo não saturado. Permanecem bolhas de ar contidas pela tensão superficial da água, que constituem obstáculos ao fluxo de água. Desta forma, o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que o que ele apresentaria se estivesse totalmente saturado. A diferença, entretanto, não é muito grande.

A condutividade hidráulica depende não só da quantidade de vazios do solo, mas também da disposição relativa dos grãos. Solos residuais apresentam

condutividades hidráulicas maiores em virtude dos macroporos de sua estrutura. Este fator é marcante também no caso de solos compactados. Geralmente quando compactado mais seco, a disposição das partículas (estrutura chamada floculada) permite maior passagem de água do que quando compactado mais úmido (estrutura dispersa), ainda que com o mesmo índice de vazios (Pinto, 2000).

Benson e Daniel (1990), com o objetivo de verificar a importância da estrutura e dos aglomerados de partículas na condutividade hidráulica de uma argila compactada, estudaram o material a nível microscópico, não encontrando nenhuma evidência de floculação ou dispersão da estrutura do solo em função do teor de umidade de compactação. Segundo os autores, para que a condutividade hidráulica seja minimizada em solos argilosos altamente plásticos que formam aglomerados de partículas, é necessário que os vazios entre os aglomerados sejam eliminados durante a compactação. A eliminação dos aglomerados pode ser feita através da adição de uma quantidade de água suficiente para que os mesmos fiquem menos resistentes pela redução de sucção, ou através da aplicação de uma energia de compactação suficientemente alta para destruir os aglomerados secos e resistentes.

Segundo Daniel (1993), as características mais importantes da água são a quantidade de ar dissolvida, o tipo e concentração de eletrólitos, turbidez, teor de nutrientes e população de microorganismos. Água desaerada é preferível para ser utilizada em ensaios de condutividade hidráulica. Eletrólitos podem influenciar a condutividade hidráulica. Um aumento na concentração de eletrólitos ou na valência dos cátions poderá aumentar a espessura na dupla camada de íons, diminuindo o espaço por onde a água pode passar, diminuindo assim a condutividade hidráulica.

A água destilada pode lixiviar eletrólitos, fazendo com que a dupla camada de íons expanda, também reduzindo a condutividade hidráulica. Turbidez, teor de nutrientes e população de microorganismos também podem afetar a condutividade hidráulica. Entretanto, não são utilizadas águas com estas características a não ser que se queira avaliar os efeitos do crescimento de microorganismos com o tempo ou da turbidez da água na condutividade hidráulica. O autor chama a atenção para a consideração destes fatores na escolha do líquido permeante quando forem testados solos argilosos. A água tratada proveniente da rede de abastecimento é comumente utilizada como permeante e é o líquido recomendado pela norma ASTM D 5084 (1990).

Os ensaios de condutividade hidráulica podem ser conduzidos com água, chorume ou outros compostos químicos como permeante. Compostos químicos requerem algumas considerações especiais em termos de equipamento (Daniel, 1994).

Bowders e Daniel (1987), desenvolveram um estudo cujo objetivo foi determinar qual a concentração de um composto orgânico que poderia alterar significativamente a condutividade hidráulica de uma argila compactada. Os líquidos permeantes utilizados foram metanol, ácido acético, heptano, tricloroetileno e água. Ao final, os autores confirmaram a hipótese de que se um líquido orgânico não afeta as características de sedimentação ou os Limites de Atterberg, o líquido não irá afetar a condutividade hidráulica da argila. Seria necessária a realização de testes de condutividade hidráulica para detectar a influência do líquido permeante nessas condições.

De acordo com Broderick e Daniel (1990), se for possível prevenir as mudanças na estrutura do solo durante a percolação com um agente químico, pode-se manter a baixa condutividade hidráulica inicial do solo. Esta prevenção pode ser feita através da estabilização química, adicionando cimento ou cal para

aumentar a resistência mecânica e tampar parcialmente os poros, ou através da estabilização mecânica, densificando a amostra de solo. Observou-se que as partículas são mais resistentes à alteração (floculação ou orientação) quando estão em uma configuração mais densa, mostrando que o aumento do esforço de compactação possui um grande potencial para a estabilização da argila contra ataque químico. Muitos compostos químicos orgânicos tendem a encolher a dupla camada de íons que está ao redor das partículas de argila, causando a floculação das mesmas. Esta floculação resulta em um encolhimento no esqueleto do solo e no aparecimento de fissuras. Os compostos orgânicos podem também desidratar as zonas entre as camadas de argilas expansivas. A combinação de floculação, fissuração e redução de espessura da dupla camada de íons leva ao aumento da condutividade hidráulica. Os líquidos inorgânicos também podem ocasionar aumento na condutividade hidráulica. Ácidos e bases também podem atacar solos argilosos dissolvendo os minerais do solo.

Em caso de solos argilosos com fluido orgânico como fluido permeante, as propriedades do fluido nos poros, a composição química e mineralógica do solo e a natureza da adsorção do permeante pelas partículas de solo são fatores potencialmente importantes. Não é possível prever a condutividade hidráulica de solos com fluidos orgânicos como permeante baseando-se na medição de condutividade hidráulica com água como permeante, nem é muito sabido sobre a condutividade hidráulica de solos com misturas de fluidos orgânicos e com água como permeante (Budhu et al., 1991).

Gilligam (1983) e Gilligam & Clemence (1984) sugeriram que a adição de líquidos orgânicos em solos ricos em argila causa a formação de tactóides nestes solos. Tactóides são variações definidas na literatura como aglomerações em forma de eixo, de minerais de argila que são dispersos na matriz de solo (Van Olphen, 1963). A formação de tactóides no solo cria uma estrutura mais granular com espaços maiores entre os poros e uma passagem de fluxo mais fácil.

Kinsky et al. (1971) apresentou resultados de ensaios de carga variável e adensamento para sustentar seus argumentos de que a constante dielétrica do fluido nos poros é a maior causa de mudança na condutividade hidráulica. Eles argumentavam que a diminuição na constante dielétrica reduz a espessura da dupla camada na superfície dos minerais do solo (Fig. 2.5) e eles efetivamente diminuem as dimensões dos poros no solo. Quanto menor a constante dielétrica, maior a permeabilidade.

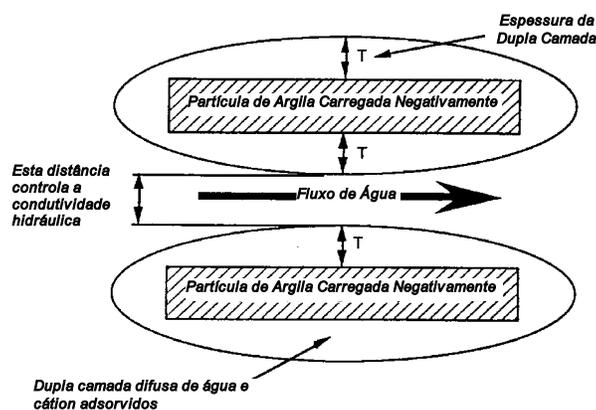


Figura 2.5 – Dupla camada de íons e o seu efeito na condutividade hidráulica (Daniel, 1994)

Van Olphen (1963) sugeriu que a redução na constante dielétrica vai induzir floculação (uma mudança na estrutura), provendo mais espaço entre os poros para o fluxo de fluido.

Algumas investigações têm mostrado que químicos orgânicos concentrados podem alterar a argila compacta e produzir grandes aumentos na condutividade hidráulica (Brown & Anderson, 1983; Brown et al., 1983; Brown et al., 1984; Fernandez & Quingley, 1985; Green et al, 1981; Hamidon, 1984 e Michaels & Lin, 1954). Os aumentos são causados pela redução na espessura da dupla camada difusa (Fig. 2.5) que envolve as partículas de argila (Mesri & Olson, 1971; Mitchell, 1976). A baixa constante dielétrica de químicos orgânicos é responsável pela redução da espessura da dupla camada (Fernandez & Quingley, 1985). Quando a

dupla camada encolhe, as partículas de solo tendem a se juntar, isto é, flocular e formar agregados com macroporos e possivelmente quebrar por redução (encolhimento) da estrutura entre os agregados.

Segundo Suthersan (1997) óleos e graxas podem simplesmente cobrir os grãos de cimento, evitando a reação entre a água e o cimento. Alguns contaminantes orgânicos podem ser adsorvidos pela superfície de cimento e retardar severamente a hidratação do cimento. Outros contaminantes orgânicos são agentes floculantes e destroem a dispersão dos grãos de cimento, o que é vital para a formação de uma estrutura cimentada.

Green et al. (1983) estudou a condutividade hidráulica de várias argilas permeadas com fluidos orgânicos e também concluiu em seu trabalho, que as diferenças na constante dielétrica dos fluidos são responsáveis pelas mudanças na condutividade hidráulica. No entanto, os resultados dele mostram que quanto maior a constante dielétrica maior a condutividade hidráulica, o inverso dos encontrados de Kinsky et al. (1971)

Broderick e Daniel (1990) concluíram que os químicos orgânicos mais agressivos são os com menores constantes dielétricas. Líquidos com baixas constantes dielétricas são mais agressivos porque a espessura da dupla camada adjacente à partícula de argila é diretamente proporcional a constante dielétrica D .

Outro fator importante que influencia a condutividade hidráulica é o tamanho da amostra.

Amostras utilizadas em permeâmetros de parede flexível deverão possuir diâmetro e altura no mínimo seis vezes maiores que a maior partícula de solo da amostra. Esta recomendação encontra-se na norma Americana ASTM D 5084 (1990) – Standard Test Method for Measurement of Conductivity of Saturated

Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, que foi adotada neste trabalho por falta de uma norma brasileira adequada para permeâmetros de parede flexível e solos de baixa condutividade hidráulica.

Geralmente, quanto maior o diâmetro da amostra, mais representativo é o resultado obtido. Utilizam-se amostras entre 25 mm até 150 mm. A razão L/D (altura/ diâmetro) é muito variável, sendo encontrados na bibliografia valores entre 0,25 a 2 (Daniel, 1993; Yanful et al, 1995; Locat et al, 1996). Para permeâmetros de parede flexível recomenda-se a utilização de $L/D = 1$, para evitar as diferenças de tensão efetiva ao longo da amostra, que por sua vez também influenciam os resultados de condutividade hidráulica.

Daniel (1994) relata que os solos altamente compressíveis ou solos com outras características tais como macroporos, fraturas, juntas ou planos de falha são os mais sensíveis a mudanças nas tensões efetivas. Em todos os casos, o aumento das tensões efetivas irá reduzir a porosidade e, portanto, a condutividade hidráulica. Segundo o autor, a melhor prática é submeter à amostra a uma tensão efetiva representativa das condições de campo. Para solos compressíveis deve-se tomar cuidado para que não ocorra consolidação excessiva da amostra, resultando em valores muito baixos de condutividade hidráulica.

Boynton e Daniel (1985) ao avaliar a influência da tensão efetiva, observaram que o nível de tensões influencia principalmente o grau de fechamento das fissuras. A aplicação de uma tensão efetiva de 56 kPa foi capaz de fechar as fissuras, diminuindo a condutividade hidráulica, enquanto que tensões efetivas entre 14 e 28 kPa resultaram em condutividades hidráulicas muito mais elevadas. Os autores chamam atenção para o uso de tensões confinantes muito altas em laboratório, que podem levar a resultados errôneos.

A aplicação de gradientes hidráulicos muito altos pode causar várias alterações no solo. Necessariamente, as tensões efetivas em uma das extremidades do corpo de prova (entrada de água) serão menores do que na outra extremidade do corpo de prova (saída de água). Por isso, quanto maior é o gradiente hidráulico, maior será a diferença nas tensões efetivas. Uma vez que o aumento das tensões efetivas tende a reduzir o índice de vazios, haverá uma consolidação excessiva na porção final da amostra, diminuindo a condutividade hidráulica (Carpenter e Stephenson, 1986; Daniel, 1993).

Tavenas et al, (1983) recomendam que o gradiente hidráulico seja aplicado mediante um aumento de tensão $\Delta P/2$ no topo e uma diminuição de tensão $\Delta P/2$ na base da amostra, onde ΔP é a diferença entre as tensões de base e topo da amostra, com o objetivo de diminuir os efeitos da consolidação na base da amostra ocasionada pelas diferenças de tensões efetivas ao longo da mesma.

Gradientes hidráulicos altos tendem a carrear partículas finas do solo, ocasionando dois tipos de problemas: (1) as partículas finas podem ficar aprisionadas na porção final do corpo de prova, reduzindo a condutividade hidráulica e (2) as partículas finas podem ser totalmente carreadas dos solos mais granulares, aumentando a condutividade hidráulica. Em geral, devem ser utilizados gradientes hidráulicos que se aproximem aos valores encontrados em campo. A norma Americana ASTM D 5084 recomenda limites a serem utilizados em solos com baixa condutividade hidráulica.

A viscosidade do líquido permeante também é um fator que afeta a condutividade hidráulica do solo variando com a temperatura. Com água, a condutividade hidráulica varia aproximadamente 3% para cada 1°C de mudança na temperatura (ver norma ASTM D 5084). As correções para os efeitos da temperatura são facilmente feitas.

2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DE SOLOS CIMENTADOS

De maneira geral, a adição de cimento aumenta a resistência e a rigidez, diminui a compressibilidade e altera os limites de consistência; a condutividade hidráulica é reduzida nos solos granulares, mas pode aumentar nos solos argilosos; a durabilidade medida em ciclos de molhagem e secagem aumenta (Montardo, 1999).

Agentes cimentantes de natureza pozolânica, artificialmente introduzidos em mecanismos de estabilização de solos têm, no tempo de cura, uma das variáveis mais significativas para a caracterização do comportamento mecânico, uma vez que este fator afeta diretamente a efetividade do grau de cimentação da mistura (e.g. Mallmann, 1996; Ceratti, 1979; Mateos, 1961).

Segundo Prietto (1996), todos os aspectos analisados do comportamento mecânico do solo residual de arenito artificialmente cimentado com cimento pozolânico, foram, em maior ou menor grau, influenciados pela variação do grau de cimentação e da tensão efetiva média inicial.

Bellezza & Pasqualini (1997) estudaram a influência da adição de cimento e do tempo de cura na condutividade hidráulica de dois siltes argilosos e uma areia siltosa. Os resultados demonstraram que os valores de condutividade hidráulica obtidos com a adição de cimento dependem do tipo de solo e da umidade em que são feitas a mistura e a compactação. A adição de cimento pode provocar valores de condutividade hidráulica maiores ou menores em relação ao solo não tratado. Verificou-se que o tempo de cura diminui o valor da condutividade hidráulica, podendo este chegar a valores muito menores que os do solo não tratado. Outra observação importante é que as misturas solo-cimento percoladas imediatamente após a compactação apresentam condutividades hidráulicas menores que as mesmas misturas percoladas após um certo tempo.

2.4 DERIVADOS DE PETRÓLEO E SUAS INTERAÇÕES COM O SOLO

Baseado no ponto de ebulição (Newmann et al. 1981), os vários produtos do petróleo podem ser agrupados como:

- (i) gasolinas leves (ponto de ebulição de 30° a 100° C),
- (ii) gasolinas pesadas (ponto de ebulição de 100° a 200° C), e
- (iii) diesel e querosene (ponto de ebulição de 200° a 300° C)

Os hidrocarbonetos policíclicos são hidrocarbonetos complexos e podem conter grupos aromáticos tanto quanto cicloalcanos na mesma molécula ou podem conter mais de um anel aromático (Fig. 2.6). Tais hidrocarbonetos policíclicos são encontrados na fração diesel e querosene que fazem parte do grupo iii (Yong & Rao, 1991)

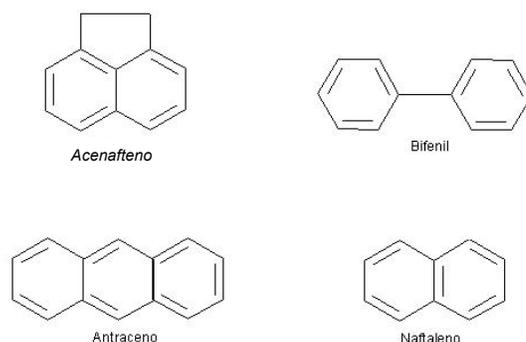


Fig. 2.6 – Estrutura química de hidrocarbonetos policíclicos (Yong et al. 1991).

Com relação à interação solo e contaminante, o grupo funcional de solos que podem interagir com contaminantes contendo hidrocarbonetos de petróleo (PHC) inclui os grupos funcionais de hidroxilas superficiais, inorgânicas e orgânicas. O grupo funcional de hidroxila inorgânica superficial pode ser encontrado em argilas minerais cristalinas, minerais amorfos de silicato, óxidos metálicos, oxihidróxidos e hidróxidos.

Algumas mudanças nas propriedades físicas do solo podem ocorrer na interação com moléculas PHC, através da fraca interação com a superfície da

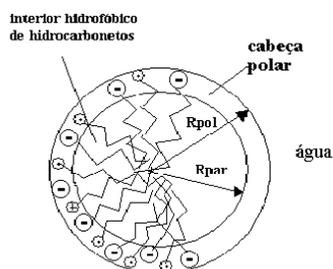
argila pelas forças de atração de Van der Waals. As moléculas PHC apolares nos vazios do solo podem influenciar as propriedades físicas do solo. A condutividade hidráulica do solo é um parâmetro físico de importância do solo na interação solo contaminante (para solos com $k > 10^{-8}$ m/s), em função de que ela controla o movimento do fluido através do solo.

Mitchell e Madsen (1987) revisaram várias investigações e chegaram às seguintes conclusões sobre os efeitos dos hidrocarbonetos na condutividade hidráulica dos solos argilosos. Soluções diluídas, isto é, concentrações na solubilidade limite ou mais baixa de hidrocarbonetos na água, não tem efeito na condutividade hidráulica de solos argilosos. Permeação com hidrocarbonetos puros invariavelmente influencia a condutividade hidráulica da argila. O grau de efeito depende do método de ensaio de condutividade hidráulica utilizado. Permeação com hidrocarbonetos puros levam a uma diminuição na condutividade hidráulica de solos argilosos quando se utiliza permeâmetro de parede flexível e pode levar a um aumento de mais de três ordens de magnitude quando se utiliza permeâmetro de parede rígida. O aumento na condutividade hidráulica em ensaios de parede rígida com passagem de hidrocarbonetos puros é atribuído ao encolhimento do solo, levando desse modo à formação de fissuras e macroporos. Fluxo de hidrocarbonetos concentrados através de solos argilosos é predominantemente através de fissuras e macroporos. Muita da água dos microporos permanecem no solo.

Hidrocarbonetos de petróleo (PHC's) são compostos de uma mistura de alcanos apolares e aromáticos e hidrocarbonetos policíclicos que tem solubilidade limitada em água. A apolaridade de moléculas PHC's permitem somente interações fracas com a superfície de argila (Van der Waals). Os níveis de adsorção de vários hidrocarbonetos são conseqüentemente mais baixos. A adsorção dos hidrocarbonetos pela superfície de argila ocorre somente quando a solubilidade (na água) é excedida e os hidrocarbonetos são acomodados na forma

micelar. Uma consequência importante dessa relação é que a fração aromática dos produtos de petróleo (que são as mais tóxicas) tem a menor afinidade para a superfície da argila. Soluções diluídas de hidrocarbonetos na água não têm efeito na condutividade hidráulica de solos argilosos.

Em solventes polares as moléculas anfifílicas (surfactantes) posicionam as cabeças polares para a parte mais externa do agregado e encerram a cadeia parafínica para a região interna. A este sistema dá-se o nome de micelas (Fig.2.7)



Esquema ilustrativo de uma micela

R_{par} —dimensão da parte parafínica, R_{pol} —dimensão total da micela que inclui as cabeças polares e água de hidratação.

Fig. 2.7 – Esquema ilustrativo de uma Micela (Fonte :Barros, V.P.)

Segundo Button (1976), Meyers e Quinn (1973), e Meyers e Oas (1978), alguns fatores que influenciam interações entre moléculas PHC e partículas de argilominerais como a adsorção de hidrocarbonetos pela superfície de argila ocorre somente quando a solubilidade de hidrocarboneto é excedida e o hidrocarboneto existe na forma micelar. O principal modo de interação micelar com a superfície da partícula de argila era inferido como força de atração de Van der Waals para os valores de adsorção computados.

A agregação das moléculas de hidrocarbonetos na formação micelar levaria substancialmente a um aumento nas forças de Van der Waals da superfície de argila e é presumivelmente responsável pela remoção de moléculas de hidrocarbonetos da água.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL , MATERIAIS E MÉTODOS

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa está dividido em duas partes, a primeira delas visa validar o equipamento construído no ENVIRONGEO/UFRGS através da comparação de resultados de ensaios de condutividade hidráulica realizados por Heineck (2002). A segunda parte visa verificar a eficácia da técnica de solidificação e estabilização de solos contaminados.

3.1 ENSAIOS PARA VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para a validação do equipamento permeâmetro de parede flexível segundo a norma ASTM D 5084-90 foram realizados três ensaios de condutividade hidráulica nos seguintes materiais: uma amostra de solo residual de arenito da Formação Botucatu (SRAB); uma amostra de cinza volante e outra de cinza pesada. Estes três ensaios foram comparados aos resultados obtidos por Heineck (2002) em equipamento similar. Os ensaios realizados visaram validar o equipamento construído no ENVIRONGEO/UFRGS.

3.2 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

Para verificação da aplicabilidade da técnica de solidificação/estabilização de solos contaminados foram utilizadas amostras de solo residual de arenito da Formação Botucatu, o cimento Portland CP V - ARI e o óleo diesel. As amostras foram submetidas a ensaios de compactação, resistência à compressão simples, condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível, caracterização mineralógica por difração de raios X e análise petrográfica de laminas delgadas.

Inicialmente obteve-se a curva de compactação de solo residual de arenito Botucatu segundo a NBR 7182/86, sem adições. Para os ensaios de compressão simples (NBR 12025) e condutividade hidráulica (ASTM 5084 D) utilizaram-se os materiais em conjunto, ou seja, matriz de solo residual de arenito Botucatu contaminada com óleo diesel e encapsulada com cimento Portland. A porcentagem dos materiais foi calculada da seguinte maneira: a porcentagem do cimento Portland CPV – ARI foi sobre o peso total de sólidos secos da amostra de solo. As amostras estavam na umidade ótima, que era de 14,2%, e a porcentagem de óleo diesel na amostra foi em relação ao peso de líquidos da amostra na umidade ótima. As proporções utilizadas para os ensaios de compressão simples estão na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 – Ensaios de resistência à compressão simples (proporções dos materiais).

Amostra	Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)	Cimento CP V – ARI (%)	Água destilada (%)	Óleo Diesel (%)	Tempo de cura (dias)
100% SRAB	100	0	14,2	0	0
SRAB+0% Cimento 10% óleo diesel	100	0	12,78	1,42	0

Continuação da Tabela 3.1 – Ensaios de resistência à compressão simples.

<i>Amostra</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)</i>	<i>Cimento CP V – ARI (%)</i>	<i>Água destilada (%)</i>	<i>Óleo Diesel (%)</i>	<i>Tempo de cura (dias)</i>
<i>SRAB+0% Cimento 20% óleo diesel</i>	100	0	11,36	2,84	0
<i>SRAB+0% Cimento 30% óleo diesel</i>	100	0	9,94	4,26	0
<i>SRAB+0% Cimento 40% óleo diesel</i>	100	0	8,52	5,68	0
<i>SRAB+0% Cimento 50% óleo diesel</i>	100	0	7,1	7,1	0
<i>SRAB+0% Cimento 75% óleo diesel</i>	100	0	3,55	10,65	0
<i>SRAB+0% Cimento 100% óleo diesel</i>	100	0	0	14,2	0
<i>SRAB+10% Cimento 0% óleo diesel</i>	90	10	14,2	0	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 10% óleo diesel</i>	90	10	12,78	1,42	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 20% óleo diesel</i>	90	10	11,36	2,84	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 30% óleo diesel</i>	90	10	9,94	4,26	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 40% óleo diesel</i>	90	10	8,52	5,68	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 50% óleo diesel</i>	90	10	7,1	7,1	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 75% óleo diesel</i>	90	10	3,55	10,65	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 100% óleo diesel</i>	90	10	0	14,2	3 e 7
<i>SRAB+20% Cimento 0% óleo diesel</i>	80	20	14,2	0	3 e 7
<i>SRAB+20% Cimento 10% óleo diesel</i>	80	20	12,78	1,42	3 e 7
<i>SRAB+20% Cimento 20% óleo diesel</i>	80	20	11,36	2,84	3 e 7
<i>SRAB+10% Cimento 30% óleo diesel</i>	80	20	9,94	4,26	3 e 7
<i>SRAB+20% Cimento 40% óleo diesel</i>	80	20	8,52	5,68	3 e 7

Continuação da Tabela 3.1 – Ensaio de resistência à compressão simples.

<i>Amostra</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)</i>	<i>Cimento CP V – ARI (%)</i>	<i>Água destilada (%)</i>	<i>Óleo Diesel (%)</i>	<i>Tempo de cura (dias)</i>
<i>SRAB+20% Cimento 50% óleo diesel</i>	80	20	7,1	7,1	3 e 7
<i>SRAB+20% Cimento 75% óleo diesel</i>	80	20	3,55	10,65	3 e 7
<i>SRAB+20% Cimento 100% óleo diesel</i>	80	20	0	14,2	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 0% óleo diesel</i>	70	30	14,2	0	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 10% óleo diesel</i>	70	30	12,78	1,42	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 20% óleo diesel</i>	70	30	11,36	2,84	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 30% óleo diesel</i>	70	30	9,94	4,26	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 40% óleo diesel</i>	70	30	8,52	5,68	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 50% óleo diesel</i>	70	30	7,1	7,1	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 75% óleo diesel</i>	70	30	3,55	10,65	3 e 7
<i>SRAB+30% Cimento 100% óleo diesel</i>	70	30	0	14,2	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 0% óleo diesel</i>	60	40	14,2	0	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 10% óleo diesel</i>	60	40	12,78	1,42	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 20% óleo diesel</i>	60	40	11,36	2,84	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 30% óleo diesel</i>	60	40	9,94	4,26	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 40% óleo diesel</i>	60	40	8,52	5,68	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 50% óleo diesel</i>	60	40	7,1	7,1	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 75% óleo diesel</i>	60	40	3,55	10,65	3 e 7
<i>SRAB+40% Cimento 100% óleo diesel</i>	60	40	0	14,2	3 e 7

Continuação da Tabela 3.1 – Ensaios de resistência à compressão simples.

<i>Amostra</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)</i>	<i>Cimento CP V – ARI (%)</i>	<i>Água destilada (%)</i>	<i>Óleo Diesel (%)</i>	<i>Tempo de cura (dias)</i>
<i>SRAB+50%Cimento 0% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>14,2</i>	<i>0</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50%Cimento 10% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>12,78</i>	<i>1,42</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50% Cimento 20% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>11,36</i>	<i>2,84</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50% Cimento 30% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>9,94</i>	<i>4,26</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50% Cimento 40% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>8,52</i>	<i>5,68</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50% Cimento 50% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>7,1</i>	<i>7,1</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50% Cimento 75% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>3,55</i>	<i>10,65</i>	<i>3 e 7</i>
<i>SRAB+50% Cimento 100% óleo diesel</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>0</i>	<i>14,2</i>	<i>3 e 7</i>

Posteriormente a etapa dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) passou-se à etapa dos ensaios de condutividade hidráulica do mesmo material. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM 5084 D. As proporções utilizadas estão na Tabela 3.2 a seguir:

Tabela 3.2 – Ensaio de condutividade hidráulica (proporções dos materiais).

<i>Amostra</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)</i>	<i>Cimento CP V – ARI (%)</i>	<i>Água destilada (%)</i>	<i>Óleo Diesel (%)</i>	<i>Tempo de cura (dias)</i>
<i>100% SRAB</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>14,2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>SRAB+0% Cimento 10% óleo diesel</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>12,78</i>	<i>1,42</i>	<i>0</i>
<i>SRAB+0% Cimento 20% óleo diesel</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>11,36</i>	<i>2,84</i>	<i>0</i>

Continuação da Tabela 3.2 – Ensaio de condutividade hidráulica.

<i>Amostra</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)</i>	<i>Cimento CP V – ARI (%)</i>	<i>Água destilada (%)</i>	<i>Óleo Diesel (%)</i>	<i>Tempo de cura (dias)</i>
<i>SRAB+0% Cimento 40% óleo diesel</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>8,52</i>	<i>5,68</i>	<i>0</i>
<i>SRAB+10%Cimento 0% óleo diesel</i>	<i>90</i>	<i>10</i>	<i>14,2</i>	<i>0</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+10%Cimento 10% óleo diesel</i>	<i>90</i>	<i>10</i>	<i>12,78</i>	<i>1,42</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+10% Cimento 20% óleo diesel</i>	<i>90</i>	<i>10</i>	<i>11,36</i>	<i>2,84</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+10% Cimento 40% óleo diesel</i>	<i>90</i>	<i>10</i>	<i>8,52</i>	<i>5,68</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+20%Cimento 0% óleo diesel</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>14,2</i>	<i>0</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+20%Cimento 10% óleo diesel</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>12,78</i>	<i>1,42</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+20% Cimento 20% óleo diesel</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>11,36</i>	<i>2,84</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+20% Cimento 40% óleo diesel</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>8,52</i>	<i>5,68</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+30%Cimento 0% óleo diesel</i>	<i>70</i>	<i>30</i>	<i>14,2</i>	<i>0</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+30%Cimento 10% óleo diesel</i>	<i>70</i>	<i>30</i>	<i>12,78</i>	<i>1,42</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+30% Cimento 20% óleo diesel</i>	<i>70</i>	<i>30</i>	<i>11,36</i>	<i>2,84</i>	<i>3</i>
<i>SRAB+30% Cimento 40% óleo diesel</i>	<i>70</i>	<i>30</i>	<i>8,52</i>	<i>5,68</i>	<i>3</i>

Obs: o tempo de cura foi de 3 dias para o início do ensaio (montagem do ensaio e colocação da amostra para percolação) e aproximadamente 7 dias para a medição de condutividade hidráulica.

A última etapa consistiu em execução de análise da morfologia do material através de análise petrográfica convencional por meio de um microscópio petrográfico nas amostras ensaiadas de arenito com adições de cimento e óleo diesel. As dosagens utilizadas para microscopia estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Análise Petrográfica das amostras (proporções dos materiais).

<i>Amostra</i>	<i>Solo residual de arenito Botucatu (SRAB) (%)</i>	<i>Cimento CP V – ARI (%)</i>	<i>Água destilada (%)</i>	<i>Óleo Diesel (%)</i>	<i>Tempo de cura (dias)</i>
<i>SRAB+10%Cimento 0% óleo diesel</i>	90	10	14,2	0	3
<i>SRAB+10%Cimento 10% óleo diesel</i>	90	10	12,78	1,42	3
<i>SRAB+10% Cimento 20% óleo diesel</i>	90	10	11,36	2,84	3
<i>SRAB+10% Cimento 40% óleo diesel</i>	90	10	8,52	5,68	3

Foi realizada também análise de difração por raios X de uma amostra de solo residual de arenito Botucatu sem adições. A difração por raios X foi feita na amostra natural, amostra glicolada e amostra calcinada a 500° C.

MATERIAIS

3.3 SOLO RESIDUAL DE ARENITO BOTUCATU (SRAB)

O solo utilizado na pesquisa é uma areia fina siltosa, fracamente plástica. Trata-se de um solo residual (horizonte C), substrato de arenito, pertencente à Formação Botucatu da Bacia do Paraná (Scherer, 1998). A jazida de onde foram coletadas as amostras apresenta um talude, de aproximadamente 20m de altura, situado às margens da rodovia estadual RS-240, na localidade de Vila Scharlau, município de São Leopoldo / RS, conforme ilustrada nas Figura 3.1 e 3.2.

O solo foi escolhido principalmente devido à existência de trabalhos prévios de caracterização (Núñez, 1991; Prietto, 1996; Ulbrich, 1997; Thomé, 1999). Núñez (1991) constatou a homogeneidade da jazida ao realizar ensaios ao longo de sua profundidade. Thomé (1999) realizou ensaios adicionais de caracterização do solo, verificando que as amostras utilizadas em seu experimento eram consistentes com o conjunto de resultados obtidos pelo primeiro autor. A Figura 3.3 e a Tabela 3.4 apresentam a classificação e a curva granulométrica, respectivamente, obtida para o solo residual com o uso de defloculante. As propriedades físicas médias do solo, determinadas por Núñez (1991) e Thomé (1999) são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Classificação granulométrica do SRAB (Thomé, 1999).

<i>Material</i>	<i>Porcentagem</i>	<i>Classificação HRB</i>	<i>Classificação unificada</i>
<i>Argila</i>	<i>14%</i>	<i>A - 4</i>	<i>SM (Areia siltosa)</i>
<i>Silte</i>	<i>29,9%</i>		
<i>56,1% de areia</i>	<i>47,3 % de areia fina</i>		
	<i>8,8% de areia média</i>		

Nuñez (1991) determinou as principais propriedades físico-químicas do solo residual, com ênfase para a mineralogia e a composição química da fração argila. Estas análises realizadas indicaram a predominância do argilomineral caulinita. Observou-se, também, a presença de 3,2% de hematita, que é o óxido responsável pela cor rosada característica do solo residual de arenito Botucatu.



Figura 3.1 – Jazida de arenito Botucatu (Vila Scharlau)

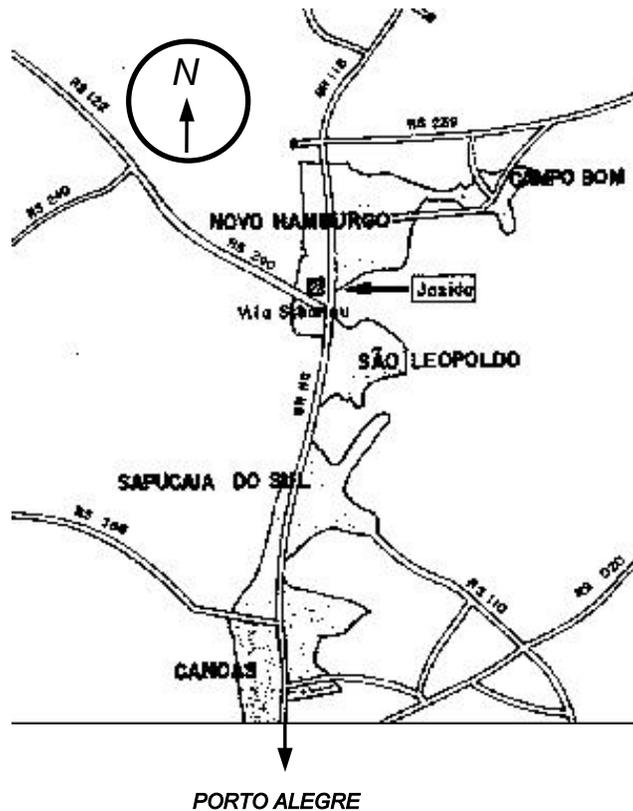


Figura 3.2– Localização da jazida de solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).

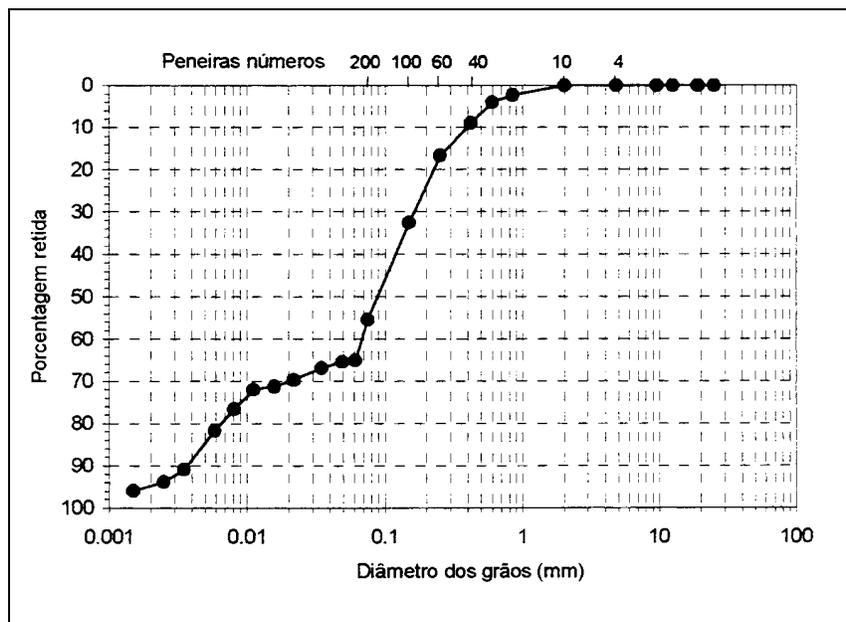


Figura 3.3 – Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu (Thomé, 1999).

Através da Tabela 3.5 pôde-se comparar os valores obtidos para a curva de compactação, como a densidade máxima e a umidade ótima, na energia de compactação de Proctor Normal, com os valores obtidos na curva de compactação realizada no presente trabalho.

Tabela 3.5 – Propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu.

<i>Propriedades</i>	<i>Valores médios (Núñez, 1991)</i>	<i>Valores médios (Thomé, 1999)</i>
<i>Limite de Liquidez (LL)</i>	21%	22%
<i>Limite de Plasticidade (LP)</i>	17%	19%
<i>Índice de Plasticidade (IP)</i>	4%	3%
<i>Limite de Contração (LC)</i>	19%	-
<i>Densidade Real dos Grãos (γ_s)</i>	26,7 kN/m ³	26,7 kN/m ³
<i>Diâmetro Efetivo (D_{10})</i>	0,003 mm	0,004 mm
<i>Coefficiente de Uniformidade (C_u)</i>	43	30
<i>Densidade Máxima (γ_d) – (Proctor Normal)</i>	17,40 kN/m ³	-
<i>Umidade Ótima (ω_{ot}) – (Proctor Normal)</i>	15,90%	-
<i>Densidade Máxima (γ_d) – (Proctor Modif.)</i>	18,90 kN/m ³	19,40 kN/m ³
<i>Teor de umidade ótima (ω_d) – (Proctor Modif.)</i>	13,90%	12,10%

3.4 CIMENTO PORTLAND

Os componentes essenciais são o CaO (obtido de calcário), SiO₂ e Al₂O₃ (obtidos de argilas, preferencialmente cauliniticas), com pequenas quantidades de Fe₂O₃ (proveniente de impurezas da argila). Calcário e argila, nas proporções aproximadas de 4:1, são moídos (50 a 200 mesh) e misturados (via seca ou via úmida) e queimados (em longos fornos rotativos) à temperaturas de até 1450°C.

Água e CO_2 são eliminados, formando-se o clínquer, que são pelotas vítreas de tamanho de bolas de gude. Ao clínquer é adicionado cerca de 2,5% de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sendo o conjunto moído para constituir o cimento (Moreira, 1994).

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) embora contemplado pela ABNT com uma norma separada do cimento Portland comum, é na verdade um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (Tabela 3.6 e Figura 3.4).

Tabela 3.6 - Composição do cimento portland de alta resistência inicial (adapt. de ABCP)

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	100 - 95	0 - 5	NBR 5733

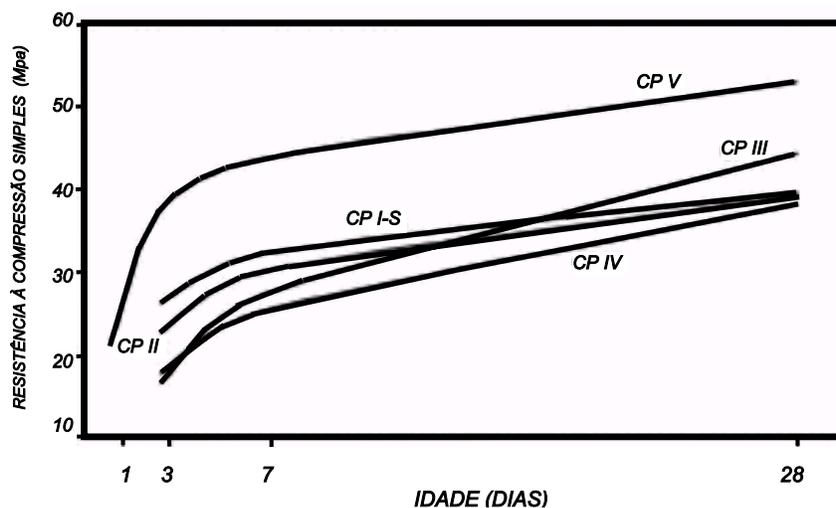


Figura 3.4 - Evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento portland.

Justifica-se a utilização de cimento Portland CP V-ARI através da Figura 3.4, onde a resistência à compressão para 3 dias de cura é equivalente à resistência aos 28 dias de cura do cimento Portland CP IV e para 7 dias de cura com cimento CP V-ARI à resistência a compressão se equivale à resistência aos 28 dias de cura do cimento Portland CP III.

3.5 ÓLEO DIESEL

O óleo diesel utilizado nos ensaios foi fornecido pela Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP/PETROBRÁS, situada em Canoas/RS.

É considerado perigoso à ingestão e aspiração devido a sua composição (Tabela 3.7). Tem como características o ponto de fulgor $< -43^{\circ}\text{C}$ e temperatura de auto-ignição em 257°C . Suas propriedades físico-químicas vão desde sua aparência, que se denomina “líquido amarelo límpido (isento de materiais em suspensão)”, passando por sua solubilidade (sendo o mesmo insolúvel em água) e cheiro característico.

Tabela 3.7 – Componentes do óleo diesel (REFAP, 2003)

Componentes	Concentração
Hidrocarbonetos Saturados	70-75% (volume)
Hidrocarbonetos Olefínicos	< 1% (volume)
Hidrocarbonetos Aromáticos	20-30% (volume)
Enxofre	< 0,5% (peso)
Ponto de ebulição	174° C
Densidade	0,82 a 0,86

Em caso de contaminação de água, o produto pode formar películas superficiais sobre a água. É moderadamente tóxico à vida aquática. Pode transmitir qualidades indesejáveis à água, afetando o seu uso. Quanto à

contaminação do solo, por percolação pode degradar a qualidade das águas do lençol freático, além de contaminar as plantas existentes. Seu pH medido em laboratório está em torno de 5,8.

3.6 ÁGUA

A água utilizada nos ensaios para a moldagem dos corpos de prova é água da rede pública de abastecimento e a água utilizada para o ensaio de condutividade hidráulica é água destilada. Seu pH medido em laboratório está em torno de 6,1.

MÉTODOS

3.7 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS

A caracterização foi realizada por diversos autores anteriormente (Núñez, 1991; Prietto, 1996; Ulbrich, 1997; Thomé, 1999; Casagrande, 2001). As amostras foram coletadas na jazida da Vila Scharlau (Figuras 3.1 e 3.2), colocadas ao ar livre para secar e posteriormente foram destorroadas e peneiradas (peneira N°10) para o uso em laboratório e preparada segundo a NBR 6457/86.

3.8 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A realização dos ensaios de compactação do SRAB seguiu a norma NBR 7182/86, onde foi obtida a curva de compactação na energia de Proctor normal para o SRAB utilizado na pesquisa.

3.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples do SRAB nas proporções que estão citadas no programa experimental foram feitos de acordo com a norma NBR 12025/90 – “Solo-cimento-ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos”. Os ensaios são feitos com SRAB na umidade ótima, com parâmetros de moldagem obtidos da curva de compactação realizada anteriormente. Os corpos-de-prova foram moldados e rompidos em uma prensa de CBR do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS.

Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova

Os ensaios de compressão simples com adição de cimento portland CP V - ARI são realizados com tempos de cura de 3 e 7 dias conforme a norma NBR 12024/92 – Moldagem e Cura de corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova utilizados para este ensaio têm dimensões de aproximadamente 5cm de diâmetro e aproximadamente 10cm de altura.



Figura 3.5- Moldagem de corpos de prova.

3.10 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL.

O permeâmetro de parede flexível foi projetado e construído durante a presente pesquisa no ENVIRONGEO/UFRGS, adaptado para utilização de materiais contaminantes, tanto na percolação quanto no corpo de prova a ser ensaiado.

O projeto foi feito nas quatro pranchas que estão ilustradas nas figuras 3.6 e 3.7, a seguir. Nelas estão as dimensões utilizadas para a construção do equipamento.

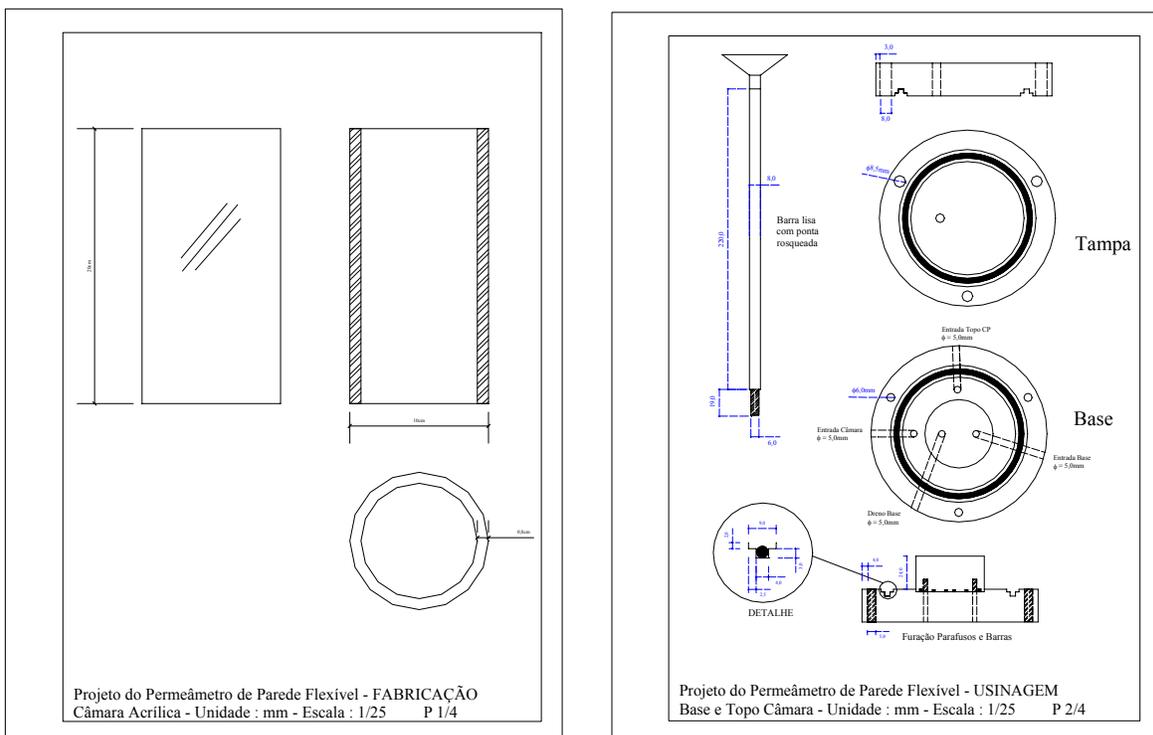


Figura 3.6 –Prancha 1 e 2 projeto da câmara acrílica e base e tampa da câmara.

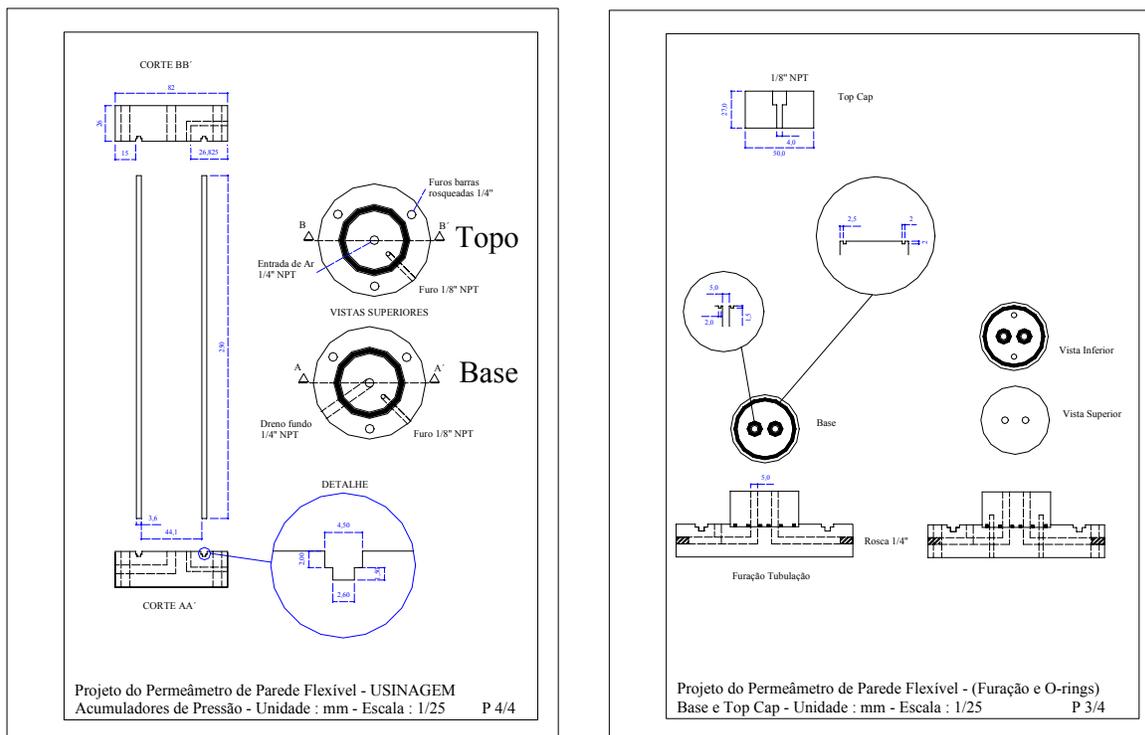


Figura 3.7 –Prancha 3 e 4 projeto dos acumuladores de pressão e da base e top cap do corpo de prova.

O equipamento utilizado para este ensaio foi desenvolvido de acordo com a norma americana ASTM D-5084-90. “Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter”. Este equipamento é adequado para solos que tenham condutividade hidráulica menor ou igual a 1×10^{-5} m/s (1×10^{-3} cm/s), ou seja, solos não granulares, com baixa condutividade hidráulica.

No desenvolvimento deste equipamento (Fig. 3.8) teve-se o cuidado de utilizar materiais que fossem inertes ao ataque de produtos contaminantes e tóxicos, como é o caso dos hidrocarbonetos que constituem o óleo diesel utilizado nesta pesquisa. Deste modo, grande parte das peças que compõem o equipamento são em aço inox. Em virtude do alto custo do aço inox, algumas partes em que não há contato com material contaminante são constituídas de

outros materiais como latão. Os tubos são constituídos de nylon onde há contaminação e polietileno para a passagem de água e ar comprimido.

O projeto e construção do equipamento foram realizados no ENVIRONGEO, sendo que a totalidade das peças que constituem o equipamento foram usinadas sob encomenda; as conexões, válvulas e tubos foram adquiridas no comércio especializado. Após a conclusão da montagem do equipamento iniciou-se o teste do equipamento, onde se simulou as condições do ensaio com o objetivo de verificar o funcionamento e a estanqueidade no equipamento.



Figura 3.8 – Permeâmetro de Parede Flexível desenvolvido no ENVIRONGEO/ UFRGS.

A Figura 3.9 mostra esquematicamente o equipamento permeâmetro de parede flexível montado no ENVIRONGEO / UFRGS com todas as instalações necessárias para o seu funcionamento.

O equipamento é constituído por uma célula triaxial (Fig. 3.10) onde o corpo-de-prova é colocado no interior da mesma célula sobre uma base de mesmo diâmetro, entre duas pedras porosas (Fig. 3.11). No confinamento lateral é utilizada uma membrana de látex, cujas extremidades são fixadas à base e top cap, de aço inox, por meio de o-rings.

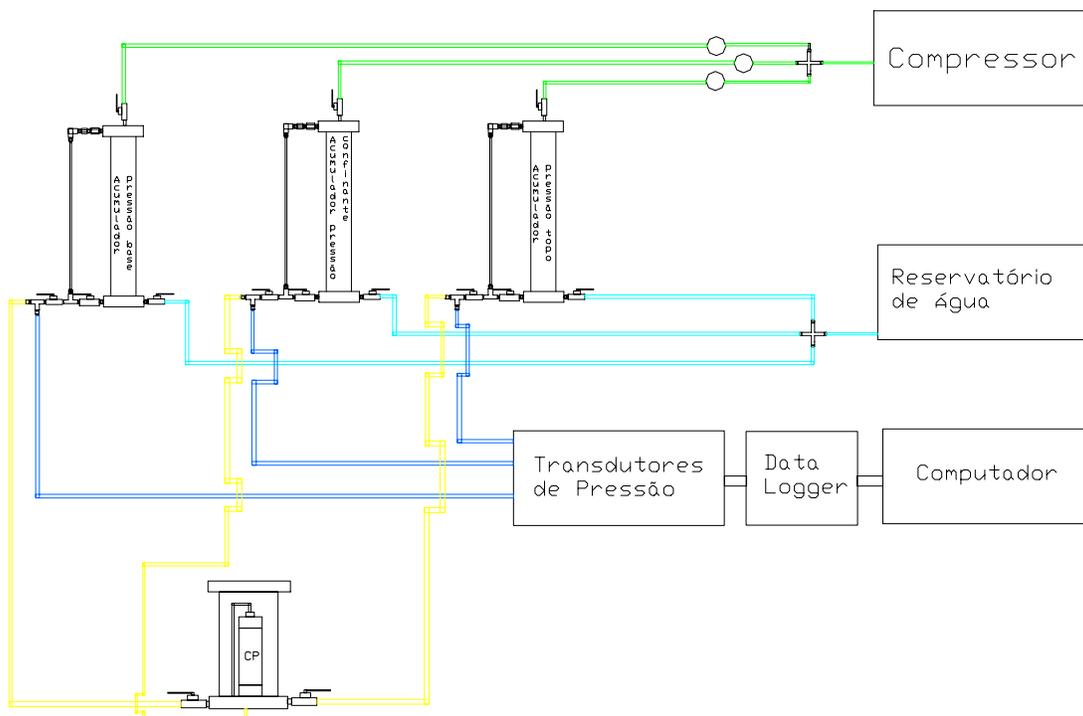


Figura 3.9 – Esquema do equipamento Permeâmetro de Parede Flexível construído no ENVIRONGEO / UFRGS.



Figura 3.10 – Câmara triaxial



Figura 3.11 - Detalhe da pedra porosa de bronze

O sistema de aplicação de pressão é constituído por três câmaras de aço inox, chamados de acumuladores de pressão (Fig. 3.12), que fazem a interface ar comprimido - água, ou seja, transferem a pressão do ar para a água, aplicando as tensões no corpo-de-prova. Dois destes acumuladores são conectados a amostra (um na base e outro no top cap), sendo responsáveis pela tensão de base e topo; o terceiro acumulador é responsável pela tensão confinante. No topo dos acumuladores foram acoplados os tubos para a aplicação do ar comprimido e na base foram conectadas as tubulações de transmissão de tensão e o sistema de abastecimento de água. Junto aos acumuladores foram instalados tubos de nylon graduados, que permitem a visualização do nível de água no interior dos acumuladores.

A ligação entre os acumuladores e a célula é feita por meio de tubos, conexões e válvulas. O líquido empregado nas câmaras pressurizadas e como líquido permeante é água destilada, sendo possível a utilização de outro líquido que se queira estudar.



Figura 3.12 – Acumuladores de pressão em aço inox

Como o ensaio consiste em monitorar as tensões confinantes, base e topo, foram instalados dois transdutores de pressão, sendo um deles utilizado para a monitoração da tensão confinante e o outro é usado para monitoramento da tensão topo e base alternadamente. Os transdutores eletrônicos de pressão foram conectados a um datalogger que converte os

dados de corrente elétrica em dados computacionais, os quais são enviados a um microcomputador que gerencia as informações através de um software específico.

Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova

Os ensaios de condutividade hidráulica onde há a adição de cimento portland CP V - ARI foram realizados com tempo de cura de 3 dias, conforme a norma NBR 12024/92 – Moldagem e Cura de corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova utilizados para este ensaio tinham dimensões de aproximadamente 5cm de diâmetro e aproximadamente 10cm de altura.

3.10.1 Procedimento de ensaio

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados seguindo algumas etapas que são as seguintes:

INSTALAÇÃO DA AMOSTRA

Consiste em instalar a amostra na câmara, com as pedras porosas (Fig. 3.11) e papel filtro nas extremidades. Colocando-se o filme de PVC no entorno da amostra, evitando-se assim o contato do solo contaminado com a membrana de látex, que colocada posteriormente é fixada com o-rings nas extremidades. Após selar a câmara procede-se o enchimento da mesma com água (Fig. 3.13).



Figura 3.13 – Câmara triaxial de pressão com a amostra de solo instalada.

FASE DE PERCOLAÇÃO

Esta fase visa a eliminação de bolhas de ar na amostra e facilita a saturação do corpo-de-prova.

O procedimento iniciou-se com a aplicação de uma contra-pressão (altura de coluna d'água disponível para percolação) e uma tensão de confinamento na amostra, de modo que a tensão efetiva fique em aproximadamente 10 kPa. A base deve estar conectada ao reservatório de água e o topo à pressão ambiente, para que haja fluxo.

Esta etapa durou até que fossem percolados duas vezes o volume de vazios da amostra.

FASE DE SATURAÇÃO

Aplicou-se incrementos de tensão isotrópica de 50 kPa de modo que a tensão efetiva ficasse no máximo entre 15 e 20 kPa. Exemplo:

- a) Os incrementos de TC eram aplicados ao mesmo tempo, abrindo-se a válvula da tensão confinante um pouco antes da contra-pressão (aplicada no topo do corpo-de-prova). O novo incremento era aplicado somente depois que a contra-pressão que foi aplicada no topo do corpo-de-prova atingisse a base do corpo-de-prova, ou seja, somente depois que a pressão estivesse equalizada por todo o corpo de prova. A tensão confinante máxima utilizada depende da capacidade do equipamento e da tensão efetiva do ensaio. A contra-pressão deve ser de no mínimo 200 kPa para que as bolhas de ar sejam dissolvidas na água. A saturação foi monitorada pelo parâmetro B.*

FASE DE ADENSAMENTO

Na fase de adensamento mediu-se a variação volumétrica do corpo-de-prova quando aplicada a tensão efetiva em que ocorreu o ensaio. Consiste em

aplicar um incremento de tensão confinante desejado, deixando a drenagem aberta verificando-se assim o volume de água que sai da amostra, até atingir a estabilidade de volume.

FASE DE MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios desta pesquisa foram realizados com carga hidráulica constante, considerando-se válida a lei de Darcy, sendo que a vazão média era dada pelo quociente do volume total de água passante na amostra e tempo total de ensaio. Utilizando-se a seguinte equação para o cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica:

$$k = \frac{L.Q}{A.t.h} \quad (5),$$

sendo,

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

Q = Vazão de água passante pela amostra (m^3);

A = área transversal da amostra (m^2);

L = comprimento da amostra (m);

h = carga hidráulica (m);

t = duração do ensaio (s)

A variáveis como A e L , são constantes do corpo-de-prova. Estas dimensões se mantêm durante o ensaio, ou seja, considera-se que não ocorrem deformações do corpo de prova durante o ensaio.

A vazão (Q) foi determinada pela diferença de nível dos acumuladores de aplicação da tensão de base e topo observados nos tubos graduados (Fig.3.14), logo o volume total foi determinado multiplicando-se a área transversal pela diferença de nível nos acumuladores. O tempo (t) é a duração do ensaio realizado.

A carga hidráulica (h) foi determinada pela diferença de tensão da base e topo registrada pelos transdutores eletrônicos de pressão. A carga (gradiente

hidráulico) deve ser mantida constante durante todo o ensaio, sendo que a norma ASTM D 5084-90 admite uma diferença máxima de 5% na medição da tensão de topo e base.

Efetua-se ainda a correção da condutividade hidráulica segundo a viscosidade e temperatura da água, sabendo-se que a viscosidade da água a 20°C é igual a 1,0:

$$k_{20} = R_T \cdot k \quad (6)$$

onde:

k_{20} = condutividade hidráulica para água a 20°C.

R_T = Fator de correção da viscosidade da água em diferentes temperaturas.

k = condutividade

hidráulica obtida da fórmula anteriormente descrita.



Figura 3.14 – Equipamento executando ensaio.

3.11 ANÁLISES PETROGRÁFICAS

Foram realizadas análises microscópicas do material encapsulado. As lâminas delgadas foram analisadas em microscópio petrográfico no Laboratório de Petrologia Metamórfica do Instituto de Geociências, departamento de

Geologia no Campus do Vale da UFRGS. O material que foi analisado está detalhado na Tabela 3.3 deste trabalho.

Para cada lâmina foram utilizadas três lentes diferentes para as análises: de 2,5x, 5,0x e 10x, respectivamente aumentos reais de 24x, 48x e 96x, para as fotos de 10 x 15cm.

Através das análises petrográficas pôde-se avaliar a composição mineralógica do material, a diferença na textura do material para cada amostra e a influência da mesma na condutividade hidráulica.

3.12 SEPARAÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA DIFRAÇÃO DE RAIOS X

As amostras foram moídas para separação nas frações <5 μ m e <2 μ m. De cada amostra moída, foi separada uma porção de 10 gramas, colocada em recipiente de 100 ml, misturada com água destilada e ultrassonorizada por um intervalo de 3 minutos. As amostras ultrassonorizadas foram colocadas em tubos de 1000 ml e colocadas num agitador por intervalo de 4 horas. Concluída esta fase para o grupo de seis amostras, as mesmas foram levadas a uma sala refrigerada, com temperatura ambiente constante de 21°C. Cada amostra foi agitada por 25 segundos a intervalo de 2 minutos. A sifonagem realizava-se no dia seguinte, introduzindo-se um tubo de vidro, curvo no extremo inferior, acima de 2 cm sobre o fundo, permitindo a coleta de todo o material <2 μ m em suspensão. Este procedimento foi repetido durante 10 dias, ou seja, até que a água fica-se bem clara, praticamente desprovida desta fração granulométrica. Para eliminar o excesso de cloretos de Ca e Mg, utilizados para evitar a floclulação dos finos, cada amostra foi centrifugada a 6500 rpm por 6 min. Adicionada água destilada, as amostras foram colocadas em tubos de plástico e levadas ao agitador de rodas por 15 minutos. Posteriormente, foram centrifugadas por 10 minutos, para extrair das amostras o excesso de cloretos. Esta operação foi repetida por 4 vezes. As amostras foram testadas com nitrato de prata para verificar a total eliminação dos cloretos. O restante do material, que ficou no tubo de 1000 ml, foi cheio com água destilada até a marca. A sifonagem foi realizada a intervalos de 2 horas, 33 minutos e 36 segundos. O processo de sifonagem obedeceu à metodologia da granulometria anterior. Do

material obtido na separação das diversas frações, foram preparadas as lâminas orientadas, natural, glicolada e calcinada. Nesta fase, as lâminas foram analisadas num difratômetro Siemens (tubo de Co, 40 mA e 40 kV), programado para um intervalo de 2° a 32°, step de 0,02 e tempo de contagem de 5". Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Raios X do Instituto de Geociências da UFRGS.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo estão os resultados dos ensaios e análises feitas no programa experimental realizados para esta pesquisa.

4.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Através da curva de compactação com energia de Proctor Normal obtida para o Solo residual de arenito Botucatu (SRAB), verificou-se que a umidade ótima é de aproximadamente 14,2% para um peso específico seco máximo de 17,6 kN/m³. Este resultado está muito próximo a resultados obtidos anteriormente por Casagrande (2001) e Heineck (2002) para o mesmo material.

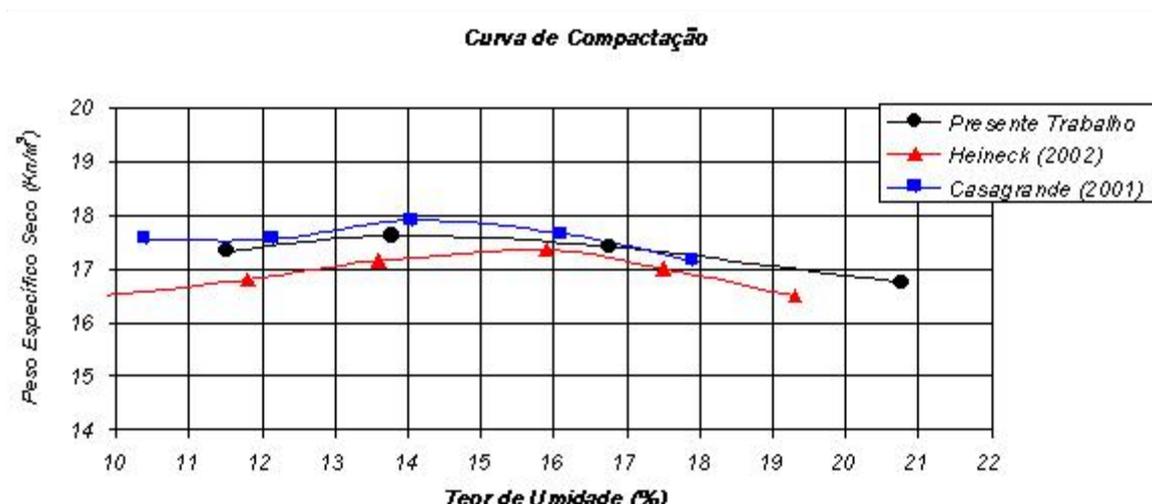


Figura 4.1 Curvas de compactação para o SRAB

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada para 3 e 7 dias de cura, com imersão dos corpos de prova quatro horas antes da ruptura. Os gráficos estão apresentados a seguir nas Figuras 4.2 para 3 dias de cura e 4.3 para 7 dias de cura.

Avaliando-se a resistência a compressão não-confinada, observa-se que, quanto mais óleo, maior a quantidade de cimento necessária para o encapsulamento. A resistência à compressão não confinada depende, como se pode ver, de três fatores: da quantidade de cimento adicionada, da quantidade de contaminante presente no solo e do tempo de cura.

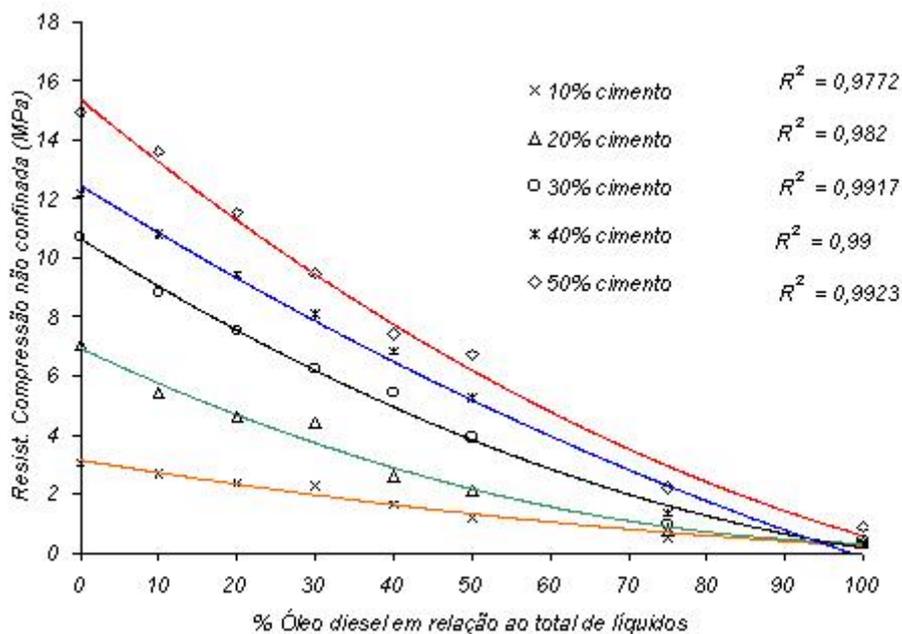


Figura 4.2 Resistência à compressão não confinada aos três dias de cura

Os resultados ainda mostram que quanto maior a quantidade de óleo diesel menor é a resistência, ocorrendo o caso em que em algumas amostras com 100% de óleo sobre o peso total de líquidos, a resistência é muito baixa, chegando à ruptura imediatamente após a imersão. Um dos motivos seria pela

inibição ou retardamento da hidratação do cimento. Outro motivo seria devido à adsorção das partículas de óleo à partícula de solo.

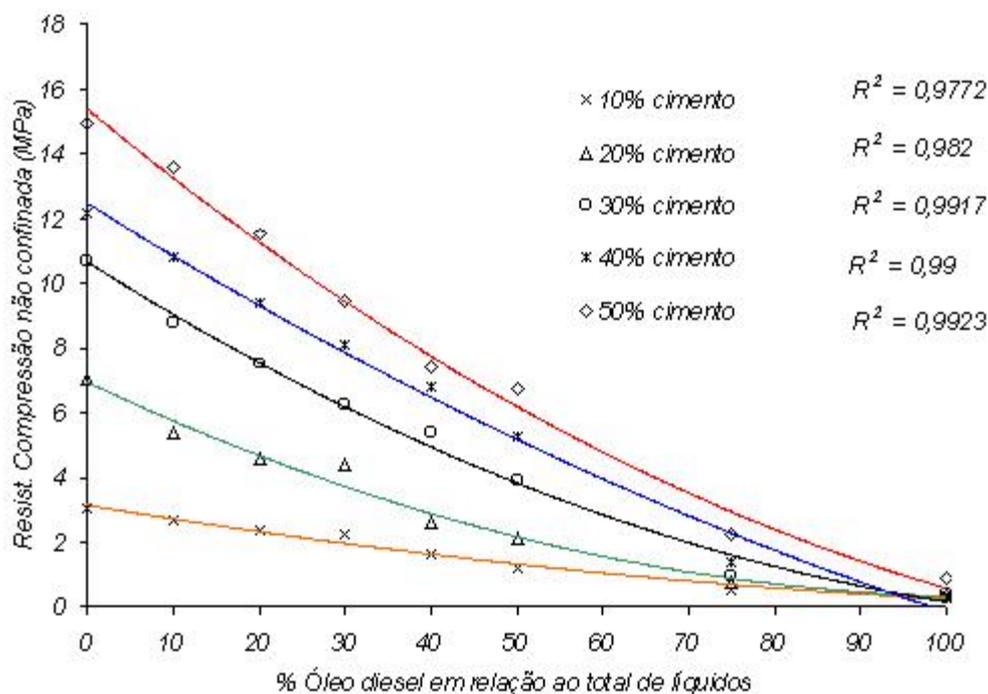


Figura 4.3 Resistência à compressão não confinada aos sete dias de cura.

Nota-se que independentemente do tempo de cura das amostras, a resistência dos corpos de prova aumenta com o aumento do teor de cimento Portland. Aumenta, também, com a diminuição do teor de óleo diesel.

A resistência à compressão não confinada é tanto maior quanto maior for o tempo de cura da amostra, considerando amostras com teores iguais de cimento e contaminante.

4.3 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SEGUNDO A NORMA ASTM D 5084 – PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL

4.3.1 Validação do Equipamento

Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica segundo a norma ASTM D 5084 para validação do equipamento permeâmetro de parede flexível construído no ENVIRONGEO/UFRGS. Estes ensaios, realizados também no ENVIRONGEO/UFRGS, mostraram resultados (Tabela 4.1 e Figura 4.4) muito próximos quando comparados com os resultados obtidos por Heineck (2002) para o mesmo material, com equipamento e procedimento de ensaios semelhantes, validando-se assim o permeâmetro de parede flexível construído.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para validação do equipamento

Material		Presente Trabalho		Heineck (2002)	
		k (m/s)	w (%)	k (m/s)	w (%)
1	Cinza volante	5,43E-07	43,34	5,67E-07	44,00
2	Cinza de fundo	8,44E-07	49,56	1,78E-06	44,00
3	Solo Residual de arenito Botucatu	7,38E-08	14,34	3,97E-08	17,20

Através da Figura 4.4 observou-se que o resultado da condutividade hidráulica para a cinza volante foi o que mais se aproximou dos resultados de Heineck (2002). Apesar de apresentarem resultados muito próximos, a variabilidade encontrada nas amostras de cinza de fundo e SRAB deve-se provavelmente aos parâmetros de compactação, que não são idênticos aos utilizados por Heineck (2002) nas amostras ensaiadas.

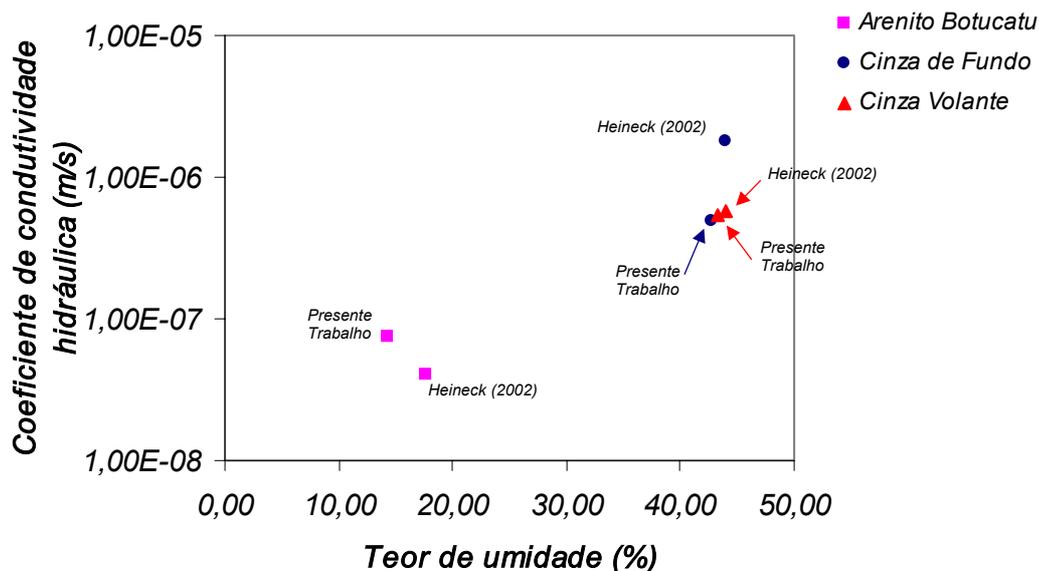


Figura 4.4 Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para validação do equipamento (Comparação com resultados de Heineck (2002))

4.3.2 Verificação da técnica de Solidificação e Estabilização

A seguir serão apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.5 os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para avaliação da aplicabilidade da técnica de solidificação/estabilização de solos para o solo residual de arenito botucatu (SRAB) contaminado com óleo diesel e encapsulado com cimento Portland CP – VARI.

Tabela 4.2 – Condutividade Hidráulica para verificação da técnica Solidificação/Estabilização.

Coeficiente de condutividade hidráulica (m/s)						
% óleo	% cimento					
	0	10		20	30	
0	7,74E-08	3,42E-08		1,76E-08	2,88E-09	
10	5,77E-08	2,60E-08 ^a	2,01E-08 ^b	4,15E-09	8,31E-09	
		1,42E-08 ^a				
20	2,41E-08	7,86E-09		5,05E-09	2,27E-08 ^a	2,14E-08 ^b
					2,00E-08 ^a	
40	2,99E-08	2,38E-08		9,02E-09	1,35E-09 ^a	1,93E-09 ^b
					2,51E-09 ^a	

^a – Repetições de ensaio

^b – média dos ensaios repetidos

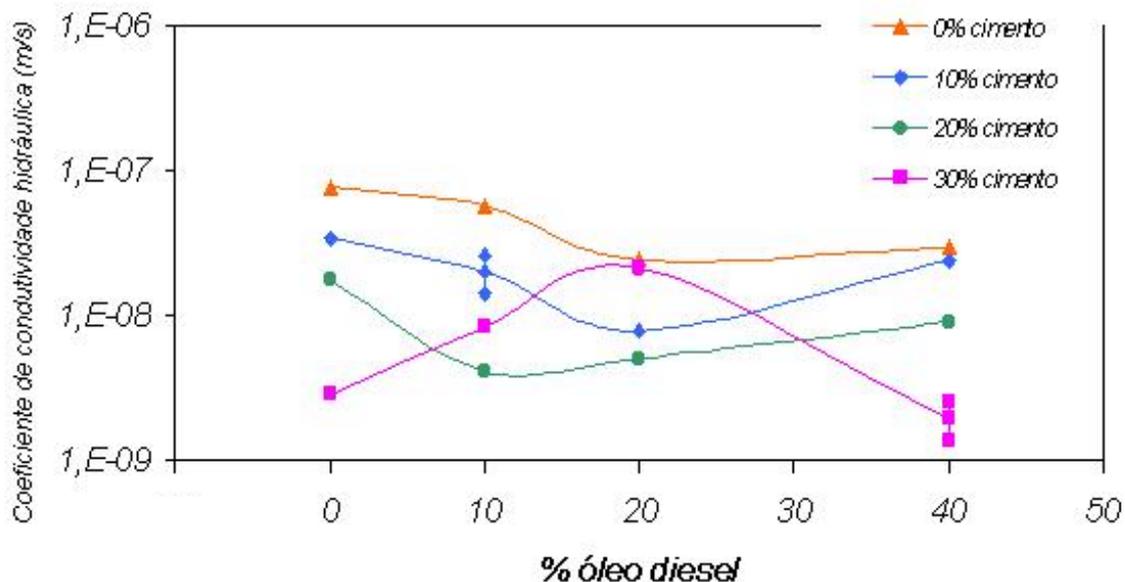


Figura 4.5 Condutividade Hidráulica para verificação da técnica de Solidificação/Estabilização.

Através dos resultados de condutividade hidráulica verifica-se que para 0% de cimento, inicialmente a condutividade hidráulica diminui para quantidades crescentes de óleo diesel até 20%, onde a condutividade hidráulica volta a aumentar para quantidades maiores de 20% de óleo diesel.

Para quantidades maiores de cimento, entre 10 e 20%, o comportamento do material obteve a mesma tendência do material sem cimentação, onde, para pequenas quantidades de óleo diesel, a condutividade hidráulica teve uma diminuição, e para valores maiores de óleo a condutividade hidráulica voltou a aumentar. Este comportamento é devido à adição do óleo diesel, e provavelmente a efeitos físicos como da compactação e bloqueio de poros pelas partículas (gotas) de óleo, supondo-se que para pequenas quantidades de óleo, as partículas do mesmo ficam dispersas na matriz de solo, funcionando como barreiras ao fluxo de água. Para quantidades maiores de óleo a concentração de óleo aumenta e, provavelmente a dispersão das partículas diminui, provocando a agregação das partículas de óleo. A agregação destas partículas poderia formar “gotas” maiores de óleo, que fluiriam dentro da amostra, sendo estas gotas as responsáveis pelo aumento da condutividade hidráulica, uma vez que elas não estariam mais obstruindo a passagem de água.

Sabe-se também que para quantidades maiores de óleo, e portanto menores de água, ocorre o fenômeno de adsorção do mesmo pelas partículas de argila (Young, 1991), o que levaria a um aumento da condutividade hidráulica. O fenômeno de adsorção do óleo pelas partículas de solo ocorre inicialmente pela fração fina do SRAB, pelas partículas de maior área superficial específica.

A presença de maiores quantidades de óleo ocupando os espaços interfoliares, pode diminuir o potencial de expansão da esmectita presente no solo, aumentando a porosidade do material, e por conseqüência, a sua condutividade hidráulica.

Para cada curva com diferente porcentagem de cimento nota-se que a condutividade hidráulica mínima é obtida cada vez com menor quantidade de óleo, chegando a valores inferiores a 10% de óleo quando se adiciona 30% de cimento. Este comportamento é devido provavelmente a efeitos combinados de adsorção, floculação e retardamento da hidratação do cimento. Os efeitos da cimentação são verificados através da diminuição da condutividade hidráulica para crescentes quantidades de cimento Portland, para amostras sem óleo diesel.

Para os teores de 10 e 20% e 30% de cimento observou-se um padrão de comportamento onde inicialmente a condutividade hidráulica diminui e posteriormente volta a aumentar, para crescentes quantidades de óleo diesel, para os teores utilizados nos ensaios.

4.4 RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Utilizando os resultados de condutividade hidráulica com a respectiva resistência à compressão simples pode-se verificar, além da aplicabilidade, a eficácia da técnica fisicamente, podendo-se avaliar através da resistência, a possibilidade da destinação final do material solidificado em obras de engenharia como, solo reforçado para fundações, rodovias, onde as características mecânicas serão melhoradas.

4.4.1 Resultados Condutividade hidráulica x Resistência à compressão simples (7 dias de cura)

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados da relação entre a condutividade hidráulica e a resistência à compressão simples para amostras de SRAB com óleo diesel e cimento portland com 7 dias de cura.

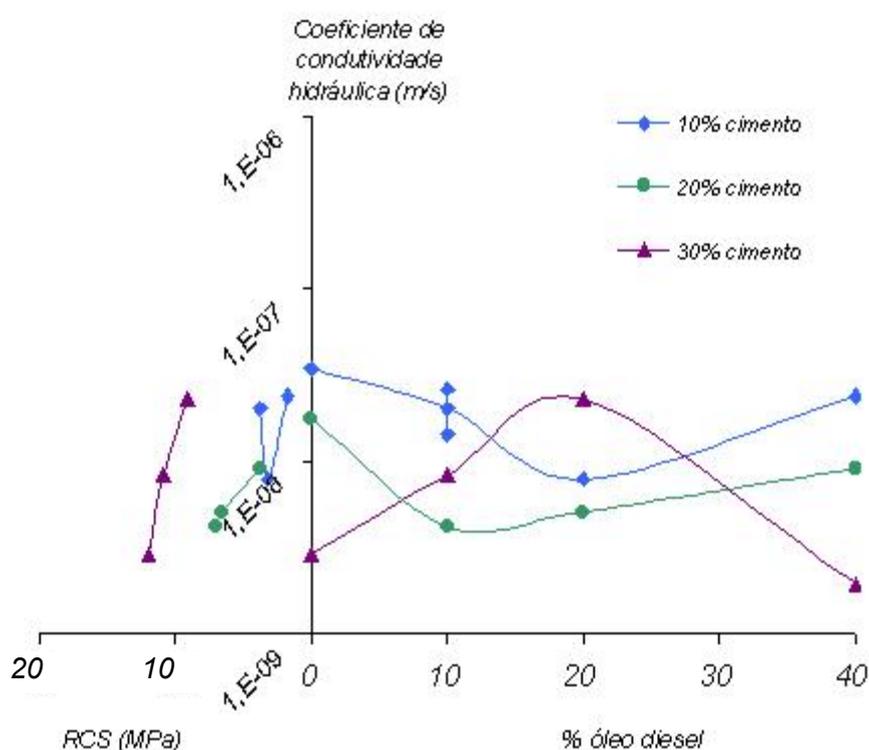


Figura 4.6 Resistência à compressão simples (7 dias de cura) x condutividade hidráulica.

A Tabela 4.3 apresenta para cada porcentagem de cimento Portland a sua menor condutividade hidráulica e a sua resistência à compressão simples.

Tabela 4.3 – Resistência à compressão simples (7 dias de cura) x Condutividade hidráulica

Amostra	RCS (MPa) 7 dias de cura	Coeficiente de condutividade hidráulica (m/s)
<i>10% cimento + 20% óleo diesel</i>	3,216	7,86E-09
<i>20% cimento + 10% óleo diesel</i>	7,043	4,15E-09
<i>30% cimento + 0% óleo diesel</i>	11,955	2,88E-09

Observa-se que a resistência à compressão simples diminui com a crescente quantidade de óleo diesel. Para pequenas quantidades de óleo diesel, a menor condutividade hidráulica é obtida juntamente com a maior resistência à compressão simples.

4.5 RESULTADOS LIXIVIAÇÃO X CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Foram comparados os resultados obtidos para lixiviação (Knop, 2003) segundo as normas ASTM D 4874 e ABNT NBR 10005, com os ensaios de condutividade hidráulica para amostras com mesma porcentagem de óleo diesel (0, 10, 20 ou 40%) e com porcentagem de cimento, de 0, 10 e 20% (Figuras 4.5 e 4.6). Os parâmetros comparados foram:

- A quantidade de cimento na amostra;
- A quantidade de óleo diesel;
- A condutividade hidráulica
- A quantidade de lixiviado;

Levando-se em conta o objetivo de cada ensaio feito, nota-se claramente que não há relação entre os resultados obtidos, lembrando que os resultados obtidos pelos ensaios de lixiviação são para avaliar a eficácia da técnica de solidificação / estabilização do solo baseado em parâmetros químicos do lixiviado enquanto que a condutividade hidráulica avalia a aplicabilidade desta técnica, ou seja, avalia características físicas do composto encapsulado. O que se busca com esta comparação é avaliar o melhor desempenho desta técnica aliado com a melhor aplicabilidade da mesma, entendendo-se por aplicabilidade, a condutividade hidráulica ideal para não tornar o composto demasiadamente permeável.

4.5.1 Comparação com ensaios de lixiviação (Knop, 2003) segundo a norma ASTM D 4874.

Verificou-se através dos resultados apresentados na Figura 4.7 que a porcentagem de óleo no lixiviado cresce quanto maior for a quantidade de óleo na amostra, para a mesma quantidade de cimento. A porcentagem de óleo no lixiviado diminui para quantidades maiores de cimento. Observou-se também que a condutividade hidráulica não tem um padrão no seu comportamento, tendo seus valores mais baixos, aproximadamente 10^{-9} m/s, nas porcentagens entre 10 e 20% de óleo diesel. Para o valor de 40% a condutividade hidráulica volta a aumentar. Através desta análise concluiu-se que a melhor aplicabilidade e a eficácia da técnica de solidificação/ estabilização, para os resultados combinados, é da amostra com 20% de cimento e 10% de óleo diesel, onde a condutividade hidráulica atingiu seu menor valor para as amostra ensaiadas e a lixiviação também atingiu seu menor valor.

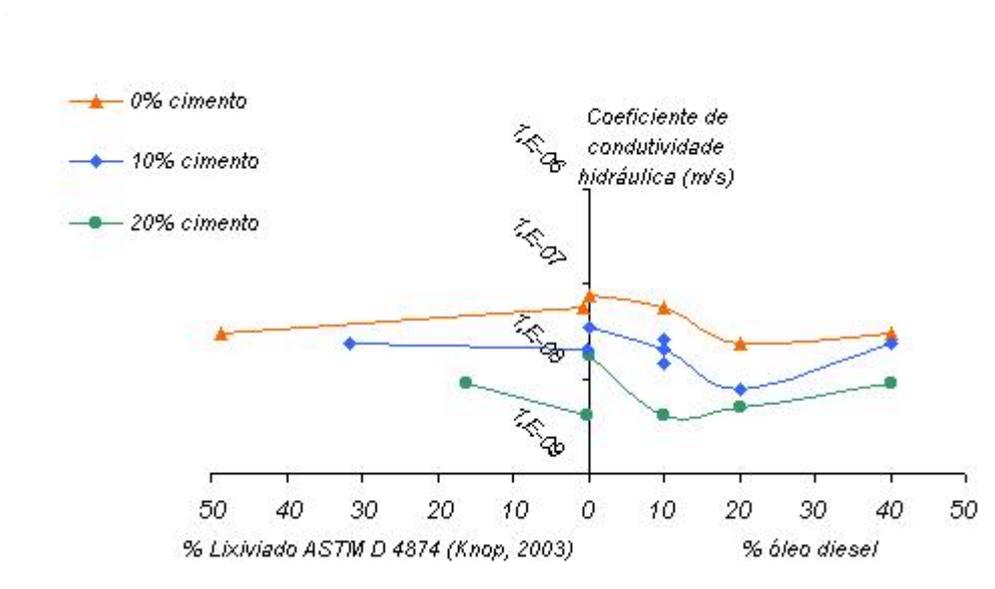


Figura 4.7 Lixiviação ASTM D 4874 (Knop, 2003) x Condutividade Hidráulica.

4.5.2 Comparação com ensaios de lixiviação (Knop, 2003). segundo a norma ABNT NBR 10005.

Verificou-se através destes resultados apresentados na figura 4.8 que a porcentagem de óleo no lixiviado, cresce para quantidades maiores de óleo na amostra. Observou-se também através destes gráficos que a melhor aplicabilidade e a eficácia da técnica de solidificação/ estabilização, para os resultados combinados, é novamente da amostra com 20% de cimento e 10% de óleo diesel, onde a condutividade hidráulica atingiu seu menor valor para as amostra ensaiadas ($\sim 10^{-9}$ m/s) e a lixiviação também atingiu seu menor valor.

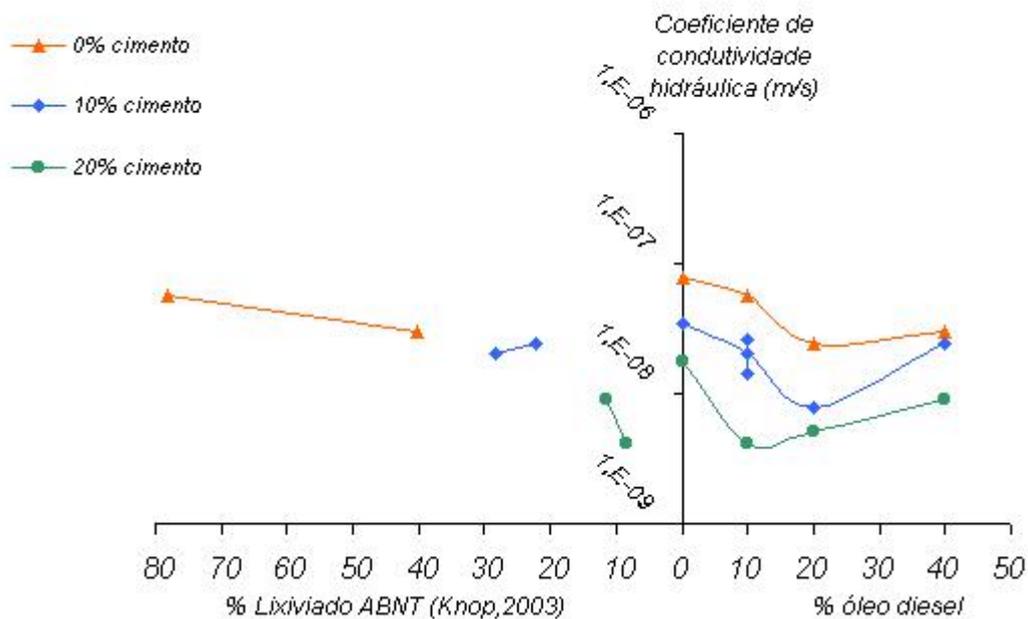


Figura 4.8 Lixiviação ABNT NBR 10005 (Knop, 2003) x Condutividade Hidráulica.

Em relação à condutividade hidráulica, deve-se ter cuidado quando a técnica for aplicada em grandes áreas, pois se a condutividade hidráulica for muito baixa, corre-se o risco de causar grande acúmulo de água no local tratado, devendo existir um sistema de drenagem no local.

4.6 ANÁLISES PETROGRÁFICAS

O material que foi analisado está descrito no Capítulo 3 deste trabalho (Tabela 3.3). Para cada lâmina foram utilizadas três lentes diferentes para as

análises: de 2,5x, 5,0x e 10x, respectivamente, resultando em aumentos reais de 24x, 48x e 96x.

A composição mineralógica do material analisado foi predominantemente de quartzo monocristalino, com presença de quartzo policristalino (fragmento de rochas metamórficas), feldspatos alterados para argilominerais de natureza caulínica, moscovitas e raros grãos de turmalina e de minerais opacos (Figuras 4.9 a 4.14).

Na figura 4.9 verifica-se que a amostra é constituída de grãos arredondados de quartzo monocristalino (Qzm), quartzo policristalino (Qzp), matriz silto-argilosa (Msa) e agregados de cimento Portland (Acp)

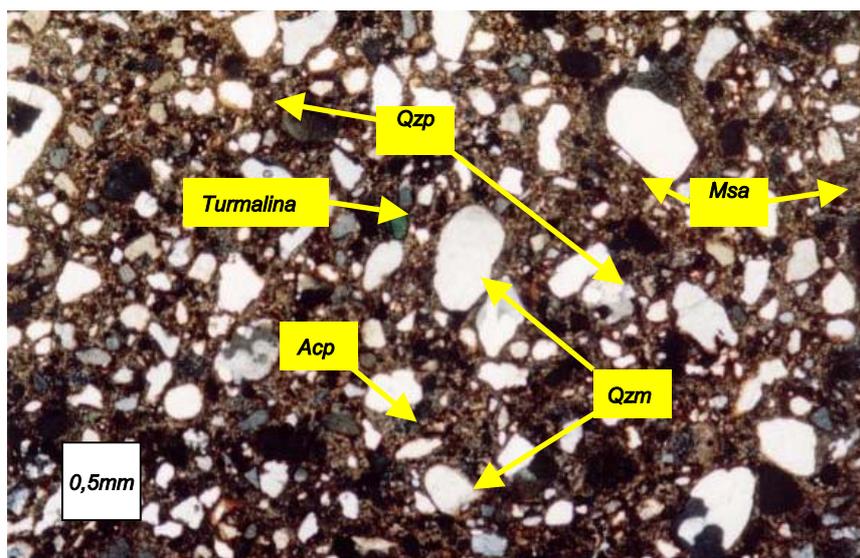


Figura 4.9 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 0% de óleo diesel. Lente de 2,5 x que corresponde a 24x de aumento real.

Nas figuras 4.10 e 4.11 verifica-se que a amostra é constituída, como a amostra da Figura 4.9, de grãos arredondados de quartzo monocristalino (Qzm), quartzo policristalino (Qzp), matriz silto-argilosa (Msa) e agregados de cimento Portland (Acp).

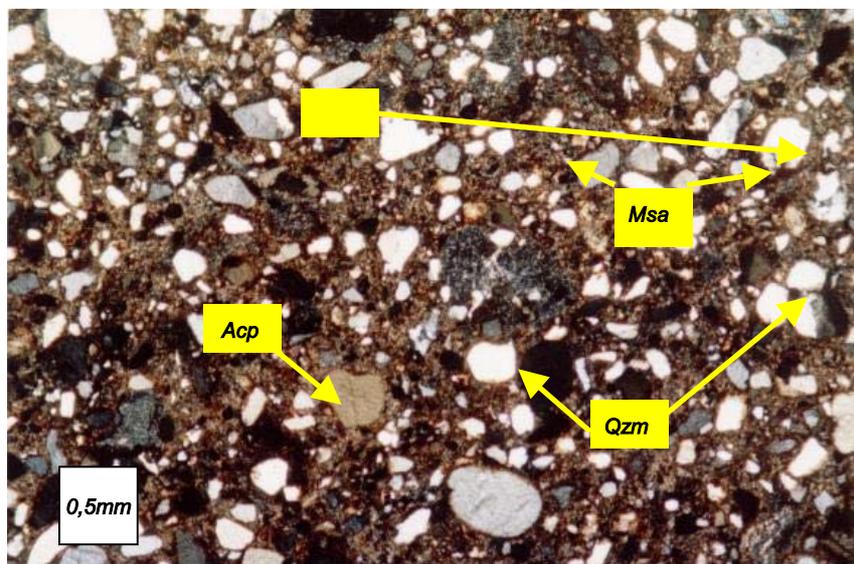


Figura 4.10 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 10% de óleo diesel. Lente de 2,5 x que corresponde a 24x de aumento real.

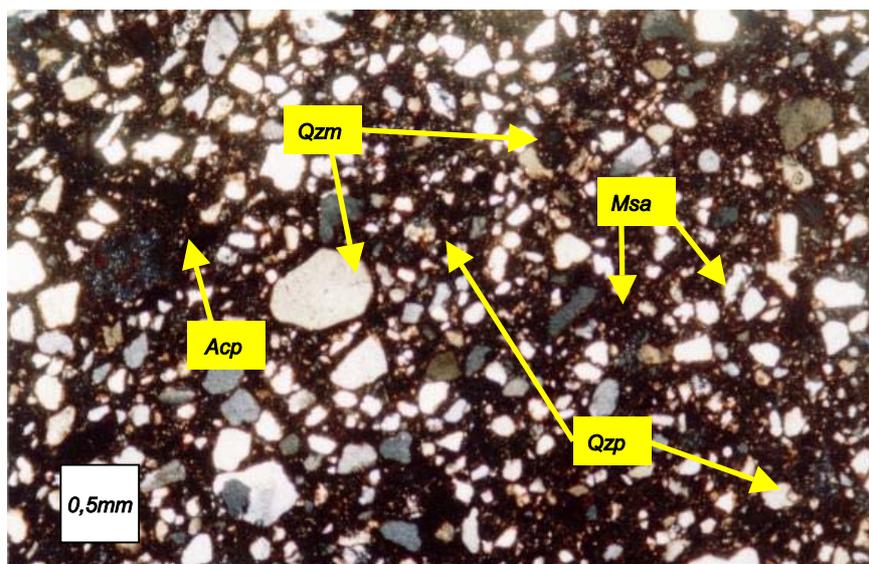


Figura 4.11 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 40% de óleo diesel. Lente de 2,5 x que corresponde a 24x de aumento real.

A descrição mineralógica da Figura 4.12 é idem às anteriores destacando que os grãos maiores ocorrem de forma suspensa na matriz silto-argilosa, isto é, a estrutura do material é sustentada por esta matriz.

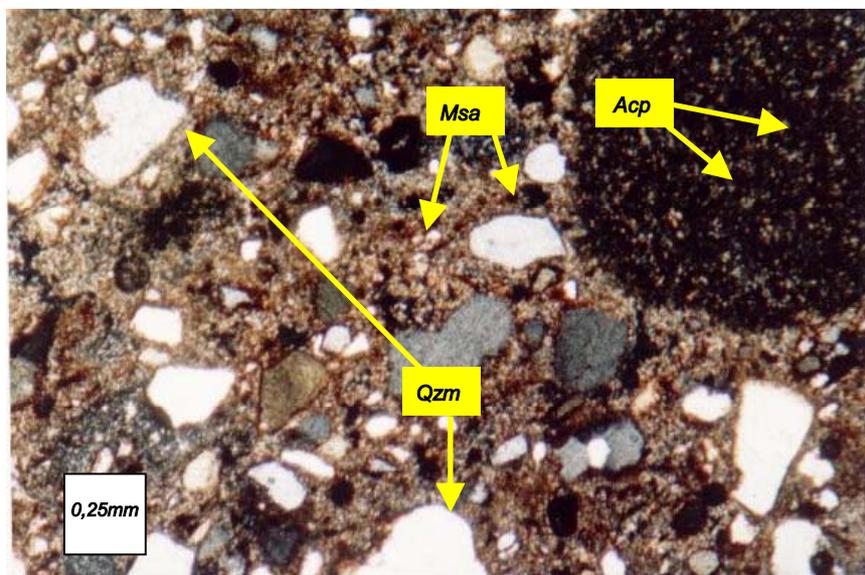


Figura 4.12 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 0% de óleo diesel. Lente de 5 x que corresponde a 48x de aumento real.

Nas Figuras 4.13 e 4.14, a seguir, observa-se a mesma matriz silto-argilosa envolvendo os grãos maiores.

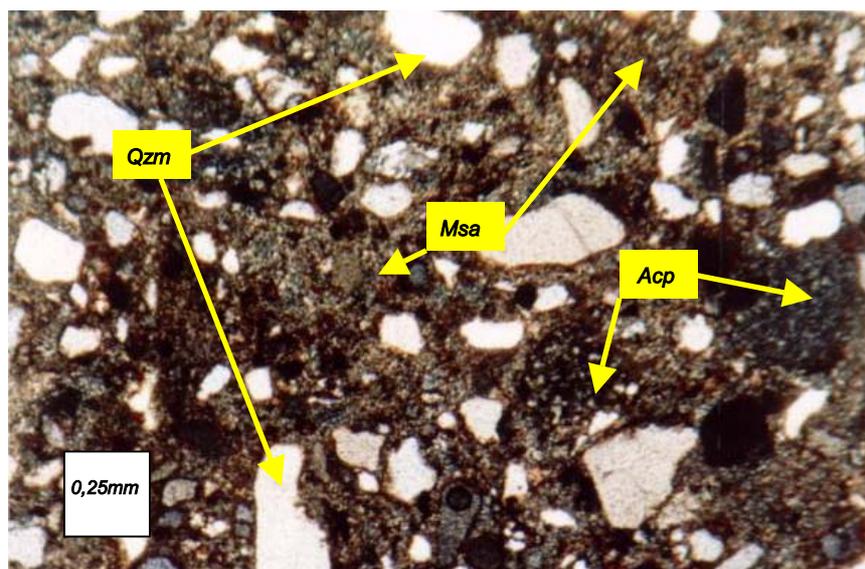


Figura 4.13 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 10% de óleo diesel. Lente de 5 x que corresponde a 48x de aumento real.

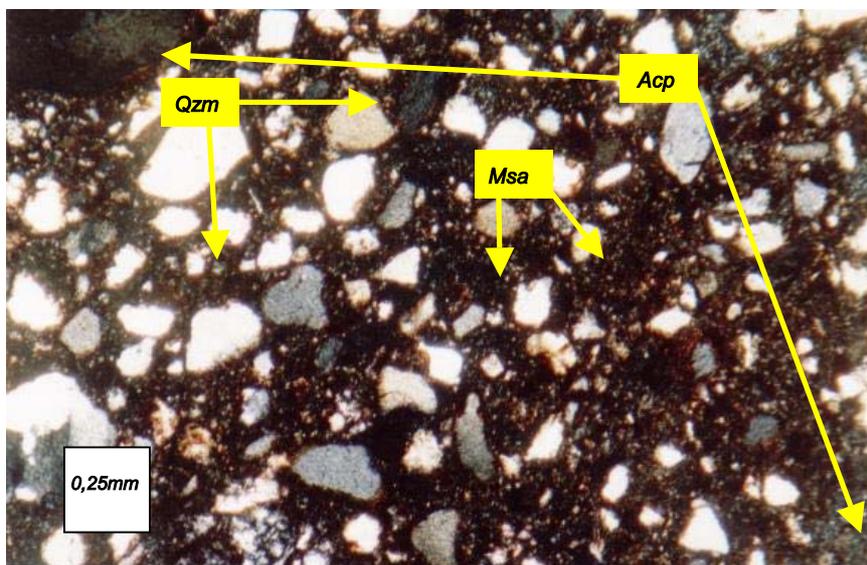


Figura 4.14 Fotomicrografia do solo residual do arenito Botucatu com teor de 40% de óleo diesel. Lente de 5 x que corresponde a 48x de aumento real.

A composição mineralógica do material da matriz foi detalhada por meio da análise por difração de raios X.

Nas fotomicrografias verifica-se também a presença de grãos arredondados, em particular, aqueles de dimensões mais avantajadas.

Ocorre uma mudança na coloração da amostra que depende da quantidade de óleo presente na mesma. A amostra com 40% de óleo apresenta a matriz escurecida em relação às amostras sem óleo e com 10% de óleo diesel devido a maior adsorção do óleo nas partículas de solo (Figuras 4.10 e 4.13).

A condutividade hidráulica varia provavelmente devido à maior ou menor adsorção do óleo pela fração fina da matriz (silto-argilosa) de solo.

A variação de cor no material ensaiado é caracterizada nos corpos de prova, lâminas delgadas e nas imagens das fotomicrografias. Esta distinção na

coloração das amostras, observa-se tanto para as amostras com 10% (Fig. 4.15) como igualmente para as amostras com 20% de cimento (Fig. 4.16) onde a amostra sem óleo apresenta uma coloração rosada clara, a amostra com 10% de óleo a coloração é muito semelhante à sem óleo. Já a amostra com 40% de óleo diesel apresenta uma coloração mais escurecida, devido ao aumento da porcentagem de óleo diesel presente na mesma. Isto é devido ao efeito da maior adsorção do óleo diesel por parte da fração fina do material.

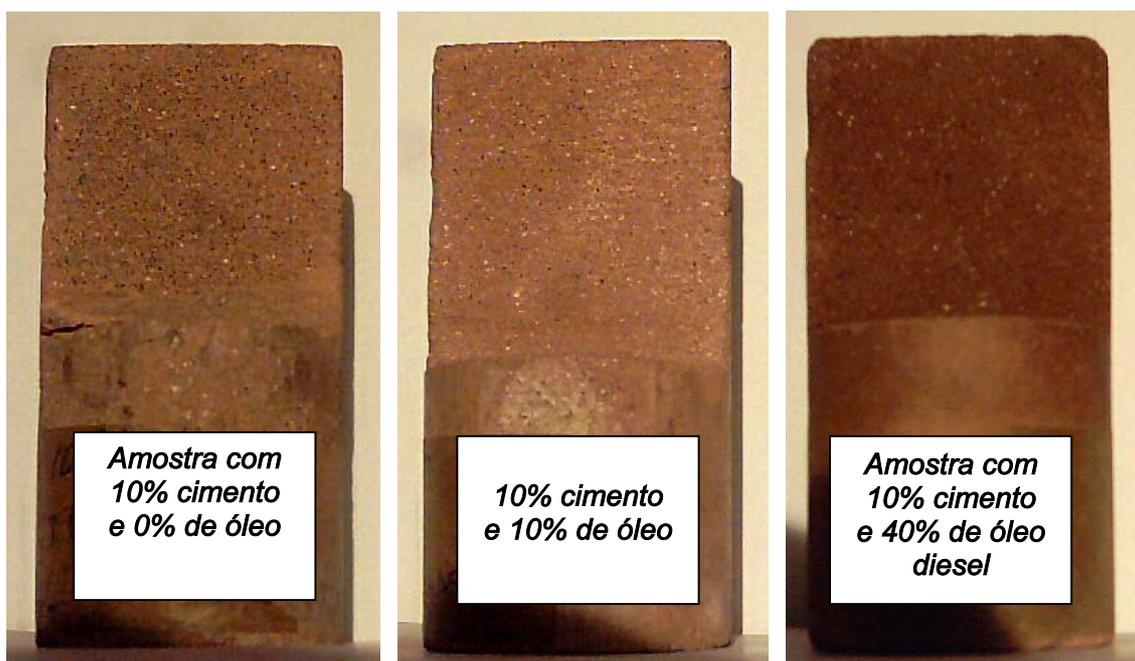


Figura 4.15 Corpos-de-prova com 10% de cimento e com 0%, 10% e 40% de óleo diesel.

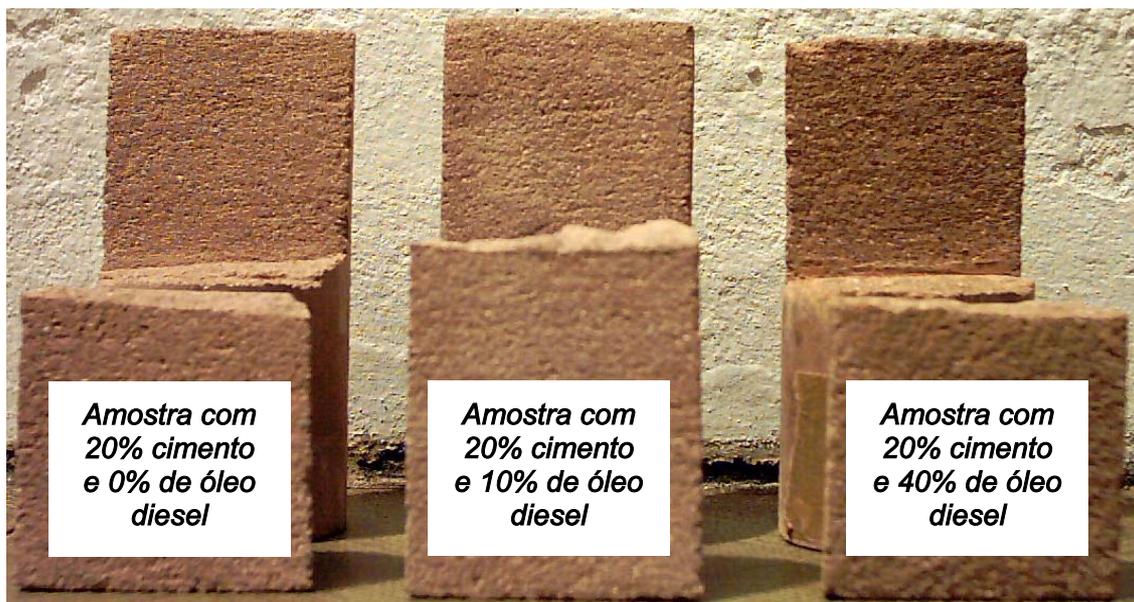


Figura 4.16 Corpos-de-prova com 20% de cimento para as porcentagens de 0%, 10% e 40% de óleo diesel.

4.7 DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X

A fração fina do material ensaiado foi caracterizada por meio da análise difratométrica de raios X. A fração fina do solo residual compreende a ocorrência predominante de caulinita e de modo subordinado interestratificados do tipo illita-esmectita. A adsorção de óleo diesel por parte do solo residual pode ser explicada pela presença destes argilominerais. A adsorção pode ser devida à fração granulométrica fina.

Observa-se, na Figura 4.17, a presença dominante de indivíduos de caulinita e a ocorrência subordinada de variedades de interestratificados illita-esmectita.

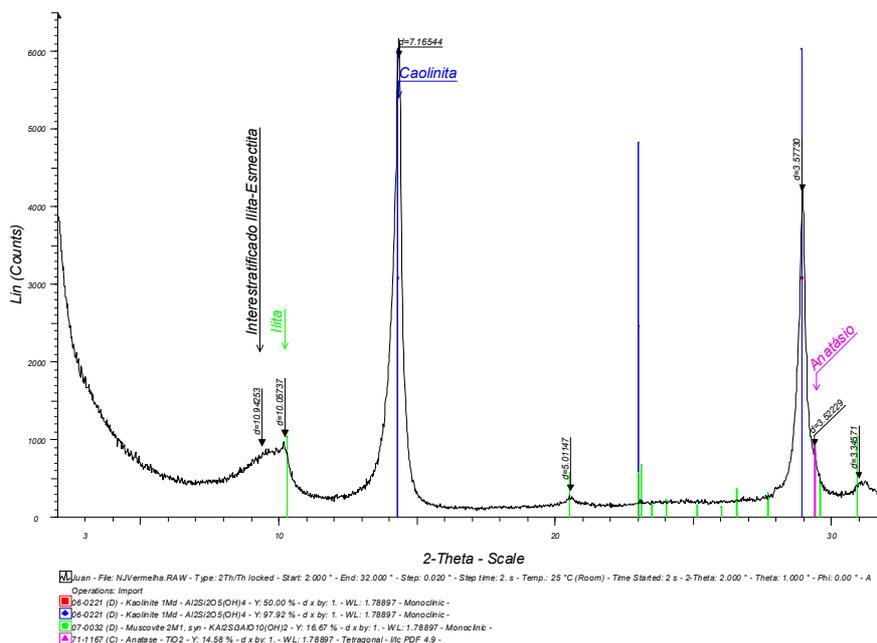


Figura 4.17 Difractograma da amostra de solo residual do Arenito Botucatu sem adição de óleo diesel. Amostra natural.

Observa-se na Figura 4.18 ainda a presença dominante da caulinita com o deslocamento do pico da esmectita para valores maiores e separando-se da illita que adquire uma forma simétrica.

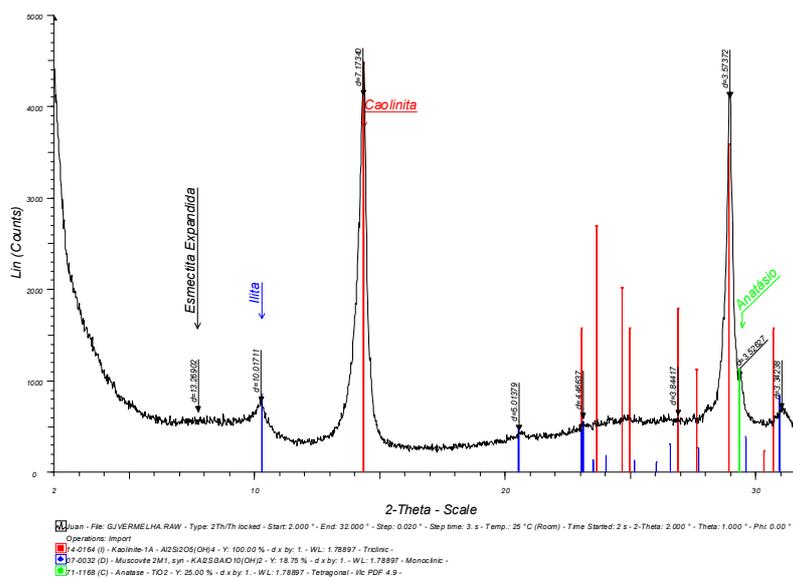


Figura 4.18 Difractograma da amostra de solo residual do Arenito Botucatu sem adição de óleo diesel. Amostra glicolada.

Observa-se na Figura 4.19 em destaque o aumento da intensidade do pico da illita e o desaparecimento do pico da caulinita por efeito da calcinação.

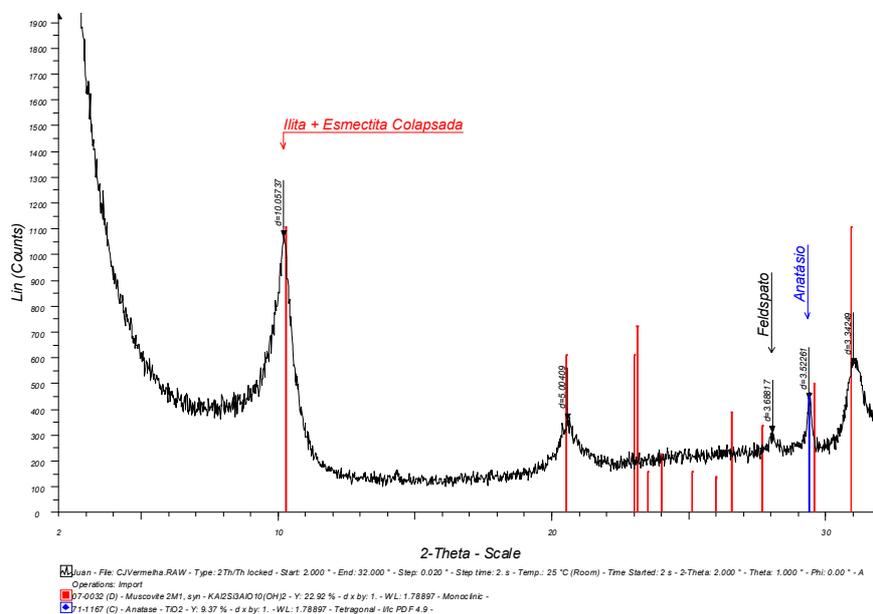


Figura 4.19 Difratoograma da amostra de solo residual do Arenito Botucatu sem adição de óleo diesel. Amostra calcinada.

As partículas de esmeclita apresentam um volume 10^{-4} vezes menor do que as caulinitas e uma área 10^{-2} vezes menor. Isto significa que para igual volume ou massa, a superfície das partículas de esmeclita é 100 vezes maior do que das partículas de caulinita. As forças de superfície são muito importantes no comportamento de partículas coloidais, sendo a diferença de superfície específica uma indicação da diferença de comportamento entre solos com distintos argilominerais (Pinto, 2000).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais em relação à montagem do equipamento, método de solidificação/estabilização de solos contaminados e condutividade hidráulica. Para finalizar são propostas sugestões para futuros trabalhos neste segmento.

5.1 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

O permeâmetro de parede flexível desenvolvido no ENVIRONGEO segue a norma americana ASTM D 5084 – 90. Este equipamento foi projetado e construído para receber e resistir a contaminantes químicos, presentes em amostras de solo contaminadas ou como líquido permeante, através de peças e conexões de aço inox e tubulação de nylon.

O equipamento mostrou-se muito eficaz quanto à realização de ensaios de condutividade hidráulica, o que pode ser comprovado através de comparação de resultados com os de outro autor (Heineck, 2002), o que valida o equipamento. O equipamento teve sua eficiência comprovada também quanto ao uso de materiais contaminantes nos ensaios, não apresentando desgaste de seus componentes ou tubulações no período de realização de ensaios para o estudo desta técnica.

5.2 MÉTODO DE SOLIDIFICAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A resistência à compressão não confinada aumenta com o aumento do teor de cimento na amostra. Para um mesmo teor de cimento, a resistência à compressão não confinada diminui com o aumento do teor de contaminante na amostra.

Através dos ensaios realizados de compressão não confinada, verificou-se que o material obtido por meio do encapsulamento possui uma boa resistência quando a porcentagem de contaminante for até de 20%, podendo este solo ser usado em obras de engenharia como um solo com características melhoradas.

Através dos ensaios de lixiviação em coluna pode-se verificar também que até 20% de contaminante no solo, a técnica é considerada eficaz, pois o nível de contaminante presente no lixiviado é muito baixo. Para quantidades de contaminante acima de 20% seria necessária uma adição maior de cimento para que o nível de contaminação no lixiviado diminuísse.

A técnica de solidificação/estabilização de solos contaminados foi avaliada em função dos valores mínimos de condutividade hidráulica obtidos para as diferentes porcentagens de contaminação, para cada teor de cimento. Para todos os teores de cimento estudados com teores de óleo diesel de até 20%, a técnica apresenta uma boa aplicabilidade pois a camada tratada tem uma condutividade hidráulica entre 10^{-8} e 10^{-9} m/s, o que é considerado pouco permeável quanto ao fluxo de água no interior da camada de solo.

5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica do SRAB sem cimentação, diminui com o aumento da quantidade de óleo diesel, para teores de óleo de até 20%. Para quantidades de óleo diesel maiores do que 20% a condutividade hidráulica

volta a aumentar. Para amostras sem contaminação, a condutividade hidráulica diminui com o aumento da quantidade de cimento Portland.

Para os teores de 10, 20 e 30% de cimento observou-se um padrão de comportamento onde inicialmente a condutividade hidráulica diminui e posteriormente volta a aumentar, para crescentes quantidades de óleo diesel.

Observa-se ainda que o ponto mínimo de condutividade hidráulica para cada porcentagem de cimento é obtido com teores cada vez menores de óleo diesel.

Na curva para 30% de cimento o ponto mínimo de condutividade hidráulica deve provavelmente estar entre os valores de 0 e 10% de óleo diesel. A posterior queda da condutividade hidráulica para a curva de 30% de cimento, com porcentagens maiores de 20% de óleo diesel não foi observada para as curvas com 0, 10 e 20% de cimento, muito provavelmente porque a quantidade de óleo diesel para promover uma queda na condutividade hidráulica, em tais casos, estaria além da quantidade utilizada nos ensaios realizados, que foram de até 40% de óleo diesel.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- *Realização de ensaios de condutividade hidráulica para teores maiores de 30% de cimento e teores maiores de 40% de óleo diesel .*
- *Realização de ensaios de condutividade hidráulica para teores intermediários de óleo diesel (5%, 15%, 25%,).*
- *Realização de microscopia para outros teores de cimento e de óleo diesel.*
- *Uso de outros materiais como agentes encapsulantes, tais como a cal ou a cinza volante em adição ao cimento Portland e outros fluidos permeantes.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter: D 5084*. Philadelphia, 1990. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solos – Ensaio de Compactação NBR 7182*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova. NBR 12024*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo-cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-Prova Cilíndricos: NBR 12025*. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Amostras de Solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP) -*Guia básico de utilização do cimento portland - BT-106, 7.ed.* São Paulo, 2002. 28p.

BARROS, V.P. *Estudo de Micelas*. Instituto de física da USP. 2002. Site: <http://socrates.if.usp.br/~vpbarros/node6.html>. Acessado dia 02/12/2003.

BELLEZZA, I., PASQUALINI, E. *Hydraulic performance of soil-cement liners*. In: *GEOENVIRONMENT 97, 1997. Proceedings...* Bouazza, Kadikara & Parker ed, Balkema, Rotterdam, 1997. p.271-276.

- BENSON, C. H., DANIEL, D. E. *Influence of clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v. 116, n. 8, p. 1231 – 1248, 1990.*
- BOWDERS, J.J., DANIEL, D.E. *Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to Dilute Organic Chemicals. Journal of Geotechnical Engineering, New York, ASCE, 113, n. 12, p. 1432-1448, 1987.*
- BOYNTON, S. S., DANIEL, D. E. *Hydraulic Conductivity tests on compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v. 111, n. 4, p. 465 – 478, 1985.*
- BRODERICK, G.P., DANIEL, D. E.. *Stabilising compacted clay against chemical attack. Journal of Geotechnical Engineering, New York, ASCE, 116, n. 10, p.1549-1567, 1990.*
- BROWN, K.W., ANDERSON, D.C. *Effects of organic solvents on the permeability of clay soils, EPA-600/83-16, Municipal Environmental Research Laboratory. EPA – Cincinnati, Ohio. 153p. 1983.*
- BROWN K.W., GREEN, J.W., THOMAS, J.C. *The influence of selected organic liquids on the permeability of clay liners. Land disposal of hazardous waste, Proceedings of the Ninth Annual Research Symposium, EPA-600/9-83-018. EPA – Cincinnati, Ohio. p. 114-125. 1983.*
- BROWN K.W., THOMAS, J.C., GREEN, J.W. *Permeability of compacted soils to solvents, mixtures and petroleum products. Land disposal of hazardous waste, Proceedings of the Tenth Annual Research Symposium, EPA-600/9-84-007. Municipal Environmental Research Laboratory. EPA – Cincinnati, Ohio. p. 124-137. 1984.*
- BRUCE, D. A.; BRUCE, M. E. C.; DIMILLIO, A. F. *Deep mixing method: A global perspective. Civil Engineering, December, 1998, p.38-41.*

- BUDHU, M., GIESE, R.F., CAMPBELL, G., BAUMGRASS, L. *The permeability of soils with organic fluids. Canadian Geotechnical Journal.* v 28. p.140-147. 1991.
- BUTTON, D.K. *The influence of clay and bacteria on the concentration of dissolved hydrocarbon saline solution. Geochimica et Cosmochimica Acta,* v. 40, p.435-440. 1976.
- CARPENTER, G. W., STEPHENSON, R. W. *Permeability Testing in the Triaxial Cell. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia,* v. 9, n.1, p. 3-9, março 1986.
- CARRARO, J. A. H., CONSOLI, N. C. *Coal Mining Waste Utilisation for Soil Improvement In: GeoEnvironment 97.* 1 ed. Rotterdam – The Netherlands: A. A. Balkema, 1997, p. 566.
- CASAGRANDE, M.D.T. *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.* 2001. 96p. *Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGE/UFGRS, Porto Alegre.*
- CERATTI, J.A.P. *Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGE/UFGRS. Porto Alegre. 152p. 1979.*
- CONSOLI, N. C., CARRARO, J. A. H. *Aspects of Industrial by products for soil Improvement in: Contaminated Ground: Fate of Pollutants and Remediation.* 1 ed. The Netherlands: Thomas Telford, 1997.
- CONSOLI, N. C. , CARRARO, J. A. H., PRIETTO, P.D..M. *Aspectos da Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de Solos In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica XI COBRAMSEG, Brasília – DF: , 1998. v. 2. P. 1101-1108.*

- CONSOLI, N. C. , HEINECK. K. S. , PRIETTO, P.D..M., CARRARO, J. A. H. *The Behavior of Soil-Fly Ash Carbide Lime Compacted Mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA: , v. 127, n. 9, p.774-782, 2001-a.*
- CONSOLI, N. C. , MONTARDO, J. P., PRIETTO, P.D..M. *Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do Efeito das Propriedades dos Materiais Constituintes. Revista Solos e Rochas. São Paulo - Brasil: , v. 24, n. 3, p. 191 – 209., 2001- b.*
- CONSOLI, N. C. , CERATTI, J. A. P., HEINECK. K. S. , SPECHT, L. P. *Comportamento de Misturas Solo-Cimento- Fibra Submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos. Revista Solos e Rochas. São Paulo – SP:, v. 25, n. 1, p.15-34, 2002-a.*
- CONSOLI, N. C., PRIETTO, P.D..M., HEINECK. K. S. , CARRARO, J. A. H. *Behavior of Compacted Soil Fly Ash Carbide Lime Compacted Mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA: , v. 128, 2002- b.*
- CORSEUIL, H. X. ; MARINS, M. D. M. *Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: O problema é grave? Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2, n.2, p. 50-54, 1997.*
- DANIEL, D.E. *Clay Liners. In: Geotechnical Practice for Waste Disposal, London: Chapman & Hall, 1993. Cap. 7, p. 137-163.*
- DANIEL, D.E. *State of the art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils, In: HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND WASTE CONTAMINANT TRANSPORT IN SOIL, 1994, Philadelphia. ASTM STP 1142, ASTM, 1994. p.30-78.*
- DIXON, D.A., GRAHAM, J. GRAY, M.N. *Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. Canadian Geotechnical Journal. v. 36, p. 815-825. 1999.*

DONELLY, J. R.; WEBSTER, W. C. *From Sediment to Solid. Civil Engineering*, May 1996, p. 41-43

FERNANDEZ, F., QUINGLEY, R.M. *Hydraulic conductivity of natural clays permeated simple liquid hydrocarbons. Canadian Geotechnical Journal*. v. 122, p. 205-214. 1985.

FREDLUND, D.G., RAJARDO, H. *Soil mechanics for unsaturated soil*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1993.

GILLIGAM, E.D. *The effect of organic pore fluid on the fabric and geotechnical behavior of clays*. Tese .Syracuse University, Syracuse, New York. 1983.

GILLIGAM, 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.

GLASSER, F.P. *Fundamental aspects of cement solidification and stabilization, Journal of Hazardous Material*, v. 52. p 151-170. 1993

GOUMANS, J.J.J.M., VAN DER SLOOT, H.A.,ALBERS, Th.G. (Eds.), WASCON *Waste materials in construction*, Elsevier, Amsterdam, 1991.

GREEN, W.J., LEE, G.F., JONES, R.A. *Clay-soils permeability and hazardous waste storage. Journal of the Water Pollution Control Federation*. v. 53, n° 8, p1347-1354, 1981

GREEN, W.J., LEE, G.F., JONES, R.A., PALLT, T. *Interaction of clay soils with water and organic solvents: Implications for the disposal of hazardous wastes. Environmental Science and Technology*, v. 17, p. 278-282. 1983.

HAMIDON, A.B. *Organic Leachate effects on the stability and hydraulic conductivity of compacted Kaolinite. Dissertação (M.Sc) – Louisiana State /University*. 1984.

- HEINECK, K. S. *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Tese (Doutorado em Engenharia) - PPGE/UFGRS, Porto Alegre. 234p. 2002.
- HUANG, S., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 35, p 426-432. 1998
- IBAÑES, R.; ANDRÉS, A.; IRABIEN, J.A.; ORTIZ, I. Fly ash binders in stabilization of FGD wastes. *Journal of Environmental Engineering*, v. 124, n.1, Jan 1998, p. 43-50.
- JACOBSON, C. D.; OSBORN, G.C. *Getting the Lead out*. *Civil Engineering*, April 1991, p. 60-62.
- KINSKY, J. FRYDMAN, S., ZASLAVSKY, D. The effect of the different dielectric liquids on the engineering properties of clay. *Proceedings, Fourth Asian Regional Conference on SMFE*, v. 1. p. 369-372. 1971.
- KLICH, I; BACHELOR, B.; WILDING, L.P.; DREES, L.R. Mineralogical alterations that affect the durability and metals containment of aged solidified and stabilized wastes. *Pergamon, Cement and Concrete Research*, v.29. p. 1433-1440. 1999.
- KNOP, A. *Encapsulamento de Solos Contaminados por Hidrocarbonetos*. 2003. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGE/UFGRS, Porto Alegre.
- LAMBE, T.W. The Structure of Compacted Clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*. ASCE, v. 84, n. 2, p. 1 – 35, 1958.
- LAMBE, T.W., WITHMANN, R.V. *Soil Mechanics*, SI version. New York: John Wiley & Sons Inc. 553p. 1969.
- LI, X.D., POON, C.S. SUN, H., LO, I.M.C., KIRK, D.W. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/ stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials*. v. A82. p. 215-230. 2001.

- LOCAT, J., TREMBLAY, H., LEROULEIL, S. *Mechanical and Hydraulic Behavior of a Soft Inorganic Clay Treated with Lime. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 33, p. 654-669, 1996.*
- MACIEL FILHO, C. L. *Introdução à Geologia de Engenharia. Santa Maria, Editora da UFSM, 2ª ed, 1997, 284p.*
- MALLMANN, J.E.C. *Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclivagem e câmara à temperatura constante. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 150p. 1996.*
- MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A.E.; POLETTINI, A.; SIRINI, P. *Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementations matrices. Elsevier, Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. B70, p.53-70, 1999.*
- MATEOS, M. *Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash. Ames. Tese (Ph.D.) – Iowa State University of Science and Technology. 247p. 1961.*
- MAYERS, T.E., EAPPI, M.E. *Laboratory evaluation of stabilization/solidification technology for reducing the mobility of heavy metals in New Bedford Harbor superfund site sedimentsstabilization of hazardous radioactive and mixed wastes, second edition. ASTM publication, Philadelphia, 304p. 1992.*
- MESRI, G., OLSON, R.E. *Mechanisms controlling the permeability of clays. Clay and Clay minerals, Pergamon Press, New York. v. 19, p 151-158. 1971.*
- MEYERS, P.A., OAS,T.G. *Comparison of associations of different hydrocarbons with clay particles in simulated sweater. Environmental Science and Technology. v.132. p. 934-937. 1978.*
- MEYERS, P.A., QUINN, J.G. *Association of hydrocarbons and mineral particles in saline solution. Nature (London). v. 244 . p. 23-24. 1973.*

- MONTARDO, J.P. *Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 130p. 1999.*
- MOREIRA, M.D. *Aplicações dos minerais e rochas industriais. Sociedade Brasileira de Geologia, Associação Baiana de Geólogos, 87p. 1994.*
- MICHAELS, A.S., LIN, C.S. *Permeability of Kaolinites. Industrial and Chemistry. v. 46, n° 6, p. 1239-1246. 1954.*
- MITCHELL, J.K. *Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons. New York. 422p. 1976.*
- MITCHELL, J. K. *Fundamentals of Soil Behavior. New York, NY. John Wiley and Sons Inc., 2 ed., 437p, 1993.*
- MITCHELL, J.K., MADSEN, F.T. *Chemical effects on clay hydraulic conductivity. In. Geotechnical practice for waste disposal. ASCE specialty conference. Edited by R.D. woods. American Society of Civil Engineers, New York, p. 87-116. 1987.*
- MOREIRA, MARCOS D. *Aplicações dos minerais e rochas industriais. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, Associação Baiana de Geólogos. 87p. 1994.*
- NEWMANN, H.J., LAHME, B.P., SEVERIN, D. *Composition and properties of petroleum. Geology of petroleum. Vol. V. Wiley, Chichester. 1981.*
- NÚÑEZ, W.P. *Estabilização Físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação. 1991. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.*
- OLSEN, H. W. *Hydraulic flow through saturated clays. Clays and Clays Minerals. v. 9, n. 2, p. 131-161, 1962.*
- PARK, C.K. *Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. Pergamon, Cement and*

Concrete Research, v. 30 p.429 – 435, 2000.

P.E.I Associates Inc. *Handbook of Underground Storage Tank Safety and Correction Technology*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington. 1988.

PINTO, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo. Oficina de Textos. 247p. 2000.

POON, C.S., CHEN, Z.Q., WAI, O.W.H. *The effect of flow-through leaching on the diffusivity of heavy metals in stabilized/solidified wastes*. Elsevier, *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.B81, p. 179-192, 2001.

PRIETTO, P.D.M. *Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 150p. 1996.

PRIETTO, P. D.M. SCHNAID, F.; CONSOLI, N.C. *Aspectos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado*. *Solos e Rochas*, São Paulo, v.20, n.3, p.145-166, 1997.

REFINARIA ALBERTO PASQUALINI – REFAP. *Especificações técnicas para óleo diesel*. Canoas, Internet. Site <http://www.refap.petrobras.com.Br/SegMAmb/substancias/Sub-072.htm>, acesso dia 09/06/2003.

SCHERER, C.M.S. *Arcabouço Estratigráfico do Mesozóico da Bacia do Paraná*. *Geologia do Rio Grande do Sul*. UFRGS. CIGO. Ed. Michael Holz e Luiz Fernando De Ros. 444p. 1ª Ed. 1998.

STEGEMANN, J.A.; BUENFELD, N.R. *Prediction of leachate pH for cement paste containing pure metal compounds*. Elsevier, *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.B90, p. 169-188, 2002.

SUTHERSAN, SUTHAN. S. *Remediation Engineering: Design Concepts*. CRC Press Inc. Lewis Publishers. 1997. 362p.

TAVENAS, F. LEBLOND, P., JEAN, P., LEROUEIL, S. *The Permeability of Natural Soft Clays. Part I: Methods of Laboratory Measurement*. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 20, p. 629-644, 1983.

THOMÉ, A., CARRARO, J. A. H., CONSOLI, N. C. *Utilisation of industrial by products for soil stabilisation and the influence of temperature in the development of pozzolanic reactions in: ENVIROMENTAL GEOTECHNICS*. 1 ed. The Netherlands: A. A. Balkema, 1998.

THOMÉ, A. *Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais*. 1999. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia)

ULBRICH, L.A. *Aspectos do comportamento de um solo reforçado com fibras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre , 122p. 1997.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Tractability Studies for Solidification/ Stabilization of Contaminated Material*. Technical Letter N° 1110-1-158. Washington, 1995.

VALLS, S., VÁSQUEZ, E. *Stabilization and solidification of sewage sludges with Portland cement*. Pergamon, *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 1671-1678, 2000.

VAN DER SLOOT, H.A., HEESMAN, L., QUEVAUVILLER, Ph. *Harmonization of leaching extraction test, studies in Environmental Science*, Elsevier, Amsterdam, 1997.

VAN OLPHEN, H. *An introduction to clay colloid chemistry*. John Wiley & Sons, New York. 1963.

VARGAS, M. ,1914. *Introdução à mecânica dos Solos*. 509 p. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.

WILES, C.C., *A review of Solidification/Stabilization technology*. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v.14, p 5-21, 1987.

YANFUL, E. K., SHIKATANI, K. S., QUIRT, D. *Hydraulic Conductivity of Natural Soils Permeated with Acid Mine Drainage*. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 32, p. 624-646, 1995.

YONG, R.N., RAO, S.M. *Mechanistic Evaluation of Mitigation of Petroleum hydrocarbon contamination by soil medium*. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 28. p 84-91. 1991.