

**COMPORTAMENTO DE *LINERS* SOB A INFLUÊNCIA DE
UM CONTAMINANTE ORGÂNICO**

Augusta Brenner dos Santos

Porto Alegre

Abril, 2005.

AUGUSTA BRENNER DOS SANTOS

**COMPORTAMENTO DE *LINERS* SOB A INFLUÊNCIA DE
UM CONTAMINANTE ORGÂNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico.

Porto Alegre

Abril, 2005.

Santos, Augusta B.

Título: Comportamento de *Liners* sob a Influência de um Contaminante Orgânico/ Augusta Brenner dos Santos – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2005.

n p.

Comportamento de *Liners* sob a Influência de Contaminante, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre. Orientador: Consoli, Nilo; Heineck, Karla Orientador.

1. Assunto I. Condutividade Hidráulica.

CCAA2

AUGUSTA BRENNER DOS SANTOS

**COMPORTAMENTO DE *LINERS* SOB A INFLUÊNCIA DE
UM CONTAMINANTE ORGÂNICO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, abril de 2005.

Prof. Nilo César Consoli,
Ph. D. pela Concordia University, Canada
Orientador

Prof. Karla Salvagni Heineck,
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. University of Oxford-Inglaterra

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

Prof. Gilliane Christine Sills
Ph.D. pela University London

Dedico este trabalho a minha mãe Marlene pelo apoio durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Para a realização desta dissertação, diversas pessoas e instituições foram importantes. Eis a forma que encontrei para prestar meu reconhecimento, agradeço:

A minha mãe por toda a força dada durante o mestrado.

Aos meus orientadores Nilo César Consoli e Karla Salvagni Heineck pelos ensinamentos, dedicação, confiança prestada e pelos constantes incentivos.

Ao bolsista de iniciação científica Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger pelo apoio e dedicação.

À Refinaria Alberto Pasqualini REFAP S.A., a qual forneceu amostras de combustível para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Juan Flores pelo apoio dado nos ensaios de difração de raios x.

Aos funcionários João Nelson Diniz pelo apoio, pelas dicas.

Aos colegas mestrandos e doutorandos, especialmente Rodrigo Montemezzo, Rodrigo Caberlon, Alexandre Knop e Rosemar Lemos.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

SANTOS, A.B. **Comportamento de *Liners* sob a Influência de um Contaminante Orgânico**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de Solo-Bentonita (SB) e de Solo-Cimento-Bentonita (SCB) quando permeada com água e óleo diesel, bem como analisar a influência da variação do teor de cimento com a finalidade de propiciar resultados capazes de auxiliar para um projeto construtivo de barreiras verticais de contaminantes. O programa experimental consistiu na realização de ensaios de compressão não-confinada, ensaios de condutividade hidráulica com um permeâmetro de parede rígida do tipo *Compaction mold* e ensaios de difração de raios-X a fim de se estudar o comportamento das misturas de SB e SCB em termos de resistência e permeabilidade. Os resultados dos ensaios realizados para cada tipo de mistura foram analisados separadamente. A análise dos resultados permitiu identificar as alterações provocadas na condutividade hidráulica pela variação do fator a/c e do líquido percolante. Os resultados dos ensaios de compressão não-confinada demonstraram uma maior resistência com a diminuição do fator a/c . A mistura de SB apresentou um aumento da condutividade hidráulica quando permeada com óleo diesel comparado com o valor encontrado quando permeado com água, o que pode ser explicado pelo inchamento intracristalino demonstrado pelo ensaio de difração de raios-X. As amostras de SCB, devido à introdução de cimento, apresentaram um acréscimo inicial na condutividade hidráulica (permeadas com água) quando comparadas com amostras de SB, seguidas de uma redução na condutividade hidráulica quando permeadas com óleo diesel.

Palavras-chave: condutividade hidráulica, contaminante orgânico, bentonita, montmorilonita, solo residual, cimento

ABSTRACT

SANTOS, A.B. **Behavior Of *Liners* Under The Influence Of An Organic Contaminant.** 2005. (M.Sc. Thesis in Engineering) – Graduate Course in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Behavior Of *Liners* Under The Influence Of An Organic Contaminant

The objective of this work is to study the mechanical and hydraulic behavior of soil-cement-bentonite (SCB) and soil-bentonite (SB) mixes when permeated with water and diesel oil, as well as to investigate the influence of cement content with the purpose of providing results capable of helping the design of vertical cutoff walls. Unconfined compression tests, hydraulic conductivity test with a compaction mold permeameter and X-ray diffraction tests were carried out in order to study the SCB and SB mixes behavior in unconfined strength and hydraulic conductivity terms. The analysis of the results allowed to identify changes in hydraulic conductivity due to the variation of the water-cement ratio and permeant fluid. The results of the unconfined compression tests demonstrated that the samples with water-cement ratio = 2 reached higher shear strengths than the other samples with water-cement ratio = 4 and 6. The SB mixes presented an increase of the hydraulic conductivity when permeated with diesel oil when compared with the same samples permeated with water, which can be explained by the intracrystalline swelling, demonstrated by the X-ray diffraction test. The SCB mixes, due to the introduction of cement, have an initial increase in hydraulic conductivity (permeated with water), when compared with SB mix, followed by a reduction of the hydraulic conductivity when diesel oil is permeated.

Key words: hydraulic conductivity, organic contaminant, bentonite, montmorillonite, residual soil, cement.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
2.2 <i>SLURRY WALLS</i>	3
2.2.1 Barreiras de Solo-Bentonita	4
2.2.2 Barreiras de Solo-Cimento-Bentonita.....	7
2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS	9
2.3.1 Condutividade hidráulica em meios saturados e a Lei de Darcy	9
2.3.2 Fatores que interferem na condutividade hidráulica	11
2.4 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO POROSO.....	12
2.5 CONTAMINANTE.....	19
2.6 PERMEÂMETRO DE PAREDE RÍGIDA X PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL	19
2.7 FLUÍDOS ORGÂNICOS E SUA INTERAÇÃO COM O SOLO	21
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	23
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
3.2 ENSAIOS PRELIMINARES DE CARACTERIZAÇÃO.....	23
3.2.1 Caracterização dos Materiais	23
3.3 DEFINIÇÃO DA DOSAGEM DOS MATERIAIS NAS MISTURAS	24
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	24
3.4.1 Solo	25
3.4.2 Bentonita.....	29
3.4.3 Cimento.....	30
3.4.4 Água	31
3.4.5 Óleo Diesel.....	32
3.5 MÉTODOS UTILIZADOS	32
3.5.1 Coleta e preparação dos materiais	33
3.5.2 Preparação dos corpos de prova.....	33
3.5.3 Ensaios de Caracterização	34
3.5.4 Ensaios de Compressão não-confinada.....	34
3.5.5 Ensaios de Condutividade Hidráulica.....	35
3.5.6 Análise por Difração de Raios X.....	38
4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	39
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA.....	39

4.3 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SEGUNDO A NORMA ASTM D5856	40
4.3.1 Resultados da amostra Solo-Bentonita (SB)	40
4.3.2 Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 2	43
4.3.3 Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 4	46
4.3.4 Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 6	50
4.2.5 Resultados globais	53
4.4 ANÁLISES POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X	55
4.4.1 Resultado da análise de Difração de Raios X - Amostra natural	56
4.4.2 Resultado da análise de Difração de Raios X da amostra tratada com Etileno Glicol	57
4.4.3 Resultado da análise de Difração de Raios X da amostra Calcinada	57
4.4.3 Resultado da análise de Difração de Raios X da amostra de Bentonita Saturada com Óleo Diesel	58
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	60
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	60
5.2 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO	60
5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	60
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Formação do <i>filter cake</i> : (a) deposição das partículas coloidais nos vazios do solo; (b) filtração da lama por diferença de pressões; (c) formação do filme protetor ao longo da face da escavação (Fonte: Xanthakos, 1979).....	5
Figura 2.2 – Lançamento da mistura de Solo-Cimento-Bentonita para dentro da trincheira (Fonte: Ryan e Day, 2002).....	7
Figura 2.3 – Lâminas de uma montmorilonita.....	14
(Fonte: Site:www.systemmud.com.br)	14
Figura 2.4 – Comparação do inchamento de uma montmorilonita cálcica e sódica (Fonte: Site:www.systemmud.com.br).....	15
Figura 2.5 – Comparação entre estruturas das argilas	16
(Fonte: Site:www.systemmud.com.br)	16
Figura 3.1 - Mapa da localização da Vila Scharlau (Thomé, 1999).	25
Figura 3.2 – Jazida de arenito Botucatu na localidade de Vila Scharlau (Caberlon, 2004).	26
Figura 3.3 – Curva granulométrica do SRAB (Heineck, 2002).	28
Figura 3.4 – Curva de compactação do SRAB (Knop, 2003).	28
Figura 3.5 - Distribuição Granulométrica da Bentonita Sódica	30
Figura 3.6 – Vista geral dos permeâmetros instalados em uma capela de exaustão de gases ..	35
Figura 3.7 – Permeâmetro – Detalhe dos cilindros - (1), do cilindro que contém o líquido permeante (2) e do tubo graduado para a leitura da vazão (3).....	36
Figura 3.8 – Esquema do Permeâmetro	37
Figura 4.1 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra Solo-Bentonita permeada com água	41
Figura 4.2 – Resultado do V_p/V_v x Tempo na amostra Solo-Bentonita permeada com água .	41
Figura 4.3 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra Solo-Bentonita permeada com óleo diesel	42
Figura 4.4 – Resultado do V_p/V_v x Tempo na amostra Solo-Bentonita permeada com óleo diesel.....	43
Figura 4.5 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c = 2$ permeado com água	44
Figura 4.6 – Resultado do V_p/V_v x Tempo na amostra SCB fator $a/c=2$ permeada com água	45
Figura 4.7 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c = 2$ permeada com óleo diesel.....	45

Figura 4.8 – Resultado do V_p/V_v x Tempo na amostra SCB fator $a/c=2$ permeada com óleo diesel.....	46
Figura 4.9 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c =4$ permeada com água	47
Figura 4.10 – Resultado V_p/V_v x Tempo na amostra SCB fator $a/c=4$ permeada com água ..	48
Figura 4.11 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c =4$ permeada com óleo diesel.....	49
Figura 4.12 – Resultado do V_p/V_v x Tempo na amostra SCB fator $a/c=4$ permeada com óleo diesel.....	49
Figura 4.13 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c =6$ permeada com água	50
Figura 4.14 – Resultado V_p/V_v x Tempo na amostra SCB fator $a/c=6$ permeada com água ..	51
Figura 4.15 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c =6$ permeada com óleo diesel.....	52
Figura 4.16 – Resultado do volume de entrada e saída na amostra SCB fator $a/c=6$ permeada com óleo diesel	52
Figura 4.17 – Resultado da condutividade hidráulica para a água	54
Figura 4.18 – Resultado da condutividade hidráulica para óleo diesel	55
Figura 4.20 - Difratoograma de Raios X. Amostra natural	56
Figura 4.21 - Difratoograma de Raios X. Amostra tratada com etileno glicol.....	57
Figura 4.22 - Difratoograma de Raios X da bentonita calcinada	58
Figura 4.23 - Difratoograma de Raios X. Amostra de bentonita saturada com óleo diesel.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dosagem de materiais aplicados em misturas de Solo-Cimento-Bentonita.....	8
Tabela 2.2 – Classificação das Argilas	13
Tabela 3.1 – Dosagem dos Materiais.....	24
Tabela 3.1 – Índices Físicos do SRAB	27
Tabela 3.2 - Índices Físicos da Bentonita Sódica	30
Tabela 3.3 – Teor de componentes do cimento Portland (% em massa) (ABCP, 2003).....	31
Tabela 3.4 – Características físicas e mecânicas do cimento CP V – ARI (Feuerharmel, 2000)	31
Tabela 3.5 – Informações sobre óleo diesel (REFAP, 2003)	32
Tabela 4.1 – Resultados do programa de ensaios de compressão não-confinada	39
Tabela 4.2 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Bentonita (SB).....	40
Tabela 4.3 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) fator a/c=2	43
Tabela 4.4 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) fator a/c=4	46
Tabela 4.5 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) fator a/c=6	50
Tabela 4.6 – Resumo dos resultados.....	53

SIGLAS E SÍMBOLOS

A: Área da seção transversal

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ARI: Alta resistência inicial

C_u : Coeficiente de Uniformidade

D: Constante Dielétrica

D_{10} : Diâmetro efetivo

D_{50} : Diâmetro Médio

DECIV: Departamento de Engenharia Civil

Δh : Variação de altura entre dois pontos

Δs : Variação de distância entre dois pontos

$\vec{\nabla} H$: Gradiente da carga hidráulica no espaço tridimensional

g: Aceleração da gravidade

γ_d : Densidade máxima

γ_0 : Massa específica da água

γ_s : Densidade Real dos Grãos

i: Gradiente hidráulico

IP: Índice de Plasticidade

k: Coeficiente de condutividade hidráulica

LC: Limite de Contração

LL: Limite de Liquidez

LP: Limite de Plasticidade

p: Pressão piezométrica

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Q: Vazão

REFAP: Refinaria Alberto Pasqualini S. A.

RS: Rio Grande do Sul

SB: Solo-Bentonita

SCB: Solo-Cimento-Bentonita

SRAB: Solo residual de arenito Botucatu

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

v: Velocidade de percolação

ω_{ot} : Umidade ótima

z: Cota do ponto

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Normalmente os solos com altos teores de argila apresentam baixos valores de condutividade hidráulica. Devido a essa característica as misturas de Solo-Bentonita (SB) e Solo-Cimento-Bentonita (SCB) vem sendo cada vez mais utilizadas nos últimos anos como uma forma de barreira vertical de contenção de contaminantes, sendo que sistemas de barreiras verticais utilizando estes materiais apresentam uma maior rapidez construtiva e um menor custo que outros processos construtivos consagrados.

Este sistema de barreiras recebe a denominação de *Slurry Walls* e consiste numa matriz de solo e bentonita, com ou sem a presença do cimento Portland. Deve, contudo, apresentar uma umidade suficiente para manter a mistura com baixa consistência para possibilitar seu escoamento dentro da barreira.

As barreiras verticais de contenção têm a finalidade de evitar a contaminação do lençol freático ou de áreas específicas através de seu confinamento, de tal forma que impeça o contato com as plumas de contaminantes encontradas no solo, sendo que estas plumas podem ser geradas de várias maneiras: vazamento de tanques de combustível, rompimento de canos, despejo de produtos químicos inadequados, etc. Desta forma esta pesquisa se propõe a analisar o comportamento hidráulico do compósito Solo-Bentonita e Solo-Cimento-Bentonita quando permeado com óleo diesel encontrado no comércio brasileiro, simulando o comportamento do *liner* quando em contato com um contaminante orgânico.

1.2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo verificar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de Solo-Bentonita e solo-cimento-bentonita com a finalidade de propiciar resultados

capazes de auxiliar um projeto construtivo de barreiras verticais de contenção de contaminantes utilizando estes materiais.

A partir do objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- a) Analisar o comportamento mecânico das misturas Solo-Bentonita e Solo-Cimento-Bentonita, avaliando o ganho de resistência mecânica com diferentes fatores água-cimento (a/c);
- b) Estudar o comportamento hidráulico das misturas quando percolados com água e contaminante;
- c) Comparar o comportamento das misturas com cimento (Solo-Cimento-Bentonita) e sem cimento (Solo-Bentonita).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para apresentação da dissertação, optou-se pela seguinte estrutura:

- a) Capítulo 1: Apresenta-se a introdução, onde constam os problemas e a relevância da pesquisa, bem como os objetivos desta pesquisa;
- b) Capítulo 2: Revisão bibliográfica dos principais assuntos referentes a esta pesquisa, priorizando trabalhos científicos que pudessem fornecer subsídios para o desenvolvimento de um programa experimental adequado à pesquisa proposta;
- c) Capítulo 3: É apresentada a etapa de laboratório com uma descrição detalhada do programa experimental, consistindo na exposição e caracterização dos materiais, métodos, equipamentos utilizados e detalhes acerca da preparação dos corpos de prova;
- d) Capítulo 4: São apresentados os resultados obtidos, bem como são feitas as análises e estabelecidas discussões dos ensaios de laboratório, buscando o entendimento das características mecânicas e hidráulicas das misturas de Solo-Cimento-Bentonita, assim como a influência do líquido percolante no comportamento da mistura;
- e) Capítulo 5: As conclusões do trabalho são apresentadas e feitas sugestões para as próximas pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica das barreiras tipo *Slurry Walls*, seguido de uma revisão sobre condutividade hidráulica de solos saturados, caracterização do meio poroso e do contaminante, interação solo-contaminante e finalmente uma revisão sobre os tipos de permeâmetros mais utilizados.

2.2 SLURRY WALLS

As barreiras verticais de contenção, conhecidas como *Slurry Walls*, consistem em uma escavação em forma de trincheira, normalmente com 0,60 a 1,50 m de largura (D'Appolonia, 1980), em que as paredes da escavação são suportadas por uma "lama de bentonita", que posteriormente enrijece dentro do trecho ou é substituída por um material geotécnico (solo).

Este sistema vem, nos últimos anos, substituindo outros processos construtivos consagrados de barreiras de contenção, como por exemplo: estacas-pranchas, paredes diafragma entre outros, principalmente pela sua maior rapidez construtiva e ao seu menor custo (Xanthakos, 1979).

Op. cit. menciona que geralmente estas trincheiras são preenchidas com Solo-Bentonita ou Solo-Cimento-Bentonita, e passam a constituir uma barreira de materiais misturados por equipamentos móveis, que acompanham o ritmo da escavação. Entre eles pode-se citar as retro-escavadeiras e as carregadeiras de esteiras. Esta é a principal razão para a alta produtividade e diminuição dos custos das barreiras tipo *Slurry Walls*.

As barreiras podem ser classificadas da seguinte forma segundo *op. cit.*:

- a) De acordo com o material de preenchimento (*backfill*) da trincheira, elas podem ser classificadas como Solo-Bentonita, Cimento-Bentonita e Solo-Cimento-

Bentonita, sendo tratada nesta revisão apenas as barreiras de Solo-Bentonita e Solo-Cimento-Bentonita, que são alvo desta pesquisa;

- b) Dependendo da estratigrafia do subsolo, elas podem ser cravadas em um substrato ou suspensas;
- c) Podem ter função estrutural, de acordo com as condições da morfologia e da estratigrafia do local;
- d) Dependendo das condições do local, elas podem estar, ou não, em um ambiente agressivo;
- e) E ainda, podem ser abertas ou fechadas, dependendo da geometria.

Outra forma de *liner* muito utilizado, conforme Broderick e Daniel (1990), é a argila compactada. Broderick e Daniel (1990) enfatizam dois tipos de argilas compactados usados, um deles através de misturas com aditivos e outro é a estabilização mecânica:

- a) Na mistura com aditivos espera-se estabilizar o solo por cimentação das partículas de argila, aumentando a resistência do solo e pelo fechamento parcial dos poros da massa de solo, esperando-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;
- b) 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.

2.2.1 Barreiras de Solo-Bentonita

Este tipo de barreira começou a ser utilizada, com o passar do tempo, para o controle das infiltrações nas escavações (fundações, aterros) e, principalmente, para evitar as infiltrações de poluentes carregados através do lençol freático contaminado (Ryan e Day, 2002).

O primeiro passo depois de aberta a barreira é lançar a lama bentonítica, que por diferença de pressão penetrará nos vazios do solo adjacente. Neste processo se formará o *filter cake*, que é uma fina camada que se forma na interface da lama e do solo, sendo que esta camada se dá

pelo acúmulo nos poros das partículas do solo adjacente de grupos de partículas sólidas, denominados colóides.

Após alguns segundos, o *filter cake* é coberto por uma fina camada de bentonita, também chamada de filme protetor. O processo é ilustrado na Figura 2.1. Nesse estágio, a barreira está impermeável e oferece completa resistência a penetração de líquidos. A pressão lateral exercida pela lama bentonítica no trecho age contra o *filter cake* estabilizando as paredes da escavação, evitando assim, o seu colapso (Xanthakos, 1979).

A lama bentonítica é mantida, durante toda a escavação, pelo menos 60 cm acima do nível d'água dentro do solo e, no máximo, 90 cm abaixo do nível da superfície.

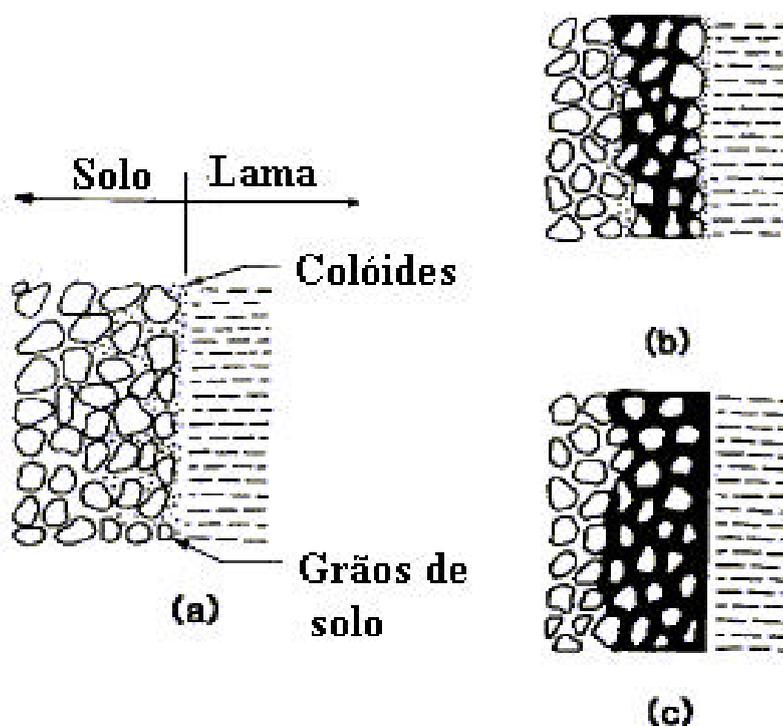


Figura 2.1: Formação do *filter cake*: (a) deposição das partículas coloidais nos vazios do solo; (b) filtração da lama por diferença de pressões; (c) formação do filme protetor ao longo da face da escavação (Fonte: Xanthakos, 1979).

O *backfill*, ou material de preenchimento, apresenta uma composição de acordo com as necessidades de projeto, sendo que nesta mistura, a bentonita sempre está incluída. Para Xanthakos (1979), a bentonita contribui para uma granulação adequada do material, o que, por sua vez, esta relacionada com a condutividade hidráulica do material de preenchimento.

Segundo D'Appolonia (1980) se o material de preenchimento apresentar uma alta condutividade hidráulica, então a condutividade hidráulica da barreira Solo-Bentonita é função do *filter cake*. Já, por outro lado, se a condutividade hidráulica do *backfill* for baixa, então a condutividade hidráulica da barreira é uma função do material de preenchimento.

A granulometria do solo utilizado na mistura é outro fator muito importante na condutividade hidráulica do material de preenchimento como um todo, sendo que quanto menor a condutividade hidráulica no solo, menor será a condutividade hidráulica da mistura de Solo-Bentonita. Desta forma, solos com maior porcentagem de finos plásticos na sua granulometria irão apresentar menores valores de condutividade hidráulica se comparados a materiais de maior diâmetro e não-plásticos (Xanthakos, 1979; D'Appolonia, 1980).

O material de preenchimento deve ser uma pasta saturada tendo baixa resistência ao cisalhamento para ser capaz de escoar facilmente, mas ao mesmo tempo ter rigidez suficiente para permanecer estável numa declividade de 10:1. Esta consistência corresponde a um *slump* de 10 a 15 cm e uma quantidade de água na mistura de Solo-Bentonita normalmente entre 25 a 30% em relação ao peso total (D'Appolonia, 1980).

Para se obter uma baixa condutividade hidráulica em barreiras de Solo-Bentonita é essencial a aplicação de uma grande quantidade de finos com características plásticas na sua granulometria, mas ao mesmo tempo a inserção desse material irá gerar uma alta compressibilidade. Uma combinação ótima para se gerar um material de baixa condutividade hidráulica e compressibilidade consiste de uma matriz granular cujos vazios gerados serão preenchidos por solos de grãos finos e bentonita. D'Appolonia (1980), por exemplo, sugere a combinação de uma areia com 20 a 30% de materiais finos (partículas de solo que passam pela abertura da peneira de nº200) de características plásticas.

As amostras de Solo-Bentonita apresentam valores de condutividade hidráulica inferiores às das misturas de Solo-Cimento-Bentonita (Azambuja, 2004).

2.2.2 Barreiras de Solo-Cimento-Bentonita

As barreiras de Solo-Cimento-Bentonita (SCB) são construídas da mesma forma que as barreiras de Solo-Bentonita, porém são mais rasas normalmente apresentando uma profundidade inferior a 15m (Ryan e Day, 2002), sendo que isto depende do tipo do solo no local.

A mistura da lama de SCB é bastante difícil de ser realizada, devido à adição do cimento, devendo ser misturada até atingir uma forma homogênea.

Para Xanthakos (1979), a bentonita serve como sustentação para as partículas de cimento, evitando a segregação da lama.

Este processo é conhecido como sendo de execução em duas etapas. A primeira etapa consiste da escavação do trecho e a outra é o enchimento da trincheira, conforme ilustra a Figura 2.2 (Ryan e Day, 2002).



Figura 2.2 – Lançamento da mistura de Solo-Cimento-Bentonita para dentro da trincheira (Fonte: Ryan e Day, 2002).

Segundo Ryan e Day (2002) as dosagens usuais são as seguintes, conforme a Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Dosagem de materiais aplicados em misturas de Solo-Cimento-Bentonita

Materiais	Quantidades (%)*
Bentonita	2 - 3
Cimento	10 - 20
Solo e Água	A determinar

(Fonte: Ryan e Day, 2002).

* Percentual calculado em relação ao peso total da mistura

Conforme Broderick e Daniel (1990) a adição de cimento Portland melhora a resistência química do solo ao ataque de químicos orgânicos. Podendo, em alguns casos, a condutividade hidráulica do solo estabilizado com cimento e permeado com químicos orgânicos ser menor que a condutividade hidráulica do solo não estabilizado e permeado com água.

A condutividade hidráulica de uma mistura de Solo-Cimento-Bentonita é um resultado de complexas interações entre os vários componentes da mistura. Segundo Ryan e Day (2002), o cimento Portland interfere na capacidade de uma mistura de solo e bentonita de atingir baixos valores de condutividade hidráulica, mas por outro lado, o cimento aumenta a resistência da mistura, sendo que esta resistência é função do fator água-cimento e da sua idade.

Segundo Ryan e Day (2002) as especificações para a resistência mínima das barreiras de Solo-Cimento-Bentonita variam em um intervalo de 100 a 700 kPa, sendo que alguns projetos exigem um mínimo de resistência de 200 kPa aos 28 dias. Entretanto, existem numerosos fatores que devem ser considerados para a determinação da resistência mínima de uma barreira de Solo-Cimento-Bentonita, entre os quais estão:

- a) O custo do cimento que aumenta quase que em proporção direta em relação à resistência mínima especificada;
- b) O acréscimo excessivo de cimento pode gerar juntas e diminuir consideravelmente a flexibilidade da barreira sob a ação de carregamentos, com isso, aumentando as chances de aparecimento de fissuras na barreira;

- c) O efeito negativo que o cimento tem sobre a condutividade hidráulica da barreira, levando a valores maiores em relação às barreiras de Solo-Bentonita.

2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS

2.3.1 Condutividade hidráulica em meios saturados e a Lei de Darcy

Levando-se em consideração as areias, o solo pode ser visto como um material poroso e permeável constituído por diversos canais, interconectados uns aos outros, o que permite que a água seja armazenada devido ao equilíbrio hidrostático ou flua através da ação da gravidade. Outro fator importante deste tipo de solo é sua baixa compressibilidade, o que acarreta numa baixa transferência de pressões entre grãos e água, o que resulta num solo muito permeável (Vargas, 1977).

Pinto (2000) relatou que os solos residuais e solos evoluídos pedologicamente apresentam estruturas com macroporos, pelos quais a água percola com maior facilidade. Nestes solos, mesmo que as partículas sejam pequenas, os vazios entre as aglomerações das partículas são grandes e é por eles que a água flui.

Por outro lado, as argilas apresentam um comportamento diferente do apresentado pelas areias, pois é um solo com alta compressibilidade, o que acarreta numa alta transferência de pressão entre o solo e a água e uma conseqüente 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).

O engenheiro francês Henry Darcy em 1856 realizou experimentos clássicos sobre o escoamento laminar através de um meio poroso. Estes experimentos foram feitos com filtros de areia, os quais foram percolados por água (Lambe, 1979).

O movimento dos fluídos no meio poroso é limitado por constrições, de modo que a geometria real do fluxo é muito complexa para ser estudada em detalhes. Além disso, a velocidade de um fluído no meio poroso é variável segundo a distribuição granulométrica, o arranjo e a forma dos grãos. Sendo assim, devido a complexidade da determinação da velocidade intergranular, a velocidade dos fluídos no meio poroso é geralmente descrita em termos macroscópicos, denominada de velocidade de fluxo, fluxo específico ou velocidade de Darcy (Halliday e Resnick, 1979).

Considerando um solo permeável com um fluxo permanente de um fluído não-viscoso e sob a ação da gravidade, aplica-se à equação de Bernoulli expressa por:

$$\frac{p}{\rho_0} + z + \frac{v^2}{2g} = cte \quad (1)$$

onde p é a pressão piezométrica num ponto qualquer,

ρ_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):

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

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

Os resultados de Darcy levaram a seguinte expressão:

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

onde k representa o coeficiente de condutividade hidráulica e a velocidade de percolação (v) é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i).

Porém, 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. Desta forma, onde o fluxo se torna não estacionário ou o solo não seja tão uniforme, a carga hidráulica pode não decrescer linearmente ao longo da direção do fluxo. Assim, onde o gradiente da carga hidráulica ou a condutividade é variável torna-se necessário considerar os valores localizados do gradiente, fluxo e condutividade, ao invés de valores médios para o solo como um todo. Uma expressão mais exata e generalizada para a Lei de Darcy, é, portanto, escrita na forma diferencial e tridimensional:

$$\vec{v} = k \vec{\nabla} H \quad (5)$$

onde $\vec{\nabla} H$ é o gradiente da carga hidráulica no espaço tridimensional.

2.3.2 Fatores que interferem na condutividade hidráulica

Daniel (1994) relata que o coeficiente de condutividade hidráulica não só varia com os tipos de solos, mas também em um mesmo solo, dependendo essencialmente da temperatura. E ainda cita um estudo anterior apresentado em 1981 por Olson e Daniel, que relata que a condutividade depende também das propriedades do líquido permeado.

Boyton e Daniel (1985) relatam que a condutividade hidráulica pode sofrer interferência do 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 poros, a idade da amostra a ser testada, o índice de vazios e outros.

Mitchell (1976) ainda cita a concentração eletrolítica, a composição e natureza de cátions adsorvidos, grau de saturação, índice de vazios e tensões atuantes na amostra.

Conforme Pinto (2000) o grau de saturação é um fator importante, visto que a percolação de água não remove todo ar existente num solo não saturado e estas bolhas de ar contidas pela tensão superficial da água que constituem obstáculos ao fluxo de água. Assim o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que aqueles apresentados pelos solos totalmente saturados. *Op. cit.* relata ainda que a condutividade hidráulica depende da disposição relativa dos grãos. Solos residuais por apresentarem macroporos apresentam maior condutividade hidráulica. 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.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO POROSO

Um dos principais fatores que irá interferir na condutividade hidráulica é o meio poroso que será utilizado, sendo normalmente utilizado como meio poroso a argila. Sendo elas formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (Santos, 1989).

Segundo Pereira (2003) a maioria dos minerais de argilas apresentam morfologia planar como as micas. Dependendo da proporção entre sílica e alumina, tal como 1:1, 2:1 e 2:2, podem receber diferentes classificações, conforme a Tabela 2.2.

Conforme citado por Santos (1989) a classificação dos argilominerais recomendada pelo Comitê Internacional pour L'Etude des Argiles (CIPEA, Mackenzie, 1959), esses minerais são subdivididos em duas grandes classes:

- a) Os silicatos cristalinos com reticulado em camadas, ou forma lamelar, também chamados de filossilicatos;
- b) Os silicatos com reticulado de estrutura fibrosa.

Tabela 2.2 – Classificação das Argilas

Grupo	Estrutura Sílica: Alumina	Troca Catiônica	Distância Interatômica (Å)	Hidratação / Inchamento
Caolinita	1 : 1	Nenhuma	7,2	Nenhum
Talco	2 : 1	Nenhuma	9,3	Nenhum
Esmectita	2 : 1	Na ⁺ , Ca ⁺² , K ⁺ , Mg ⁺²	11 – 15	Variável
Vermiculita	2 : 1	K ⁺ , Mg ⁺²	14 – 15	Variável
Ilita	2 : 1	K ⁺	10	Nenhum
Mica	2 : 1	K ⁺	10	Nenhum
Clorita	2 : 2	Mg(OH) ₂ ou Fe	14	Nenhum
Atapulgita	2 : 1	Nenhuma	12	Nenhum

(Fonte: Site:www.systemmud.com.br)

Os filossilicatos são os mais encontrados na natureza e a classificação desse grupo é feita em função das suas propriedades estruturais, tais como distância interplanar basal, grau de substituição na camada octaédrica, expansibilidade pela introdução de moléculas polares entre camadas basais e do tipo de arranjo ao longo dos eixos cristalográficos que definem as espécies de um grupo mineral. Este grupo apresenta os seguintes subgrupos: a) caolinita; b) esmectita ou montmorilonita; c) vermiculita; d) mica hidratada ou hidrômica; e) clorita; f) argilominerais de camadas mistas ou interestratificadas.

As argilas mais importantes utilizadas para a contenção de escavações e em barreiras de contenção pertencem ao grupo das esmectitas. Elas são as maiores componentes das bentonitas que são argilas industrializadas fortemente hidratáveis aplicadas na lama de perfuração. Possuem propriedades viscosificantes, formadora de gel e de controle de filtrações. O termo bentonita é utilizado comercialmente para denominar a montmorilonita que possui o sódio como cátion trocável, que é um tipo de esmectita (Pereira, 2003).

Conforme podemos observar na Figura 2.3, o cristal de montmorilonita consiste de três camadas: alumina sobreposta e sotoposta por sílica como se fosse um sanduíche (Pereira, 2003).

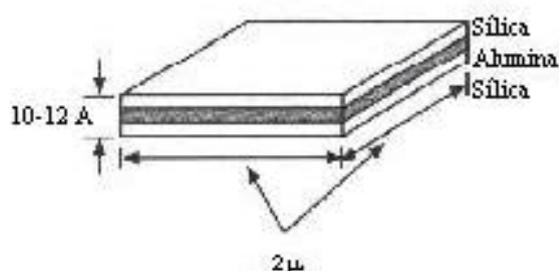


Figura 2.3 – Lâminas de uma montmorilonita.

(Fonte: Site:www.systemmud.com.br)

As argilas são agregadas em pacotes laminares como um baralho de cartas. Cada lâmina mede 10\AA , ou seja, cada milímetro comporta 1 milhão de lâminas. Se pudessem ser espalhadas uma ao lado da outra, as lâminas presentes em 1 g de argila ocupariam área de 750 m^2 . Ao entrarem em contato com água, os pacotes de argila vão se separando a medida que a água penetra entre as camadas. Este efeito é chamado de dispersão – a separação das lâminas aumenta sua área de superfície exposta com as cargas atraindo as moléculas de água criando o efeito gel (Pereira, 2003).

As esmectitas apresentam partículas de pequeno diâmetro e extremamente finas, suas variedades possuem geralmente um elevado grau de propriedades plásticas e coloidais, e apresenta grandes variações em suas propriedades físicas, sendo estas variações freqüentemente atribuídas a variações na natureza dos cátions trocáveis que neutralizam a estrutura cristalina e a fatores estruturais e composicionais (Santos, 1989).

As características das esmectitas incluem grande capacidade de troca catiônica, grande área superficial e baixa condutividade hidráulica para a água (Gleason *et al.*, 1997).

Segundo Maciel Filho (1997) as esmectitas são caracterizadas pelo seu poder de retenção de água, expansibilidade elevada e por se tornar plásticas em um teor de umidade superior ao correspondente ao da caolinita. 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.

Conforme estudo de Alther (1982, 1987); Rescke e Haug (1991), citados em Gleason *et al.* (1997), a maior parte das bentonitas são sódicas ou cálcicas e são caracterizadas pelo tipo de cátion externo, que é absorvido na superfície da partícula da argila durante a formação do

mineral. A bentonita sódica é usada mais extensivamente que a bentonita cálcica devido a sua superior capacidade de expansão e sua menor condutividade hidráulica na água.

A capacidade da argila em trocar cátions, a área de superfície das placas e a quantidade de água adsorvida refletem sua reatividade. Os dois últimos são dados físicos. O primeiro é o dado químico que pode ser medido e indica com precisão a presença das esmectitas nas formações perfuradas ou no próprio fluido. A capacidade de troca catiônica da esmectita é 10 vezes maior que das outras, em média. A troca deixa elétrons excedentes, ou seja, cargas negativas nas superfícies das lâminas. Estas são compensadas por cátions adsorvidos que unirão as placas em grandes pilhas. Os cátions podem ser monovalentes como o Na^+ ou bivalentes como o Ca^{+2} e o Mg^{+2} . Desta forma, a montmorilonita pode ser cálcica ou sódica. Na Figura 2.4 pode-se observar uma comparação entre o inchamento de uma bentonita sódica e cálcica (Pereira, 2003).

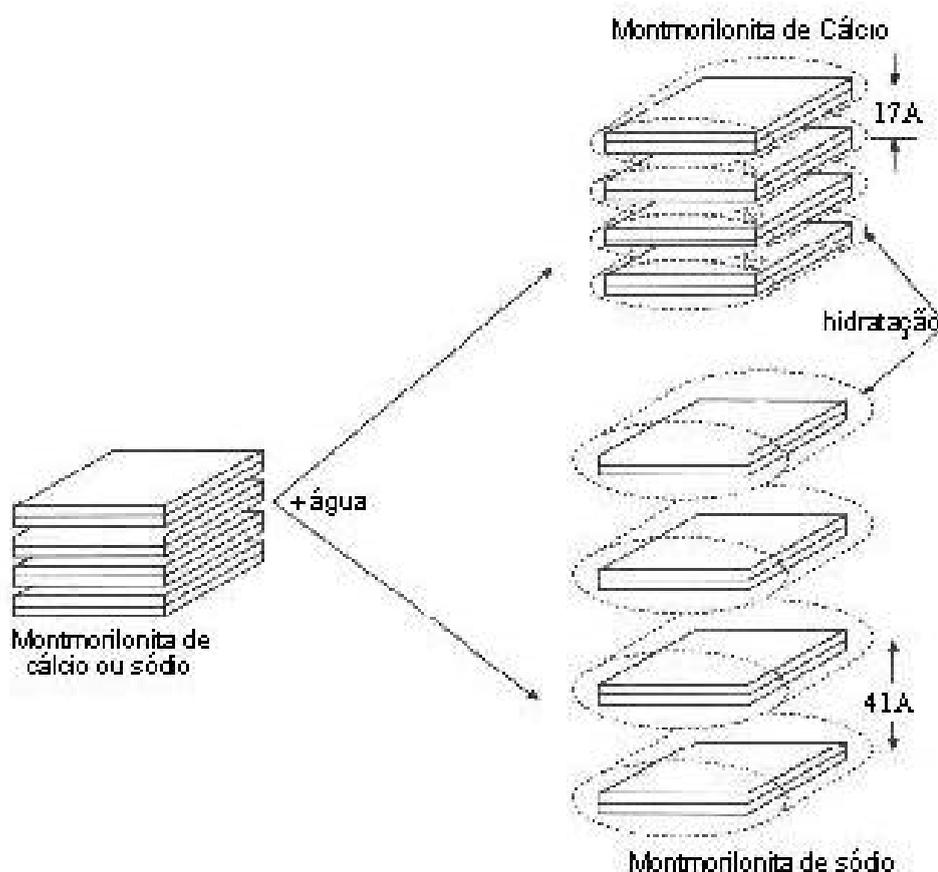


Figura 2.4 – Comparação do inchamento de uma montmorilonita cálcica e sódica (Fonte: Site:www.systemmud.com.br).

Como já mencionado, o cristal de montmorilonita consiste de 3 camadas. Se a superfície negativa da placa está associada a uma nuvem de cátions, a extremidade ou aresta possui cargas positivas expostas, resultantes de rupturas da estrutura cristalina do mineral (tendência de ir se quebrando em plaquetas menores). O espaço intercamadas, dependendo do cátion presente, será de 9,8 Å (Na^+) ou 12,1 Å (Ca^{+2}), preenchido com moléculas de água firmemente aderidas. Em contato com a água doce, esta por sua natureza bipolar invade o espaço intercamadas que expande com a argila adsorvendo grandes porções de água. A dispersão resultante gera o que nós conhecemos como viscosidade. A expansão nas montmorilonitas de cálcio chega a 17 Å e nas montmorilonitas de sódio, a 40 Å. A força de atração intercamadas exercida pelo Ca^{+2} é 4 vezes maior que o Na^+ e impede a penetração de maior quantidade de água. Este fato resulta em viscosidades 4 vezes maiores das bentonitas sódicas em relação às bentonitas cálcicas (Pereira, 2003).

A Figura 2.5 apresenta um quadro mostrando a estrutura das argilas.

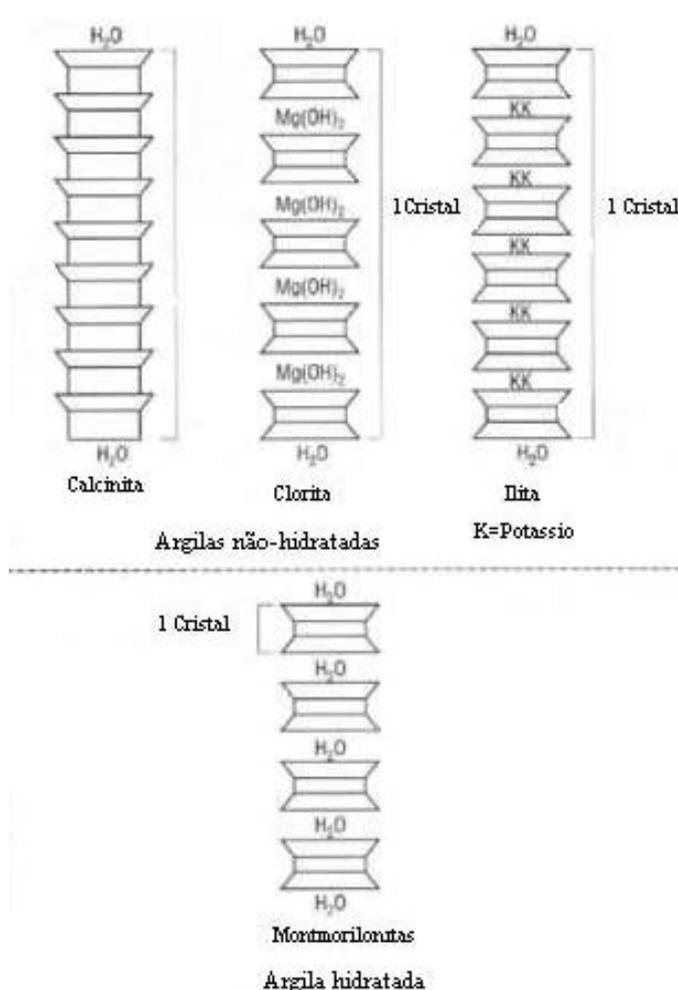


Figura 2.5 – Comparação entre estruturas das argilas
(Fonte: Site:www.systemmud.com.br)

A esmectita é muito mais expansiva que a illita e a clorita, mais ainda que a caolinita. Formações argilosas contendo esmectita vão ser conseqüentemente sensíveis a presença de água. Muitas destas formações contêm variados tipos e quantidades de argilas. Quanto maior a presença de esmectita, maior a reatividade (Pereira, 2003).

Segundo Grim (1962), a água pode estar presente na argila de três formas: (1) nos poros, nas superfícies e ao redor das extremidades das partículas discretas dos minerais que compõem o meio poroso, sendo que esta água pode ser removida com baixa energia; (2) entre as camadas das células unitárias das vermiculitas, esmectitas e nas formas hidratadas da haloisita, sendo que a água retida nesse processo é a que provoca a expansão das esmectitas (bentonita); e (3) no retículo cristalino nos minerais dos tipos sepiolita, atapulgita e paligorskita.

Grim (1962) ainda apresenta evidências de que a água adsorvida pelos argilominerais se encontra num estado físico incomum, diferente do estado líquido, sendo que este estado é considerado incomum devido as moléculas da água apresentarem-se em condições semelhantes ao estado sólido, embora não na forma de gelo. Neste estado físico alterado, as moléculas da água encontram-se a distâncias relativamente pequenas da superfície da partícula de argila, essa espessura pode variar mesmo em se tratando de uma mesma espécie mineral. A água que está com estado físico alterado pode voltar ao estado normal (líquido) de forma gradual ou abrupta, dependendo de fatores como regularidade física, quantidade e homogeneidade na distribuição das cargas elétricas na superfície do argilomineral.

A maior ou menor espessura da camada de água incomum está associada a superfícies planas. Nas superfícies irregulares a espessura dessa água é menor, em conseqüência, as superfícies dos planos basais do retículo cristalino tendem a apresentar películas de água incomum com maior espessura, principalmente nos espaços interlamelares dos minerais do grupo das esmectitas (Grim, 1962).

Esse fenômeno é conseqüência do caráter polar da molécula da água. Uma vez que as superfícies das argilas são normalmente carregadas com cargas elétricas negativas, as moléculas de água se orientam com os respectivos pólos positivos que aderem à superfície negativa das partículas de argila, a segunda camada de moléculas de água seriam orientadas devido a atração pelo pólo negativo da primeira camada de moléculas de água já aderidas e orientadas. Este tipo de arranjo poderia ser continuado indefinidamente. Porém, isso não ocorre, porque as moléculas de água possuem energia térmica e tendem a estar num estado de

movimento contínuo. Conforme conceitos clássicos da teoria coloidal, o movimento devido à agitação térmica se oporá à orientação regular. Teoricamente, logo em contato com a superfície do argilomineral, as moléculas de água estarão altamente orientadas, diminuindo à medida que se afastam da superfície do argilomineral, onde a agitação térmica é maior. Este modelo, entretanto, apresenta falha, pelo fato da superfície das argilas não ser um plano carregado eletricamente de forma uniforme, e das moléculas de água não agirem como “pequenas barras imantadas bipolares” (Grim, 1962).

Grim (1962) cita um modelo para o sistema água argila que é bastante satisfatório, esse modelo considera que a distância entre o átomo de oxigênio e o átomo de hidrogênio é de 0,96 Å e o ângulo do arranjo da molécula de água em forma de “V” varia entre 103° e 106°, muito próximos do ângulo dos tetraedros do filossilicato, que é de 109°. A forma e a distribuição das cargas da molécula de água assemelham-se, então, a um tetraedro, com dois cantos positivos e dois negativos. Quando duas moléculas de água se aproximam, há uma atração eletrostática entre o canto do tetraedro positivo de uma molécula com o canto negativo da outra, formando-se um agrupamento de moléculas de água de forma tetraedral, semelhante à estrutura da água em estado sólido na forma de gelo. Essa “lâmina” de H₂O está composta de moléculas de água unidas em grupos hexagonais de rede hexagonal estendida.

A superfície do mineral de argila é composta por átomos de oxigênio ou por grupos de hidroxilas organizadas em um padrão hexagonal que, de acordo com Hendricks e Jefferson (1938), Macey (1942) e Forslind (1948), citados por Grim (1962), podem coincidir com um padrão semelhante à estrutura da água, sabendo-se que o retículo cristalino de muitos minerais de argila contém elétrons em excesso que surgem com a substituição isomórfica de cátions no seu retículo cristalino. Assim, por razões estruturais, bem como pela presença de cátions adsorvidos, as moléculas de água estariam integrando-se ao retículo cristalino do argilomineral.

Pelo exposto, pode se constatar uma grande afinidade físico-química entre a água e os minerais de argila. Tal afinidade é responsável pelas características de plasticidade e de expansividade das argilas quando em presença de água.

2.5 CONTAMINANTE

O óleo diesel é um combustível de composição complexa, constituído basicamente por hidrocarbonetos parafínicos, olefínicos e aromáticos e, em menor quantidade, por substâncias cuja fórmula química contém átomos de enxofre, nitrogênio, metais, oxigênio, etc (site: www.refap.petrobras.com.br).

Estes hidrocarbonetos são formados por moléculas constituídas de 8 a 40 átomos de carbono, normalmente, sendo, portanto mais pesados do que aqueles que compõe a gasolina.

O óleo diesel é formulado através da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do petróleo bruto (*op. cit.*).

Op. cit. relata que os principais riscos estão associados à ingestão e aspiração. Contatos ocasionais com a pele provocam lesões irritativas. Contato com os olhos causam irritação com vermelhidão das conjuntivas

Op. cit. relata ainda que o produto apresenta moderada volatilidade, com cheiro característico desagradável. O produto pode formar películas superficiais sobre a água, sendo moderadamente prejudicial à vida aquática. O seu derramamento podem causar mortalidade dos organismos aquáticos, prejudicar a vida selvagem, particularmente as aves, além de transmitir qualidades indesejáveis à água, afetando o seu uso. O óleo diesel pode afetar o solo e, por percolamento, degradar a qualidade das águas do lençol freático.

2.6 PERMEÂMETRO DE PAREDE RÍGIDA X PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL

Os permeâmetros podem ser classificados como permeâmetros de paredes rígidas e permeâmetros de paredes flexíveis.

O permeâmetro de parede flexível é mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona ao redor de toda a amostra. Possui vantagens como: 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.

Os permeâmetros de paredes rígidas consistem em tubos rígidos que contém a amostra a ser permeada, a amostra tende a apresentar menor expansividade que a amostra ensaiada em um permeâmetro de parede flexível, além de uma maior facilidade no uso, porém apresenta como desvantagem a não saturação total da amostra, a impossibilidade de saturação por contra pressão, a não existência de controle sobre as pressões atuantes na amostra e a existência da possibilidade de haver fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro.

Na pesquisa em questão será utilizado o permeâmetro tipo *Compaction mold permeameter*, dessa forma atem-se a atenção a ele: neste modelo o solo é compactado dentro do tubo em que é realizado o ensaio e o teste de condutividade hidráulica é conduzido através da aplicação de uma carga hidráulica.

Daniel (1994) cita que a realização dos ensaios de permeabilidade devem ser feitos com controle de entrada de líquido na amostra. Sendo que esta entrada pode ser feita de três formas:

- a) Carga Constante: Este sistema possui a vantagem da pressão constante na amostra, visto que a carga hidráulica é constante, além da simplicidade de cálculo, sendo este o tipo de carga utilizada nesta pesquisa;
- b) Carga Variável: Existem duas formas de ser realizado: a) com carga hidráulica variável e carga hidráulica de saída constante (atmosfera). b) com cargas hidráulicas de entrada e de saída variáveis, recomendado para solos com baixa condutividade hidráulica. Apresenta como desvantagem a variação de carga que pode liberar bolhas de gás dissolvidas e também pode causar variações na tensão efetiva, resultando na consolidação da amostra;
- c) Fluxo constante: o líquido é bombeado através da amostra a uma taxa de fluxo constante e medição de perda de pressão ocasionada pela passagem do líquido pela amostra através de transdutor diferencial de pressão. Possui a vantagem da possibilidade de realização de ensaios em curto espaço de tempo e automação total do equipamento.

Daniel (1994) relatou também critérios que devem ser observados para determinar quando um ensaio esta finalizado: a) Quando percolado com água, os fluxos de entrada e saída devem ser razoavelmente iguais, a condutividade hidráulica deve estar estabilizada e ainda devem ter sido coletados pontos suficientes para um resultado representativo. b) Quando percolado com compostos químicos devem ser observados ainda os seguintes critérios: o volume de líquido permeado corresponda a dois volumes de poros da amostra, a composição química do líquido

de saída deve ser igual a composição química do líquido de entrada, e ainda devem ser plotadas as concentrações de todos os íons críticos do líquido efluente.

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 levam ao aumento da condutividade hidráulica.

2.7 FLUÍDOS ORGÂNICOS E SUA INTERAÇÃO COM O SOLO

Anandarajah (2003) relata que quando as argilas saturadas são permeadas com fluídos orgânicos como o heptano, tem se notado um aumento da condutividade hidráulica, sendo que se supõem geralmente que este aumento se dê pela combinação de mudanças físico-químicas (isto é, compressão da espessura da dupla camada) e a conseqüente alteração da estrutura interna (isto é, redução do aglomerado), sendo que os mecanismos que leva a estas alterações são: (1) formação de quebras devido a redução do aglomerado e (2) aumento uniforme da porosidade intersticial do volume de solo devido a redução do aglomerado.

Em estudos de Verwey e Overbeek (1948) e Mitchell (1993), citados por Anandarajah (2003), que estudaram a teoria da dupla camada, constataram que um decréscimo da constante dielétrica do fluído causa uma diminuição na espessura da dupla camada, permitindo que se aproximem uma das outras. Isto conduz a uma redução do conglomerado do solo. Se isto ocorre sob a condição de um volume constante, então a permeabilidade aumenta.

Oliveira (2001) afirma que a condutividade hidráulica saturada de solos argilosos é fortemente influenciada pelas propriedades físico-químicas dos líquidos percolantes e pelas características dos argilominerais do meio.

Para um mesmo líquido, quanto maior for a fração argila, menor será a permeabilidade deste meio, pois maior será a interação líquido-superfície do argilo mineral (Oliveira, 2002).

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 .

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, ou seja, a investigação da condutividade hidráulica dos meios porosos argilosos, utilizou-se dois grupos de compósitos, um de SRAB e bentonita e o outro de SRAB, cimento e bentonita, visando avaliar a influência do uso do cimento Portland sobre a condutividade hidráulica do meio percolado com hidrocarbonetos.

O primeiro passo foi a realização de ensaios preliminares de caracterização dos solos utilizados, sendo eles: solo residual de arenito Botucatu (SRAB) e bentonita sódica. Posteriormente foram definidas as dosagens das misturas de SCB a serem trabalhadas nesta dissertação, através dos resultados de ensaios de compressão simples. O terceiro passo realizado foi a análise do comportamento hidráulico das amostras através de ensaios de condutividade hidráulica realizados em um permeâmetro de parede rígida e análises por difração de raios X.

3.2 ENSAIOS PRELIMINARES DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Caracterização dos Materiais

Os ensaios de caracterização física nas matrizes de solo residual e bentonita compreenderam:

- a) Ensaios de granulometria;
- b) Limites de Atterberg;
- c) Massa específica real dos grãos;
- d) Teor de umidade.

Os resultados destes ensaios serão apresentados posteriormente junto com outras características destes materiais.

3.3 DEFINIÇÃO DA DOSAGEM DOS MATERIAIS NAS MISTURAS

Após a realização de vários testes a fim de determinar a dosagem das misturas optou-se pelas seguintes dosagens, conforme a Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Dosagem dos Materiais

Bentonita (%)	Teor de Umidade (%)	Fator a/c	Cimento (%)
12,0	100,0	0	0
12,0	100,0	2	25
12,0	100,0	4	12,5
12,0	100,0	6	8,3

O teor de bentonita é a relação entre o peso da bentonita seca e o peso total de sólidos na amostra. Optou-se por esta dosagem pois com ela se conseguiu obter uma amostra com alta trabalhabilidade e sem que houvesse a segregação dos materiais.

A escolha de diferentes fatores água-cimento para uma mesma umidade tem como objetivo verificar a interferência da adição do cimento no comportamento hidráulico da mistura.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Os materiais utilizados nesta pesquisa bem como suas características e procedências são apresentadas abaixo:

3.4.1 Solo

O solo utilizado no desenvolvimento desta pesquisas é uma areia fina siltosa, mal graduada e fracamente plástica. Trata-se de um solo residual pertencente ao horizonte C, substrato de arenito, pertencente à denominada Formação Botucatu.

A jazida de onde foram coletadas as amostras apresenta um talude, de aproximadamente 20 m de altura, situado às margens da rodovia estadual RS-240, na localidade de Vila Scharlau, município de São Leopoldo / RS, conforme as Figura 3.1 e Figura 3.2.

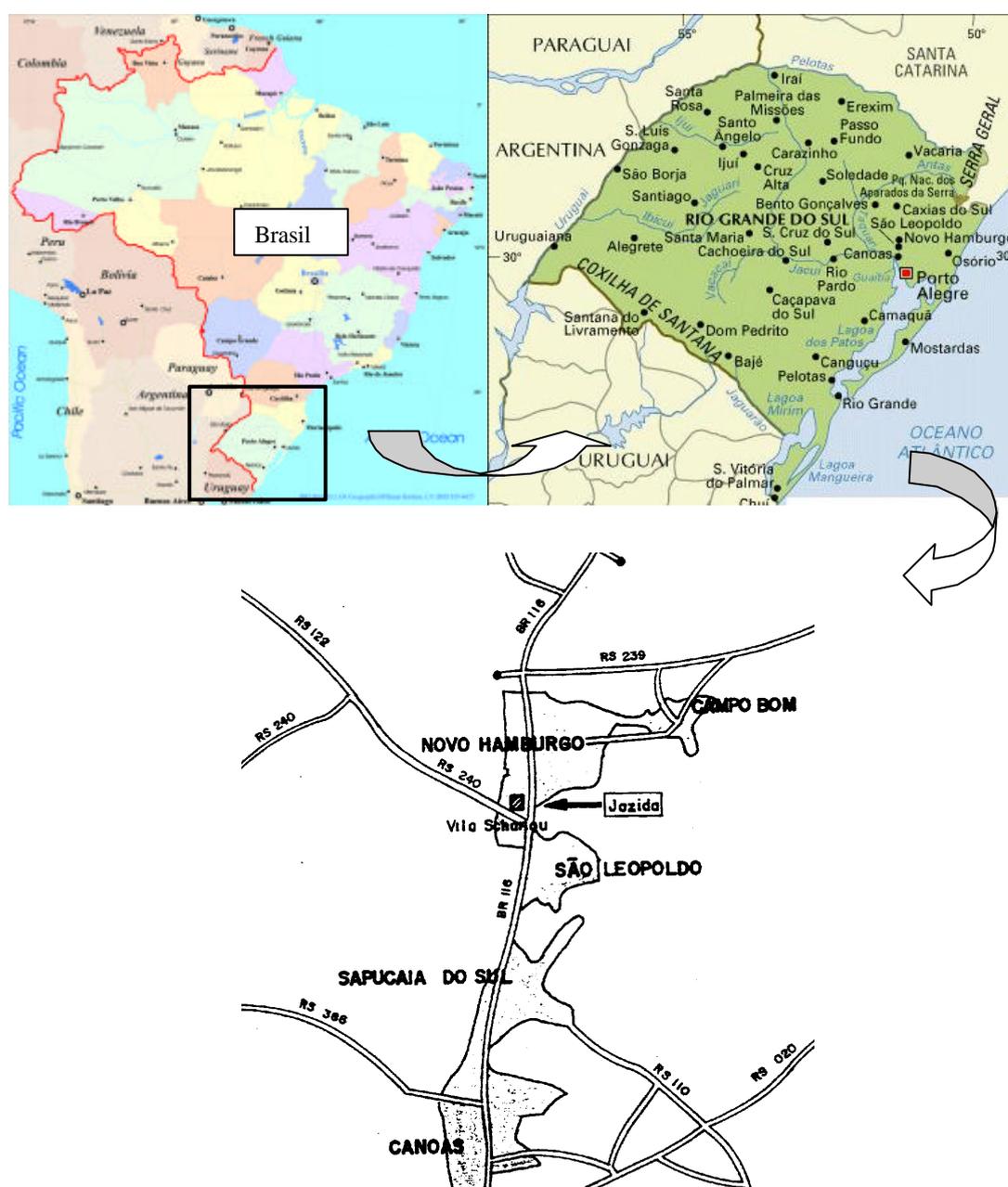


Figura 3.1 - Mapa da localização da Vila Scharlau (Thomé, 1999).



Figura 3.2 – Jazida de arenito Botucatu na localidade de Vila Scharlau (Caberlon, 2004).

O solo residual de arenito Botucatu já foi empregado em várias pesquisas no PPGEC/UFRGS [e.g: Núñez (1991), Thomé (1999), Casagrande (2001), Heineck, (2002)], em que foi constatada a homogeneidade da camada ao longo de sua profundidade.

As propriedades físicas médias do solo determinadas por Nuñez (1991) e Thomé (1999) estão apresentadas na Tabela 3.1, sendo utilizado neste trabalho os resultados obtidos por Thomé (1999).

A Figura 3.3 apresenta a curva granulométrica obtida por Thomé (1999) para o solo residual com o uso de defloculante.

Tabela 3.1 – Índices Físicos do SRAB

Propriedades	Valores médios (Nuñez,1991)	Valores médios (Thomé, 1999)
Limite de Liquidez (LL)	21%	22%
Limite de Plasticidade (LP)	17%	19%
Índice de Plasticidade (IP)	4%	3%
Limite de Contração (LC)	19%	-
Peso Específico	2,67 g/cm ³	2,67 g/cm ³
Diâmetro Efetivo (D ₁₀)	0,003mm	0,004mm
Diâmetro Médio (D ₅₀)	-	0,09mm
Coefficiente de Uniformidade (C _u)	43	30
Densidade Máxima (γ_d) – (Proctor Normal)	17,40 N/m ³	-
Umidade Ótima (ω_{ot}) – (Proctor Normal)	15,90%	
Densidade Máxima (γ_d) – (Proctor Modif.)	18,90 N/m ³	19,40 N/m ³
Umidade Ótima (ω_{ot}) – (Proctor Modif.)	13,90%	12,10%

A curva granulométrica adotada foi a determinada por Heineck (2002) e confirmada por ensaios preliminares de peneiramento, em que se verifica um solo composto por 5% de argila (<0,002mm), 38,9% de silte (0,002 a 0,075mm) e 56,1% de areia, sendo que 47,3% deste percentagem é composta por areia fina (0,074 a 0,042mm) e somente 8,8% de areia média (0,042 a 2,0mm), conforme Figura 3.3. Assim sendo, de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), o material é classificado como uma areia siltosa, e conforme ASTM D 2487 (1993), classifica-se como SM (areia siltosa).

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

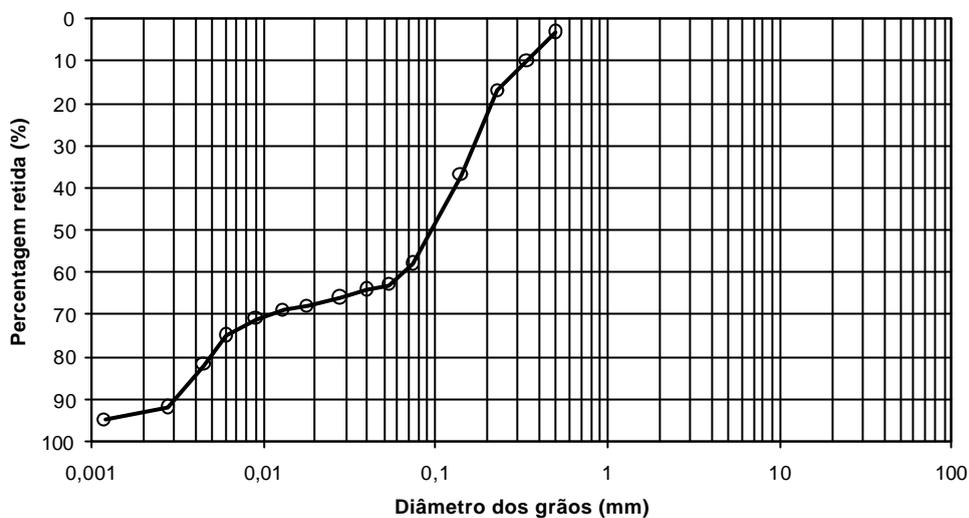


Figura 3.3 – Curva granulométrica do SRAB (Heineck, 2002).

Nuñez (1991) ainda determinou as principais propriedades físico-químicas do solo em questão, com ênfase dada a mineralogia e à composição química da fração argila. Todas as análises realizadas indicaram a predominância do argilo mineral caolinita, observando-se também a presença de 3,2% de hematita, que é o óxido responsável pela cor rosada característica do solo.

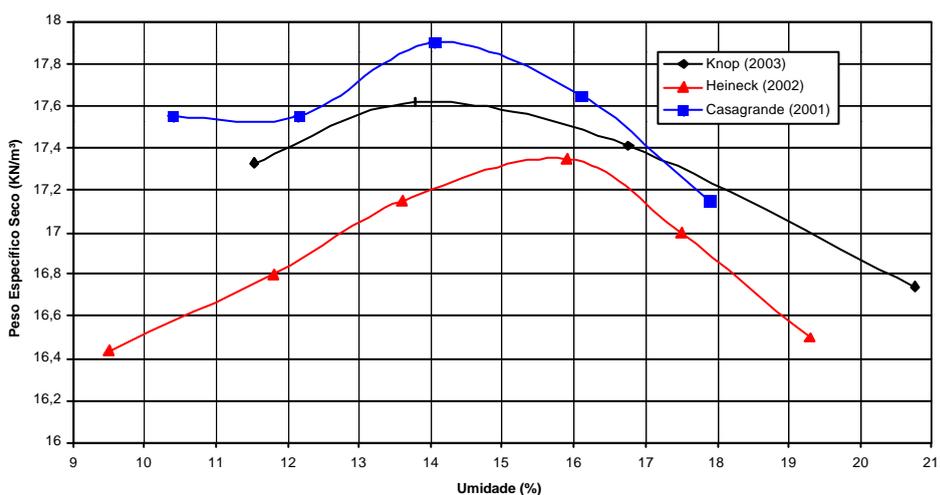


Figura 3.4 – Curva de compactação do SRAB (Knop, 2003).

Para sua utilização selecionou-se apenas a fração que passou na malha de 0,250 mm e que ficou retida na malha de 0,125 mm. Com essa seleção, grande parte dos resíduos de origem orgânica, fração mais grosseira e dos minerais pesados, fração mais fina, foram removidos.

3.4.2 Bentonita

Material primariamente formado por argilo minerais do grupo das esmectitas, sendo elas caracterizadas pelo cátion externo adsorvido na superfície da partícula da argila durante a formação do mineral, podendo este ser o sódio ou o cálcio. A bentonita sódica é mais habitualmente utilizada na selagem e na impermeabilização por possuir uma maior capacidade de expansão e menor condutividade hidráulica na água do que a bentonita cálcica conforme estudos de Alther (1982, 1987); Reschke e Haug, (1991), citados por Gleason (1997). Em contra partida, a bentonita cálcica é mais estável quimicamente quando exposta a certos compostos químicos. No estudo em questão será utilizado a bentonita sódica.

A qualidade de uma bentonita pode ser avaliada através de medidas indiretas, como: avaliação dos Limites de Atterberg e de ensaios de expansão livre, ou seja, quanto maior o Limite de Plasticidade e o Limite de Liquidez, melhor a qualidade da bentonita. Para uma bentonita sódica de média qualidade o Limite de Liquidez encontra-se entre 300 e 500% e uma de alta qualidade entre 500 e 700%.

Os testes de expansão livre mostram que quanto maior a capacidade de expansão da bentonita, melhor a sua qualidade (Heineck, 2002).

As principais características deste material são sua grande afinidade com a água, grande capacidade de troca catiônica e baixa condutividade hidráulica para a água devido a sua grande capacidade de expansão, sendo um exemplo de sua aplicação as barreiras verticais, em que estas encontram-se confinadas e devido a expansão das partículas, estas são forçadas umas contra as outras preenchendo os vazios e formando uma barreira contra a passagem de fluídos.

A bentonita utilizada foi adquirida comercialmente. As características determinadas em laboratório da bentonita sódica utilizada nos experimentos estão apresentadas na Tabela 3.2, bem como na Figura 3.5.

Tabela 3.2 - Índices Físicos da Bentonita Sódica

Índices Físicos	Bentonita Sódica
Limite de Plasticidade (LP)	139%
Limite de Liquidez (LL)	608%
Índice de Plasticidade (IP)	466%
Peso Específico	2,66 g/cm ³

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

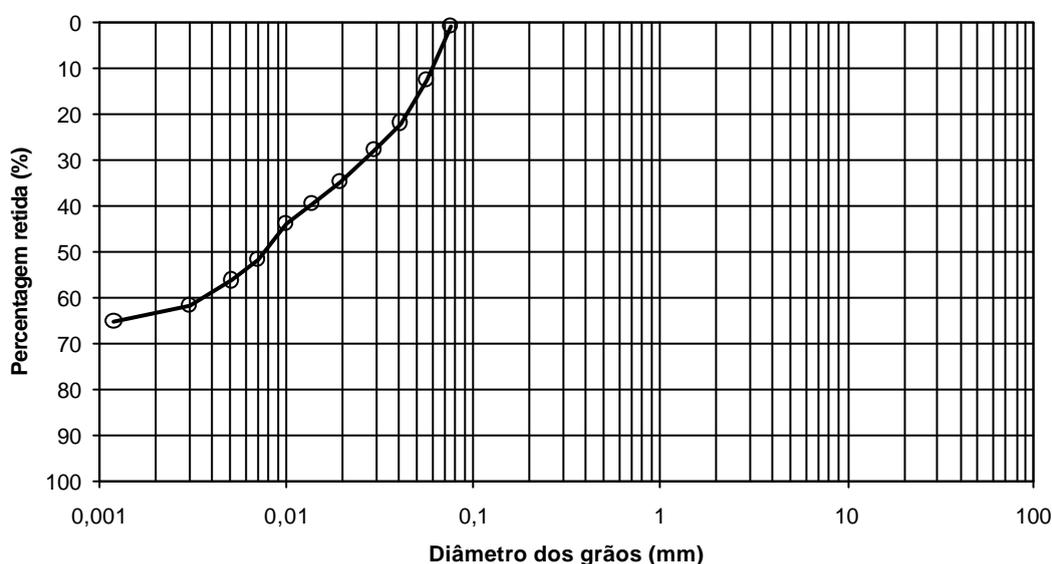


Figura 3.5 - Distribuição Granulométrica da Bentonita Sódica

Através da curva granulométrica verifica-se um solo com 36% de argila (<0,002mm) e 64% de silte (entre 0,002 a 0,075mm), sendo assim classificada como CH (argila inorgânica de alta plasticidade) pela classificação unificada (ASTM D 2487/93). Este ensaio foi realizado em conjunto com Lemos (2005).

3.4.3 Cimento

Como agente cimentante adotou-se cimento tipo Portland CP-V de alta resistência inicial (ARI) da marca Cauê, adquirido junto a um estabelecimento comercial da cidade de Porto Alegre (RS-Brasil), este cimento tem a peculiaridade de atingir altas resistências iniciais já

nos primeiros dias da aplicação. A composição do cimento CP-V, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), está apresentado na Tabela 3.3. Ainda de acordo com a ABCP, a alta resistência inicial do cimento Portland CP V – ARI deve-se a uma diferente composição do clínquer, em termos de quantidade dos componentes.

Feuerharmel (2000) apresentada as características físicas e mecânicas do cimento CPV - ARI, aqui apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Teor de componentes do cimento Portland (% em massa)
(ABCP, 2003)

Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Material carbonático
CP V - ARI	95 – 100%	0 – 5%

Tabela 3.4 – Características físicas e mecânicas do cimento CP V –
ARI (Feuerharmel, 2000)

	Finura	Tempo de pega		Resistência à compressão			
	Massa específica (kg / m ³)	Início (min)	Fim (min)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
Média	3,11	195	296	23,5	39,2	45,2	53,3
Mínimo	3,11	165	258	22,1	37,8	41,6	51,4
Máximo	3,11	218	365	25,2	41,8	47,2	53,6
Desvio Padrão	0,00	14	27	0,9	0,9	1,2	1,3

3.4.4 Água

A água destilada foi utilizada na preparação de todos os corpos de prova, durante os ensaios de condutividade hidráulica foi utilizado também água destilada.

3.4.5 Óleo Diesel

Empregou-se como contaminante à base de hidrocarbonetos nesta pesquisa, o óleo diesel, obtido junto à Refinaria Alberto Pasqualini S.A. – REFAP (2003), da cidade de Canoas/RS. O óleo diesel apresenta um comportamento não volátil, sendo imiscível em água. A densidade unitária do óleo diesel é de 0,839 e uma viscosidade de 1,8. Demais dados sobre o óleo diesel são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Informações sobre óleo diesel (REFAP, 2003)

Componente	Concentração
Hidrocarbonetos saturados	70 – 75% (volume)
Hidrocarbonetos olefínicos	< 1% (volume)
Hidrocarbonetos aromáticos	20 – 30% (volume)
Enxofre	< 0,5% (peso)
Ponto de Ebulição	174°C

Tem como características o ponto de fulgor < - 43°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.

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 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 (Caberlon, 2004).

3.5 MÉTODOS UTILIZADOS

A seguir será descrito o método utilizado para a preparação e moldagem dos corpos de prova e os métodos de ensaio empregados durante o programa experimental.

3.5.1 Coleta e preparação dos materiais

Primeiramente as amostras de solo (solo residual de arenito Botucatu) foram coletadas na jazida de origem, no estado deformado, trazidas para o laboratório, secas ao ar, destorroadas, peneiradas e devidamente estocadas em recipientes adequados, tudo segundo a NBR 6457 (ABNT, 1986a).

3.5.2 Preparação dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples foi realizada em moldes bipartidos de PVC com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Devido aos altos teores de umidade das misturas, os moldes de PVC foram vedados lateralmente e inferiormente através da aplicação de borracha de silicone, com o objetivo de evitar a fuga de água através do molde. Como não foi possível a compactação da amostra em camadas, a mistura dos materiais foi devidamente despejada dentro dos moldes até uma altura de 100 mm.

Para a preparação das amostras os componentes foram adicionados em um recipiente colocando-se primeiramente a bentonita e o SRAB, misturando-se até atingir uma certa homogeneização. A seguir se colocava aos poucos a água; caso fosse uma amostra com cimento este também seria adicionado aos poucos. Esta seqüência foi a mais apropriada, pois permitiu que os grumos de bentonita formados em contato com a água fossem facilmente desagregados, propiciando assim uma melhor homogeneização da mistura. Os corpos de prova foram preparados um a um, ou seja: cada corpo de prova teve uma mistura de solo, cimento, bentonita e água preparada separadamente. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação.

Concluído o processo de moldagem, a desmoldagem do corpo de prova só foi feita quando o mesmo apresentou resistência suficiente capaz de não provocar danos na amostra (em torno de 48 horas). Feita a desmoldagem, os corpos de prova foram pesados com precisão de 0,01 gf, medidos com precisão de 0,01 cm e logo após acondicionados em sacos plásticos até completar o período de cura de 7 dias após o período de moldagem (incluído os dois dias para a desmoldagem).

Para os ensaios de condutividade hidráulica seguiu-se a mesma forma de preparação, porém o material era despejado no próprio cilindro do permeâmetro, onde permanecia curando durante 24h e então iniciava-se o ensaio.

3.5.3 Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização física nas matrizes de solo residual e bentonita seguiram as seguintes especificações:

- a) Ensaios de granulometria: a análise granulométrica da bentonita foi realizada seguindo o procedimento proposto na NBR 7181 (ABNT, 1984c), sendo utilizada a solução de hexametáfosfato de sódio como agente defloculante;
- b) Limites de Atterberg: os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram determinados segundo a NBR 6459 (ABNT, 1984a) e a NBR 7180 (ABNT, 1984b) respectivamente;
- c) Massa específica real dos grãos: foi determinada conforme o procedimento proposto na NBR 6508 (ABNT, 1984d);
- d) Teor de umidade: a determinação deste parâmetro seguiu o método descrito no anexo da NBR 6457 (ABNT, 1986a).

3.5.4 Ensaios de Compressão não-confinada

A realização dos ensaios de compressão simples seguiu os procedimentos descritos na NBR 12025/90-Moldagem e Cura de corpos-de-prova cilíndricos. A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova é da marca Wykeham Farrance, adaptada com anéis dinamométricos de 3 kN e 6 kN, previamente calibrados. Após o período de cura de 7 dias, os corpos de prova foram cisalhados.

No programa de ensaios de compressão não-confinada foram realizados ensaios com os fatores a/c, sendo eles: sem cimento, 2, 4 e 6, que representam uma quantidade de 25, 12,50%, respectivamente.

3.5.5 Ensaio de Condutividade Hidráulica

Nos ensaios de condutividade hidráulica foram realizados segundo a ASTM D 5856, utilizados permeômetros do tipo *Compaction mold permeameter*, sendo que este permeômetro foi desenvolvido e construído no Environgeo/UFRGS, o permeômetro em questão foi desenvolvido em conjunto com Lemos (2005) no desenvolvimento de sua tese de doutorado que ainda esta em andamento.

Entre as partes do equipamento estão: cilindro de aço inox para a colocação da amostra e em que é moldada a amostra, e cilindro, também em aço inox, para armazenamento do contaminante.

No desenvolvimento deste equipamento teve-se o cuidado de utilizar materiais inertes ao ataque de produtos químicos 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 de 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 o latão. Foi utilizada uma tubulação de *nylon* por ser inerte ao ataque do óleo diesel.

A seguir, as Figuras 3.6 e 3.7 apresentam fotos do permeômetro, bem como alguns detalhes dos mesmos.



Figura 3.6 – Vista geral dos permeômetros instalados em uma capela de exaustão de gases



Figura 3.7 – Permeâmetro – Detalhe dos cilindros - (1), do cilindro que contém o líquido permeante (2) e do tubo graduado para a leitura da vazão (3).

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

Nestes ensaios foram utilizadas cargas constantes através da aplicação de ar comprimido numa interface ar/água, regulada com um registro de pressão de precisão de 12kPa, resultando em um gradiente hidráulico de 8,3. A amostra foi moldada no próprio cilindro, de 15 cm de diâmetro por 15 cm de altura, em que foi realizado o ensaio de condutividade hidráulica.

A Figura 3.8 apresenta um esquema do permeâmetro utilizado.

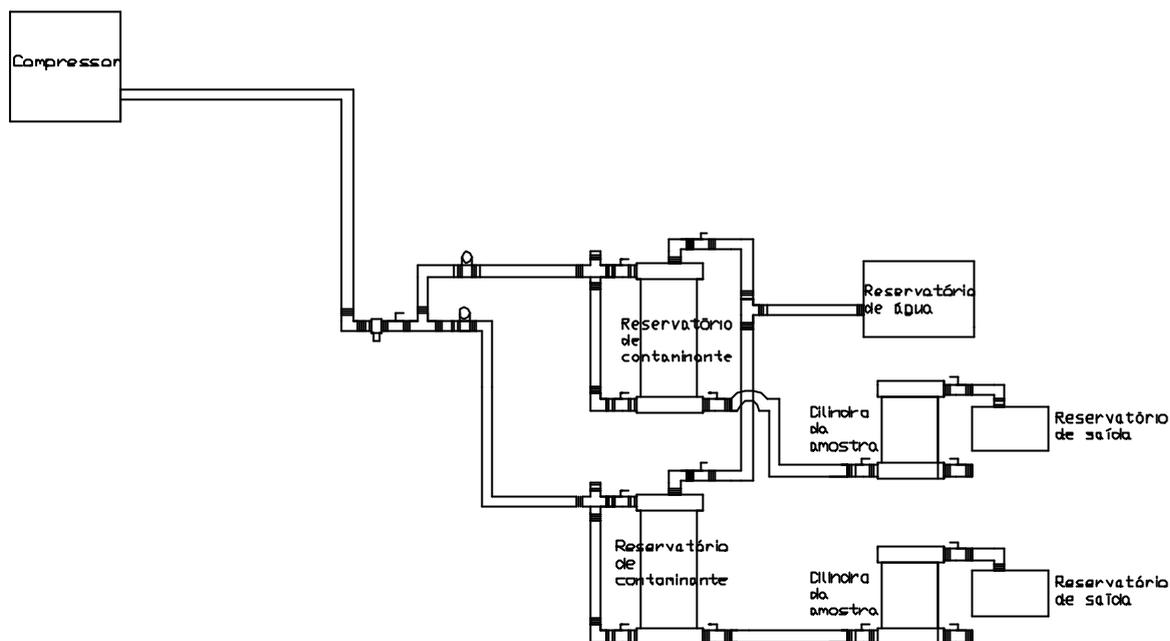


Figura 3.8 – Esquema do Permeâmetro

Os ensaios de condutividade hidráulica obedeceram as seguintes etapas:

- a) Preparação da amostra, conforme já mencionado anteriormente;
- b) Colocação da amostra no cilindro, deixando a mesma curar durante vinte e quatro (24) horas;
- c) Início do ensaio de condutividade hidráulica com a percolação de água da base para o topo da amostra com uma carga de 12 kPa e gradiente hidráulico de 8,3, tendo-se o cuidado de retirar todas as bolhas de ar encontradas na tubulação através da percolação de água pela base da amostra;
- d) Retirada de leituras regulares no ensaio medindo-se a altura do material permeante no reservatório de contaminante, com o auxílio de um tubo graduado conectado ao reservatório, onde se podia verificar o nível do líquido permeante e juntamente com o valor do peso do líquido já permeado pode-se calcular a condutividade hidráulica da amostra;
- e) Continuidade do ensaio até se obter a estabilidade da condutividade hidráulica, ou seja, no mínimo quatro valores de condutividade hidráulica próximos;
- f) Depois de obtida esta estabilidade, parava-se o ensaio, isolando-se a amostra através do fechamento das válvulas e retirando-se a pressão aplicada;
- g) Posteriormente era substituída no reservatório de contaminante a água por óleo diesel, tomando-se novamente o cuidado de retirar as bolhas de ar que ficaram na tubulação.

- h) Reinício do ensaio com a mesma carga e o mesmo gradiente hidráulico, até se obter novamente a estabilidade da condutividade hidráulica, com pelo menos quatro leituras de condutividade hidráulica aproximadas.
- i) Após o término do ensaio o equipamento era desmontado para a limpeza e descontaminação do mesmo.

Foram realizados quatro ensaios de condutividade hidráulica, sendo eles com fatores a/c 2, 4 e 6 e um sem a presença de cimento. Estes ensaios foram realizados tendo como material permeante a água e o óleo diesel.

3.5.6 Análise por Difração de Raios X

Posteriormente, para um melhor entendimento dos resultados de condutividade hidráulica, foram realizadas análises de Difração de Raios X.

Foram realizadas três análises na bentonita utilizada, sendo elas:

- a) Difração de Raios X, amostra natural;
- b) Difração de Raios X, amostra tratada com etileno glicol;
- c) Difração de Raios X, amostra calcinada.

Sendo ainda realizada uma análise na bentonita saturada em óleo diesel:

- a) Difração de Raios X, amostra natural.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Geociência da UFRGS.

4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo encontram-se os resultados dos ensaios e análises feitas no programa experimental realizado nesta pesquisa.

4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Os ensaios de resistência à compressão não confinada foram realizados de forma padronizada para todos os corpos de prova quanto ao tempo de cura, no caso sete dias, com imersão prévia ao rompimento.

A Tabela 4.1 apresenta o resultado destes ensaios.

Tabela 4.1 – Resultados do programa de ensaios de compressão não-confinada

Fator água-cimento (a/c)	Teor de Umidade (%)	Resistência (MPa)
0 (sem cimento)	100	*
2	100	0,45
4	100	0,16
6	100	0,05

* Não houve um endurecimento da amostra, não se podendo desmoldar e por conseqüência não foi possível realizar o ensaio de compressão não-confinada.

Pode-se observar que a resistência à compressão não-confinada aumentou com o acréscimo da quantidade de cimento na amostra ou com o menor fator água/cimento, como esperado.

4.3 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SEGUNDO A NORMA ASTM D5856

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados de forma padronizada para todas as amostras ensaiadas.

A seguir são apresentadas as tabelas e as figuras com os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica.

4.3.1 Resultados da amostra Solo-Bentonita (SB)

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros de moldagem para a amostra em questão:

Tabela 4.2 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Bentonita (SB)

Propriedades	Valores
Teor de Umidade	102%
Peso Específico Natural	1,34 g/cm ³
Peso Específico Seco	0,66 g/cm ³
Índice de Vazios	3,1

A amostra de Solo-Bentonita quando percolada com água apresentou inicialmente uma condutividade hidráulica na ordem de 10^{-6} cm/s. Posteriormente houve uma diminuição gradativa de seu valor chegando a um valor médio de condutividade hidráulica de $k=1,7 \cdot 10^{-7}$ cm/s, sendo que foi permeado na amostra um volume equivalente a 0,2 vezes o seu volume de vazios.

A seguir é apresentado na Figura 4.1 o gráfico do volume percolado dividido pelo volume de vazios (V_p/V_v) x k, tendo a água como líquido permeante.

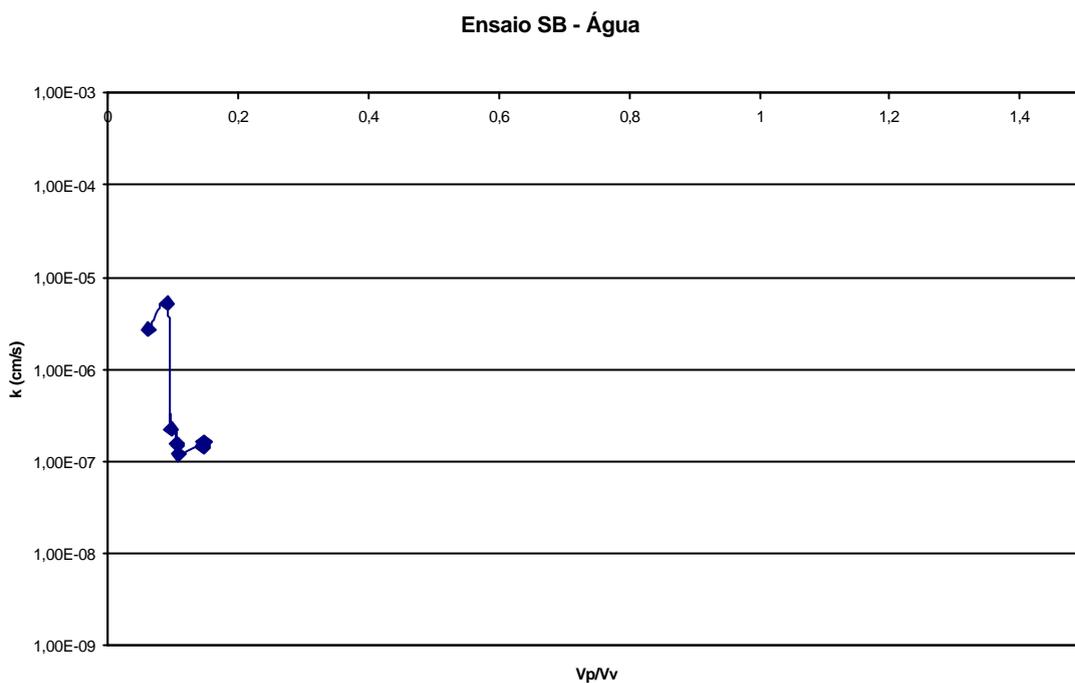


Figura 4.1 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra Solo-Bentonita permeada com água

Na Figura 4.2 pode-se observar o comportamento do preenchimento do volume de poros com o tempo. O grande intervalo entre as leituras no intervalo de 40 a 120 horas deve-se a impossibilidade de leituras no final de semana.

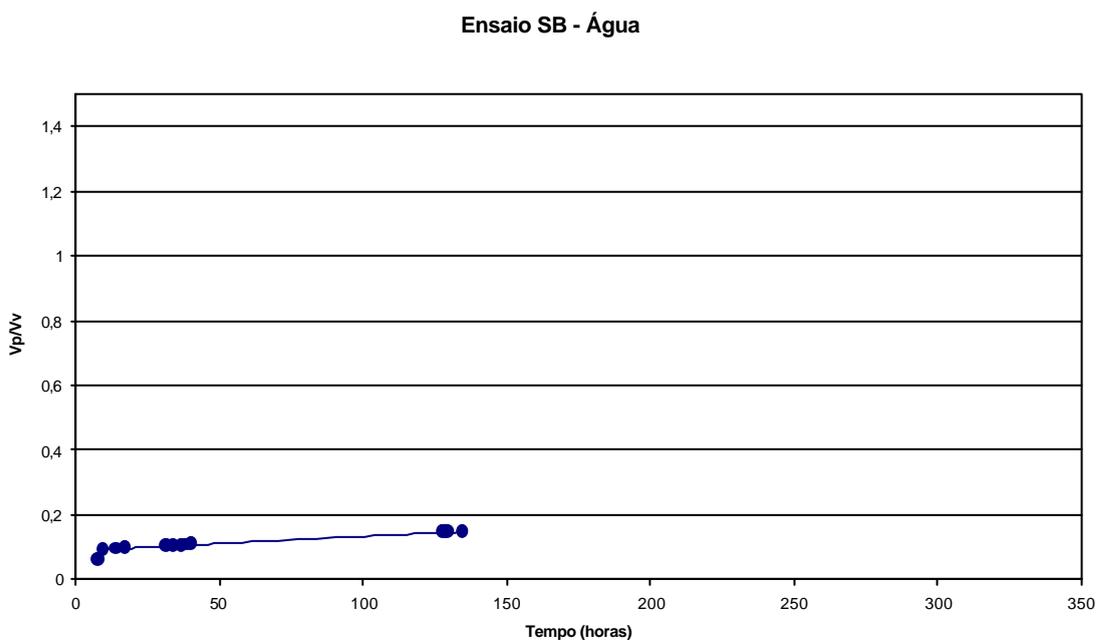


Figura 4.2 – Resultado do Vp/Vv x tempo na amostra Solo-Bentonita permeada com água

A seguir é apresentado na Figura 4.3 o gráfico do $V_p/V_v \times k$ tendo como líquido permeante o óleo diesel, onde se percebe uma mudança na condutividade hidráulica após a percolação de aproximadamente 0,2 V_p/V_v de óleo diesel, indicando que este quando percolado na amostra de SB ocasiona mudanças no comportamento hidráulico. No caso da amostra percolada com óleo diesel observa-se uma baixa condutividade hidráulica inicial, com valores em torno de $2,5 \cdot 10^{-7}$ cm/s. A partir de um determinado momento a amostra apresentou um rápido aumento do valor da condutividade hidráulica sendo o seu valor médio de $9,6 \cdot 10^{-5}$ cm/s. Este fenômeno será explicado, mais adiante, com o auxílio do ensaio de Difração de Raios X.

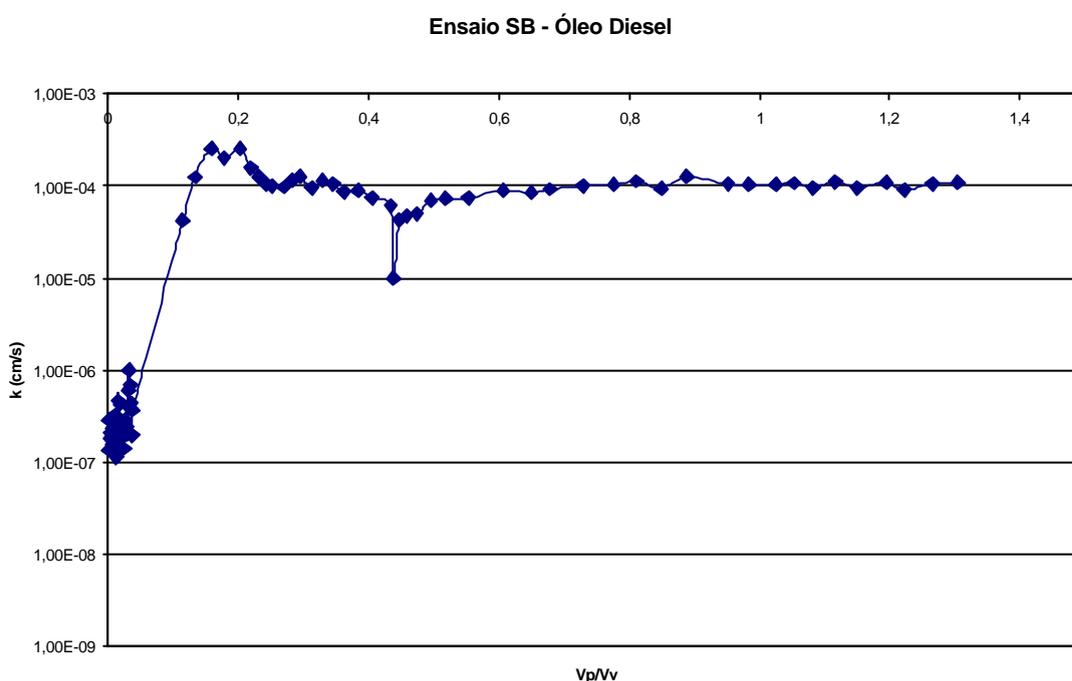
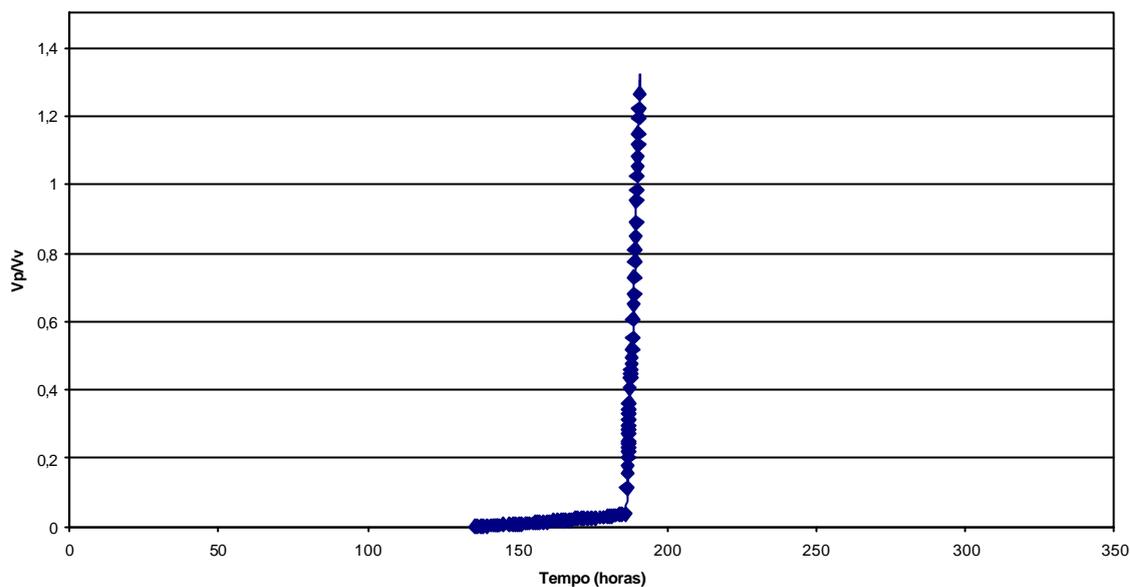


Figura 4.3 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra Solo-Bentonita permeada com óleo diesel

Na Figura 4.4 apresenta-se o comportamento do V_p/V_v da amostra permeada com óleo diesel, onde se pode perceber com o aumento da condutividade hidráulica se dá após a passagem de aproximadamente 0,06 volume de vazios de óleo diesel através da amostra.

Ensaio SB - Óleo Diesel



Fi

gura 4.4 – Resultado do V_p/V_v x tempo na amostra Solo-Bentonita permeada com óleo diesel

4.3.2 Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 2

A Tabela 4.3 apresenta parâmetros de moldagem para a amostra em questão:

Tabela 4.3 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) fator $a/c=2$

Propriedades	Valores
Teor de Umidade	98%
Peso Específico Natural	1,37 g/cm ³
Peso Específico Seco	0,69 g/cm ³
Índice de Vazios	2,9

A amostra SCB, quando percolada com água, apresentou um valor médio de condutividade hidráulica de $4,3 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Na Figura 4.5 é apresentado o gráfico do $V_p/V_v \times k$ para esta amostra SCB, sendo permeado aproximadamente 1,8 vezes o volume de vazios da amostra.

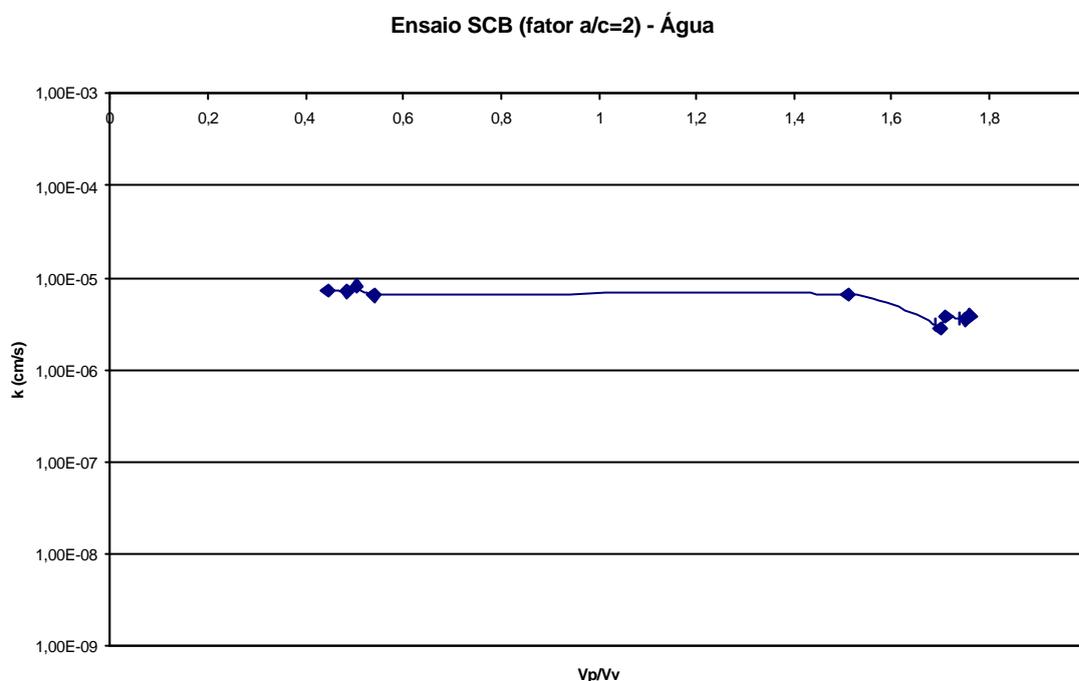


Figura 4.5 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c = 2$ permeado com água

Na Figura 4.6 pode-se ver comportamento do fluxo de água na amostra com o tempo quando permeada com água, sendo observado $1V_p/V_v$ em aproximadamente 40 horas.

A amostra SCB permeada com óleo diesel apresentou uma condutividade hidráulica inicial com uma ordem de grandeza de 10^{-6} cm/s, se estabilizou com uma ordem de grandeza de 10^{-7} cm/s, tendo como valor médio de condutividade hidráulica de $7,5 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Não foram observadas grandes mudanças na condutividade hidráulica do SCB (fator $a/c=2$), provavelmente devido ao efeito da cimentação, sendo permeado cerca de 0,6 vezes o volume de vazios da amostra.

O gráfico apresentado na Figura 4.7 demonstra o desenvolvimento do ensaio.

Ensaio SCB (fa/c=2) - Água

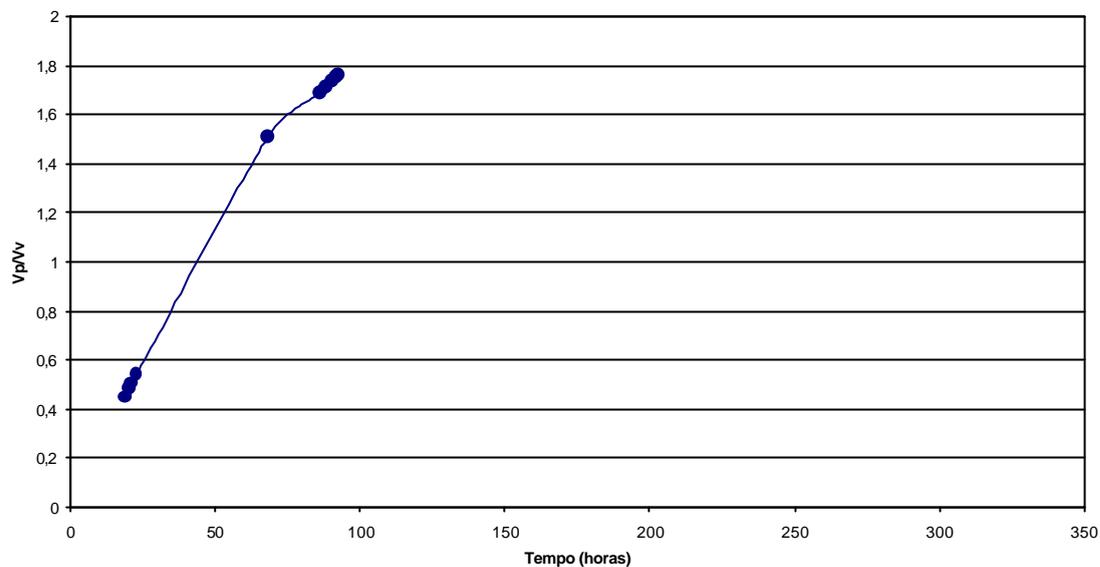


Figura 4.6 – Resultado do V_p/V_v x tempo na amostra SCB fator $a/c=2$ permeada com água

Ensaio SCB (fator a/c=2) - Óleo Diesel

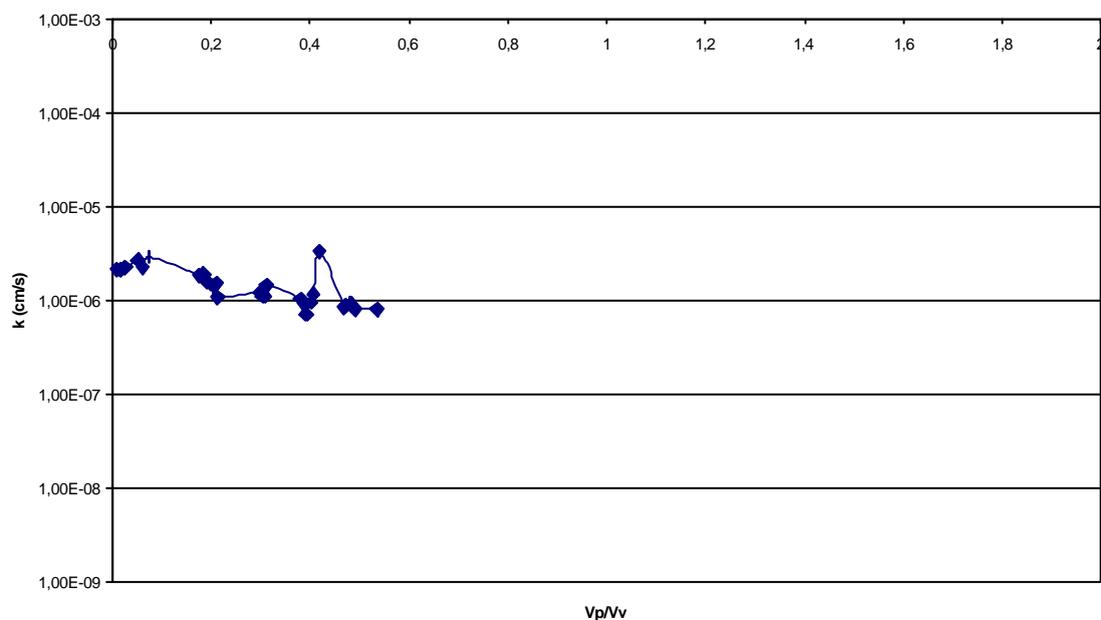


Figura 4.7 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c = 2$ permeada com óleo diesel

Na Figura 4.8 pode-se observar quantos volumes de vazios já foram permeados com óleo diesel através da amostra com o tempo, onde se observa que foi percolado aproximadamente 0,4 V_p/V_v em 175 horas.

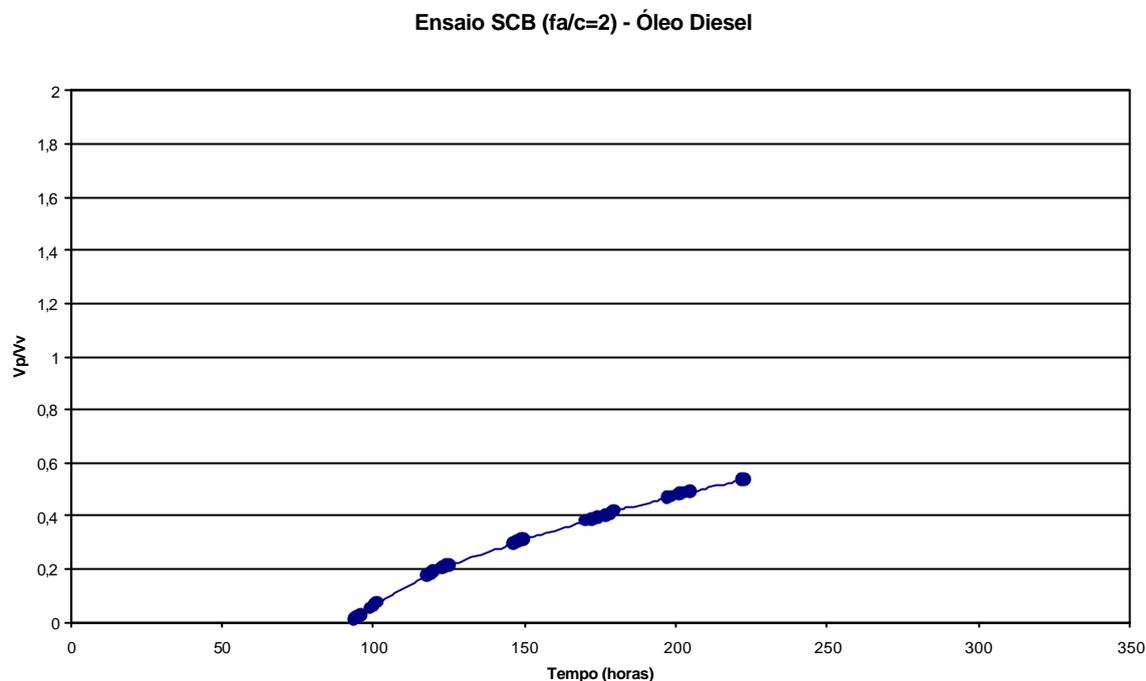


Figura 4.8 – Resultado do V_p/V_v x tempo na amostra SCB fator $a/c=2$ permeada com óleo diesel

4.3.3 Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 4

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de moldagem para a amostra em questão:

Tabela 4.4 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) fator $a/c=4$

Propriedades	Valores
Teor de Umidade	99%
Peso Específico Natural	1,35 g/cm ³
Peso Específico Seco	0,68 g/cm ³
Índice de Vazios	3,0

A amostra de Solo-Cimento-Bentonita apresentou uma grande estabilidade desde o início do ensaio, quando percolado com água, tendo seu valor de condutividade hidráulica médio igual a $1,4 \cdot 10^{-5}$ cm/s. Foram percolados aproximadamente 3,5 o volume de vazios da amostra. A Figura 4.9 representa o desenvolvimento do ensaio.

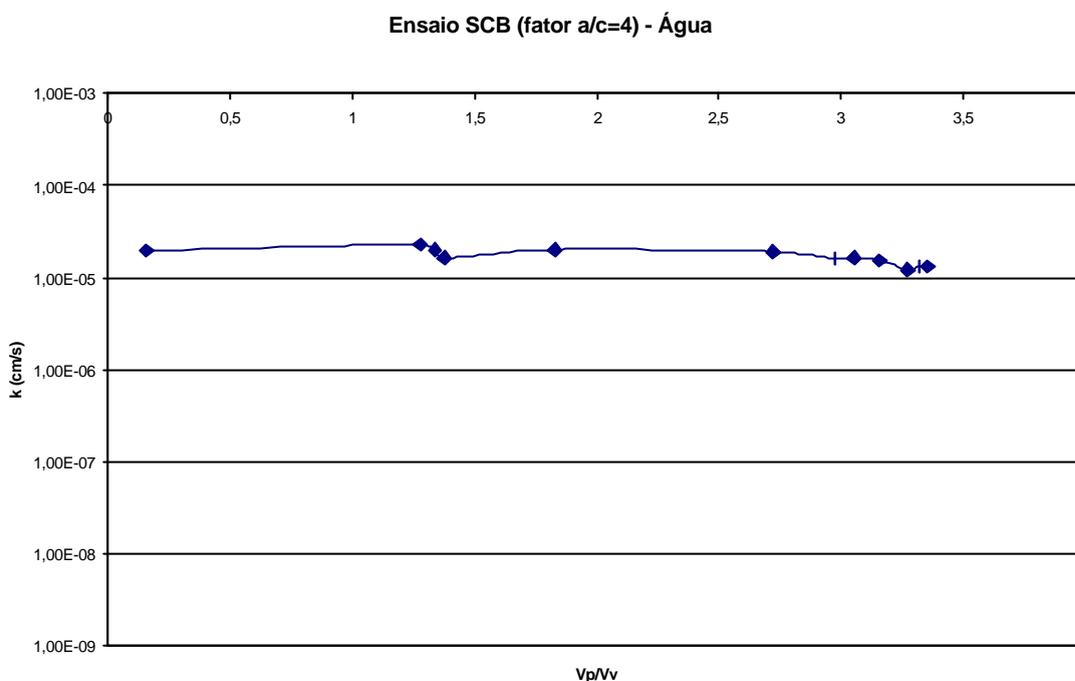


Figura 4.9 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c = 4$ permeada com água

Na Figura 4.10 pode-se observar quantos volumes de vazios foram permeados com água através do tempo, percebendo-se $3V_p/V_v$ em aproximadamente 50 horas.

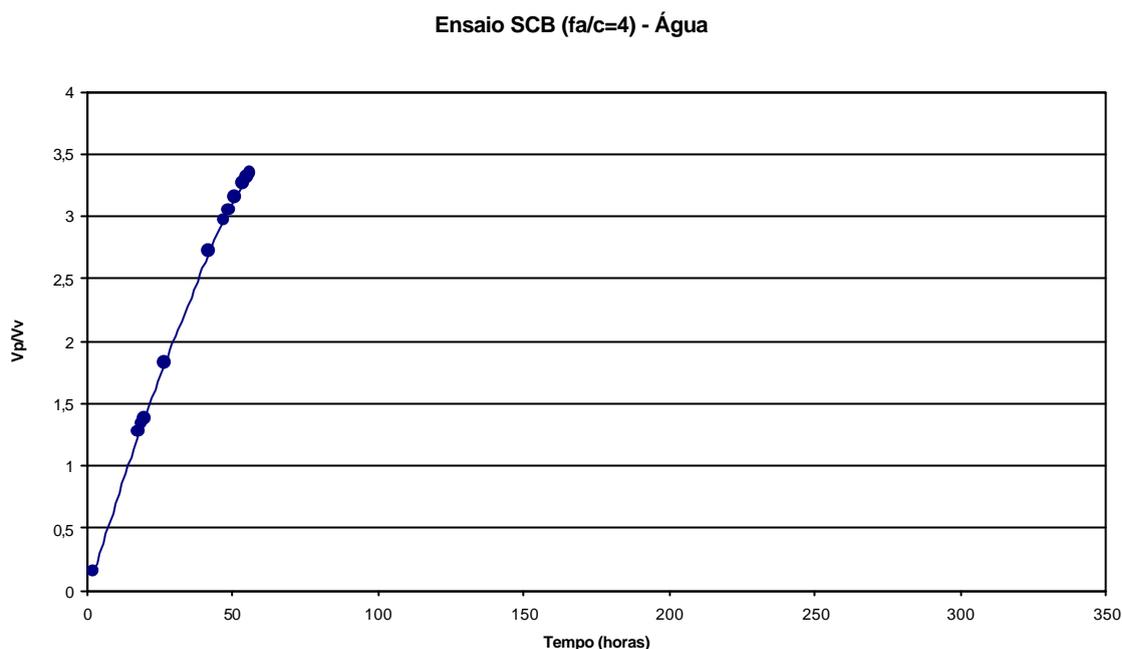


Figura 4.10 – Resultado V_p/V_v x tempo na amostra SCB fator $a/c=4$ permeada com água

A amostra SCB com fator $a/c=4$ quando permeada com óleo diesel apresentou uma evolução diferenciada. No início do ensaio quase não havia percolação de fluido, e, devido ao grande calor, houve uma grande evaporação de material no recipiente de coleta do material percolado, o que gerou valores não significativos de condutividade hidráulica. Desta forma, foram descartados estes valores. O ensaio estabilizou-se com um valor médio de condutividade hidráulica de $3,8 \cdot 10^{-8}$ cm/s.

Novamente, não foi observado o grande aumento na condutividade hidráulica que foi observado para o ensaio SB, devido, provavelmente ao efeito da formação de estrutura em função da cimentação.

A Figura 4.11 apresenta os resultados deste ensaio, onde se pode observar que foi percolado apenas 0,03 vezes o volume de vazios da amostra, isto se deu devido ao fato a amostra apresentar uma baixa condutividade hidráulica e mesmo deixando percolar por um grande tempo foi percolado pouco material.

Pode-se observar na Figura 4.12 o comportamento V_p/V_v através do tempo.

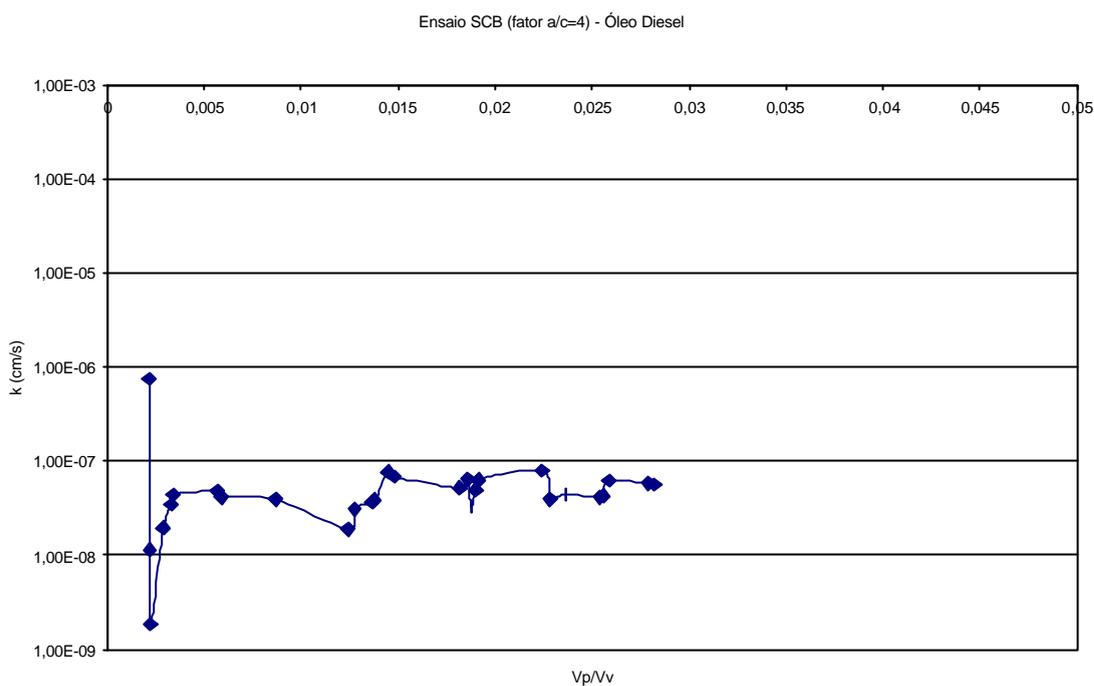


Figura 4.11 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator a/c =4 permeada com óleo diesel

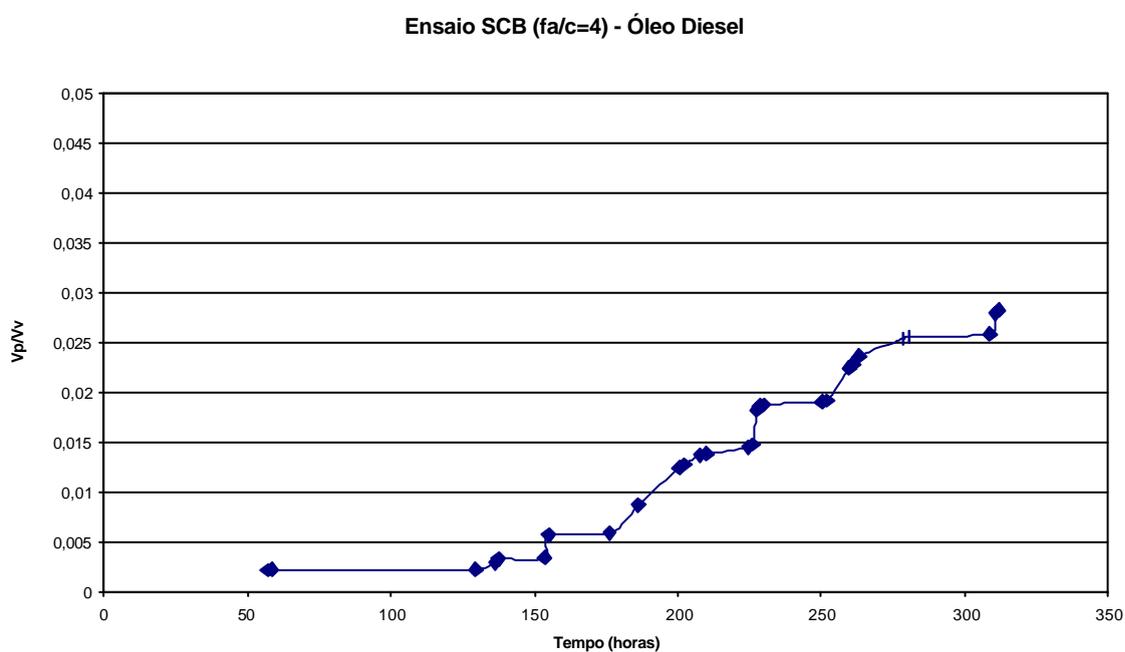


Figura 4.12 – Resultado do Vp/Vv x tempo na amostra SCB fator a/c=4 permeada com óleo diesel

4.3.4 Resultados da amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) com fator água-cimento 6

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros de moldagem para a amostra em questão:

Tabela 4.5 – Parâmetros de moldagem para a amostra Solo-Cimento-Bentonita (SCB) fator $a/c=6$

Propriedades	Valores
Teor de Umidade	98%
Peso Específico Natural	1,37 g/cm ³
Peso Específico Seco	0,69 g/cm ³
Índice de Vazios	2,9

A amostra SCB com fator a/c 6 apresentou, quando permeada com água, uma alta condutividade hidráulica, sendo o seu valor médio igual a $5,9 \cdot 10^{-5}$ cm/s, sendo permeados um volume de aproximadamente 2,7 vezes o volume de vazios.

A Figura 4.13 apresenta o resultado deste ensaio.

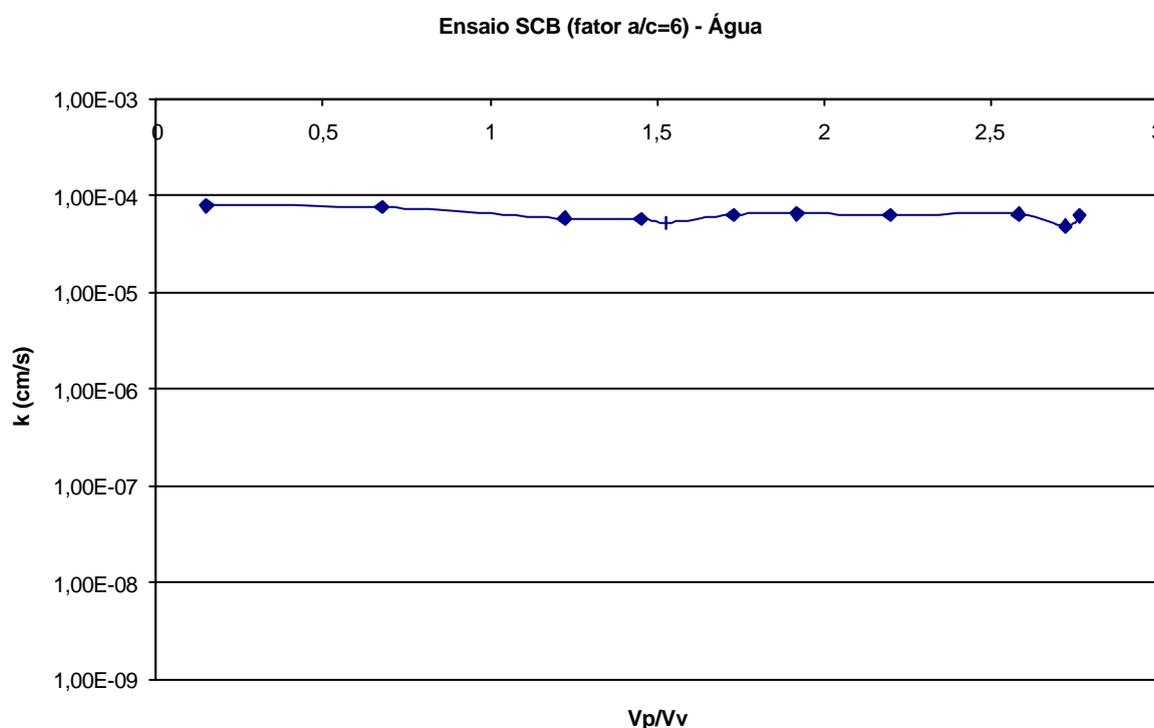


Figura 4.13 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator $a/c = 6$ permeada com água

Na Figura 4.14 observa-se o V_p/V_v através do tempo na amostra SCB $f_a/c=6$.

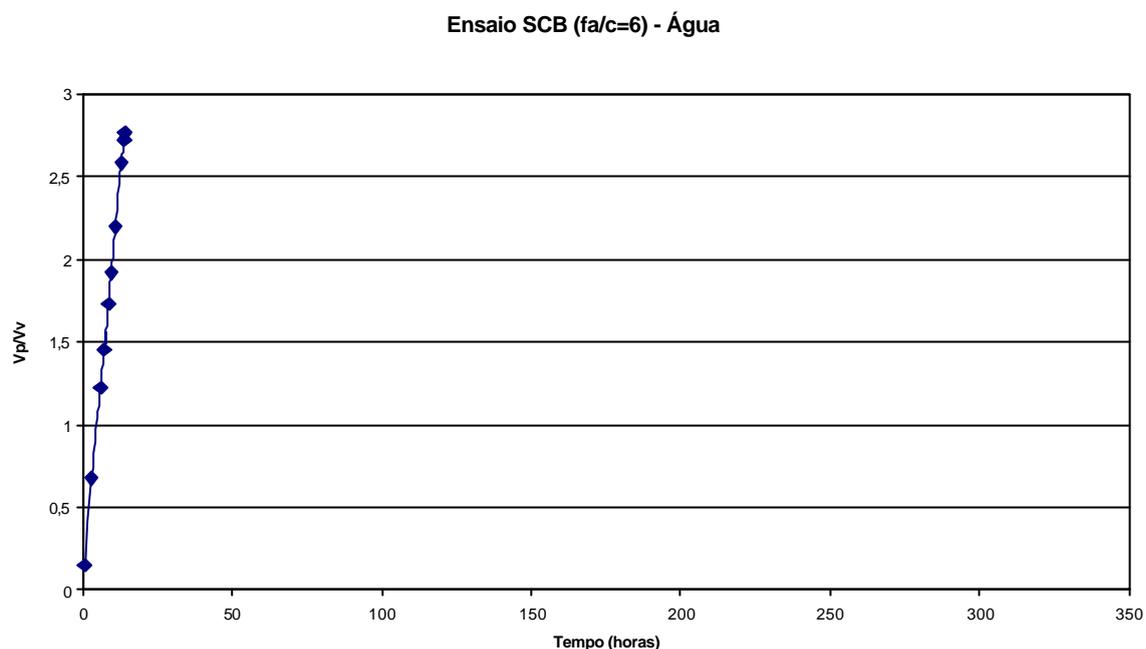


Figura 4.14 – Resultado V_p/V_v x Tempo na amostra SCB fator $a/c=6$ permeada com água

Quando se colocou o óleo diesel como agente permeante obteve-se uma rápida queda inicial na condutividade hidráulica da amostra passando seu valor para uma ordem de 10^{-7} cm/s. O valor médio da condutividade hidráulica ficou em torno de $1,7 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Durante este ensaio foi percolado um volume de aproximadamente 0,4 vezes o volume de vazios da amostra.

Novamente, como nos outros ensaios com cimentação, não houve grande aumento da condutividade hidráulica como ocorreu no ensaio SB.

Na Figura 4.15 pode-se observar o desenvolvimento do ensaio.

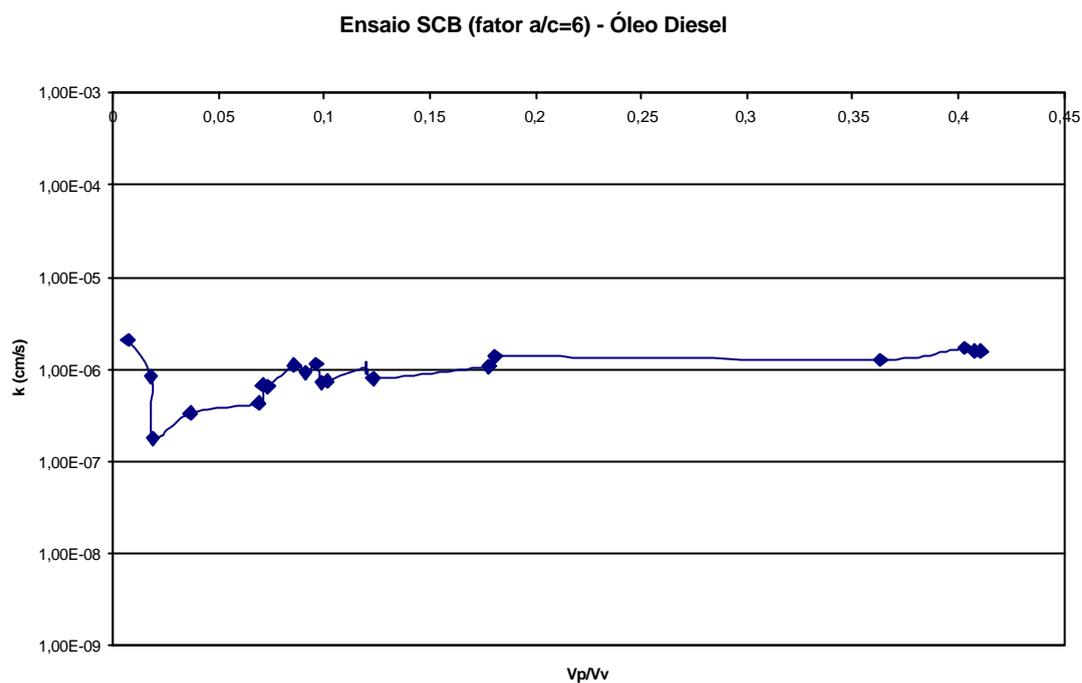


Figura 4.15 – Resultado da condutividade hidráulica para a amostra SCB com fator a/c =6 permeada com óleo diesel

Observa-se na Figura 4.16 quantos volumes de vazios foram percolados através do tempo.

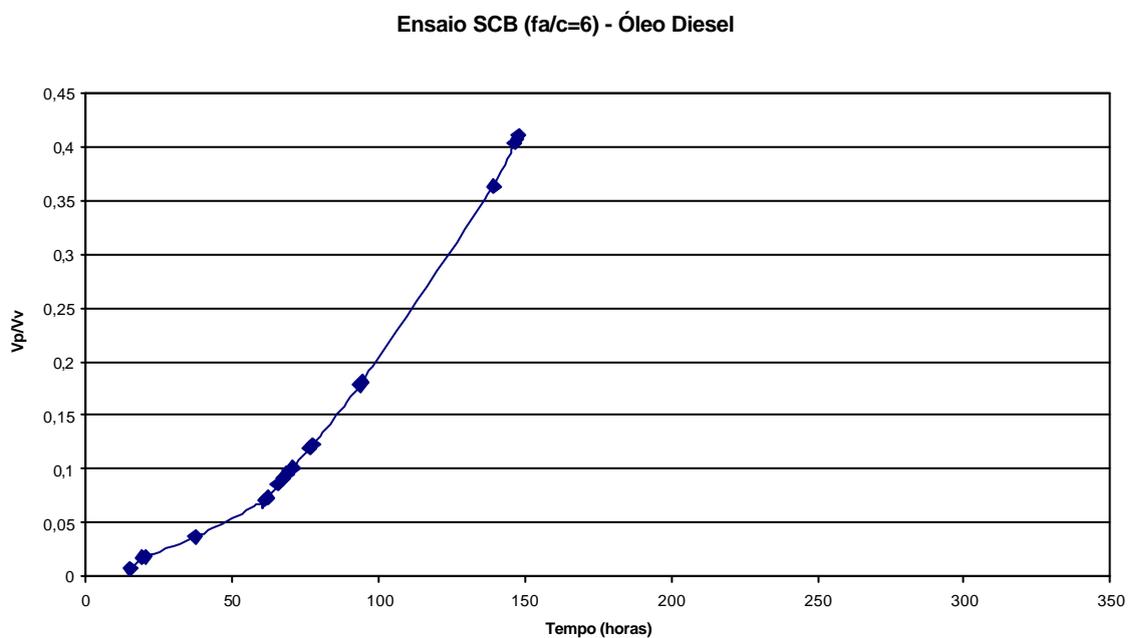


Figura 4.16 – Resultado do volume de entrada e saída na amostra SCB fator a/c=6 permeada com óleo diesel

4.2.5 Resultados globais

A seguir apresenta-se a planilha com o resumo dos resultados

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados

Propriedades	SB	SCB (fa/c=2)	SCB (fa/c=4)	SCB (fa/c=6)
Teor de Umidade	102%	98%	99%	98%
Peso Específico Natural	1,34 g/cm ³	1,37 g/cm ³	1,35 g/cm ³	1,37 g/cm ³
Peso Específico Seco	0,66 g/cm ³	0,69 g/cm ³	0,68 g/cm ³	0,69 g/cm ³
Índice de Vazios	3,1	2,9	3,0	2,9
Cond. Hidráulica (água)	1,7.10 ⁻⁷ cm/s	4,3.10 ⁻⁶ cm/s	1,4.10 ⁻⁵ cm/s	5,9.10 ⁻⁵ cm/s
Cond. Hidráulica (óleo diesel)	9,6.10 ⁻⁵ cm/s	7,5.10 ⁻⁶ cm/s	3,8.10 ⁻⁸ cm/s	1,7.10 ⁻⁶ cm/s

Pode-se observar nos resultados para as amostras percoladas com água, um aumento da condutividade hidráulica de $2,5.10^{-7}$ cm/s, para a amostra não cimentada para um valor na ordem de 10^{-5} cm/s para o caso das amostras de Solo-Cimento-Bentonita com fatores de água/cimento 4 e 6, como esperado, corroborando os resultados obtidos por Azambuja, 2004.

A Figura 4.17 apresenta o gráfico dos ensaios permeados com água:

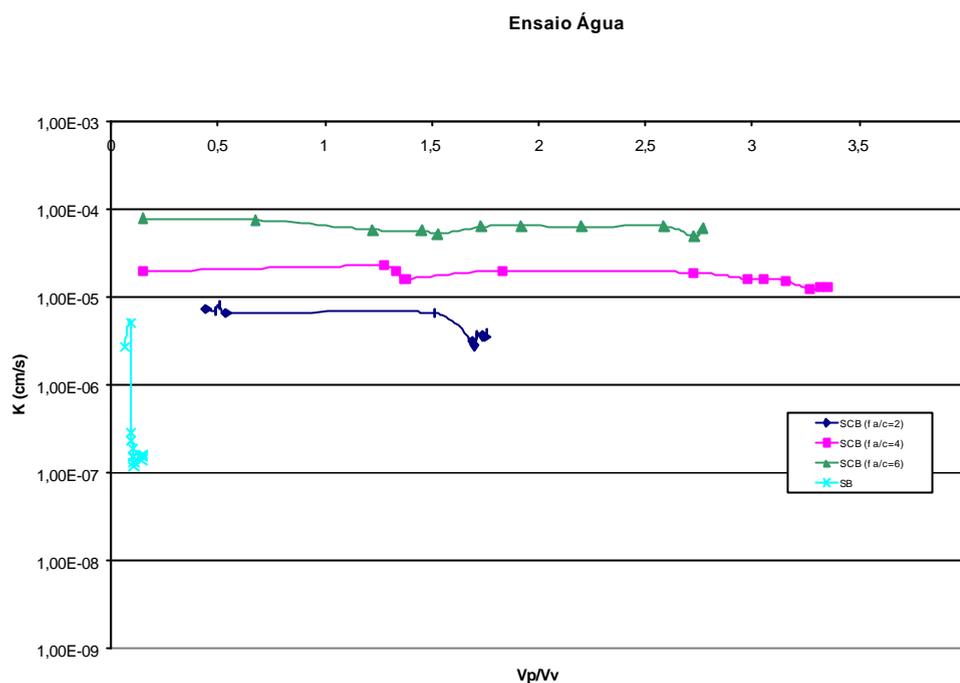


Figura 4.17 – Resultado da condutividade hidráulica para a água

Já quando as amostras foram percoladas com óleo diesel, obteve-se o menor valor de condutividade hidráulica para a amostra Solo-Cimento-Bentonita com fator água/cimento 4, sendo este valor de $5,7 \cdot 10^{-8}$ cm/s. A amostra de Solo-Bentonita apresentou um valor próximo a este até um determinado momento do ensaio quando a condutividade hidráulica teve um súbito aumento no seu valor.

A Figura 4.18 apresenta estes resultados:

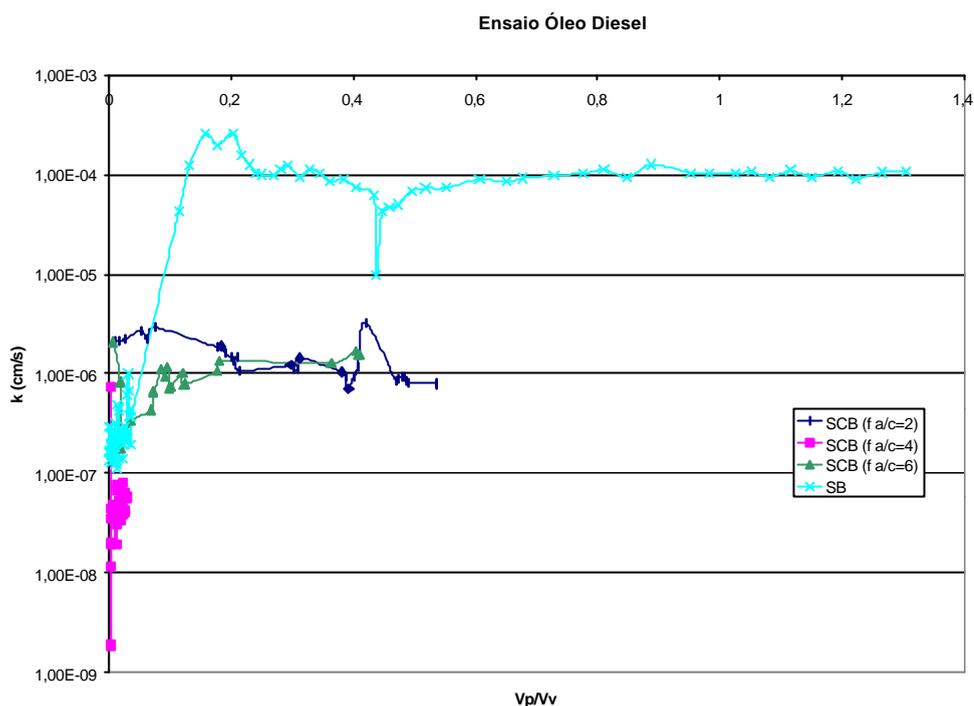


Figura 4.18 – Resultado da condutividade hidráulica para óleo diesel

Pode-se observar no gráfico acima que os ensaios cimentados não apresentaram um súbito aumento na condutividade hidráulica como ocorreu no ensaio SB.

O ensaio SCB com fator $a/c=4$ foi o que apresentou os melhores resultados de condutividade hidráulica para o óleo diesel, sendo que foi ele, também, que apresentou a melhor trabalhabilidade durante a moldagem entre os ensaios cimentados. A amostra SCB com fator $a/c=2$, devido a maior quantidade de cimento, apresentou uma menor trabalhabilidade e a amostra SCB com fator $a/c=6$ apresentou uma pequena segregação dos materiais.

4.4 ANÁLISES POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A bentonita foi analisada por técnicas de Difração de Raios X, de acordo com a rotina de preparação de argilominerais do Laboratório de Difração de Raios do Instituto de Geociências da UFRGS, obedecendo-se as seguintes condições:

- a) Bentonita não saturada. Nesta situação foram preparadas três laminas de bentonita orientada, nas condições, Natural, Glicolada e Calcinada;

b) Bentonita saturada com óleo diesel.

4.4.1 Resultado da análise de Difração de Raios X - Amostra natural

A Figura 4.20 representa o difratograma da amostra natural de bentonita, em que se observa o pico da montmorilonita em 12,973 Å, caracterizando-se por apresentar uma marcada assimetria para valores mais elevados. No mesmo difratograma observam-se traços de caolinita e quartzo, respectivamente.

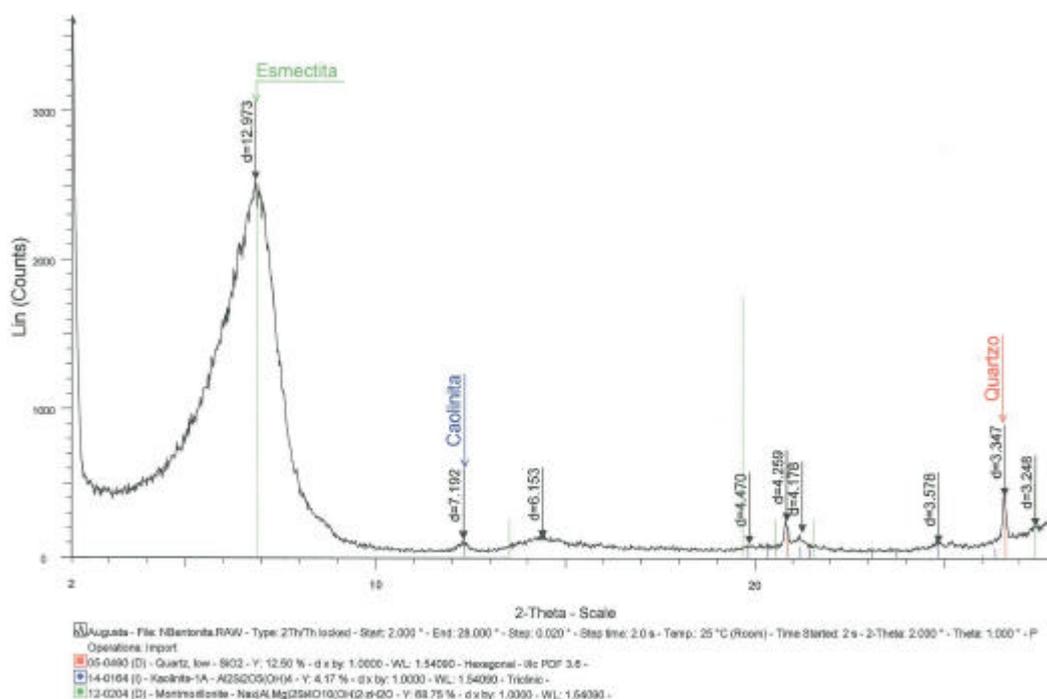


Figura 4.20 - Difratograma de Raios X. Amostra natural

4.4.2 Resultado da análise de Difração de Raios X da amostra tratada com Etileno Glicol

A Figura 4.21 representa o difratograma da amostra de bentonita tratada com etileno glicol, em que se observa o deslocamento do pico da montmorilonita da amostra natural em 12,973 Å para 17,115 Å. Este pico caracteriza-se por uma significativa cristalinidade e simetria. Ocorrem como traços caolinita e quartzo.

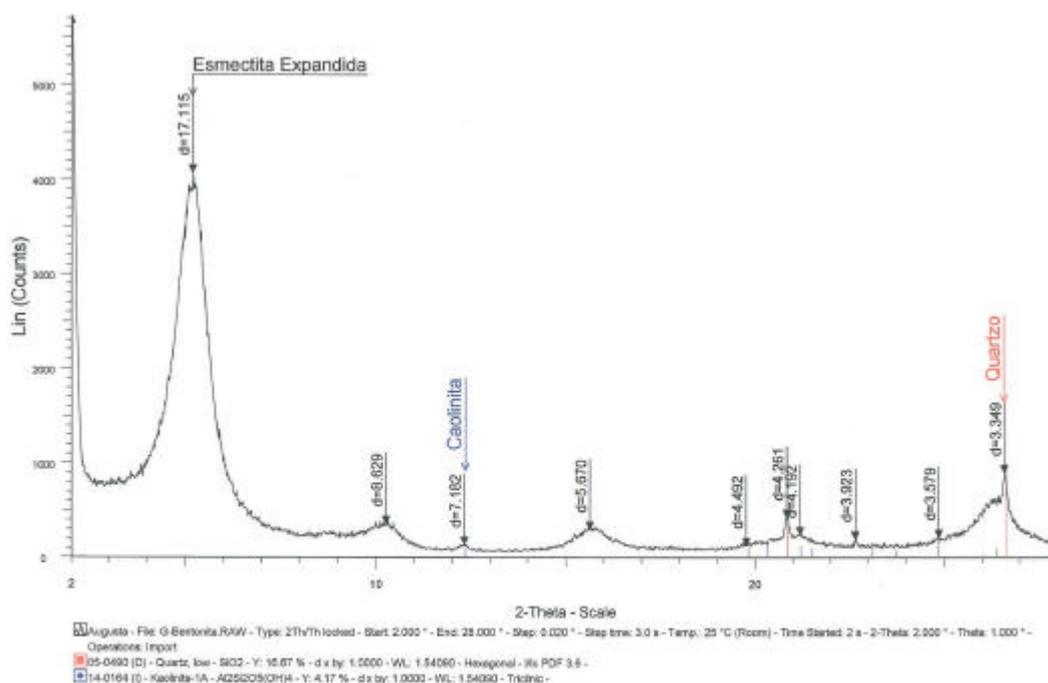


Figura 4.21 - Difratograma de Raios X. Amostra tratada com etileno glicol

4.4.3 Resultado da análise de Difração de Raios X da amostra Calcinada

A Figura 4.22 representa o difratograma da bentonita natural calcinada a 500°C. Pelo processo de calcinação o pico característico da montmorilonita natural de 12,973 Å desloca-se para 9,940 Å que define a montmorilonita colapsada. Como consequência, também, da calcinação, o pico da caolinita desaparece por completo por colapso estrutural. Entretanto, o quartzo

permanece por tratar-se de um mineral de comportamento refratário nessa faixa de temperatura.

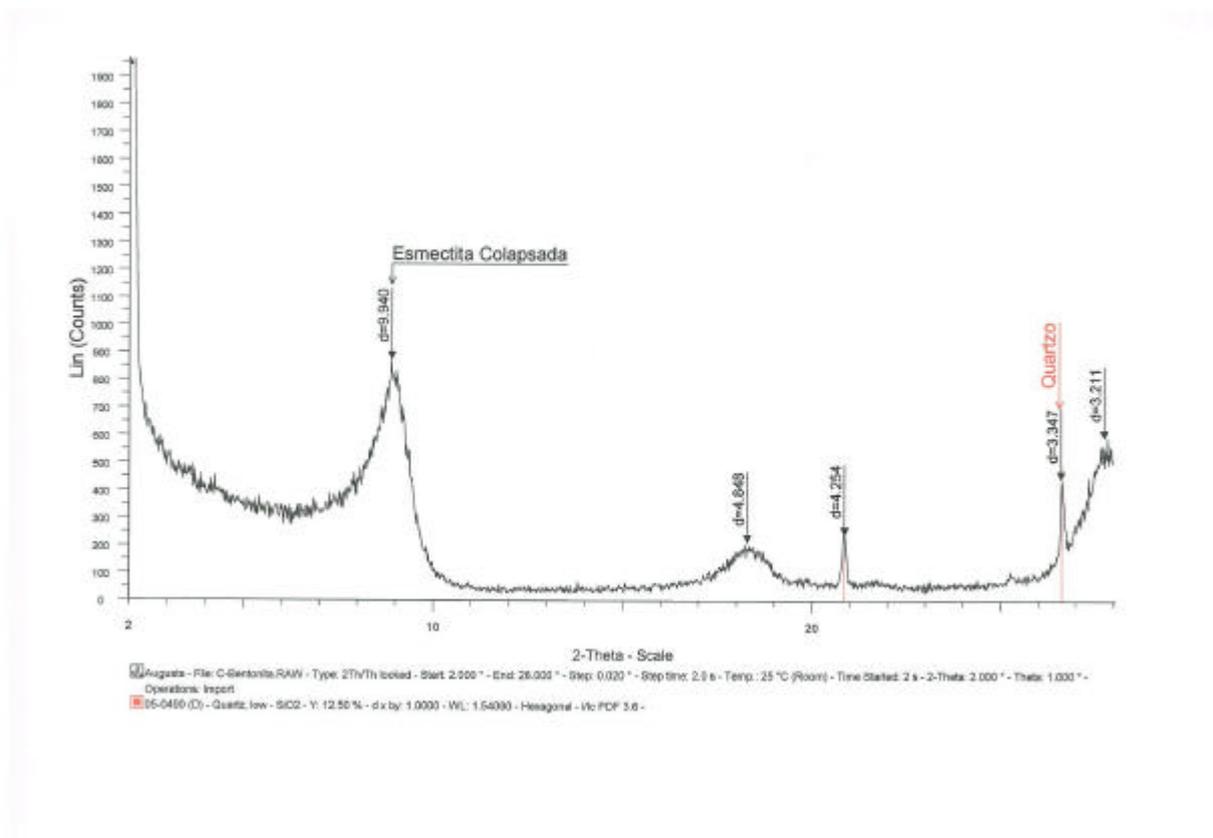


Figura 4.22 - Difratoograma de Raios X da bentonita calcinada

4.4.3 Resultado da análise de Difração de Raios X da amostra de Bentonita Saturada com Óleo Diesel

A Figura 4.23 representa o difratograma da amostra de bentonita saturada com óleo diesel. Destaca-se neste difratograma o posicionamento do pico da montmorilonita em 12,826 Å. O pico da montmorilonita em 12,826 Å indica uma redução distância entre os planos atômicos ou planos basais (d) quando comparado com a amostra natural que apresenta o pico da montmorilonita em 12,973 Å. Por outra parte, a comparação da amostra glicolada com o pico da montmorilonita em 17,115 Å com a amostra saturada com óleo diesel ($d=12,826$), equivale a uma significativa redução do inchamento intracristalino da montmorilonita. Este inchamento intracristalino é produzido pelo líquido que penetra e provoca o afastamento recíproco entre os planos basais da montmorilonita.

Este comportamento poderá estar relacionado com o aumento da permeabilidade da amostra em determinados teores de óleo diesel. Pode ser sugerido que o óleo diesel satura a amostra expulsando a água presente nos sítios de inchamento intracristalino da montmorilonita. O aumento da porosidade por estar relacionado, também, à redução da propriedade expansiva da bentonita. Por isso, uma vez atingido o ponto de saturação em óleo diesel, a água presente é expulsa, diminuindo o tamanho das massas de bentonita, que se “contraem” aumentando a porosidade e conseqüente permeabilidade da amostra.

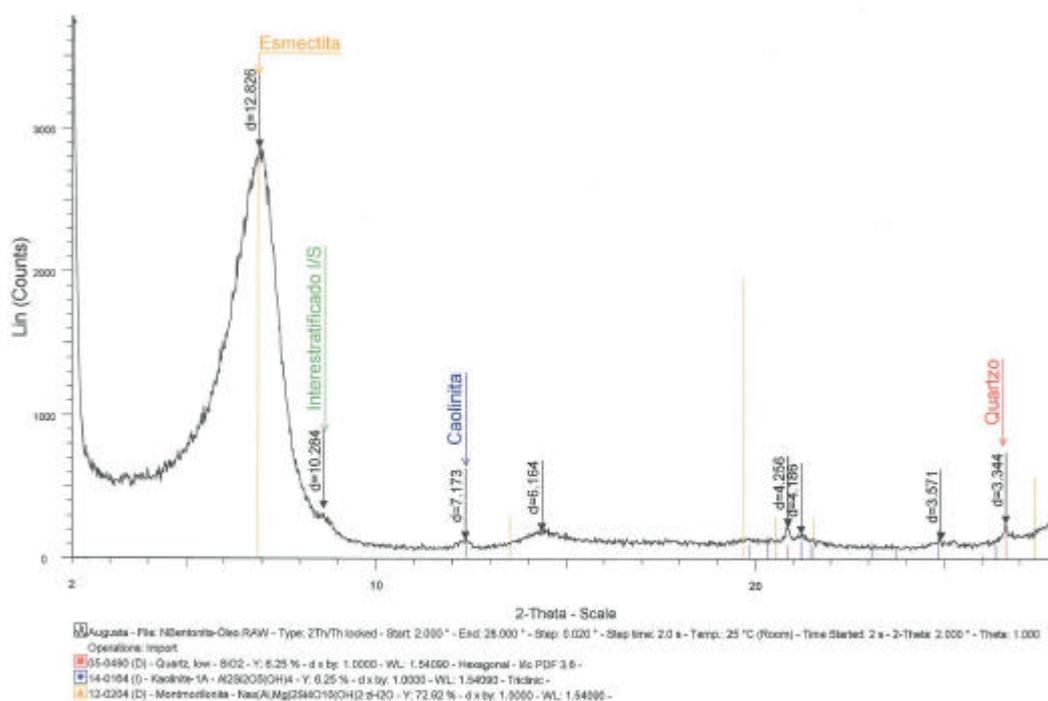


Figura 4.23 - Difratograma de Raios X. Amostra de bentonita saturada com óleo diesel.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais em relação à montagem do equipamento e a condutividade hidráulica. Para finalizar são propostas sugestões para futuros trabalhos neste segmento.

5.2 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

O permeâmetro de parede rígida desenvolvido no Environgeo/UFRGS segue a norma americana ASTM D 5856. Este equipamento foi projetado e construído para receber e resistir a contaminantes químicos presentes em amostras de solo contaminado ou como líquido permeante, através de peças e conexões de aço inox e tubulações de nylon.

O equipamento mostrou-se muito eficaz quanto à realização de ensaios de condutividade hidráulica, tendo sua eficiência comprovada também quanto ao uso de materiais contaminantes nos ensaios. Não apresentando desgaste de seus componentes ou tubulações no período de realização dos ensaios.

5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica da amostra Solo-Bentonita aumentou com a percolação de óleo diesel, o que pode em parte ser explicado por meio de difração de raios X, pois com óleo diesel como agente percolante há uma significativa redução do inchamento intracristalino da montmorilonita.

Para as amostras de Solo-Cimento-Bentonita pode-se observar uma diminuição da condutividade hidráulica quando comparamos os resultados obtidos da amostra permeada com água e óleo diesel.

Os melhores resultados, ou seja, o menor valor de condutividade hidráulica para a amostra permeada com óleo diesel foi alcançado com a amostra Solo-Cimento-Bentonita com fator água/cimento igual a 4, sendo este valor de $5,7.10^{-8}$ cm/s.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos fica aqui as seguintes sugestões:

- a) Realização de ensaios de condutividade hidráulica para outros materiais permeantes;
- b) Realização de microscopia eletrônica para as amostras;
- c) Uso de outros materiais como agentes cimentantes.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D 2487. Philadelphia, 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of porous material using a rigid-wall, Compaction-Mold Permeameter: D 5856. Philadelphia, 1997.
- ANANDARAJAH, A. Mechanism Controlling Permeability Change in Clays due to Changes in Pore Fluid. February 2003. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 163-172p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Especificações Brasileiras para Cimentos Portland. Informativo recebido por e-mail. São Paulo, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984c. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solos – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1987. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam em peneiras de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984d. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: Solo-Cimento – Ensaio de compressão simples de corpo de prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 1990. 2p.
- AZAMBUJA, R. M. B. Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para a Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes. 2004. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- 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.

- CABERLON, R.C. Condutividade hidráulica de solos contaminados encapsulados. 2004. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- 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).- PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- D' APPOLONIA, D. J. Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, New York*, v. 107, n 4, p. 393-409, 1980.
- DANIEL, D. E. "State-of-the-art: Laboratory Hydraulic Conductivity Testes for Saturated Soils" *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.*
- FEUERHARMEL, M.R. Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- GLEASON, M H., DANIEL, D. E., EYKHOLT, G. R. Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Maio, 1997. 438-445p.
- GRIM. R. E. *Applied Clay Mineralogy*, New York: McGraw-Hill Book Company. 422p. 1962.
- HALLIDAY, D., E RESNICK, R.. *Física II. Vol. 1*, Rio de Janeiro, RJ, Livros Técnicos e Científicos Editora, S.A. 383p, 1979.
- HEINECK, K.S. Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiaisgeotécnicos para barreiras de contenção de resíduos. 2002. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- KNOP, A. Encapsulamento de Solos Contaminados por Hidrocarbonetos. 2003. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- LAMBE, T. W., WHITMAM, R. V. *Soil Mechanics, SI Version*. New York: John Wiley, 1979. 553p.
- LEMONS, R. G. Alteração do Comportamento Mecânico e Hidráulico so Solo Devido à Ação de Materiais Agressivos. Tese em andamento (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- MACIEL FILHO, C. L. *Introdução à Geologia de Engenharia*. Santa Maria, Editora da UFSM, 2ª ed, 1997, 284p.
- MITCHELL, J.K. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons. New York. 422p. 1976.
- NÚÑEZ, W.P. Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação. 1991. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

OLIVEIRA, J. C. S. 2001. Avaliação de barreiras argilosas, Salvador, BA, Tese (Doutorado), Universidade Federal da Bahia, 126p.

OLIVEIRA, J. C. S.; Oliveira, I. B. 2002. Avaliação de barreiras argilosas na contenção de hidrocarbonetos, In: III Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental - Gestão Ambiental - Urbana e Industrial, Porto Alegre, RS, 20 – 22 de maio, Trabalho 184.

PEREIRA, E. O uso de inibidores de argilas como solução de problemas em sondagens. Disponível em: <<http://www.systemmud.com.br>> Acesso em 1 de agosto de 2004.

PICARELLI, S. Avaliação da contaminação de solos por hidrocarbonetos pesados em diques de contenção. 2003. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEM/UFRGS, Porto Alegre.

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

RYAN, C. R.; DAY, S.R. Soil-Cement-Bentonite Slurry Walls. In: M. W. O'NEILL; F. C. TOWNSEND. Deep Foundations 2002: Na International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance (Geotechnical Special Publication Nº 116). New York: ASCE, 2002, p. 713-727.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de Argilas, 2ª Edição, Vol. 1, São Paulo, SP, Editora Edgard Blücher Ltda, 1989.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de Argilas, 2ª Edição, Vol. 2, São Paulo, SP, Editora Edgard Blücher Ltda, 1989.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de Argilas, 2ª Edição, Vol. 3, São Paulo, SP, Editora Edgard Blücher Ltda, 1989.

SYSTEM MUD. Disponível em: <<http://www.systemmud.com.br>> Acesso em 1 de agosto de 2004.

THOMÉ, A. Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais. 1999. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia)– CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

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.

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

XANTHAKOS, P. P. Slurry Walls. New York: McGraw Hill, 1979. 622p.