

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UMA BENTONITA EM UM SOLO RESIDUAL PARA
USO COMO CAMADA SELANTE

Leandro Victor dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc., LD.

Prof^a. Helena Polivanov, D. Sc.

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, D. Sc.

Prof. Waldyr Lopes de Oliveira Filho, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 2008

SANTOS, LEANDRO VICTOR DOS

Estudo da Influência de uma Bentonita
em um Solo Residual Para Uso como Camada
Selante

[Rio de Janeiro] 2008

XVII, 140p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Camada Selante

2. Bentonita

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me trazer paz, calma e confiança nas horas mais difíceis e por sempre iluminar meus caminhos.

Aos meus pais pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim, não esquecendo o meu querido irmão por todas as horas de carinho e amizade dedicadas.

Ao Prof. Dr. Cláudio Fernando Mahler pelo apoio e orientação ao longo do trabalho.

À Prof. Dra. Helena Polivanov pelos ensinamentos, sugestões e principalmente pela paciência e amizade dedicada durante a execução deste trabalho.

A minha amada Fernanda, por estar sempre ao meu lado me encorajando, apoiando, dividindo os problemas e adicionando alegrias na minha vida. Não esquecendo também dos meus sogros (Maysa e Paulo) pela confiança depositada em mim.

Ao engenheiro Ronaldo Izzo, por todo tempo dedicado e os conselhos prestados.

Ao Prof. Dr. Antônio Soares da Silva pela ajuda na confecção e interpretação das lâminas de micromorfologia.

Aos estagiários da Geologia (Bruno, Vitor e Thiago) e da Geotecnia (Paola, Carol e Igor) por toda a ajuda prestada na realização dos ensaios de Laboratório, sem vocês seria muito mais difícil

Aos meus grandes amigos Vitão e Reka, pela amizade dedicada no dia-a-dia do laboratório.

Aos meus amigos da COPPE Vinícius Guedes, Uilliam, Sérvulo, Renata e Ivete pelos momentos de descontração, apoio e amizade.

Aos professores e funcionários do departamento de Geotecnia da COPPE-UFRJ, e em especial aos técnicos de laboratório, Serginho, “Bororó”, Carlinhos, Luizão e Gil pela colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do departamento de Geologia da UFRJ, e em especial aos professores Emílio Velloso e Andréa Borges e aos técnicos de laboratório Osório Luiz e Fátima, pela colaboração, sugestões e ensinamentos durante a execução deste trabalho.

Ao agrônomo Sílvio Tavares e ao físico Júlio, ambos da Embrapa Solos, pela realização dos ensaios para determinação da curva característica.

A todos meus amigos, Gabriela, Leandro, Thiago (Parceiro), Vânia, Amanda Oliveira, Fabinho, Suelen, Cícero, Cauê, Hatushika, Stutz, Marcos (Balão) muito obrigado pelo apoio, incentivo e amizade, todos vocês estão guardados no meu coração.

A TODOS O MEU MUITO OBRIGADO!!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UMA BENTONITA EM UM SOLO RESIDUAL PARA
USO COMO CAMADA SELANTE

Leandro Victor dos Santos

Novembro/2008

Orientador: Cláudio Fernando Mahler

Programa: Engenharia Civil

As preocupações ambientais justificadas por inúmeros casos de contaminações do solo e da água podem ser minimizadas com a utilização de dispositivos que assegurem a proteção ambiental, como, por exemplo, a camada selante. O presente trabalho teve o propósito de analisar e comparar os efeitos da aplicação da bentonita em um solo pouco argiloso e verificar se, com essa mistura os materiais passam a se comportar com características físicas, físico-químicas e geotécnicas adequadas para serem utilizados como camada selante. Para estas análises coletaram-se amostras de solo, deformadas e indeformadas, no município de Teresópolis no Estado do Rio de Janeiro. Posteriormente, em laboratório, realizaram-se ensaios de granulometria, densidade real dos grãos, limites de Atterberg, potencial hidrogeniônico (pH), mineralogia por difração de Raios-x, compactação, condutividade hidráulica, curva característica e ensaio de ressecamento. A partir dos resultados concluiu-se que a bentonita quando adicionada, em pequenas quantidades, a solos pouco argilosos, melhora significativamente as características físicas, físico-química e geotécnica destes. Dessa forma, podem desempenhar com sucesso a função selante.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF INFLUENCE IN A THE BENTONIT IN RESIDUAL SOIL FOR USE AS
LAYER

Leandro Victor dos Santos

Novembro/2008

Advisor: Cláudio Fernando Mahler

Department: Civil Engineering

The environmental concerns, justified by countless cases of soil and water contaminations, can be minimized by using devices that assure the environment protection, for example, the layer. The present research concerned to analyze and to compare the application of bentonite on a non-clayey soil and to verify if the new material has proper physical, physical-chemical and geotechnical characteristics to be used as layer. For these analyses, deformed and undeformed soils samples were collected in Teresópolis, Rio de Janeiro State, Brazil. Later on, in laboratory, granulometer, density, Atterberg's limits, pH, mineralogy, compactation, hydraulic conductivity, characteristic curve and drying tests were carried out. The results show that small amounts of bentonite improved significantly the physical, physical-chemical and geotechnical characteristics of the soils where it was added, meaning that the mixture can be used as an layer successfully.

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1	Objetivo.....	4
1.2	Conteúdo da Dissertação	5
2.	Fundamentação Teórica.....	7
2.1	Aspectos geotécnicos	7
2.1.1	Condutividade Hidráulica	7
2.1.1.1	Fatores que Afetam a Condutividade Hidráulica.....	9
	<u>Composição Mineralógica</u>	9
	<u>Composição Granulométrica</u>	10
	<u>Estrutura do solo</u>	11
	<u>Compactação do solo</u>	12
	<u>Grau de Saturação</u>	16
	<u>Propriedades do fluido percolante</u>	17
2.2	Retenção de Água pelos Solos.....	17
2.3	Energia Potencial da Água no Solo	18
2.4	Curva de Retenção de Água no Solo ou Curva Característica.....	21
2.5	Trincas de Ressecamento	25
2.6	Características gerais da bentonita	27
2.7	Camadas Selantes.....	36
2.7.1	Tipos de Camadas Selantes	37
3.	Materiais e Métodos	46
3.1	Características Geológicas da Área	46
3.2	Características Pedológicas do Ponto de Coleta.....	48
3.3	Coleta de Amostras	50
3.4	Misturas Solo-bentonita	52
3.5	Caracterização dos Materiais Estudados	53
3.5.1	Análise Micromorfológica	53
3.5.2	Análise Granulométrica Conjunta	58
3.5.3	Determinação da Densidade Real dos Grãos.....	59
3.5.4	Determinação dos Limites Atterberg.....	59
3.5.5	Determinação do Potencial Hidrogeniônico e do Δ pH	61
3.5.6	Determinação da Composição Mineralógica	63
3.5.6.1	Difratometria de Raios X	63
3.6	Ensaio de Compactação (Proctor Normal)	65
3.7	Determinação da Condutividade Hidráulica.....	66

3.8	Determinação da Curva Característica	67
3.9	Ensaio de Ressecamento	68
3.9.1	Equipamentos Utilizados	70
	<u>Sistema de Aquisição de Dados</u>	70
	<u>Sensor de temperatura</u>	71
	<u>Transdutor de pressão, Tensiômetro e Pedra Porosa</u>	72
	<u>Célula de carga</u>	74
	<u>Fonte de Alimentação</u>	76
3.9.2	Preparação e Montagem do Ensaio	76
4.	Resultados e Discussões	82
4.1	Granulometria	82
4.2	Densidade Real dos Grãos	87
4.3	Limites de Atterberg	87
	<u>Limite de Contração</u>	89
	<u>Atividade de Skempton</u>	91
4.4	Potencial Hidrogeniônico e Δ pH	92
4.5	Composição Mineralógica	93
4.6	Compactação	97
4.7	Condutividade Hidráulica	100
4.8	Curva Característica	102
4.9	Ensaio de Ressecamento	104
	<u>Sucção X Tempo</u>	105
	<u>Umidade X Sucção</u>	107
	<u>Volume X Tempo</u>	110
5.	Conclusões e Sugestões	114
	<u>Sugestões para Pesquisas Futuras</u>	117
	Referências Bibliográficas	119
	Anexos	132

Índice de Figuras

Figura 2.1: Estruturas floculada e dispersa respectivamente (LAMBE & WHITMAN 1969).....	13
Figura 2.2: Fluxo de água através de poros relativamente grandes entre os grumos (Modificado de OLSEN, 1962 <i>apud</i> BENSON & DANIEL, 1990).	14
Figura 2.3: Variação da energia de compactação (modificado de SOUSA PINTO, 2002).....	15
Figura 2.4: Representação em forma de diagrama do espessamento progressivo de uma película d'água num macroporo e declínio correspondente na tensão a que são submetidas as moléculas de superfície. (modificado de BRADY, 1989).....	18
Figura 2.5: Característica da curva de retenção (modificado de FREDLUND & XING, 1994).....	23
Figura 2.6: Curva Característica Típica de Diferentes Tipos de Solo (modificado de FREDLUND & XING, 1994).....	24
Figura 2.7: Sigmóide representando a Curva de trincamento do solo e seus pontos de transição (BRAUDEAU <i>et al.</i> , 1999 <i>apud</i> BOIVIN <i>et al.</i> , 2004)	27
Figura 2.8: (a) Esquema do Arranjo atômico; (b) modelo estrutural das esmectitas (SANTOS, 1989).....	28
Figura 2.9: Representação da hidratação da esmectita cálcica e da esmectita sódica (modificado de AMORIM <i>et al.</i> 2006).	29
Figura 2.10: (a) pilhas de estoque de bentonita, (b), ativação da bentonita com barrilha – UBM (CETEM, 2002).....	32
Figura 2.11: (a) misturador sem fim usado na homogeneização da bentonita, (b) ensacamento de bentonita para expedição (CETEM, 2002).	33
Figura 3.1: Horizonte B diagnóstico do cambissolo com presença de fragmentos e seixos da rocha original.	49
Figura 3.2: Horizonte superior A sobrejacente ao Horizonte B diagnóstico do cambissolo.....	49

Figura 3.3: Horizonte C com características marcantes da rocha original	50
Figura 3.4: localização da área de coleta das amostras (GOOGLE EARTH, 2007)	51
Figura 3.5: Coleta de bloco indeformado do horizonte A	51
Figura 3.6: Montagem feita para ilustrar a amostra coletada para micromorfologia e o seu respectivo perfil de coleta.	54
Figura 3.7: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz natural) referente ao horizonte A onde fica evidenciado a porosidade bem conectada (coloração branca e sem forma definida - seta em vermelho). Observa-se na coloração marrom pequenos agregados de solo.	55
Figura 3.8: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz polarizada) referente ao horizonte A, onde observa-se no canto direito inferior da figura um Box Work de gibbsita. Ressalta-se que o tamanho do feldspato é preservado, porém há formação de poros por dissolução desse mineral.	56
Figura 3.9: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz natural) referente ao horizonte B onde fica evidenciado a porosidade bem conectada (coloração branca e sem forma definida). Observa-se na figura (setas em vermelho) a presença de poros fissurais conectados à porosidade cavitária.	57
Figura 3.10: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz polarizada) referente ao horizonte C onde fica evidenciado a porosidade na forma de vesículas não conectadas (coloração preta). Nas setas brancas são demonstrados alguns destes poros.....	58
Figura 3.11: pHmetro Quimis utilizado na determinação do potencial hidrogeniônico (pH).....	62
Figura 3.12: Difratorômetro Rigaku – Termoflex.....	64
Figura 3.13: Conjunto contendo uma bomba a vácuo e um dessecador com fundo preenchido por etilenoglicol.....	64
Figura 3.14: Mufla usada para aquecer as lâminas a temperatura de 550°C	65
Figura 3.15: Ensaio de Permeabilidade.....	67

Figura 3.16: Esquema ilustrativo dos principais componentes do ensaio de Ressecamento.....	69
Figura.3.17: Dispositivo armazenador de dados com os quatro conectores do sistema (transdutor de pressão, célula de carga, transdutor de temperatura e tensiômetro), respectivamente.	71
Figura.3.18: Transdutor de temperatura.....	71
Figura 3.19: (a) Transdutor de pressão acoplado ao copo em acrílico com pedra porosa; (b) Transdutor de pressão, em detalhe, da marca Ashcroft.	73
Figura 3.20: copo em acrílico com transdutor de pressão (b) transdutor de pressão em detalhe.....	74
Figura 3.21: Ponte de Wheatstone (fonte: http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm)	75
Figura 3.22: Célula de carga da marca Líder Balanças Modelo CS-50	75
Figura..3.23: Montagem tri-partido – tamanho CBR.....	77
Figura 3.24: (a)Conjunto no vácuo e (b)depois submerso. (Fonte: HUSE 2007).....	78
Figura 3.25: (a) Saturação interna do transdutor; (b) Rosqueamento do transdutor no copo de acrílico; (c) Transdutor submerso em água	78
Figura 3.26: (a) transdutor de temperatura acoplado na base do (CP); (b) Pasta de solo sobre o tensiômetro na base metálica; (c) Corpo de prova sobre a base metálica	79
Figura 3.27: (a) Encamisador já com a membrana; (b) Corpo de prova com a membrana; (c) Preenchimento do cilindro em acrílico com água.....	80
Figura 3.28: (a) Conjunto dos equipamentos sobre a célula de carga; (b) transdutor de pressão conectado ao tubo de plástico.	80
Figura 3.29: Ensaio de Ressecamento completo.....	81
Figura 4.1: Curva granulométrica correspondente ao horizonte A e suas respectivas misturas.	82

Figura 4.2: Curva granulométrica correspondente ao Horizonte B e suas respectivas misturas	84
Figura 4.3: Curva granulométrica correspondente ao Horizonte C e suas respectivas misturas	85
Figura 4.4: Curva granulométrica correspondente a Bentonita	86
Figura 4.5: foto ilustrativa da contração da bentonita quando submetida a 110 C.....	90
Figura 4.6: foto ilustrativa da bentonita pura durante a evolução da contração sob temperatura ambiente. (a) início do ensaio; (b) 24hs de ensaio; (c) 1 mês de ensaio.	91
Figura 4.7: Difratoograma referente a fração argila do Horizonte A e de suas respectivas misturas (5% e 10%).	94
Figura 4.8: Difratoograma referente a fração argila do Horizonte B e de suas respectivas misturas (5% e 10%).	95
Figura 4.9: Difratoograma referente a fração argila do Horizonte C e de suas respectivas misturas (5% e 10%).	96
Figura 4.10: Difratoograma referente a Bentonita pura utilizada neste estudo.	97
Figura 4.11: Curva de compactação referente ao Horizonte A e de suas respectivas misturas (5% e 10%).	98
Figura 4.12: Curva de compactação referente ao Horizonte B e de suas respectivas misturas (5% e 10%).	98
Figura 4.13: Curva de compactação referente ao Horizonte C e de suas respectivas misturas (5% e 10%).	99
Figura 4.14: Curva característica referente ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%).	102
Figura 4.15: Curva característica referente ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%).	103
Figura 4.16: Curva característica referente ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%).	103

Figura 4.17: Curva sucção versus tempo obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)...	105
Figura 4.18: Curva sucção versus tempo obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)...	106
Figura 4.19: Curva sucção versus tempo obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	107
Figura 4.20: Curva umidade versus sucção obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	108
Figura 4.21: Curva umidade versus sucção obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	109
Figura 4.22: Curva umidade versus sucção obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	110
Figura 4.23: Curva volume versus tempo, obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	111
Figura 4.24: Curva volume versus tempo, obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	112
Figura 4.25: Curva volume versus tempo, obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	113

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Variação da condutividade hidráulica dos argilominerais com o índice de plasticidade	10
Tabela 2.2: Relação entre diâmetro de partículas esféricas, seu número por cm ³ e sua superfície (REICHARDT, 1987).	11
Tabela 2.3: valores típicos de condutividade Hidráulica (PINTO, 2002).	11
Tabela 2.4: Resultados do Grau de Inchamento livre das bentonitas naturais e ativadas.....	34
Tabela 2.5: Análise Química de bentonitas (* Dados da literatura modificado de ARANHA & PORTO, 2002).....	35
Tabela 2.6: Principais características das camadas selantes recomendadas propostos por alguns autores (modificada de FERRARI, 2005).....	39
Tabela 3.1: Composição química da bentonita permagel (Fonte : Informação do catálogo da Bentonita Permigel).....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4.1: Dados obtidos por meio da combinação do método do peneiramento e da sedimentação para o horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)	83
Tabela 4.2: Dados obtidos por meio da combinação do método do peneiramento e da sedimentação para o horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).	84
Tabela 4.3: Dados obtidos por meio da combinação do método do peneiramento e da sedimentação para o Horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)	85
Tabela 4.4: Dados da granulometria da bentonita pura	86
Tabela 4.5 : Resultados da Densidade Real dos Grãos.....	87
Tabela 4.6: Resultados dos ensaios de LL, LP e IP e a classificação das amostras estudadas segundo Sucs.....	88

Tabela 4.7: Resultados do limite de contração das amostras referentes aos horizontes A, B e C puros e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)...	89
Tabela 4.8: Valores do índice de atividade (<i>IA</i>) de Skempton para as amostras estudadas	91
Tabela 4.9: Resultados da medição do pH das amostras com H ₂ O e KCl e o valor de ΔpH para as mesmas.	92
Tabela 4.10: Parâmetros de compactação Proctor Normal das amostras estudadas .	99
Tabela 4.11: Resultados da condutividade hidráulica das amostras deformadas dos horizontes A, B e C e de suas misturas com bentonita (5% e 10%).....	100
Tabela 4.12: Resultados da condutividade hidráulica das amostras indeformadas dos horizontes A, B e C.	101

Lista de Símbolos

A - área da seção transversal ao sentido do fluxo

H^+ - atividade do íon hidrogênio na solução

Δh – carga hidráulica dissipada na percolação

ψ - Energia potencial total

ψ_p - componente de pressão corresponde a pressão à qual a água pode estar submetida (somente pressões positivas, ou seja, acima da pressão atmosférica)

ψ_g – componente gravitacional, determinado pela posição do ponto considerado em relação ao nível de referência

ψ_m - componente matricial, se refere aos estados de energia devidos à sua interação com as partículas sólidas do solo (matrizes do solo)

ψ_{os} - componente osmótica, resultante de íons e outros solutos presente na água do solo

k – condutividade hidráulica; em função não somente do meio poroso, mas também do peso específico e da viscosidade do fluido;

CP – corpo de prova

l – distância ao longo do qual a carga é dissipada

i – gradiente hidráulico

IA – índice de Atividade de Skempton

IP – índice de plasticidade

LC – limite de contração

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

ρ_{dmax} – massa específica aparente seca máxima

K – permeabilidade intrínseca do solo, função exclusiva do meio poroso

γ – peso específico do líquido percolante

pH – potencial Hidrogeniônico

w_{ot} – umidade ótima

Δ pH – variação do Potencial Hidrogeniônico

Q – vazão percolada

μ – viscosidade do líquido percolante

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos houve um aumento considerável e de modo descontrolado na degradação do meio ambiente, tendo sido detectados inúmeros casos onde solos, águas subterrâneas e superficiais foram contaminados em consequência do mau uso da terra para centros urbanos, para a atividade agrícola, mineração, pecuária e industrial.

Estas atividades associam-se, geralmente, a descargas acidentais ou voluntárias de contaminantes nos solos e águas, disposição não controlada de produtos que podem ser resíduos perigosos, “lixões” e/ou aterros sanitários urbanos e industriais, lagoas de disposição, entre outras.

As preocupações ambientais em torno destas contaminações são justificadas pelo fato de que, geralmente, a mesma interfere no ambiente global da área afetada e está diretamente relacionada à origem de problemas da saúde pública (disponível em: www.achetudoeregiao.com.br/ANIMAIS/poluicao_do_solo.html).

Diante destes fatos, torna-se importante a utilização de dispositivos que assegurem a proteção ambiental, principalmente no que se diz respeito a obras de contenção de resíduos.

Uma das alternativas para este tipo de problema é a utilização de um sistema de selagem, que como o próprio nome diz, tem como principais funções isolar os resíduos e diminuir a infiltração de contaminantes e águas no solo. Estes sistemas auxiliam de forma direta na filtragem, sorção e reações geoquímicas no caso de sistemas de selagem basal, assim como na infiltração de água em sistemas de cobertura e barreira hidráulica.

Normalmente as camadas selantes são compostas por materiais argilosos compactados. No entanto, em algumas regiões não há disponibilidade local de material argiloso, portanto a utilização do solo local (siltoso ou arenoso) com algum

aditivo pode ser uma alternativa viável, justificada sob os aspectos técnicos, econômicos e também ambientais.

Normalmente os solos argilosos brasileiros são formados sob condições climáticas marcadas por duas estações bem definidas pela pluviosidade: uma seca durante o inverno e outra chuvosa no verão. Períodos de chuvas intensas aliados a elevadas temperaturas constantes, propiciam os processos de formação de solos lixiviados, com horizontes pedológicos bastantes espessos.

Esta condição pode mudar nas regiões montanhosas com temperaturas amenas, pois além do fator climático, o relevo atua de forma significativa na formação de solos incipientes. Estes solos possuem horizontes pedologicamente pouco desenvolvidos e normalmente pouco espessos (rasos). Isto pode ser justificado pelo fato de que em regiões com relevo muito montanhoso (topografia acentuada), grande parte da chuva é perdida em escoamentos laterais, favorecendo os processos erosivos e retardando o aprofundamento da pedogênese, portanto são formados solos siltosos e arenosos. (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Desta forma, torna-se importante uma análise dos solos naturais, pois alguns não possuem características técnicas adequadas para serem utilizados como camada selante, principalmente quando se trata da condutividade hidráulica. Portanto é necessário o melhoramento dos mesmos.

Como alternativa para o melhoramento das características físicas, físico-químicas, químicas e geotécnicas dos solos, a adição de bentonita, em pequenas quantidades, torna-se uma opção bastante interessante, principalmente para diminuição da condutividade hidráulica destes solos quando compactados.

A bentonita é um material argiloso que possui como principal característica sua grande expansibilidade: Quando esta entra em contato com fluidos, seu volume aumenta cerca de 20 vezes (SANTOS, 1989).

Essa característica de expansibilidade é fundamental para a utilização da bentonita como camada selante. THOMÉ & ORSO (2007), relataram a utilização da

mistura solo-bentonita com a finalidade de conter uma perda de água de um dique construído para a ampliação da Barragem do Arroio DEZ no Rio Grande Sul. O dique havia sido erguido sobre o solo de fundações sem a construção de camadas selantes. Com o passar do tempo verificou-se que estava ocorrendo perda de água pela fundação do dique, cerca de 90 litros por segundo. Como era inviável o rebaixamento do nível d'água do reservatório, utilizou-se uma lama composta pelo solo local mais a bentonita. O resultado da utilização desta lama bentonítica, para contenção de água, foi satisfatória uma vez que a vazão da jusante diminuiu mais de 99% em relação à perda inicial.

FERRARI (2005) utilizou a adição de bentonita como forma de melhoramento técnico de solos siltosos para serem utilizados como camada selante de aterros de resíduos. O resultado foi satisfatório, pois essa mistura alcançou um coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-9} m/s quando compactada com elevada energia.

Estudos como os de ANDERSON & HEE (1995); GOUVEIA FILHO & OLIVEIRA (2005); FARNESI (2006); HUSE (2007) avaliaram diferentes aspectos de melhoramentos geotécnicos de solos tropicais para a construção de sistemas de selagem por meio da adição de pequenas quantidades de bentonita. Outros trabalhos discutiram também o melhoramento técnico, principalmente da condutividade hidráulica, de materiais arenosos quando acrescidos de bentonita para serem aproveitados como camada selante (CHAPUIS, 1990, KEENEY *et al.*, 1992, SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998; SALLFORDS & ÖBERGH-HÖGSTA, 2002, TAY *et al.*, 2001, AZAMBUJA, 2004, CHALERMYANONT & ARRYKUL, 2005, LUKIANTCHUKI, 2007).

A adição de bentonita também proporciona um aumento na capacidade de sorção de contaminantes no solo, principalmente cátions, fato que pode auxiliar na diminuição do fluxo por difusão em camadas selantes basais de aterros sanitários. No entanto, poucos são os estudos que abordam integralmente a interação química da mistura solo-bentonita com as características geotécnicas do sistema de selagem.

É sabido que a utilização de bentonita ajuda a promover a remoção de alguns metais pesados quando estes estão presentes em solos tropicais (CANCELLI *et al.*, 1994, SAHA *et al.*, 2001, SAHA *et al.*, 2002, RODRIGUES *et al.*, 2004).

Segundo ALAMINO (2004), a bentonita influencia de maneira significativa a retenção de metais quando estes fazem parte da constituição de um solo. Neste trabalho utilizaram-se cinco proporções de solo-bentonita (solo puro; 25% bentonita, 50% bentonita; 75% de bentonita e 100% bentonita) e pôde-se verificar que com o acréscimo de 25% de bentonita nos solos tropicais estudados já foi responsável por quase toda adsorção dos metais pesados presentes. Ressalta-se que essa porcentagem irá variar de acordo com a constituição mineralógica de cada solo e com o contaminante presente no solo.

No caso de um aterro sanitário, devem-se considerar não apenas as avaliações sobre a compatibilidade das misturas (solo-bentonita), mas também a compatibilidade destas misturas com os resíduos dispostos.

Com base no exposto acima, decidiu-se estudar a influência da bentonita em um solo incipiente formado sob condições tropicais para a sua utilização como camada selante.

1.1 Objetivo

O presente trabalho teve o propósito de analisar e comparar os efeitos da aplicação da bentonita em um solo incipiente, ou seja, pouco evoluído pedologicamente formado sob condições tropicais e verificar se, com essa mistura os materiais passam a apresentar características físicas, físico-químicas e geotécnicas adequadas para serem utilizados como camada selante. Para estas análises foram coletadas amostras de solo, deformadas e indeformadas, no município de Teresópolis no Estado do Rio de Janeiro em diferentes cotas topográficas, com o objetivo de

analisar a influência da bentonita em profundidades distintas dentro de um mesmo solo.

As caracterizações físicas, físico-químicas, mineralógicas e geotécnicas dos solos e de suas respectivas misturas são de grande relevância, pois estas análises revelam, sobretudo, a constituição dos solos, destacando-se, entre outros fatores, a textura dos solos e a composição das argilas que influenciam de maneira significativa no comportamento da camada selante.

Por fim, este trabalho visou encontrar uma alternativa viável para a aplicação de solos pouco argilosos acrescidos de um material ativo (bentonita) para serem utilizados como camadas selantes.

1.2 Conteúdo da Dissertação

O capítulo 1 refere-se de forma bastante geral ao tema abordado nesta pesquisa destacando alguns motivos que levaram a escolha dos materiais utilizados neste trabalho. Neste capítulo também são apresentados os principais objetivos dessa dissertação.

No capítulo 2, são descritos os principais aspectos relacionados à percolação e retenção de água nos solos, formação de trincas, características gerais da bentonita e das camadas selantes.

No capítulo 3, é feita uma breve descrição geológica e pedológica da área onde as amostras de solo foram coletadas, assim como uma análise micromorfológica de lâminas referentes a este material. Neste capítulo também são apresentados os ensaios que caracterizaram a bentonita pura, os horizontes A, B e C puros e suas misturas com bentonita (5% e 10%) quanto aos seus principais componentes físicos, físico-químicos, e mineralógicos, além do seu comportamento geomecânico.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e as discussões das análises descritas no capítulo 3.

No capítulo 5, é apresentada uma avaliação referente a todas as análises realizadas, bem como as conclusões envolvendo o principal objetivo deste trabalho. Também são feitas sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, após o capítulo 5, encontram-se listadas as referências bibliográficas e são apresentados os anexos.

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo são descritos os principais assuntos relacionados à percolação e retenção de água nos solos, formação de trincas, características gerais da bentonita e das camadas selantes.

2.1 Aspectos geotécnicos

A utilização de materiais para aplicação como camadas selantes exige, conhecimentos importantes de geotecnia e de seus principais parâmetros.

Inicialmente deve-se ter um bom entendimento sobre meios porosos, pois é a partir deles que fluidos (gases e/ou líquidos) percolam quando há vazios disponíveis nos diferentes materiais. No caso de solos, que são materiais com características distintas uns dos outros, o fluido encontrará maior ou menor dificuldade para transpor o meio poroso em função de alguns fatores como: porosidade, composição mineralógica, composição granulométrica, estrutura, condutividade hidráulica, compactação, entre outros.

Desta forma, torna-se necessário uma explanação básica sobre estes fatores, frisando a influência destes em parâmetros essenciais para a construção de camada selantes.

2.1.1 Condutividade Hidráulica

O estudo da condutividade hidráulica dos solos é de grande relevância quando se trata de casos onde ocorre fluxo de água neste meio.

Em pesquisas que envolvem camadas selantes, a condutividade hidráulica é um fator decisivo na escolha do material, uma vez que é necessária a utilização de materiais com baixíssimos valores desse parâmetro.

A base da teoria do escoamento de água nos meios porosos foi estabelecida pelo engenheiro hidráulico francês Henry Darcy (FETTER, 1993). Em 1856, este citado autor publicou um trabalho, onde foi estudado o movimento da água em um filtro de areia. Este experimento deu origem a uma lei que correlaciona à velocidade média de escoamento do fluido no meio poroso. Esta lei é conhecida como Lei de Darcy e pode ser expressa pela equação 2.1.

$$v = k \times i$$

Equação 2.1

$$Q = k \times i \times A$$

Equação 2.2

Onde: v - velocidade média de fluxo

Q – vazão percolada;

k – condutividade hidráulica;

i – gradiente hidráulico;

A - área da seção transversal ao sentido do fluxo.

A determinação do gradiente hidráulico é dado pela equação 2.2.

$$i = \frac{\Delta h}{l}$$

Equação 2.3

Onde: Δh – carga hidráulica dissipada na percolação;

l – distância ao longo do qual a carga é dissipada

Salienta-se que a condutividade hidráulica (k) é um parâmetro relacionado com as características do meio poroso e do fluido que percola por este meio. Para um caso genérico onde há fluidos com densidades e viscosidades distintas percolando por um meio poroso, o valor de k para cada caso será diferente. Em outro caso hipotético onde o fluido percolado seja o mesmo, porém em meios porosos diferentes, os valores

de k também serão diferentes. Dessa forma a Lei de Darcy pode ser escrita de acordo com a equação 2.4.

$$k = K \times \frac{\gamma}{\mu} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde: k – condutividade hidráulica, em função não somente do meio poroso, mas também do peso específico e da viscosidade do fluido;

K – permeabilidade intrínseca do solo, função exclusiva do meio poroso;

γ - peso específico do líquido percolante;

μ – viscosidade do líquido percolante

Para determinação da condutividade hidráulica de um solo normalmente são utilizados o peso específico e a viscosidade dinâmica da água à temperatura de 20°C.

2.1.1.1 Fatores que Afetam a Condutividade Hidráulica

Composição Mineralógica

A condutividade hidráulica é fortemente influenciada pela composição mineralógica dos solos, principalmente pela fração argila. Nesta fração estão presentes argilominerais com uma estrutura bastante complexa.

Os grupos de argilominerais apresentam variações nas suas propriedades, causadas pelas substituições isomórficas e pela presença de cátions trocáveis (SANTOS, 1989). Dessa forma, duas argilas podem diferir amplamente, quer pela sua composição mineralógica qualitativa e quantitativa, quer pelas demais propriedades químicas, físicas, e mecânicas.

No caso de solos constituídos essencialmente por argilominerais do grupo da esmectita, os valores de condutividade hidráulica obtidos são menores do que aqueles encontrados para solos constituídos por argilominerais do grupo das caulinitas.

Um das justificativas para este fato é que as partículas de esmectita apresentam um volume 10^{-4} vezes menor do que as de caulinita e uma área 10^{-2} vezes menor. Dessa forma, para igual volume ou massa, a superfície específica das partículas de esmectita é 100 vezes maior que das partículas de caulinita (SOUSA PINTO, 2002).

MESRI & OLSON (1971) avaliaram a variação da condutividade hidráulica e do índice de plasticidade (IP) de argilas com diferentes composições mineralógicas. Pôde-se concluir que quanto maior o índice de plasticidade da argila, menor é o valor de condutividade hidráulica obtido. A Tabela 2.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2.1: Variação da condutividade hidráulica dos argilominerais com o índice de plasticidade (Modificado de MESRI & OLSON, 1971).

Argilomineral	Índice de Plasticidade (IP) %	Condutividade Hidráulica (cm/s)
caulinita	20	$1,5 \times 10^{-6}$
ilita	60	$2,0 \times 10^{-9}$
montmorilonita	500	$1,0 \times 10^{-11}$

Composição Granulométrica

A composição granulométrica do solo refere-se tão somente à distribuição das partículas sólidas do solo em termos de tamanho, e pode ser determinada através do ensaio de granulometria. A escala de tamanho varia desde pedregulhos com diâmetros entre 4,8 e 76 mm a argila com diâmetros inferiores a 0,005 mm (ABNT, 1984). Os diferentes solos são classificados de acordo com as proporções das frações granulométricas.

O tamanho das partículas é de suma importância, pois além de influenciar diretamente nas proporções dos poros de tamanhos diferentes no solo, também determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Relação entre diâmetro de partículas esféricas, seu número por cm^3 e sua superfície (REICHARDT, 1987).

Diâmetro das partículas (cm)	Números das partículas em 1 cm^3 de solo	Superfície das partículas (cm^2)
1	1	3,14
0,5	8	6,28
0,06	4.096	50,23
0,001	1.000.000.000	3.141,60

A diminuição do diâmetro de uma partícula resulta em um aumento na sua superfície específica, de maneira que afeta algumas propriedades do solo. A principal propriedade afetada é a retenção de água que irá aumentar quanto maior for a superfície específica (REICHARDT, 1987).

SOUSA PINTO (2002) relaciona a condutividade hidráulica com o tamanho das partículas dos materiais na sua forma natural. Na Tabela 2.3 verifica-se que quanto menor o tamanho das partículas menor será o valor da condutividade hidráulica dos solos.

Tabela 2.3: Valores típicos de condutividade Hidráulica (SOUSA PINTO, 2002).

Tipo de Material	Condutividade hidráulica (m/s)
argilas	$<10^{-9}$
siltes	10^{-6} a 10^{-9}
areias argilosas	10^{-7}
areias finas	10^{-5}
areias médias	10^{-4}
areias grossas	10^{-3}

Estrutura do solo

A estrutura do solo refere-se ao arranjo das partículas do solo. Segundo (REICHARDT, 1987) o solo pode ser considerado bem estruturado ou mal estruturado, sendo considerado bem estruturado um solo com bastante agregado, de forma granular, que se desfaz com relativa facilidade quando úmida. Este solo bem

estruturado facilita a percolação de água. Por outro lado, o solo mal estruturado dificulta a penetração e a movimentação de água pelos solos.

Em solos argilosos, a estrutura influencia de forma significativa na condutividade hidráulica, pois esse material pode se apresentar com estrutura floculada (facilita a percolação de fluidos) ou dispersa (dificulta a percolação de fluidos).

A estrutura do solo, ao contrário da textura, pode ser modificada. Ela pode ser mantida ou mesmo melhorada utilizando-se de práticas na geotecnia como, por exemplo, a compactação.

Ciclos de secagem e de umedecimento também podem afetar a estrutura do solo, assim como a presença de altas concentrações de sais (principalmente sódio). Estes sais podem dispersar os agregados formados por argilas transformando a estrutura floculada em estrutura dispersa.

Compactação do solo

A técnica de compactação é definida como um processo de densificação do solo pela aplicação de energia mecânica, conseqüentemente reduzindo os vazios presentes.

Quando aumenta a densidade, significa que o contato entre grãos é maior, portanto, quando se compacta espera-se que ocorra um aumento na resistência ao cisalhamento do solo, uma redução de compressibilidade e da condutividade hidráulica, além de tornar a camada de solo mais homogênea.

SOUSA PINTO (2002) relata que quando se tem um aumento na densidade aparente dos grãos, esse aumento é correspondente à eliminação de ar dos vazios, pois as quantidades de partículas sólidas e de água permanecem constantes. Dessa forma, quando se tem um elevado teor de umidade, há uma redução do atrito pela água e uma saída do ar facilitada. Estes fatos propiciam uma densidade aparente

maior, entretanto, a partir de um certo teor de umidade, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, pois o grau de saturação já é elevado e o ar está ocluído (envolto por água). Com isso, para uma determinada energia aplicada, tem-se um certo teor de umidade denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica seca máxima.

O teor de umidade também afeta a condutividade hidráulica. LAMBE & WHITMAN (1969) propuseram um modelo baseado na orientação das partículas dos solos compactados, onde se pôde verificar que para solos finos compactados com teor de umidade acima do teor de umidade ótimo, as partículas ficavam arranjadas de forma paralela (estrutura dispersa). Quando compactadas com umidade inferior ao teor de umidade ótimo, apresentou-se uma estrutura definida como floculada (Figura 2.1). Dessa forma, conclui-se que a estrutura floculada apresenta maiores vazios do que a estrutura dispersa, resultando numa maior condutividade hidráulica dos solos.

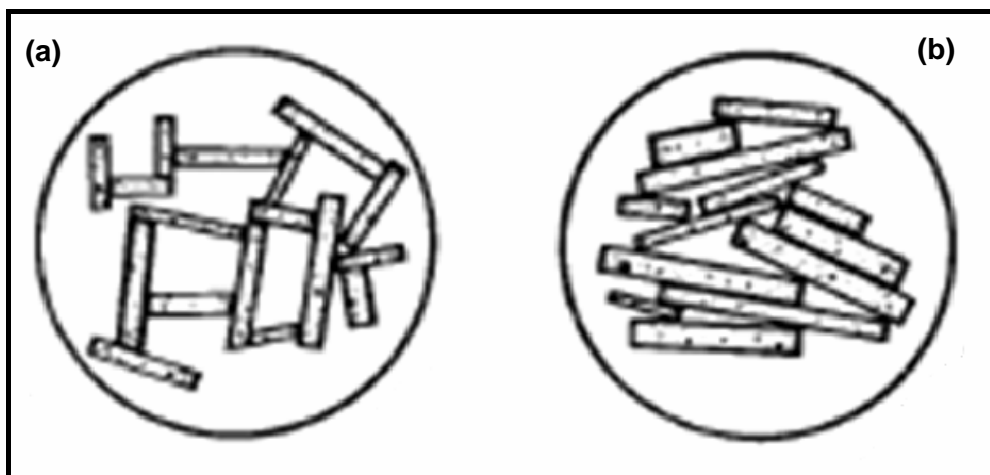


Figura 2.1: Estruturas floculada (a) e dispersa (b) (LAMBE & WHITMAN 1969).

A teoria proposta por OLSEN (1962) citado em BENSON & DANIEL (1990), sugeriu que o fluxo de água em solos argilosos compactados ocorre através dos macroporos formados entre os grumos de argila, e não através dos microporos existentes entre as partículas de argila que contornam os grumos (Figura 2.2). Quando um solo é compactado com valor maior ou igual à umidade ótima, os grumos no solo

são mais suaves, remoldados com maior facilidade, pois estão mais úmidos e compressíveis. Por outro lado, quando compactados com baixa umidade, os grumos são duros e difíceis de destruir. Portanto, a compactação com umidade superior à ótima resulta em vazios internos entre grumos menores e conseqüentemente em uma menor condutividade hidráulica.

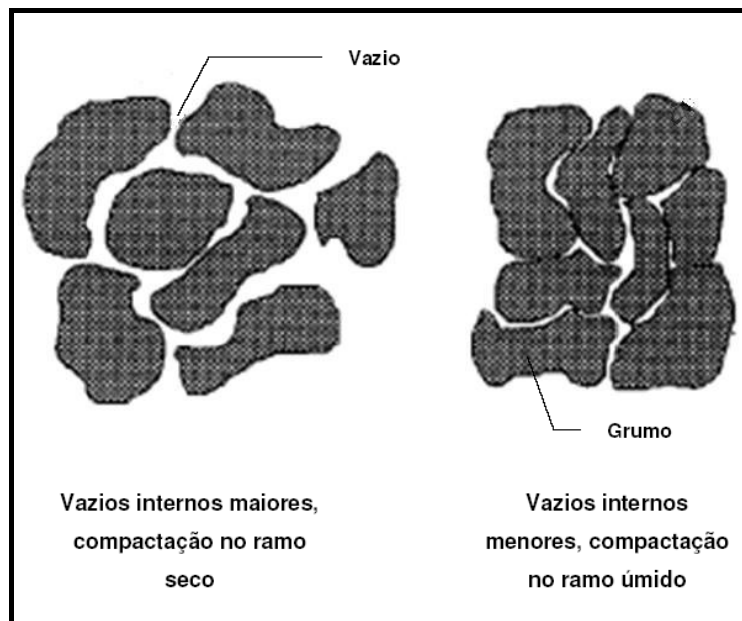


Figura 2.2: Fluxo de água através de poros relativamente grandes entre os grumos (Modificado de OLSEN, 1962 *apud* BENSON & DANIEL, 1990).

Para um mesmo solo, mantendo-se o teor de umidade constante, o aumento da energia de compactação implica num aumento da densidade aparente seca, como se mostra na Figura 2.3.

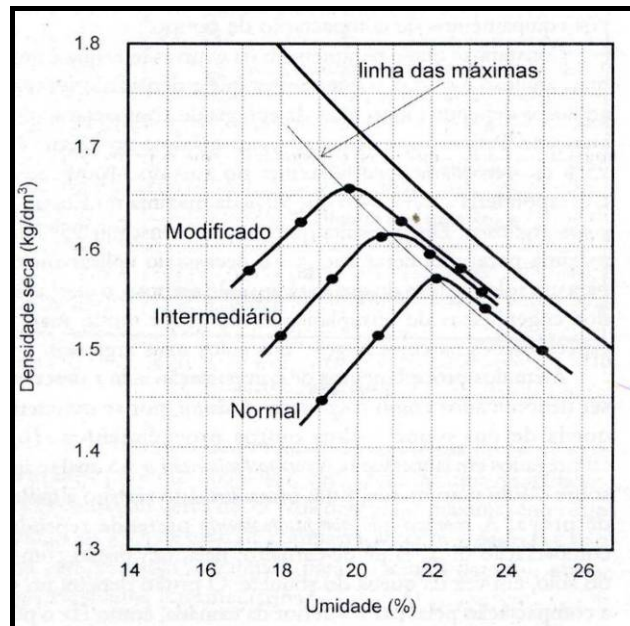


Figura 2.3: Variação da energia de compactação (modificado de SOUSA PINTO, 2002).

O efeito da energia de compactação na condutividade hidráulica é abordado por MITCHELL *et al.* (1965). Estes autores verificaram, após a realização de ensaios de condutividade hidráulica com os corpos de prova saturados, que os materiais quando compactados com baixa energia e menores teores de umidade apresentaram pouca variação, pois nesta situação os grumos do solo são mais resistentes para se deformar. Porém, quando próximo da umidade ótima ocorreu uma diminuição significativa da condutividade hidráulica.

Para o caso da energia de compactação mais elevada observou-se uma maior redução da condutividade hidráulica desde os pontos com menores teores umidades até a umidade ótima. A partir daí, maior esforço de compactação pouco ou nada provocou na diminuição da condutividade hidráulica, pois não consegue expelir o ar ocluso dos vazios.

Por fim, os autores constataram que o aumento da energia de compactação ocasionou uma diminuição na condutividade hidráulica em até 100 vezes, principalmente para pontos próximos do teor de umidade ótimo.

GOUVEIA FILHO & OLIVEIRA (2005) verificaram que com o aumento da energia de compactação em campo, obtida através do tipo de compactador utilizado, pode-se conseguir uma condutividade hidráulica *in situ* de 3 a 5 vezes menor que as obtidas nos ensaios em laboratório.

Grau de Saturação

Segundo OLSON & DANIEL (1981) o grau de saturação do solo exerce influência direta nos valores de condutividade hidráulica, pois este último parâmetro atinge seu ápice quando o solo se encontra saturado (vazios totalmente preenchidos por líquido) ou próximo a este estágio.

FREDLUND & RAHARDJO (1993) verificaram que, em solos não saturados, se o grau de saturação for menor do que cerca de 80%, o ar nos vazios do solo se apresenta numa fase contínua e competindo com a água pelos vazios dos poros. Para um grau de saturação maior do que 90%, o ar estará na forma de bolhas de ar ocluso as quais só serão expulsas caso realize uma contrapressão; e entre 80% e 90% de saturação tem-se uma zona de transição.

Nos ensaios para determinação da condutividade hidráulica de solos compactados, quando o fluido começa a percolar, há um aumento inicial no grau de saturação e conseqüentemente na condutividade, até que seja atingido um grau de saturação constante, geralmente acima de 90%, com o ar na forma de bolhas oclusas. Esta situação, na qual a condutividade hidráulica pode ser considerada constante, é mais representativa da situação de campo do que o mesmo ensaio sob condição de saturação por contrapressão (FERRARI, 2005).

Propriedades do fluido percolante

Às principais propriedades do fluido percolante que afetam a condutividade hidráulica estão relacionadas a sua densidade, e viscosidade (que por sua vez dependem da temperatura) e suas propriedades químicas.

Quanto maior a densidade, maior será o movimento do fluido através do solo devido à ação da gravidade. Quanto maior a viscosidade, menor será a condutividade hidráulica, pois a dificuldade para o fluido percolar através do meio poroso é maior.

SHACKELFORD (1994) observou que as características químicas do fluido quando em contato com o solo podem gerar diversos efeitos, por exemplo, floculação da argila e dissolução de argilominerais e/ou outros minerais, entre outros, o que pode acarretar em um aumento da condutividade hidráulica.

A exposição prolongada a ácidos fortes, solventes orgânicos ou químicos cáusticos usualmente geram altas taxas de infiltração através da camada selante (DANIEL & LILJESTRAND, 1984).

2.2 Retenção de Água pelos Solos

Na construção de camadas selantes, há uma preocupação quanto às propriedades dos solos e a forma pelo qual exercem influência sobre fatores como: movimentação da água no seu interior e capacidade de retenção de umidade pelos solos.

BRADY (1989) afirmou que a retenção de umidade dos sólidos do solo é gerada, principalmente pela ação de duas forças (Figura 2.4): uma delas é a atração das superfícies sólidas pelas moléculas d'água (adesão) e a outra é a atração das moléculas d'água entre si (coesão). Os sólidos mantêm as moléculas d'água firmemente retidas nas interfaces solo-água. Por sua vez, estas moléculas retêm por coesão outras moléculas d'água que estão mais afastadas das superfícies sólidas.

Estas forças em conjunto possibilitam aos sólidos do solo reter a água e controlar em grau considerável sua movimentação e utilização.

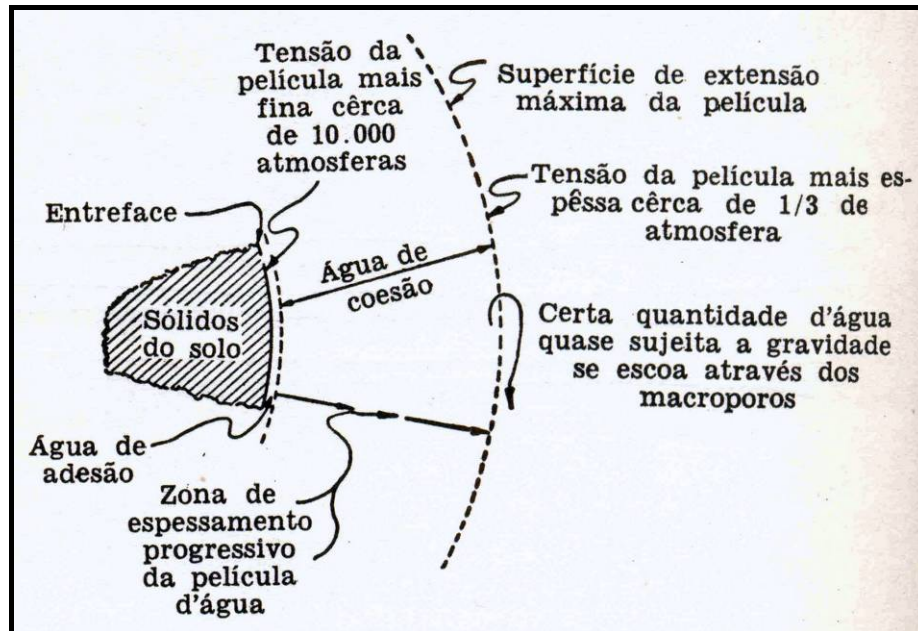


Figura 2.4: Representação em forma de diagrama do espessamento progressivo de uma película d'água num macroporo e declínio correspondente na tensão a que são submetidas as moléculas de superfície. (modificado de BRADY, 1989).

Dessa forma, conclui-se que há utilização de energia nas relações solo-água. Este fato indica que a tensão com que a água é retida varia com a distância entre as moléculas e os sólidos do solo.

À medida que as películas de água aumentam em espessura, tornam-se mais pesadas e a umidade na superfície exterior destas películas é retida com menor firmeza. Portanto, quando se tem um solo próximo da saturação, é fácil remover uma reduzida quantidade de água, porém quando a umidade do solo se torna cada vez menor, a força necessária para removê-la será cada vez maior (BRADY, 1989).

2.3 Energia Potencial da Água no Solo

Além da condutividade hidráulica outro fator que interfere no movimento da água é a energia potencial total da água.

Energia, em termos bem simples, é a capacidade de produzir trabalho. Como a água no solo, na planta até mesmo na atmosfera, não tem uma massa ou um volume definidos, é comum medir a energia da água em termos de energia por unidade de volume (E/V). Dividindo-se energia por volume, em termos dimensionais, o resultado é uma pressão. Daí se expressa o potencial da água no solo em termos de atmosferas, bária ou pascal.

Para definir o estado de energia da água dentro do solo, é necessário considerar vários campos de força, dentre eles o gravitacional e outros responsáveis pelos fenômenos de tensão superficial, capilaridade, adsorção, etc. Estes fenômenos são gerados pela interação entre as partículas sólidas do solo, organizadas em dada estrutura, e a água. Como é difícil separar esses fenômenos para fazer uma análise detalhada, são todos considerados em conjunto resultando em uma energia potencial, designada matricial (REICHARDT, 1987).

Além dos fenômenos matriciais, a presença de solutos na água do solo também afeta seu estado de energia. Porém como os solutos se movem junto com a água, esta energia chamada de osmótica, geralmente não é importante (REICHARDT, *op.cit.*).

Desta forma define-se como energia potencial total a soma de todas as energias atuantes na água dentro do solo, expressa pela equação 2.5.

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_{os} + \dots$$

Equação 2.5

Onde: ψ – Energia potencial total;

ψ_g – componente gravitacional, determinado pela posição do ponto considerado em relação ao nível de referência;

ψ_p – componente de pressão, corresponde a pressão à qual a água pode estar submetida (somente pressões positivas, ou seja, acima da pressão atmosférica)

ψ_m – componente matricial, se refere aos estados de energia devidos à sua interação com as partículas sólidas do solo (matrizes do solo);

ψ_{os} – componente osmótica, resultante de íons e outros solutos presente na água do solo.

Na equação 2.5, as reticências indicam que podem existir outras formas de energia, mas em geral elas são desprezíveis. Portanto para calcular o estado de energia da água, em dado ponto no solo, é necessário calcular cada componente e fazer a soma.

Quando se diz que a água encontra-se em equilíbrio, significa que as forças atuantes na mesma anulam umas as outras, ou seja, possuem o mesmo módulo e sentidos opostos, com isso $\psi = 0$.

Ressalta-se que a componente gravitacional é de grande importância para solos bastante úmidos, próximos a saturação, podendo ser positiva ou negativa dependendo do plano de referência. Geralmente o plano de referência escolhido é a superfície do solo, desta forma um ponto é positivo acima dele e negativo abaixo.

A componente de pressão só irá ocorrer em situações onde existe excesso de água, água livre exercendo carga hidráulica sobre o solo saturado e só são consideradas as pressões positivas.

Em solos não saturados, haverá o aparecimento de pressões negativas também chamadas de sucção. A sucção está associada à energia potencial da água do solo e pode ser definida, basicamente, como a energia aplicada por unidade de volume de água que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água. Quanto mais secos os solos, maior a sucção (LEE & WRAY, 1995).

A sucção existente no solo será composta basicamente pelas componentes matriciais e osmóticas, ambas descritas anteriormente.

2.4 Curva de Retenção de Água no Solo ou Curva Característica

A aplicação de uma sucção em um solo saturado, em estado de equilíbrio, provoca remoção da água nos vazios do solo e com isso é gerada uma pressão negativa nos mesmos. Quanto maior for a sucção aplicada, maior será quantidade de água livre afetada nos vazios, o que modifica a espessura das envoltórias de hidratação ou meniscos, provocando perda de umidade.

A curva de retenção de água no solo pode ser expressa graficamente pela relação sucção com teor de umidade (ou grau de saturação), este podendo ser expresso em termos de volume ou em peso. Nessa relação, os valores de sucção variam inversamente com o teor de umidade, ou seja, para um solo próximo de atingir o estado de total saturação, o valor da sucção tende a zero. Por outro lado, quando o grau de saturação tende a zero, a sucção alcança seus maiores valores.

Esta curva pode ser usada para auxiliar na estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como a condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e variação de volume (FREDLUND *et al.*, 1994).

O comportamento de um determinado solo quando ocorre o fenômeno de ressecamento (perda de umidade) pode ser explicado utilizando como ferramenta esta curva de retenção de água. Enquanto ocorre este fenômeno, as fases (sólida, líquida e gasosa) sofrem uma redistribuição no interior do solo e se modificam, assim como a pressão interna associada. Essa mudança afeta o comportamento do solo, pois a quantidade de água e o coeficiente de vapor ou gás difundido no solo se alteram (VANAPALLI *et al.*, 1999).

Ressalta-se que esta curva de retenção apresenta histerese, ou seja, a trajetória de secagem não é a mesma da trajetória quando o solo está submetido ao processo de umedecimento. De acordo com PRESA (1982), este efeito de histerese pode ser atribuído a diversos fatores como: geometria não uniforme dos poros

individuais interconectados por pequenos canais; influência do ângulo de contato solo-água, que muda em função da rugosidade do grão e de sua mineralogia e ocorrência de ar aprisionado nos poros, tendendo a reduzir o teor de umidade no processo de umedecimento.

O formato da curva de retenção de água do solo é afetado por alguns fatores (PRESA, 1982, JUCÁ, 1990, DE CAMPOS *et al.*, 1992). Um deles é o tipo de solo, tanto no que se refere a aspectos granulométricos quanto aos mineralógicos. Esses aspectos influenciam o valor de entrada de ar e a inclinação da curva de retenção. Essa inclinação refere-se ao trecho entre a sucção de entrada de ar e a sucção residual (Figura 2.5).

BROOKS & COREY (1966) introduziram o conceito de “valor de entrada de ar” como sendo o valor da sucção matricial que tem de ser excedida para o ar poder entrar para os vazios do solo. Estes autores supracitados também definiram o conceito de grau de saturação residual (ou umidade residual), que seria aquele a partir do qual um aumento da sucção matricial não produziria variações significativas no grau de saturação.

FREDLUND & XING (1994) mostraram, a partir da Figura 2.5, um meio para se obter o valor de entrada de ar e a umidade residual com auxílio das tangentes representadas. Segundo os autores supracitados, para todos os tipos de solo, o teor de umidade zero corresponde à sucção total na ordem de 10^6 kPa. Esse valor pôde ser confirmado experimentalmente para uma série de solos (CRONEY & COLEMAN, 1961). VAN GENUCHTEN (1980), por sua vez, sugeriu associar a umidade residual a um valor de sucção de 1500 kPa.

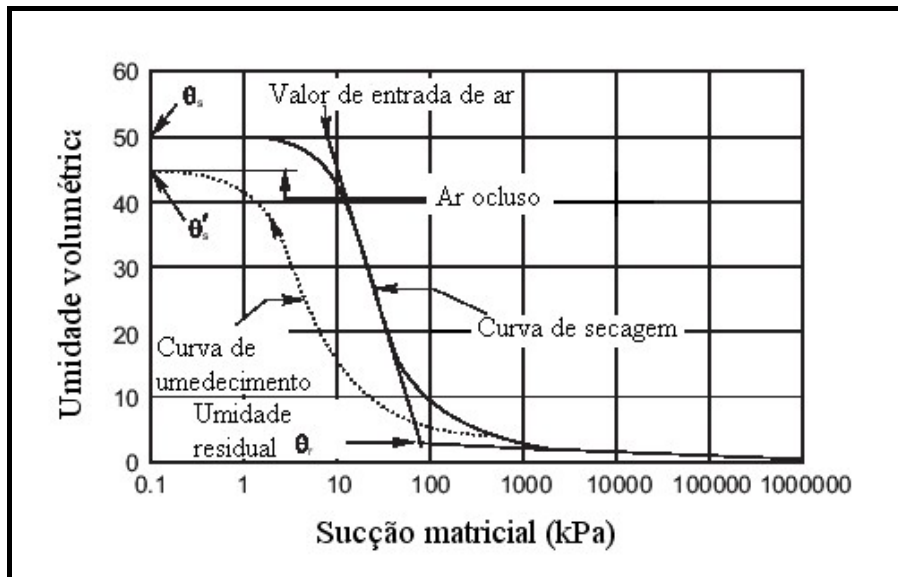


Figura 2.5: Característica da curva de retenção (modificado de FREDLUND & XING, 1994).

O valor de entrada de ar e o teor de umidade são pontos importantes de uma curva de retenção e são facilmente identificados na Figura 2.5.

Na Figura 2.6 observa-se a influência das frações granulométricas nas curvas de retenção de água no solo. Em geral, quanto maior a quantidade de argila, maior será o teor de umidade para o mesmo valor de sucção. Isto é justificado pelo fato dos solos argilosos apresentarem vazios muito pequenos e uma superfície específica grande, além do efeito da capilaridade e das forças de adsorção, este último muito menos eficaz em solos arenoso (FREDLUND & XING, 1994).

Essas forças de adsorção atuantes em solos argilosos são geradas, principalmente, pelos argilominerais, pois estes apresentam distintas forças de adsorção. Essa diferença é resultante da natureza da superfície das partículas e os tipos de cátions trocáveis para cada argilomineral. Quanto maior o tamanho dos íons presentes, menor será a adsorção de água.

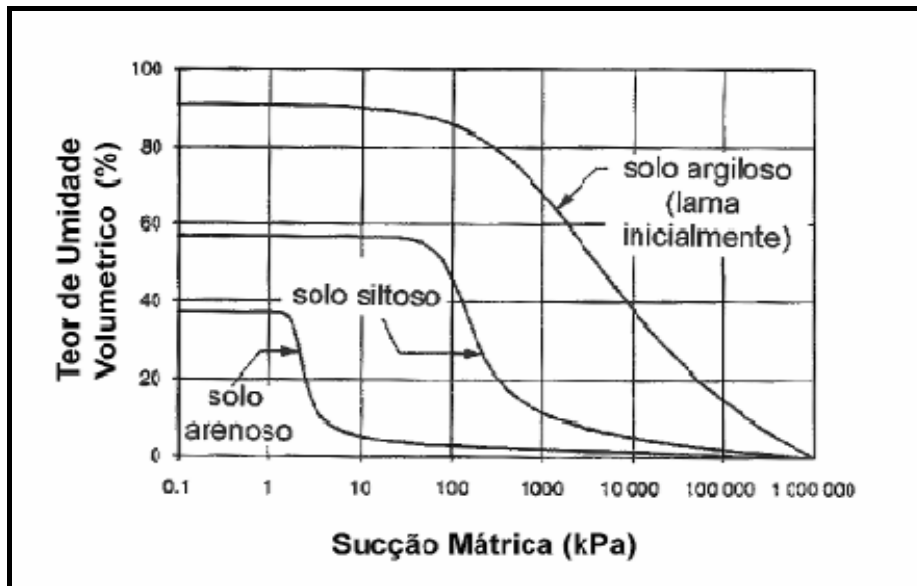


Figura 2.6: Curva Característica típica de diferentes tipos de solo (modificado de FREDLUND & XING, 1994).

Destaca-se também que os solos argilosos apresentam uma relação gradual entre o teor de umidade e a sucção, ou seja, com o aumento gradual da sucção, vazios de diâmetros maiores vão se esvaziando, até que para elevados valores de sucção, somente os vazios muito pequenos ainda retêm água, já solos arenosos apresentam uma variação mais brusca dessa relação, uma vez que possuem poros maiores que são facilmente drenados por uma pequena sucção.

DE CAMPOS *et al.* (1992) recomendaram a realização dos ensaios para obtenção da curva de retenção de água em ambiente com temperatura controlada, pois o aumento da mesma pode reduzir a tensão superficial na interface solo-água, diminuindo a curvatura do menisco e por conseqüência a sucção. A elevação da temperatura também expandiria os poros com ar, caso estes estejam com ar ocluído na massa de solo, com isso afetaria a estrutura do material e, conseqüentemente, modificaria a forma da curva.

A adição de bentonita também influencia a curva de retenção de água no solo. MONTAÑEZ (2002) estudou um solo arenoso com adição de bentonita sódica e verificou que a quantidade de bentonita adicionada ao solo provoca um ligeiro

deslocamento da curva característica do solo, em comparação ao solo sem adição de bentonita, e o grau de saturação residual aumenta com o aumento da adição de bentonita.

O autor supracitado ainda mencionou que a variação volumétrica de diversos corpos de prova, durante a primeira secagem não foi significativa. Porém durante o primeiro ciclo de umedecimento houve um significativo aumento de volume. Notou-se que o maior aumento volumétrico ocorreu para valores de sucção inferiores a 100 kPa. No segundo ciclo de secagem, há variação volumétrica até que o valor de saturação residual seja alcançado, e a partir deste ponto, não houve mais registro de variação volumétrica.

Por fim, MONTAÑEZ (2002) admite que quando a sucção atinge valores entre 1000 e 3000 kPa, toda a água presente na mistura está associada a bentonita. Por outro lado, para valores de sucção menores do que esses referidos, a água presente está associada aos dois componentes da mistura, a bentonita e a areia.

Em laboratório, esta relação sucção com umidade tem sido obtida utilizando-se diferentes equipamentos e técnicas. Nesta pesquisa utilizou-se o método da panela de Richards (descrito no item 3.8), e também obteve-se esta relação por meio do ensaio de ressecamento (descrito no item 3.9), utilizando-se um tensiômetro encostado na base de um corpo de prova sob processo de secagem.

2.5 Trincas de Ressecamento

Trincas e/ou microfissuras podem ser definidas como estruturas geradas durante a secagem do solo por meio da evaporação da água de sua estrutura. Esse fenômeno pode afetar algumas características do solo, como por exemplo, a condutividade hidráulica.

A formação de trincas é causada predominantemente pela perda de umidade do solo, gerando poro-pressão negativa. Essa pressão negativa aumenta a pressão efetiva ocasionando uma redução de volume. Como a poro-pressão atua em todas as direções, o solo tende a trincar em todas as direções (KLEPPE E OLSON, 1985).

Ressalta-se que este comportamento fica evidenciado em solos contendo argila muito ativa, ou seja, ganham e perdem umidade com muita facilidade. Durante uma evaporação constante (perda de umidade) da água intersticial haverá uma retração dos meniscos capilares, aumentando a pressão capilar. Quando estas pressões atingirem valores que ultrapassem a resistência à tração das argilas, surgem então as trincas (VARGAS, 1978).

Caso essa perda de umidade dos materiais argilosos seja imposta por elevadas temperaturas, haverá remoção da água adsorvida e destruição das propriedades dos colóides comprometendo a capacidade expansiva das argilas (UNAL & TROGOL, 2001). Por outro lado, se a perda de água do solo ocorrer de maneira gradual, o decréscimo de volume do solo praticamente termina quando o solo atinge o limite de contração, que geralmente é um valor inferior ao limite de plasticidade.

BRAUDEAU *et al.* (1999) citado por BOIVIN *et al.* (2004) sugeriram que a curva de contração geralmente apresentava-se sob a forma de uma sigmóide, com a parte linear e curvilínea separadas por pontos de transição (Figura 2.7). Esses pontos de transição A, B, C e D marcam a mudança entre as fases linear e exponencial. A é definido como limite de contração, B, como ponto de entrada de ar, C, limite da macroporosidade, e D, ponto máximo de inchamento/expansão. A linha pontilhada representa a linha de saturação ou de carregamento.

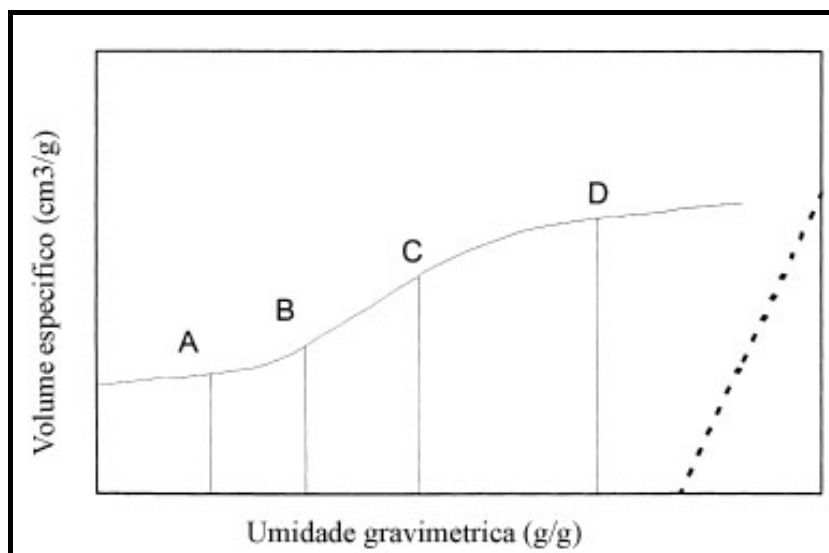


Figura 2.7: Sigmóide representando a Curva de contração do solo e seus pontos de transição (BRAUDEAU *et al.*, 1999 *apud* BÓIVIN *et al.*, 2004)

2.6 Características gerais da bentonita

O nome bentonita foi criado em homenagem à localização do primeiro depósito comercial em Fort Benton, Estado Wyoming (EUA), e é o nome genérico dado a qualquer argila composta predominantemente pelo argilomineral montmorilonita, do grupo das esmectitas, independente de sua origem ou ocorrência (GRIM, 1968).

Alguns pesquisadores consideravam que a bentonita era formada somente a partir da desvitrificação e alteração química da cinza vulcânica. Porém, ao longo do tempo foram encontradas em outros países argilas sedimentares ou residuais não relacionadas com ação vulcânica, que quando tratadas com compostos de sódio ou cálcio, produziam argilas com as mesmas características das bentonitas originais (AMORIM *et al.*, 2006).

Quanto a estrutura mineral, a esmectita é constituída por duas folhas tetraédricas de sílica intercaladas com uma folha octaédrica em que o cátion coordenado é normalmente o Al^{+3} ou Mg^{+2} formando um arranjo do tipo 2:1 (GOMES, 1986). Um modelo esquemático do arranjo 2:1 é apresentado na Figura 2.8 (a).

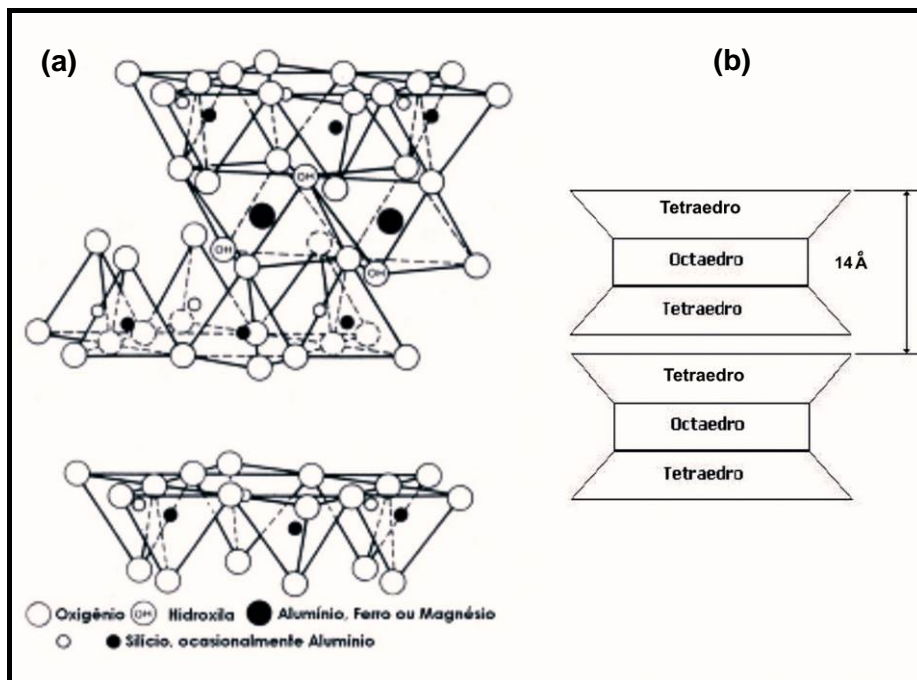


Figura 2.8: (a) Esquema do Arranjo atômico; (b) modelo estrutural das esmectitas (SANTOS, 1989)

Observa-se na Figura 2.8 (a) a camada octaédrica ao centro e as duas camadas tetraédricas delimitando-a. A Figura 2.8 (b) mostra a distância interbasal entre os arranjos estruturais igual a 14,0 ângstrons ($1 \text{ \AA} = 10^{-4} \mu\text{m}$). Contudo esses valores podem variar em função da solução ambiente na qual a argila estiver imersa.

Na constituição da esmectita estão presentes cátions trocáveis, que são resultantes do desbalanceamento de cargas de sua estrutura. Esse desequilíbrio elétrico é causado por substituições isomórficas, por exemplo: um cátion trivalente (Al^{+3}) quando trocado por um divalente (Mg^{+2}) resulta em um excesso de elétrons na camada, que migram para a superfície a procura de cátions de equilíbrio.

Essa deficiência é equilibrada principalmente por cátions hidratados entre as camadas estruturais que estão fracamente ligadas entre si. Esses cátions neutralizantes não estão fixados irreversivelmente e podem ser substituídos por outros cátions. Os principais são Na^+ e Ca^{2+} , e a predominância de determinado cátion é o que dirá se é esmectita sódica ou cálcica, respectivamente (SANTOS, 1989).

O cátion predominante na estrutura também será determinante no desempenho desejado da esmectita e nas propriedades desta. Quando o sódio for o cátion predominante, este material apresentará um poder muito maior de expansão do que quando for o cátion cálcio. Isto ocorre porque o Na^+ permite que várias moléculas de água sejam adsorvidas, resultantes da expansão osmótica. No caso das argilas cálcicas ou policatiônicas, a quantidade de água adsorvida é limitada e as partículas continuam unidas umas às outras por interações elétricas e de massa (Figura 2.9).

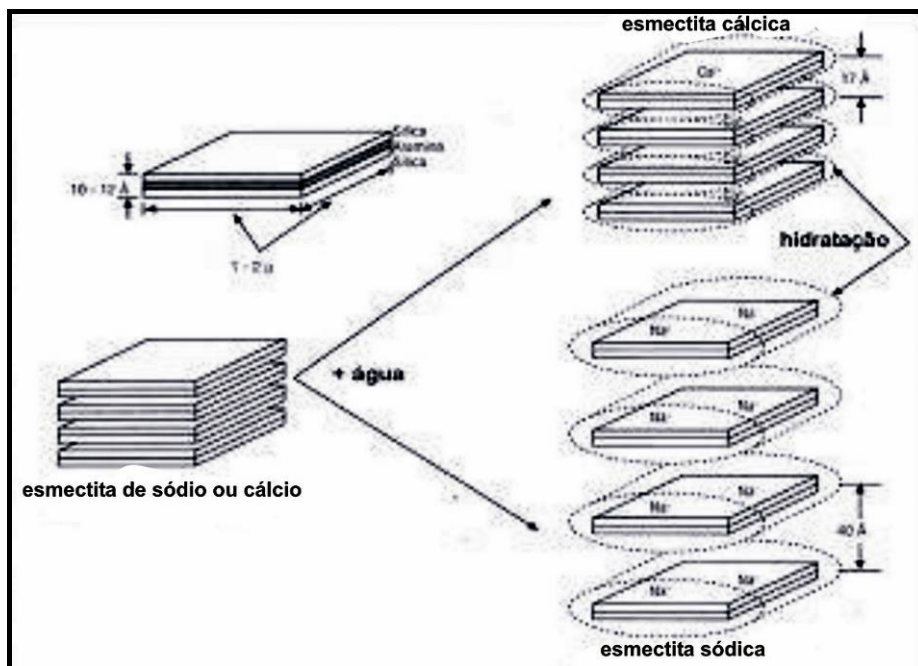


Figura 2.9: Representação da hidratação da esmectita cálcica e da esmectita sódica (modificado de AMORIM *et al.* 2006).

Dessa maneira, a esmectita sódica, denominada de bentonita, é normalmente a mais utilizada em obras de selagem e impermeabilização.

Entretanto, a esmectita cálcica é mais estável quimicamente quando exposta a alguns compostos químicos, e quando comparada a outros argilominerais, como caulinita, clorita e ilita pode-se dizer que também é bastante expansiva (AMORIM *et al.*, 2006).

A qualidade de uma bentonita também pode ser avaliada através dos limites de Atterberg e de ensaios de expansão livre. Sendo que quanto maior for o limite de plasticidade e o limite de liquidez melhor é a qualidade da bentonita. O limite de liquidez de uma esmectita cálcica varia entre 100 e 150%, enquanto que o limite de liquidez de uma esmectita sódica varia entre 300 e 500%. Os testes de expansão livre mostram que quanto maior a capacidade de expansão da bentonita melhor a sua qualidade (DANIEL & KOERNER, 1995).

No geral, as principais características das bentonitas são: alto poder expansivo (até 20 vezes o seu volume inicial), tixotropia, constituição coloidal, alta capacidade de troca catiônica (atingindo valores na faixa de 60 a 170 cmolc/kg), grande superfície específica (até 800 m²/g) e baixa condutividade hidráulica tendo a água como líquido percolante (CANCELLI *et al.*, 1994; GLEASON *et al.*, 1997).

A capacidade de expansão da bentonita é prolongada por um certo período de tempo, pois mesmo depois de totalmente umedecida, continua a ganhar volume até um certo limite. Portanto, a condutividade hidráulica também é afetada com o tempo. HOEKS *et al.* (1987) observaram que este parâmetro ainda decresce por um período de 2-3 meses. Desta forma, em aplicações práticas, recomenda-se a realização de ensaios de condutividade hidráulica durante um período de 3-4 semanas.

As reservas brasileiras de bentonita medida e indicada, respectivamente, foram 40,2 e 7,0 milhões de toneladas para 2006. O estado do Paraná tem a maior porção das reservas medidas (43%), enquanto a Paraíba tem a maior parcela das indicadas (65%). No total (medida + indicada), as reservas paranaenses representam 36% do total enquanto que as paraibanas indicam 31%.

A Paraíba tem sido o principal estado produtor sendo que, em 2006, produziu cerca de 86,5% de toda a bentonita bruta brasileira, com São Paulo em seguida, com 13% e, por último, o Paraná, com apenas 0,5%. Oficialmente, treze empresas atuam neste segmento no país. A maior delas é a Bentonit União Nordeste.

A Bentonit União Nordeste produz exclusivamente bentonita do tipo ativada e contribuiu com 80,9% do total produzido. Seguindo-a vêm a Argos Extração e Beneficiamento de Minerais Ltda. (12,1%), a Sociedade Extrativa Santa Fé Ltda. (4,3%), a Aligra Indústria e Comércio de Argila Ltda. (1,8%) e a Bentonita do Paraná Mineração Ltda. (0,9%), todas produtoras de argila moída seca (REZENDE *et al.*, 2007).

No Brasil as bentonitas brutas não são essencialmente sódicas, necessitando de tratamento a partir de compostos sódicos, como por exemplo, o Na_2CO_3 (barrilha). Esse processo de "ativação" da bentonita é indicado como forma de se obter as características de expansibilidade esperada para esse material (CETEM, 2002).

As bentonitas originárias da cidade de Boa Vista-PB, assim como as demais no Brasil, são essencialmente cálcicas. Com isso, para se obter as características de expansibilidade esperadas para esse material, precisam ser ativadas com carbonato de sódio (Na_2CO_3 - barrilha). Esse processo foi desenvolvido e patenteado na Alemanha no ano de 1933, pela empresa Erbsloh & Co e é atualmente utilizado pelos países que não dispõem de bentonita sódica natural. (CETEM, *op.cit.*).

O processo de beneficiamento e ativação da bentonita varia de empresa para empresa. A União Brasileira de Mineração (UBM) produz, atualmente, uma bentonita beneficiada e ativada da seguinte forma:

- Adição de 3,0% em peso de barrilha (Na_2CO_3) à bentonita e espalha a mistura no pátio de homogeneização. No caso da UBM esse procedimento é realizado manualmente com o auxílio de pás (Figura 2.10).
- O material homogeneizado é transferido para uma moega de alimentação na usina.
- Um alimentador tipo MAQUINOR retira o material da moega, a uma taxa de 4 t/h, e descarrega em um desintegrador de rolo, localmente chamado de pé-de-cabra (MAQUINOR).
- Deste equipamento a bentonita segue por correia transportadora para outro misturador (MAQUINOR).

- Em seguida a bentonita homogeneizada vai para um misturador (Figura 2.11 (a) de parafuso (MAQUINOR) para adição de água. A mistura com umidade em torno de 34%, tem a finalidade de promover maior contato da barrilha com a montimorilonita.

- Do misturador de parafuso, a bentonita segue por transportador de correias para um laminador de rolos, e daí é enviada por correia transportadora para o pátio de cura e secagem ao sol por um período de 48 a 180 horas. Quando a bentonita ativada atinge o nível de umidade em torno de 12%, segue para a etapa seguinte de moagem.

- A bentonita ativada e seca é alimentada em um moinho pendular, tipo Raymond, de fabricação MAQUINOR. Por meio de uma ventoinha injeta-se uma corrente de ar na parte inferior do moinho, a fim de levar o produto da moagem para um classificador pneumático. O *underflow* deste, constitui o produto da moagem, e é acondicionado em sacos (figura 2.11(b)) de 50 kg. No *overflow*, parte do fluxo volta ao moinho e os finos são coletados em um filtro de manga (CETEM, 2002).

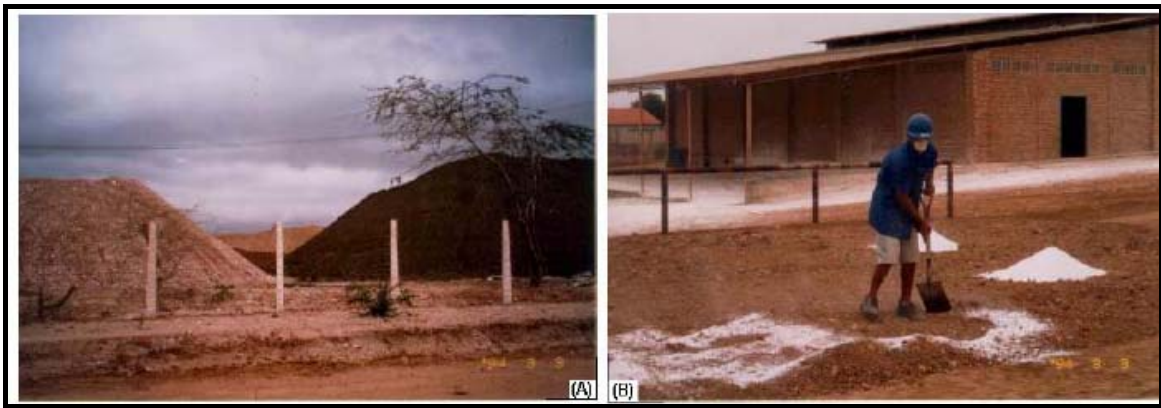


Figura 2.10: (a) pilhas de estoque de bentonita, (b), ativação da bentonita com barrilha – UBM (CETEM, 2002)

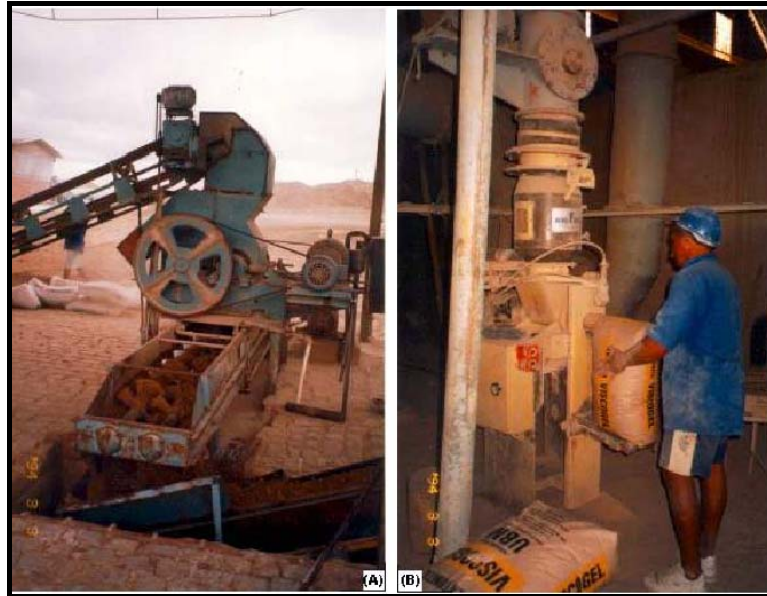


Figura 2.11: (a) misturador sem fim usado na homogeneização da bentonita, (b) ensacamento de bentonita para expedição (CETEM, 2002).

Na literatura encontram-se alguns trabalhos onde são feitas comparações entre as bentonitas brasileiras e a bentonita americana naturalmente sódica de Wyoming. ARANHA *et al.* (2002) compararam o grau de inchamento entre as bentonitas da cidade de Boa Vista-PB conhecidas como Chocolate e Verde-Lodo na sua versão natural e ativada e a amostra recebida de bentonita americana oriunda de Greybull, Wyoming, EUA (Wyo-Ben Inc.).

A ativação foi realizada dispersando-se 10 g de bentonita em 500 ml de solução saturada de Na_2CO_3 em ultra-som de ponta, deixando-se sob agitação magnética à temperatura ambiente por 24 horas. Em seguida, as suspensões foram deixadas em repouso por 24 horas, seus sobrenadantes límpidos então aspirados e seus volumes recompletados com água desionizada. Este procedimento repetiu-se até não mais ocorrer decantação, sinalizando uma baixa quantidade de sais na solução (ausência de floculação).

Por fim, o grau de inchamento livre das bentonitas foi determinado após a lenta e cuidadosa adição de 2,0 g de bentonita a 100 ml de água deionizada em proveta de

100 ml. A altura do leito de bentonita formado foi lida na escala da proveta, após 24 horas do término da adição.

Os resultados do inchamento livre mostrados na tabela 2.4 indicam um comportamento bastante diferente das bentonitas brasileiras em relação à americana, com esta última apresentando grau de inchamento significativamente superior ao das bentonitas brasileiras, mesmo após a troca de cátions interplanares por sódio (ativação). Nota-se também que as bentonitas brasileiras estudadas apresentaram aumento nos valores de inchamento após a ativação, e dentre as duas, a que obteve melhor desempenho foi a Verde Lodo.

Tabela 2.4: Resultados do Grau de Inchamento livre das bentonitas naturais e ativadas. (modificado de ARANHA *et al.*, 2002)

Bentonitas	Grau de Inchamento Livre (%)
Naturais	
Chocolate	6
Verde Lodo	6
Wyoming	25
Ativadas	
Chocolate	9
Verde Lodo	13

ARANHA & PORTO (2002) estudaram a composição química, por meio de Fluorescência de raios X (FRX), das bentonitas brasileiras Chocolate e Verde-Lodo e da bentonita americana Wyoming (EUA). Os resultados da tabela 2.5 mostraram uma composição química muito semelhante entre as bentonitas brasileiras e diferenciam-se da bentonita americana, principalmente por apresentarem maiores teores de ferro e potássio, e menores teores de sódio e silício.

ARANHA & PORTO (*op. cit*) analisaram termicamente os materiais e a partir dos resultados constataram que as bentonitas brasileiras possuem maior teor de ferro

na estrutura que a americana. Contudo, uma parte do ferro encontrado na Chocolate está sob a forma de oxi-hidróxidos de ferro.

Atráves de Análise Química e da Análise Térmica pode-se dizer que as esmectitas que constituem as bentonitas brasileiras são montmorilonitas ricas em ferro ou nontronitas.

Tabela 2.5: Análise Química de bentonitas (modificado de ARANHA & PORTO, 2002)

	Verde Lodo	Chocolate	Wyoming
Al ₂ O ₃ (%)	20.50	15.80	18.10
CaO (%)	0.43	0.63	0.40
Fe ₂ O ₃ (%)	9.20	10.40	3.50
K ₂ O (%)	1.30	0.42	0.10
MgO (%)	2.3	2.8	1.7
Na ₂ O (%)	0.45	0.75	2.30
P ₂ O ₅ (%)	0.05	0.23	n.disponível
SiO ₂ (%)	53.6	54.3	61.4
TiO ₂ (%)	1.2	0.8	0.2
MnO (%)	0.04	0.01	n.disponível
Perda ao Fogo (%)	10.03	12.68	4.4
Total (%)	99,1	98.8	n.disponível

De acordo com os dados, verifica-se uma quantidade bem maior de ferro nas bentonitas brasileiras, quando comparadas com a americana, enquanto que esta possui mais silício.

A bentonita de Wyoming apresentou teor de sódio cinco vezes maior que a verde-lodo e três vezes maior que a chocolate. As bentonitas brasileiras apresentaram uma quantidade maior de potássio que a de Wyoming, a chocolate um fator de dez e a Verde-Lodo de quatro. Quanto ao alumínio a Verde-Lodo apresentou o maior percentual e a Chocolate o menor (ARANHA & PORTO 2002).

O tipo de bentonita irá influenciar diversos processos no solo. Um deles é a formação de trincas durante o ressecamento. KLEPPE & OLSON (1985) verificaram

que ciclos de umedecimento e secagem podem gerar propagação de trincas profundas em materiais acrescidos de bentonita sódica. Estes autores constataram também que após o ressecamento, se o solo for umedecido com água, esse expandirá e fechará as trincas, tornando a camada novamente íntegra. Porém se outro tipo de líquido penetrar nas trincas e não for adsorvido pelo solo, ou algum material ficar ao longo dessas, após o processo de re-umedecimento, podem resultar zonas de condutividade hidráulica elevada.

Ressalta-se que a bentonita utilizada para este estudo foi cedida pela Bentonit União Nordeste que opera na cidade de Boa Vista.

O mecanismo de expansão das esmectitas atua em dois estágios: o primeiro é gerado pela adsorção de água entre as lamelas dos cristais do argilomineral, provocando a chamada expansão intracristalina. O segundo estágio é controlado pela osmose, fenômeno responsável pela expansão intercristalina. Ressalta-se que o primeiro estágio não é relevante para a geotecnia, pois é necessário que haja aquecimento de 300°C, fato esse que não ocorre nas condições normais de temperatura e pressão. Além disso, o tratamento da esmectita com uma solução concentrada de Na_2CO_3 em autoclave, remove todos os cátions dos sítios trocáveis, saturando o complexo sortivo com íons sódio (hidratados). Depois de seca, e nas CNTP, a bentonita é incapaz de apresentar a expansão intracristalina.

2.7 Camadas Selantes

As camadas selantes, como o próprio nome diz, referem-se a um sistema onde materiais naturais, ou misturados, são utilizados com o objetivo de impedir e/ou minimizar a infiltração e o avanço de fluidos para os meios físicos adjacentes. Em um sítio de disposição de resíduos, por exemplo, esta camada teria como principal função isolar os resíduos do ambiente.

A utilização destes sistemas de selagem em obras de engenharia é bastante amplo, principalmente, como camadas basais e de cobertura em aterros sanitários, diques de contenção, barreiras hidráulicas verticais e horizontais, lagoas de decantação, lagoas de tratamento, entre outros.

O tipo de material disponível *in loco*, a sua demanda, a finalidade da camada selante, composição química da solução percolada e da água subterrânea, vida útil do projeto, taxa de infiltração e restrições físicas são os condicionantes recomendados para a utilização de uma determinada camada selante (LEITE & ZUQUETE, 1995).

De acordo com os requisitos supracitados, o sistema de selagem pode ser constituído por diferentes materiais, tais como: solos naturais compactados, misturas de solo-bentonita, solo-cimento-bentonita, areia-bentonita e geossintéticos, entre outros. Algumas destas misturas serão mais detalhadas no item 2.7.1.

2.7.1 Tipos de Camadas Selantes

As camadas selantes podem ser formadas por materiais naturais ou misturados. Quando se tem um solo natural rico em argila, com condutividade hidráulica menor ou igual a 10^{-7} cm/s, costuma-se utilizá-lo como camada selante natural. Ressalta-se que a condutividade hidráulica do solo natural também dependerá do tipo de argilo-mineral presente e a sua preponderância.

No entanto, para que essa camada de solo natural possua um desempenho satisfatório, além das características mencionadas anteriormente, a camada de solo deverá ser contínua e sem imperfeições, como fissuras e buracos.

A condutividade hidráulica e a continuidade de uma camada de solo natural podem ser avaliadas por meio de estudos sobre a geologia e hidrogeologia local, utilizando-se ferramentas como: furos de sondagem, ensaios geofísicos, dentre outras (DANIEL, 1993).

Entretanto, devido às dificuldades para encontrar regiões homogêneas e avaliar a sua uniformidade de materiais e de estruturas numa mesma camada de solo natural, recomenda-se à utilização de métodos que eliminem estes possíveis problemas.

A compactação dos solos naturais surge como uma das alternativas para melhorar o desempenho destes materiais e garantir um valor baixo e uniforme de condutividade hidráulica em toda a camada selante.

Além do baixo valor de condutividade hidráulica (menor ou igual a 10^{-7} cm/s), ROWE *et al.* (1995) propuseram alguns critérios para utilização de solo argiloso compactado como camada selante: ausência de fraturas no solo produzidas pela compactação; quantidade mínima de 15 a 20% de partículas menores que 2 μ m e um índice de plasticidade maior que 7%; e por fim, a camada selante deve apresentar uma compatibilidade com o material disposto para que não sofra com aumentos significativos da condutividade hidráulica. ROWE *et al.* (*op.cit*), ressaltam que o projeto de camada selante é bastante específico para cada local, e que as recomendações supracitadas representam apenas as características gerais que os solos devem possuir para serem utilizados como camada selante.

O potencial de contração dos solos também é um parâmetro a ser verificado, pois determinados argilominerais possuem características de expansão e contração, ou seja, a perda de umidade pode resultar em abertura de fendas, gretas de contração e trincas de expansão formando caminhos preferenciais de fluxo (GRIM, 1968).

As principais características que as camadas selantes devem apresentar, segundo visão de alguns autores, estão ilustradas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Principais características das camadas selantes recomendadas por alguns autores (modificada de FERRARI, 2005).

Fonte	LL (%)	IP (%)	Finos (%) $\phi < 0,075$ mm (%)	Fração argila (%)	Fração pedregulho (%)	K (m/s)
BAGCHI, (1994)	≥ 30	≥ 15	≥ 50	≥ 25	X	$\leq 10^{-9}$
BENSON <i>et al.</i> (1994)	≥ 20	≥ 7	≥ 30	≥ 15	X	$\leq 10^{-9}$
CETESB (1993)	≥ 30	≥ 15	≥ 30	X	X	$\leq 10^{-9}$
DANIEL, (1993)	X	≥ 7	≥ 20	X	≤ 30	$\leq 10^{-9}$
EPA (1989)	X	>10	≥ 20	X	≤ 10	$\leq 10^{-9}$

A partir da Tabela 2,6, verifica-se que as diversas fontes consultadas recomendam uma porcentagem de finos maior ou igual a 20% na composição do solo, além de valores elevados para os limites de consistência (LL e IP). Estes fatores resultam em solos plásticos que quando associado a argilominerais expansivos, como por exemplo, do grupo da esmectita, apresentam características de contração e expansão com a variação de umidade. Estes fatores podem ser prejudiciais caso ocorram de forma intensa, pois podem gerar grandes fissuras (trincas) ocasionadas pelo ressecamento durante um prolongado período de perda de umidade e por consequência aumentar a condutividade hidráulica da camada.

No entanto, caso sejam consideradas apenas as especificações quanto à porcentagem de finos, uma gama de solos pode ser enquadrada, incluindo alguns solos siltsos e arenosos. Contudo, o valor da condutividade hidráulica especificado na tabela 2.6 é muito restritivo ($k \leq 10^{-9}$ m/s), o que conduz à preferência por solos argilosos para formação da camada selante.

MACAMBIRA (2002) analisou a potencialidade de alguns solos lateríticos compactados para a construção de camadas selantes. Verificou-se que as menores condutividades hidráulicas obtidas foram da ordem de 10^{-7} cm/s para vários solos ensaiados. Este valor diminui com o aumento do teor de umidade, até o teor de

umidade ótimo, permanecendo praticamente constante ou diminuindo ligeiramente a partir daí. Verificou-se também que o aumento da energia de compactação diminui a condutividade hidráulica de forma pronunciada no ramo seco da curva de compactação. Para teores de umidades superiores ao teor de umidade ótimo as variações foram pequenas para energias acima de 12 golpes. Outro fator que também influenciou na diminuição da condutividade hidráulica dos solos foi o aumento da porcentagem de argila. Em relação às contrações dos solos, verificou-se que o aumento do teor de umidade acarretou um aumento das contrações axiais, que atingiram valores máximos da ordem de 4 %. Os solos mais arenosos apresentaram as menores contrações axiais, não ultrapassando valores da ordem de 1 %, sendo que os solos argilosos atingiram valores de contrações médias de 2 %.

Quando localmente não há disponibilidade de solos naturais argilosos, ou quando estes por si só não apresentam características adequadas para serem utilizados como camadas selantes, tem-se como alternativa a utilização da bentonita.

Países como Alemanha, EUA, França e Suíça, já utilizam, desde a década de 70, a solução da adição de bentonita na camada selante, também conhecida como “barreira ativa”.

Barreiras ativas são camadas tratadas com bentonita especialmente desenvolvidas para impermeabilização de solos, que garantem proteção constante, mesmo quando há ocorrência de alguma falha no sistema. Estas bentonitas chamadas de ativas foram descritas com maior riqueza no item 2.6.

O solo quando adicionado de bentonita seja a ativada ou não, passa a possuir características especiais que somente esta lhe confere. Uma das características é a grande expansibilidade gerada pela retirada de umidade do meio em que estão com extrema facilidade.

Para uso em impermeabilizações de solos, recomenda-se o uso somente das bentonitas sódicas, pois possuem propriedades expansivas e de cicatrização superiores às demais bentonitas e com isso garantirão a expansão necessária para

impedir a percolação de fluidos nos solos. (GOUVEIA, 2007).

GLEASON *et al.* (1997) compararam a utilização de misturas de diferentes bentonitas, uma sódica e outra cálcica, com a areia utilizando diferentes proporções dos materiais. Neste estudo foram realizados ensaios em amostras compactadas, em teores de umidade de 15 a 19% (1 a 4% acima da umidade ótima) e massa específica seca na faixa de 1,6 a 1,7 g/cm³. Segundo os autores a quantidade de bentonita necessária para se obter um valor de condutividade hidráulica menor que 1×10^{-7} cm/s variou de aproximadamente 2 a 4,5% para a bentonita sódica e de 5 a 15% para bentonita cálcica. Conclui-se que foi necessário aproximadamente três vezes mais bentonita cálcica quando comparado à bentonita sódica para se obter o mesmo valor de condutividade hidráulica.

Diversos estudos recomendam a utilização de bentonita sódica misturada ao solo em locais onde estes se apresentam inadequados para a construção de camadas selantes. No entanto, é necessário se estabelecer uma proporção ideal solo-bentonita para cada caso específico, pois na literatura alguns autores discordam quanto à quantidade necessária de bentonita, apesar de haver um consenso sobre a utilização de pequenas quantidades.

Para ROWE (2000), a proporção adequada de bentonita para ser misturada com determinado solo está entre 4% e 10%, obtendo-se assim valores de condutividade hidráulica entre 10^{-7} a 10^{-9} cm/s. Este autor ressalta que além da importância de se obter uma proporção ótima de bentonita, o teor de umidade para cada caso específico também deve ser considerado. Ainda segundo ROWE (*op cit.*), estes parâmetros associados garantirão a obtenção de valores de condutividade hidráulica adequados, além de proporcionar uma melhor homogeneização, trabalhabilidade e uma aplicação econômica deste material.

SIVAPULLAIAH *et al.* (1998) avaliaram misturas para sistemas selantes basais, por meio de ensaios de compactação, expansão/contração, adensamento e condutividade hidráulica com misturas com proporções de 10, 15, 20, 25, 30, 50, 65 e

80% de bentonita, além da bentonita pura. Verificou-se que as melhores proporções eram de 20 a 30%, segundo seus critérios de análise.

Para solos com predominância de areias finas a médias, apenas a adição de bentonita sódica natural em teores de 3% a 4% é suficiente para que haja um decréscimo de duas ordens de magnitude na condutividade hidráulica. Para misturas contendo 5% ou mais de bentonita a condutividade hidráulica sofre um decréscimo de quatro ordens de magnitude (CHALERMYANONT & ARRYKUL, 2005).

DANIEL (1987) verificou que à medida que a quantidade de bentonita cresceu de 0 para 8% nas misturas compactadas de bentonita e areia, a condutividade hidráulica decresceu de 10^{-4} para 10^{-8} cm/s. O autor verificou também que na presença de maiores quantidades de bentonita os decréscimos não foram tão significativos.

Dessa forma, necessita-se de um conhecimento sobre a granulometria do solo utilizado para a mistura. Este fator é muito importante para ser considerado na condutividade hidráulica resultante da mistura, sendo que quanto menor a condutividade hidráulica do solo utilizado, menor será a condutividade hidráulica obtida para a mistura. Sendo assim, solos que possuem maior porcentagem de finos plásticos na sua constituição irão apresentar menores valores de condutividade hidráulica (D'APPOLONIA, 1980).

DANIEL (1993) sugere a adição, em pequenas quantidades, de bentonita misturada ao solo, em locais onde o solo comporta-se de forma inadequada para a construção de camadas selantes. Segundo ele, uma pequena quantidade de bentonita é suficiente para diminuir em várias ordens de grandeza o valor da condutividade hidráulica de um determinado solo.

FARNESI (2006) propôs uma alternativa de melhoramento de solos tipicamente lateríticos, a partir da adição de pequenas quantidades (3% e 6%) de bentonita ativada (sódica) da marca KATAZ, para uso em sistemas selantes de obras de disposição de resíduos. Neste estudo foram realizados ensaios com permeâmetros de parede rígida e flexível. Como os parâmetros de controle dos ensaios com parede flexível não foram

tão confiáveis, considerou-se como mais precisos os resultados dos ensaios com parede rígida. Verificou-se que a condutividade hidráulica destes solos só diminuiu efetivamente na amostra com 6% de bentonita ($k = 10^{-8}$ cm/s) e que tal valor pode orientar a aplicação de bentonita em solos semelhantes ao deste estudo.

FERRARI (2005), por sua vez, estudou a utilização de um solo siltoso compactado como camada selante de aterro de resíduos. Foram feitos ensaios de permeabilidade de campo, realizados em aterros experimentais, e de laboratórios, em amostras indeformadas retiradas dos aterros experimentais e amostras deformadas compactadas em laboratório. O resultado destes ensaios indicou que a condutividade hidráulica do silte era da ordem de 10^{-6} cm/s, valor superior ao recomendado pela maioria das legislações de diversos países que estabelecem 10^{-7} cm/s como valor de referência para a utilização em camadas selantes. Como alternativa para reduzir a permeabilidade do silte compactado adicionou-se bentonita ativada, nas pequenas proporções de 5% e 10%. Os ensaios de laboratório com amostras deformadas para a mistura solo-bentonita mostraram a redução do coeficiente de permeabilidade para valores inferiores a 1×10^{-7} cm/s, quando compactada com energia modificada. Estes resultados encontrados em laboratórios podem ser alcançados no campo, desde que se tenham maiores cuidados na hidratação da bentonita e na homogeneização da mistura. Dessa forma FERRARI (2005) mostrou que pode ser viável o uso de solo local, mesmo não sendo argiloso, como material de impermeabilização, com a adição de bentonita, emprego de energia elevada na compactação e atenção a certos cuidados construtivos.

Os solos arenosos, apesar de naturalmente não possuírem uma baixa condutividade hidráulica, quando adicionados de bentonita oferecem algumas vantagens para serem utilizados como camada selante. KOZICKI *et al.* (1994), enumeram algumas das vantagens: (1) apesar da molhagem inicial ser bastante rápida, é necessário um longo período de tempo para que a frente de saturação atravesse a camada selante; (2) a condutividade hidráulica da camada selante irá

diminuir com o aumento da carga ou tensão confinante, reduzindo a taxa de infiltração e (3) irá ocasionar uma redução significativa na concentração do líquido permeante, como consequência da dispersão, difusão e absorção dentro da matriz.

Outros autores recomendam a substituição de uma certa porcentagem da argila constituinte da camada selante por um material arenoso (GRAHAM *et al.*, 1989, YAN REE *et al.*, 1992, BRANDL, 1992, HAN, 1996, ALSTON *et al.*, 1997). Segundo os autores, tal mistura originaria um material com propriedades melhoradas: menor tendência à contração do que argilas puras ou siltes, índice de vazios baixo, estabilidade climática e maior facilidade de construção.

O uso da bentonita sódica (Permigel) adicionada a um solo areno-siltoso para fins de camada selante de cobertura em aterros sanitários foi analisada por HUSE (2007). Essa camada, ao ser impermeável, impede a penetração de precipitação de chuva, que leva a diminuição do volume de chorume ou lixiviado coletado e de gás produzido no aterro sanitário. Este estudo apresentou resultados de análises realizadas em um solo areno-siltoso usado como camada de cobertura no aterro de Nova Iguaçu, RJ, Brasil, considerando o uso de Permigel adicionado a este solo. Ressalta-se que Permigel é o nome comercial dado à bentonita sódica ativada (GOUVEIA, 2007).

Inicialmente, foram realizados ensaios de permeabilidade visando identificar o adequado percentual de bentonita a ser adicionada ao solo que compõe o aterro estudado. Os resultados indicaram que a partir de 4% de bentonita a condutividade hidráulica da mistura alcançou valores inferiores a 10^{-7} cm/s. Na seqüência, desenvolveu-se um novo equipamento que permitisse a medição integrada de variação volumétrica, umidade, sucção e temperatura do solo. Este equipamento usado por HUSE (*op.cit*) foi o mesmo utilizado para esta pesquisa. Ainda segundo HUSE (*op.cit*), a adição desta bentonita, com alta capacidade de expansão a determinada proporção, conduziu a uma diminuição na formação de trincas.

LUKARIANTCHUKI (2007) propôs a utilização da bentonita sódica (Permigel)

misturada a um solo arenoso natural da região de Pindorama (SP) para construção de camadas selantes de aterros sanitários. Nesta pesquisa foram apresentados resultados de ensaios com misturas de solo-bentonita nos teores de 3 %, 5 % e 7%. Os ensaios de condutividade hidráulica para o solo-bentonita foram realizados em permeâmetros de parede flexível. Os resultados obtidos indicaram que para os teores de 5 % e 7 % de bentonita a condutividade hidráulica apresentou-se com valores adequados para a construção de camadas selantes. A resistência ao cisalhamento do solo compactado puro e das misturas compactadas foi avaliada através de ensaios triaxiais do tipo consolidado não drenado (CU) e ensaios de compressão simples. A coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo do solo aumentaram e diminuíram, respectivamente, com a adição de bentonita. Os ensaios de resistência à compressão simples para as misturas com 5 % de bentonita atingiram valores aceitáveis para o emprego em camadas selantes.

Além da bentonita, alguns pesquisadores abordam outros tipos de materiais na construção de camada selante, tais como cinzas de carvão (HAN, 1996, ACHARI, 1995 *apud* HEINECK, 2002, SHACKELFORD & GLADE, 1994), adição de estabilizantes como cimento e cal (BELLEZA & PASQUALINI, 1997 *apud* HEINECK, 2002, MANASSERO *et al.*, 1994, BRODERICK & DANIEL, 1990, BOWDERS & DANIEL, 1987, AZAMBUJA, 2004, LEMOS, 2006) e adição de fibras (AL-WAHAB & EL-KEDRAH, 1995, MAHER & HO, 1994, HEINECK, 2002).

3. Materiais e Métodos

Na avaliação de solos para sistemas de selagem, é importante realizar uma caracterização física, físico-química e mineralógica dos constituintes, uma vez que a aplicabilidade deste sistema de selagem pode envolver uma complexidade de reações geradas por soluções químicas de resíduos dispostos quando do contato destes materiais com os solos. Desta forma, os ensaios de caracterização auxiliam na previsão destas reações.

De forma a entender melhor a formação e os constituintes do solo foi realizada brevemente uma descrição geológica da área de coleta das amostras. Posteriormente, fez-se uma descrição pedológica do perfil estudado, com conseqüentes coletas de amostras deformadas e indeformadas. Em seguida, no laboratório, realizaram-se as caracterizações físicas, físico-químicas e mineralógicas dos materiais estudados, além dos ensaios geomecânicos, de retenção de água (curva característica) e de Ressecamento.

3.1 Características Geológicas da Área

A área está compreendida dentro da faixa ribeira (ALMEIDA *et al.*, 1973), mais precisamente no Arco Magmático rio Negro (TUPINAMBÁ, 1999). As unidades inseridas dentro deste contexto são: Complexo rio Negro, Batólito Serra dos Órgãos, Granito Teresópolis, Diques e Coberturas Aluvionares.

A unidade mais representativa da área é o Batólito Serra dos Órgãos, que ocupa cerca de 60%, quase o dobro da área coberta pelo complexo rio Negro que ocupa 33%, enquanto que as intrusões pós-tectônicas da Unidade Granito Teresópolis ocupam 6%. O 1% restante são os diques e as coberturas quaternárias.

A unidade complexo rio Negro é a mais antiga, com idades U-Pb estimadas no intervalo 630-595 Ma (TUPINAMBÁ, 1999), que aparecem preferencialmente na porção Centro-Norte da área e um corpo isolado a Sul. Duas unidades caracterizam este Complexo, a primeira formada por gnaisses migmatíticos, e a segunda por gnaisses tonalíticos (PENHA *et al.*, 1979, PENHA *et al.*, 1981 *apud* JUNHO, 1982). Os gnaisses tonalíticos foram primeiramente descritos como migmatitos estromáticos a nebulíticos, entretanto a ausência de melanossoma ou leucossomas enriquecidos e a presença de texturas ígneas levaram a TUPINAMBÁ (1999) considerá-los um complexo meta-ígneo.

A unidade Batólito Serra dos Órgãos trata-se de rochas intrusivas que cobrem a maior parte da área de estudo e apresentam idade U-Pb entorno de 559 Ma (TUPINAMBÁ, 1999). As litologias deste batólito podem ser agrupadas em duas unidades: os granitos e leucogranito gnáissicos. (PENHA *et al.*, 1979, ROSIER, 1957 *apud* JUNHO, 1982). O perfil de solo onde foi coletada a amostra para este estudo está inserida dentro desta unidade.

O Granito Teresópolis é uma unidade composta por rochas graníticas pós-tectônicas intrusivas, que se apresentam encaixadas nos ortognaisses do Batólito Serra dos Órgãos e cortam contatos destes com os gnaisses migmatíticos da Unidade rio Negro (JUNHO, 1982). É composta por duas fácies principais: Granito Teresópolis de Grão Médio e Granito Teresópolis de Grão Fino. O primeiro possui grãos com tamanho (1-5 mm), homogêneo, leucocrático, relativamente rico em allanita, encontrado nas localidades da Pedra do Açú, Pedra do Sino e Boa Esperança (UERJ/IBGE, 1999). O outro granito possui grãos de até 2 mm, com orientação de fluxo freqüente e presença comum de enclaves e micro granulares. Ocorrem nos maciços dos bairros Paquequer Pequeno, Posse e nos Vales do Imbuy, Boa Esperança e rio do Príncipe, além de diques e aplitos (UERJ/IBGE, 1999).

A área de estudo apresenta espessos diques básicos, com direção predominante NE, sendo perpendiculares às estruturas regionais e paralelos às falhas

que deslocam as principais estruturas pré-cambrianas. As rochas que formam esses diques tem composição variando entre básica e intermediária. As litologias são basaltos, diabásios e microgabros (DRM-RJ/GEOSOL Ltda., 1982). As unidades mais recentes da área de estudo são as coberturas aluvionares e os depósitos de encosta com idade quaternária. Esses depósitos sedimentares são formados nas margens dos rios na forma de terraços ou em suas planícies de alagamento. Estes sedimentos são arenosos, de granulometria média a fina, associadas a lentes argilosas e níveis de cascalhos (UERJ/IBGE, 1999). Nos depósitos de encosta são observados grandes blocos de rochas espalhados pelo sopé das mesmas.

3.2 Características Pedológicas do Ponto de Coleta

A região escolhida para este estudo apresenta um solo residual caracterizado por um perfil de solo formado diretamente pela decomposição da rocha local. Neste perfil observou-se uma seqüência de horizontes A-B-C com horizonte B pedologicamente pouco evoluído, marcado pela presença de minerais herdados do material original, pouco intemperizados. Na figura 3.1 ilustra-se o horizonte B que apresenta uma espessura aproximada de 150 cm e características típicas de um cambissolo, com coloração amarelada, textura média, cerosidade pouco expressiva, fragmentos e seixos provenientes da rocha original e aparentemente relação silte/argila maior que 0,7. Posteriormente, a partir dos resultados do ensaio de granulometria (item 4.1), confirmou-se esta relação.

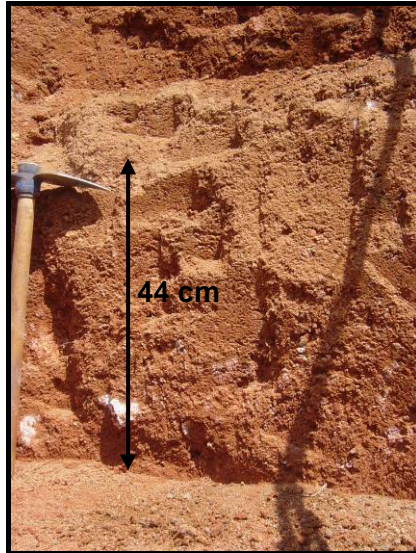


Figura 3.1: Horizonte B diagnóstico do cambissolo com presença de fragmentos e seixos da rocha original.

O horizonte A possui pequena espessura, em torno de 40 cm, e é caracterizado por uma coloração marrom escura devido aos materiais orgânicos presentes. Este horizonte está indicado na figura 3.2.

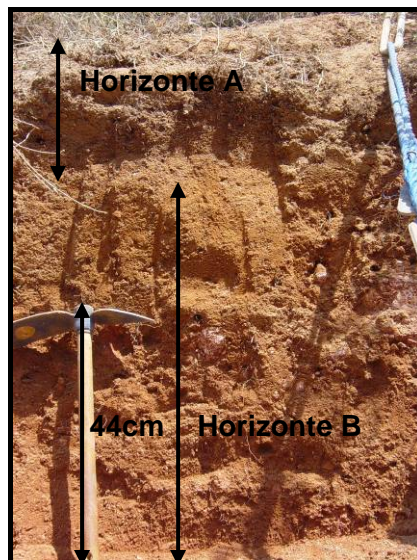


Figura 3.2: Horizonte superior A sobrejacente ao Horizonte B diagnóstico do cambissolo

O horizonte C guarda as características da decomposição mineral e textural da rocha-matriz. Apresenta coloração avermelhada, estrutura granular e textura aparentemente arenosa. Este horizonte é ilustrado na figura 3.3.

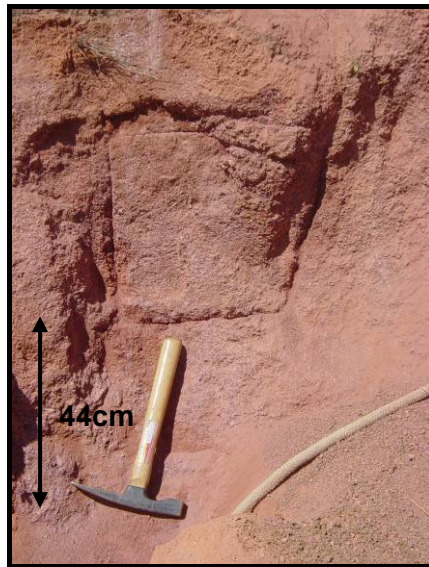


Figura 3.3: Horizonte C com características marcantes da rocha original

3.3 Coleta de Amostras

A área escolhida para coleta de amostras situa-se numa região próxima a BR-116, no Bairro Meudon, município de Teresópolis – RJ (Figura 3.4). Nesta região pode-se distinguir num perfil três horizontes (A, B e C) onde foram coletadas amostras deformadas e indeformadas. Estes horizontes estão descritos basicamente no item 3.2.



Figura 3.4: Localização da área de coleta das amostras (GOOGLE EARTH, 2007)

As amostras indeformadas foram coletadas conforme a norma NBR 9604 (ABNT, 1986) (Figura 3.5). As amostras deformadas foram acondicionadas em sacos plásticos e enviadas ao laboratório onde foram submetidas à secagem ao ar e posteriormente destorroadas e quarteadas. Esse material foi reservado para as análises físicas, físico-química e mineralógica.



Figura 3.5: Coleta de bloco indeformado do horizonte A

3.4 Misturas Solo-bentonita

A bentonita empregada neste estudo foi da marca Brasgel, comercialmente denominada de “Permagem”. Este material foi disponibilizado pela empresa Bentonit União Nordeste S.A. A Tabela 3.1 apresenta a composição química típica desta bentonita ativada.

Tabela 3.1: Composição química da bentonita Permagem (Fonte : Informação do catálogo da Bentonita Permagem)

Composição Química	
Sílica (SiO ₂)	60,2%
Alumina (Al ₂ O ₃)	18,5%
Ferro (Fe ₂ O ₃)	7,2%
Magnésio (MgO)	2,0%
Cálcio (CaO)	2,4%
Sódio (Na ₂ O)	2,5%
Água combinada (H ₂ O)	6,0%
Outros Componentes	1,2%

Os solos coletados no campo e a bentonita adquirida (Permagem) foram misturados em proporções definidas com base em valores citados na literatura, como os trabalhos de LUKIANTCHUKI (2007) e HUSE (2007).

Foram realizadas misturas de cada horizonte (A, B e C) com a bentonita nos teores de 5% e 10%. Os Cálculos das proporções de solo e bentonita foram feitos considerando a massa seca dos materiais. As misturas foram efetuadas de forma manual sendo homogeneizadas dentro de sacos plásticos.

Para facilitar a compreensão do texto as amostras serão designadas de:

HOR. A = Horizonte A puro

HOR. A 5% = 95 % Horizonte A + 5% Bentonita Permagem

HOR. A 10% = 90 % Horizonte A + 10% Bentonita Permagem

HOR. B = Horizonte B puro

HOR. B 5% = 95 % Horizonte B + 5% Bentonita Permagem

HOR. B 10% = 90 % Horizonte A + 10% Bentonita Permagemel

HOR. C = Horizonte C puro

HOR. C 5% = 95 % Horizonte C + 5% Bentonita Permagemel

HOR. C 10% = 90 % Horizonte A + 10% Bentonita Permagemel

3.5 Caracterização dos Materiais Estudados

Os ensaios de caracterização aqui apresentados foram realizados com intuito de estabelecer relações entre as características físicas, físico-químicas e mineralógicas das amostras de solo com o acréscimo bentonita.

Para acrescentar informações sobre o solo, estudado, foram elaboradas lâminas de micromorfologia, a partir de amostras indeformadas, que permitiram um melhor entendimento da distribuição dos microporos, microestruturas e microtexturas nesses materiais.

3.5.1 Análise Micromorfológica

A análise micromorfológica foi realizada nas amostras indeformadas dos horizontes A, B e C com o objetivo de identificar os constituintes presentes da fração sólida e os arranjos ou modos de organização desses constituintes, principalmente os poros.

Para esta análise fez-se necessário a coleta de pequenos blocos indeformados, com tamanho aproximado de 15 cm, em caixas de papelão (Figura 3.6) de forma a manter a estrutura preservada do solo. Estas amostras devem estar orientadas de maneira que o topo do perfil seja indicado, pois na etapa de análise das lâminas é possível identificar a direção do transporte de material dentro do solo.

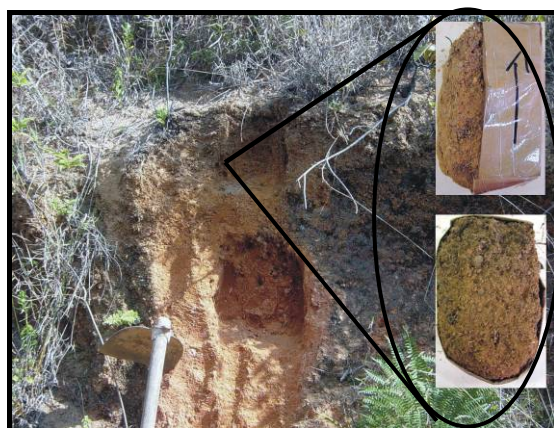


Figura 3.6: Montagem feita para ilustrar a amostra coletada para micromorfologia e o seu respectivo perfil de coleta.

A impregnação e a confecção de lâminas delgadas seguiram técnicas propostas por BULLOCK *et al.* (1985), CURI (1985) e CASTRO (1989a). Este processo é necessário para tornar as amostras resistentes ao corte e ao polimento.

Inicialmente, os blocos de solos, com estrutura preservada, foram secos ao ar. Depois desta etapa, estes materiais foram colocados em formas de alumínio e em seguida no dessecador. Este aparelho é conectado a uma bomba pneumática formando um sistema fechado e a vácuo. O equipamento utilizado é um compressor de vácuo modelo CL nº BD – 2343 DIA-PUMP da FANEM LTDA, voltagem 110 Kw 0,165. Faixa de leitura do manômetro 0 a 2 kgf/cm².

Para cada amostra foram realizadas pelo menos três sessões de impregnação por capilaridade obtida a vácuo seco, com intervalos de 24 horas.

A impregnação foi feita com uma mistura de resina plástica Araldite XGY-1109, endurecedor HY-951 e acetona P.A. A acetona foi escolhida por não apresentar água em sua composição, eliminando assim o risco de hidratação das amostras e alteração no comportamento das argilas.

O processo de endurecimento demora de duas a três semanas dependendo da porosidade das amostras. Depois desta fase, o bloco foi cortado em máquina de disco

diamantado em duas partes, uma delas foi colada em lâmina de vidro plano, depois de desbastado e polido manualmente com abrasivo (carborundum).

A descrição das lâminas foi realizada em microscópio polarizante da marca Zeiss, seguindo os manuais propostos por BULLOCK *et al.* (1985) e CASTRO (1989a).

No horizonte A predominam pedoporos (ligados a evolução pedológica) e bioporos (atividade biológica). Estes poros apresentam boa conectividade entre si (Figura 3.7).

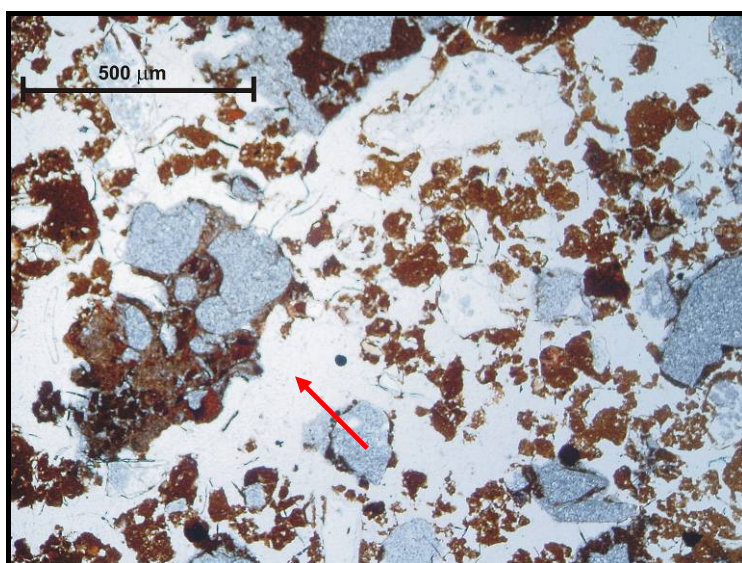


Figura 3.7: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz natural) referente ao horizonte A onde fica evidenciado a porosidade bem conectada (coloração branca e sem forma definida - seta em vermelho). Observa-se na coloração marrom pequenos agregados de solo.

Na fração esqueleto (areia e silte) do horizonte A, alguns feldspatos apresentaram sinais de alteração, formando *Box work* de gibbsita (Figura 3.8). Esta estrutura é indicativa de transporte de massa, uma vez que a mesma é típica de material pouco alterado, ou seja, deveria ter sido encontrada apenas nos horizontes B e C.

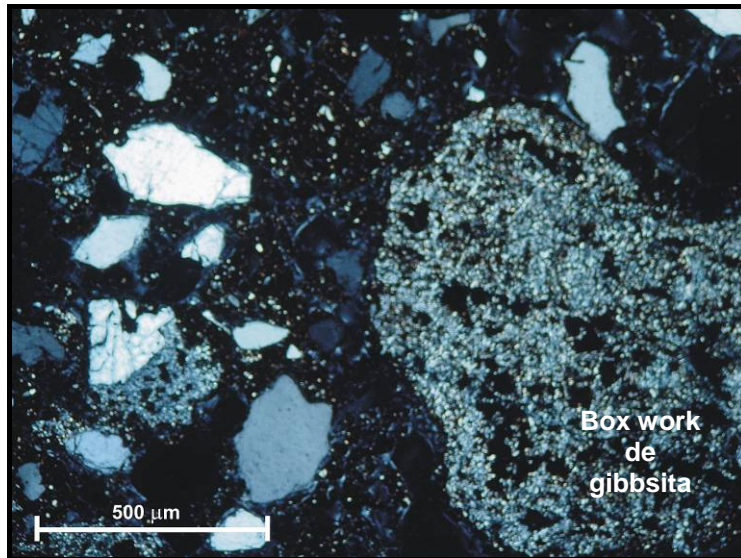


Figura 3.8: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz polarizada) referente ao horizonte A, onde observa-se no canto direito inferior da figura um Box Work de gibbsita. Ressalta-se que o tamanho do feldspato é preservado, porém há formação de poros por dissolução desse mineral.

No horizonte B, observou-se uma maior quantidade de plasma (fração argila granulométrica), quando comparado ao horizonte C, resultado direto da ação da pedogênese. O plasma “cimenta” os grãos do esqueleto (estrutura de base porfirica).

Com relação à porosidade, no horizonte B predominam poros cavitários e fissurais (pedoporos). Estes últimos são derivados de ciclos de umectação e dessecação, ambos com uma boa conectividade entre si (Figura 3.9). Este fato facilita a percolação de fluídos neste material.

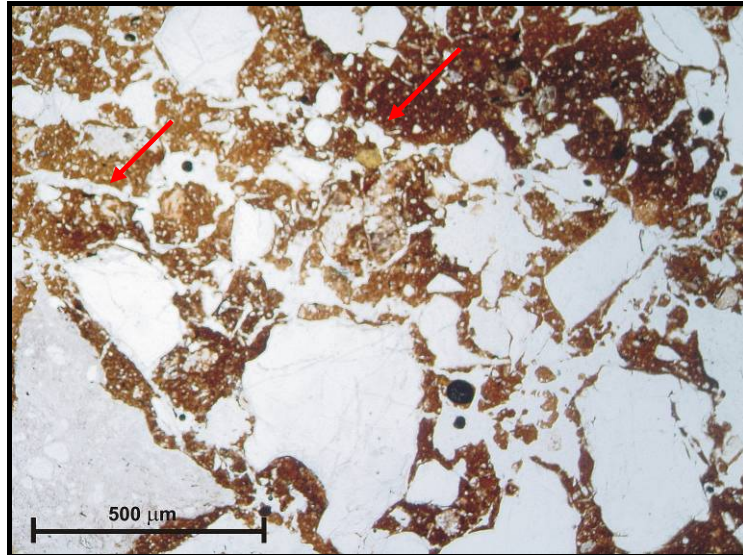


Figura 3.9: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz natural) referente ao horizonte B onde fica evidenciado a porosidade bem conectada (coloração branca e sem forma definida). Observa-se na figura (setas em vermelho) a presença de poros fissurais conectados à porosidade cavitária.

Na amostra referente ao horizonte C não foram identificados agregados de solo. Isto pode ser justificado pelo fato de não ter sido detectado plasma (argila) na lâmina que pudesse ser descrito. Basicamente observa-se apenas a fração esqueleto (areia e silte), com estrutura de base Mônica, ou seja, sem material fino cimentando o esqueleto.

A porosidade é resultado da dissolução dos minerais (vesículas), bem arredondados e não apresentam conectividade entre si (Figura 3.10), ou seja, possuem uma porosidade fechada. Este fato influencia diretamente na condutividade hidráulica dentro do horizonte C, pois apesar de ser um material poroso e com diâmetro de poros relativamente grandes, os mesmos não estabelecem uma ligação para que o fluido possa se deslocar facilmente dentro deste horizonte.

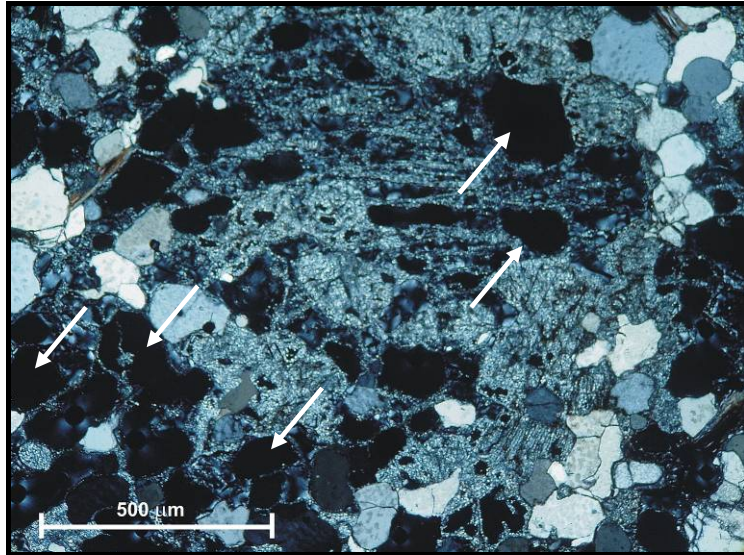


Figura 3.10: Ilustração da lâmina com aumento de 25 vezes (luz polarizada) referente ao horizonte C onde fica evidenciado a porosidade na forma de vesículas não conectadas (coloração preta). Nas setas brancas são demonstrados alguns destes poros.

No anexo I encontra-se uma descrição micromorfológica mais detalhada dos horizontes A, B e C.

3.5.2 Análise Granulométrica Conjunta

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Geotecnia – COPPE – UFRJ no setor de caracterização dos solos. Consiste na determinação das dimensões dos grãos que constituem os solos e no tratamento estatístico dessa informação.

A granulometria dos horizontes A, B e C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) foram determinadas pelo método da granulometria conjunta, utilizando-se para frações grosseiras (38,1 a 0,06 mm) o método do peneiramento, e para frações menores que 0,06mm o método da sedimentação, ambos de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984).

A granulometria da bentonita pura foi determinada obedecendo à norma supracitada, porém com algumas modificações: o tempo de repouso na solução de

hexametáfosfato de sódio foi estendido para três dias para completa hidratação, enquanto a norma recomenda 12 horas e foram utilizados aproximadamente 30 g de material, em vez de cerca de 70 g. Essas modificações foram necessárias uma vez que a bentonita apresenta uma alta expansibilidade e grande dificuldade para completa hidratação e homogeneização.

3.5.3 Determinação da Densidade Real dos Grãos

O ensaio para determinação da densidade real dos grãos foi realizado na Geotecnia – COPPE – UFRJ no laboratório de caracterização de solos, exceto para a bentonita que devido a problemas operacionais gerados pela grande expansibilidade deste material optou-se por utilizar um valor encontrado na literatura (FERRARI, 2005). Este ensaio seguiu a norma DPT M 93-64 (DNER, 1964). O ensaio foi realizado em amostras deformadas do solo utilizando-se um picnômetro de 500 ml. Consiste na razão da massa específica dos sólidos pela massa específica da água, considerando a temperatura da água a 4°C. Essa massa da parte sólida que constituem os grãos dos solos é formada principalmente por matéria orgânica e minerais (SOUSA PINTO, 2002).

3.5.4 Determinação dos Limites Atterberg

Os Limites de Atterberg ou de consistência são teores de umidade limites entre os estados de consistência, e se baseiam no fato de que um solo pode existir em qualquer um dos três estágios de plasticidade dependendo da quantidade de água que nele estiver presente.

Os limites são denominados da seguinte forma: limite de liquidez (LL) que é o teor de umidade limite entre os estados plástico e líquido do solo; limite de plasticidade (LP) que é o teor de umidade limite entre os estados semi-sólido e plástico; e limite de contração (LC) que é o teor de umidade contido no solo, onde abaixo do qual não haverá decréscimo de volume da massa de solo com a perda de umidade.

O LL e LP foram realizados no Laboratório de Geotecnia – COPPE – UFRJ no setor de caracterização de solos, exceto para a bentonita pura que foi analisada pelo Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP.

O LC foi realizado no Laboratório de Solos do Departamento de Geologia da UFRJ para todas as amostras estudadas, inclusive para a bentonita pura.

Os procedimentos para a realização destes ensaios seguiram as normas NBR-6459 (ABNT, 1984) para o limite de liquidez, NBR-7180 (ABNT, 1984) para o limite de plasticidade e NBR 7183 (ABNT, 1982) para o limite de contração.

Também foi determinada por meio do índice de plasticidade (IP), a faixa de umidade na qual o solo se comporta plasticamente. Este índice é calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Ressalta-se que quanto maior o IP, maior é a faixa de umidade em que o solo apresenta comportamento plástico. Quando o material não apresenta plasticidade (pedregulhos e areias), considera-se IP nulo e escreve-se IP = NP (não plástico).

Outro parâmetro importante de ser determinado é o índice de atividade (IA) de Skempton, que indica a maior ou menor influência das propriedades mineralógicas e química-coloidal da fração argila nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso (VARGAS, 1978). Este índice pode ser calculado de acordo com a Equação 3.1:

$$IA = \frac{IP}{\% \text{ fração argila}}$$

Equação 3.1

Onde: IA – índice de atividade de Skempton;

IP – índice de plasticidade [%];

% fração argila - é a porcentagem de material, em peso, com diâmetro < 2 µm

Ainda segundo VARGAS (*op. cit*) a atividade da argila (ou atividade de Skempton) é usualmente classificada como:

IA < 0,75 - argila pouco ativa;

0,75 ≤ IA ≤ 1,25 - argila normal;

IA > 1,25 - argila muito ativa.

3.5.5 Determinação do Potencial Hidrogeniônico e do ΔpH

Este ensaio foi realizado, para todas as amostras, no Laboratório Via Úmida do setor de Geologia de Engenharia e Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) conforme EMBRAPA (1997). A escala do pH mede a atividade do íon H⁺ na solução do solo, sendo expressa pela equação 3.2. Esta escala do potencial hidrogeniônico vai até 14. O pH abaixo de 7 é considerado ácido (predomina H⁺ na solução do solo), o pH acima de 7 é considerado básico (predomina OH⁻ na solução do solo) e o pH 7 é considerado neutro (BRADY, 1989).

$$pH = \log \left[\frac{1}{[H^+]} \right] \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: [H⁺] - atividade do íon hidrogênio na solução.

As análises do pH foram realizadas com o intuito de determinar a acidez ou alcalinidade dos solos e suas respectivas misturas. Estas análises foram determinadas através da medição do potencial hidrogeniônico por meio de eletrodo combinado imerso em uma suspensão solo:líquido na proporção 1:2,5 (EMBRAPA, 1997). Foram pesados 10g de cada material (HOR. A, HOR. A 5%, HOR. A 10%, HOR. B, HOR. B 5%, HOR. B 10%, HOR. C, HOR. C 5%, HOR. C 10% e bentonita pura), sendo adicionado em seguida, separadamente, 25ml de água destilada e de KCl (1N). A

mistura foi deixada em repouso aproximadamente uma hora e finalmente mediou-se o pH com o auxílio do pHmetro da marca Quimis (Figura 3.11), aferido com solução tampão de pH 7,0 e pH 4,0.



Figura 3.11: pHmetro Quimis utilizado na determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

Com a finalidade de se obter a carga do solo calculou-se o valor de ΔpH , que é obtido na relação expressa pela Equação 3.3.

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Equação 3.3.

De acordo com o resultado os solos e as respectivas misturas são classificados da seguinte forma:

- $\Delta\text{pH}=0$ → Ponto de Carga Zero, onde o somatório das cargas positivas e negativas é zero;
- $\Delta\text{pH}>0$ → Colóides com cargas positivas prevalecendo (Eletropositivo);
- $\Delta\text{pH}<0$ → Colóides com cargas negativas prevalecendo (Eletronegativo).

3.5.6 Determinação da Composição Mineralógica

A determinação da composição mineralógica dos horizontes A, B e C e de suas respectivas misturas (5% e 10%) foi realizada por meio da Difractometria de Raios X (DRX), conforme JACKSON (1969) com adaptações proposta por POLIVANOV (2003).

3.5.6.1 Difractometria de Raios X

Para o presente trabalho foram confeccionadas inicialmente quatro lâminas a partir da fração argila, referentes às amostras do horizonte A, B, C e bentonita pura, orientadas pelo método do esfregaço (THEISEN & HARVARD, 1962). Posteriormente, prepararam-se mais seis lâminas de argila referentes às misturas 5% e 10% de bentonita, em peso seco, com os horizontes A, B e C. Todas as lâminas sem tratamento prévio (lâmina guia) foram levadas ao difratômetro Rigaku – Termoflex (Figura 3.12), com velocidade de 1^o/min, ddp de 40kV, 30mA, contendo um contador proporcional, filtro de níquel e tubo de cobre.



Figura 3.12: Difratorômetro Rigaku – Termoflex

Em seguida, as lâminas guia dos materiais puros (HOR. A, HOR. B e HOR. C) e misturados (HOR. A 5%, HOR. A 10%, HOR. B 5%, HOR. B 10%, HOR. C 5% e HOR. C 10%), foram submetidas a uma atmosfera de etilenoglicol por um período mínimo de 4 horas (Figura 3.13), com a finalidade de determinar minerais expansivos.



Figura 3.13: Conjunto contendo uma bomba a vácuo e um dessecador com fundo preenchido por etilenoglicol

Depois de feita a leitura destas lâminas no difratômetro, elas foram aquecidas a temperatura 550°C na mufla da marca Quimis (Figura 3.14), visando identificar

possível colapso e/ou destruição da estrutura dos argilominerais. Feitos esses procedimentos as lâminas foram levadas novamente ao difratômetro.



Figura 3.14: Mufla usada para aquecer as lâminas a temperatura de 550°C

Para interpretação destas lâminas utilizou-se a marcação das posições angulares das reflexões difratadas, que são representadas em forma de picos. Os valores angulares são convertidos, em graus de 2θ para espaçamento interplanar (d em Å), através das tabelas com resoluções diretas da Lei de Bragg (FORMOSO, 1984). A identificação dos minerais é feita a partir dos valores de (d), que são acompanhados da intensidade relativa dos picos, em termos de porcentagem. Esses valores são encontrados em tabelas preparadas especialmente para identificação desses minerais. Para identificar o mineral, determinam-se as reflexões mais intensas e são comparadas com o JCPDS (1980).

3.6 Ensaio de Compactação (Proctor Normal)

Os ensaios de compactação foram realizados no Laboratório de Geotecnia – COPPE – UFRJ no galpão de estocagem e preparação de amostras, exceto para bentonita pura que foi compactada no Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP. Para estes ensaios seguiu-se a norma NBR 7182 (ABNT, 1986). A energia de compactação adotada foi a Proctor Normal.

A principal finalidade deste ensaio foi determinar a umidade ótima (w_{ot}) e a respectiva massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) obtidos por meio da curva de compactação. Ressalta-se que não houve reuso dos materiais estudados.

3.7 Determinação da Condutividade Hidráulica

Os ensaios para determinação da condutividade hidráulica dos horizontes A, B e C e de suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) foram todos realizados no Laboratório de Geotecnia – COPPE - UFRJ no setor de Resistência, deformabilidade e permeabilidade das amostras, exceto para a bentonita pura que foi ensaiada no Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP.

Inicialmente compactaram-se as amostras puras (sem adição de bentonita) e as amostras misturadas (com adição de bentonita). Todas as amostras foram compactadas em torno de suas umidades ótimas (w_{ot}) e com suas massas específicas aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) equivalentes. As amostras foram compactadas em cilindros de aproximadamente 10,14 cm de diâmetro, posteriormente acoplados em um permeâmetro de carga variável seguindo-se a norma NBR – 14545 (ABNT, 2000). Ressalta-se que devido ao comportamento arenoso (granular) apresentado pela amostra referente ao Horizonte C mesmo depois de compactada, utilizou-se o permeâmetro de carga constante obedecendo-se a norma NBR – 13292 (ABNT, 1995) (Figura 3.15).



Figura 3.15: Ensaio de Permeabilidade

Com o intuito de verificar a influência das estruturas do solo na condutividade hidráulica, determinou-se o valor de k das amostras indeformadas dos horizontes A, B e C puros. Para este ensaio o CP foi obtido puncionando um tubo cilíndrico com 4,9 cm de diâmetro no bloco de solo coletado no campo. Este tubo foi encaixado diretamente no permeômetro de carga constante e seguiu-se a norma NBR – 13292 (ABNT, 1995) para determinação da condutividade hidráulica.

3.8 Determinação da Curva Característica

Os ensaios para determinação da curva característica dos solos e de suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) foram realizados nos Laboratórios da EMBRAPA Solos de acordo com o manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997).

Neste estudo obteve-se a curva característica por meio da panela extrator de Richards, que forneceu valores de umidade correspondentes às tensões aplicadas nas amostras estudadas.

Inicialmente, as amostras deformadas dos horizontes A, B e C e suas respectivas misturas com bentonita foram saturadas e colocadas em placas de cerâmicas previamente saturadas. Em seguida foram submetidas a uma determinada pressão até atingir a drenagem máxima da água contida nos seus poros, correspondente à tensão aplicada. Determina-se então a umidade da amostra.

A Embrapa aplica neste ensaio as seguintes tensões: 6; 10; 33; 100; 500; e 1500 KPa. Estes valores correspondem a importantes estágios de retenção de água para fins de agricultura.

A tensão 10 KPa corresponde ao estágio conhecido como capacidade de campo que pode ser definido basicamente como a capacidade máxima de um solo reter água sob condições estáveis. Por outro lado, a tensão 1500 KPa corresponde ao ponto de murcha que é simplesmente o estágio onde o solo possui água retida apenas nos microporos dificultando a sua remoção pelos vegetais. Neste estágio considera-se que o solo atingiu o seu nível crítico de umidade.

Desta forma, para cada tensão aplicada resulta uma umidade retida no solo correspondente, e com estes dados elaborou-se a curva característica de retenção de umidade dos solos aqui estudados.

3.9 Ensaios de Ressecamento

Os Ensaios de Ressecamento consistem basicamente no preparo e na monitoração de um corpo de prova compactado com umidade inicial e massa específica aparente seca conhecidas, com o objetivo de se colher dados de temperatura, variação volumétrica, sucção, peso e umidade (indiretamente) e, então,

verificar de acordo com estes parâmetros como se comporta um determinado solo não saturado quando acrescido de bentonita durante um processo de secagem (perda de umidade). Pretende-se também analisar superficialmente a formação de trincas durante o processo de ressecamento do solo, a partir da variação volumétrica do corpo de prova (CP).

Neste ensaio se monitora diretamente, de forma automatizada, a variação da temperatura na base do corpo de prova, variação de sucção na base do (CP), variação do peso do (CP) e variação do volume do (CP). Indiretamente foi feito acompanhamento da variação de umidade por meio da variação do peso do (CP).

Este ensaio foi desenvolvido e montado no Laboratório de Geotecnia – COPPE – UFRJ. O equipamento desenvolvido para este ensaio é mostrado esquematicamente na Figura 3.16.

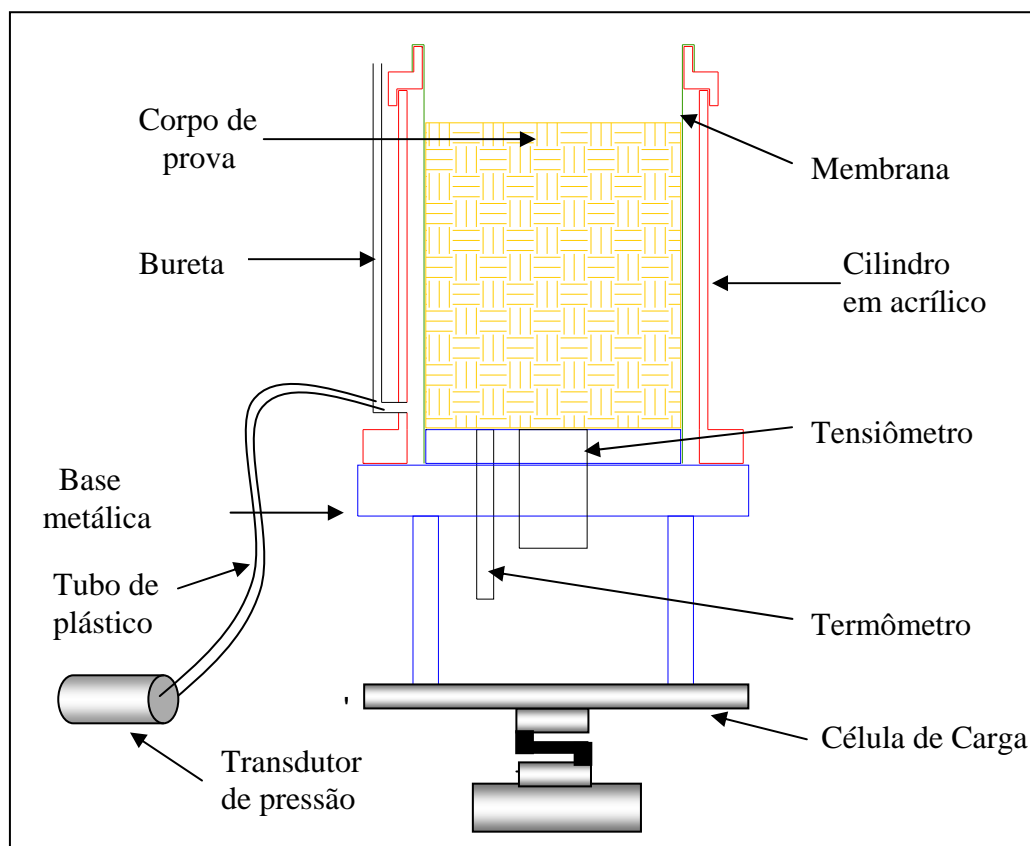


Figura 3.16: Esquema ilustrativo dos principais componentes do ensaio de Ressecamento

3.9.1 Equipamentos Utilizados

Buscou-se para este ensaio uma total automatização na forma de aquisição dos dados, principalmente por ser um ensaio prolongado com duração média de cinco dias ininterruptos. Este fato o torna difícil para ser acompanhado e monitorado de forma manual.

Sistema de Aquisição de Dados

Para se ter um total acompanhamento e monitoração do ensaio foi necessário utilizar um sistema capacitado em realizar leituras e armazenar dados providos de uma diversidade de instrumentos com as mais variadas fontes. Esse dispositivo armazenador de dados é chamado de *datalogger*. Dependendo do modelo do *datalogger*, os dados podem ser lidos diretamente no visor do aparelho ou por meio de um código computacional instalado em um computador, constituindo assim uma interface. Essa interface é feita por um cabo do tipo RS-232, desde que seja configurado o protocolo de comunicação em ambas às faces. Neste trabalho, foi utilizado o modelo ICP. COM 7018 e pode ser observado na figura 3.17. Para esse modelo a leitura dos dados é feita no computador por meio da interface referida anteriormente.

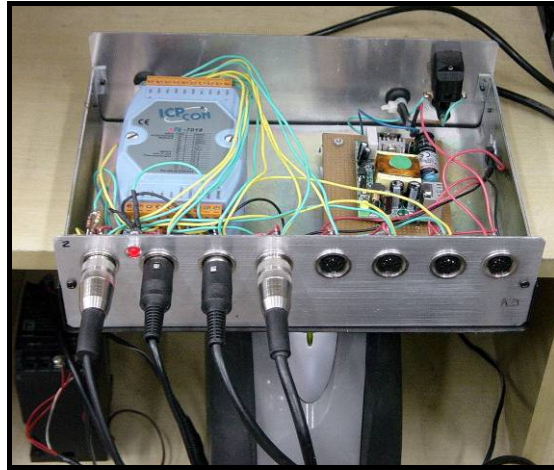


Figura.3.17: Dispositivo armazenador de dados com os quatro conectores do sistema (transdutor de pressão, célula de carga, transdutor de temperatura e tensiômetro), respectivamente.

Sensor de temperatura

A temperatura foi medida por meio de um transdutor de temperatura, no caso, um PT-100, que é um termistor que varia sua resistência linearmente com a temperatura. Este sensor é acoplado a um condicionador que é responsável por tratar, filtrar e amplificar o sinal emitido. Dessa forma, o sinal é convertido para uma faixa de tensão que possa ser lida pelo sistema de aquisição de dados. Na figura 3.18 está ilustrado este sensor.



Figura.3.18: Transdutor de temperatura

O transdutor de temperatura, assim como os demais sensores, foi conectado ao *datalogger*, obtendo-se uma medição contínua da temperatura do solo durante o ensaio de ressecamento.

Transdutor de pressão, Tensiômetro e Pedra Porosa

Para medir a sucção e a variação de volume durante o processo de secagem do solo foram utilizados transdutores de pressão. Esse sensor tem como princípio básico de funcionamento um diafragma que se distende de acordo com a pressão do líquido ou gás atuando em um dos seus lados fechados em um compartimento estanque. Do outro lado desse compartimento, em contato com a pressão atmosférica, encontram-se os extensômetros ou *strain gages* que medem o movimento do diafragma. O valor da resistência elétrica do diafragma varia com esse movimento, sendo possível uma calibração.

Neste estudo a sucção no corpo de prova foi medida por meio de um tensiômetro, desenvolvido por MAHLER & SOUZA (2004) que compreende uma acoplagem de um transdutor de pressão, mais uma pedra porosa a um copo, que pode ser de aço, vidro ou acrílico. A pedra porosa usada neste estudo é de 5 bar, e funciona como uma interface entre solo, água e sistema de medição. O copo onde é inserida a pedra porosa deve apresentar paredes bastante lisas para não permitir a fixação de bolhas de ar. O copo utilizado neste estudo foi de acrílico e desenvolve a função de matriz de todo o conjunto do equipamento, incluindo o transdutor de pressão (MAHLER & SOUZA, 2004) (Figura 3.19 a). Para que esse conjunto funcione de forma adequada, deve-se garantir que haja uma continuidade hidráulica entre a água presente na estrutura do solo com a água da pedra porosa deste equipamento.

O transdutor utilizado neste ensaio permite a medição de sucção de até 1000kPa, sendo composto de um invólucro em aço inoxidável, com acabamento polido

e cabo blindado, com sinal de saída de 1-5 Vcc e alimentação de 10Vcc da marca Ashcroft. (Figura 3.19 b).

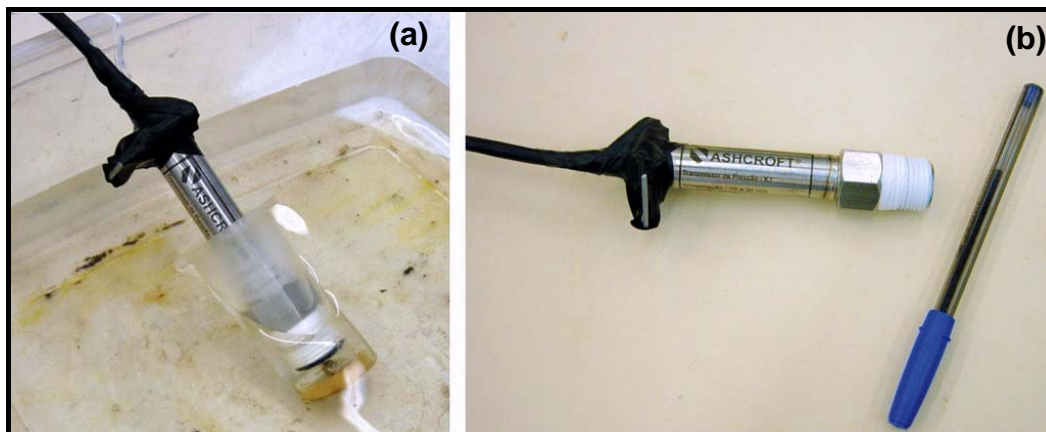


Figura 3.19: (a) Transdutor de pressão acoplado ao copo em acrílico com pedra porosa; (b) Transdutor de pressão, em detalhe, da marca Ashcroft.

Para medir a variação de volume do corpo de prova também se utilizou um transdutor de pressão. Este sensor foi acoplado a um tubo de plástico conectado a uma saída no cilindro em acrílico, de forma a detectar a pressão do líquido exercida pela coluna d'água dentro deste copo (Figura 3.20 a).

Dessa maneira, qualquer variação do corpo de prova (contração ou expansão) dentro do cilindro em acrílico resulta em uma variação da coluna d'água e conseqüentemente será detectada pelo transdutor. A partir da calibração deste sensor constatou-se que para cada 1mm de coluna d'água variada dentro do cilindro em acrílico corresponde a aproximadamente $0,02 \text{ cm}^3$ de variação volumétrica do corpo de prova.

O transdutor de pressão utilizado para medir a variação volumétrica foi da marca Wika (Figura 3.20 b). Este sensor permite a medição de pressões de até 10 kpa, o que corresponde a um peso de 1 metro de coluna d'água.

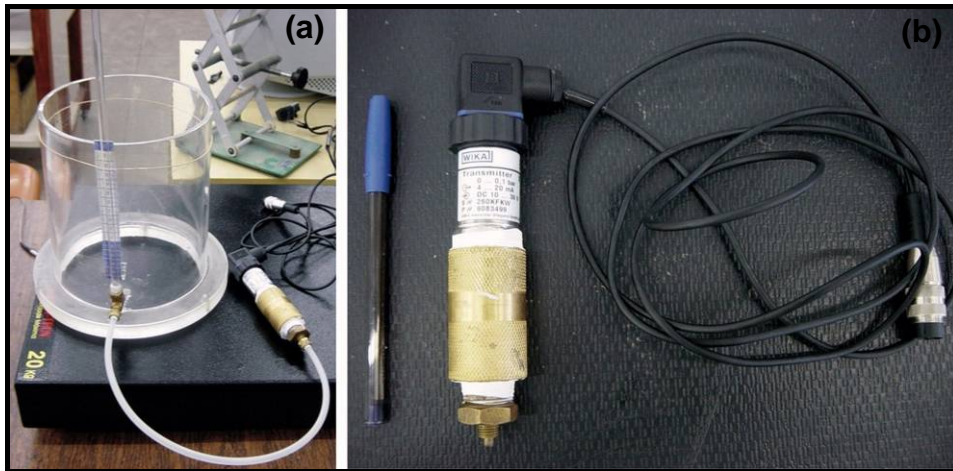


Figura 3.20: (a) Copo em acrílico com transdutor de pressão (b) transdutor de pressão em detalhe

Célula de carga

A célula de carga funciona como um transdutor de medição de força, e tem como princípio de funcionamento a variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro, quando submetido a uma deformação. Utilizam-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo a ponte de Wheatstone (Figura 3.21). Esta ponte é desbalanceada em virtude da deformação dos extensômetros, que é proporcional à força que este provoca. O valor da força aplicada é obtido por meio da medição deste desbalanceamento. Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua deformação. A força atua sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade.

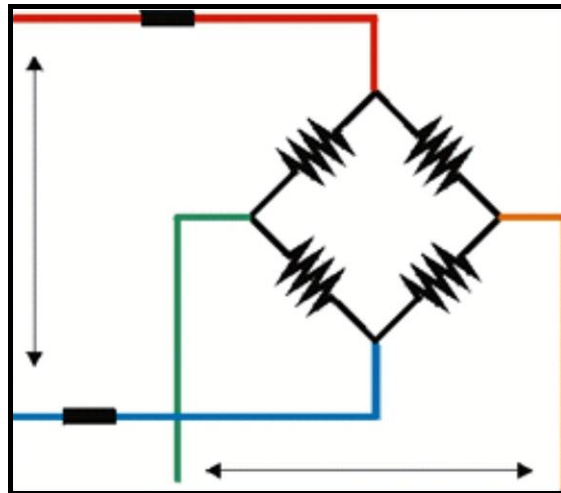


Figura 3.21: Ponte de Wheatstone (fonte: <http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm>)

Neste estudo foi utilizada, para medir a variação do peso do corpo de prova, uma célula de carga da marca Líder Balanças CS-50 (Figura 3.22). Essa célula é feita de alumínio anodizado e possui uma capacidade de carga nominal de 50 kg e sensibilidade de 2mv/v. Ressalta-se que os efeitos da temperatura nessa célula de carga são “compensados”.



Figura 3.22: Célula de carga da marca Líder Balanças Modelo CS-50

Fonte de Alimentação

Todo o fornecimento de energia do sistema foi garantido através de um cabo conectado ao corpo dos instrumentos, que é acoplado a uma fonte de alimentação, passando a gerar sinais analógicos de saída, que são armazenados no dispositivo armazenador de dados (*datalogger*).

3.9.2 Preparação e Montagem do Ensaio

Segundo HUSE (2007) os corpos de prova compactados no tamanho CBR apresentam melhores resultados para o ensaio de ressecamento. Dessa forma, determinou-se apenas a utilização deste tamanho na realização dos ensaios de ressecamento neste estudo.

O ensaio de ressecamento foi realizado com as amostras (HOR. A, HOR. A 5%, HOR. A 10%, HOR. B, HOR. B 5%, HOR. B 10%, HOR. C, HOR. C 5%, HOR. C 10%), todas homogêneas com água em torno da umidade ótima e deixadas em repouso por um período mínimo de 24 horas na câmara úmida.

Em seguida, as amostras foram compactadas em torno das suas respectivas umidades ótimas (w_{ot}), com energia normal, utilizando-se um molde CBR tri-partido encapado em filme plástico (Figura 3.23). Este fato se fez necessário para evitar possíveis danos ao (CP) na hora da extração do mesmo. Seguiu-se a norma NBR – 7182 (ABNT, 1986).



Figura..3.23: Montagem tri-partido – tamanho CBR

Paralelamente à preparação dos (CPs), começou-se a montagem dos equipamentos do ensaio. Primeiramente, garantiu-se a saturação da pedra porosa por meio do procedimento de vácuo seco e posterior vácuo com água destilada e deaerada. Posteriormente, o copo em acrílico já com a pedra porosa, é colocado em vácuo seco na câmara de saturação, por um período mínimo de 24 horas. Após esse período, a câmara é inundada com água, sendo sugada pelo vácuo até que o conjunto esteja submerso, ficando assim por um período mínimo de 12 horas (Figura 3.24).

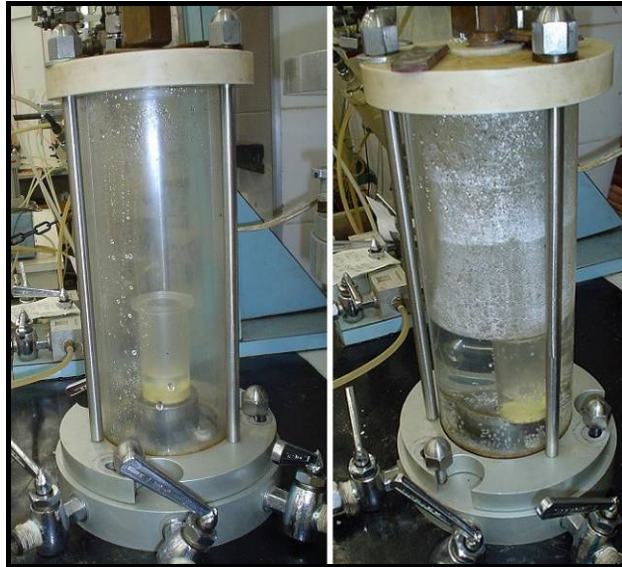


Figura 3.24: (a) Conjunto no vácuo e (b) depois submerso. (Fonte: HUSE 2007)

Depois desta etapa, fez-se a montagem do tensiômetro. Primeiramente, colocou-se teflon envolto a rosca do transdutor e fez-se a saturação do reservatório interno do mesmo, utilizando-se um picet (Figura 3.25 a), a fim de garantir que não haja bolhas de ar dentro do sistema durante a montagem. Em seguida, acoplou-se o copo de acrílico ao transdutor, ambos submersos em água deaerada (Figura 3.25 b). Após a acoplagem, o sistema deve continuar submerso até o momento do início do ensaio para que não ocorra a desaturação da pedra porosa (Figura 3.25 c).



Figura 3.25: (a) Saturação interna do transdutor; (b) Rosqueamento do transdutor no copo de acrílico; (c) Transdutor submerso em água

Finalmente, após estes preparativos, começa-se a montagem do Ensaio de Ressecamento. Inicialmente, foi feita a furação da base do (CP) para a fixação do termômetro (Figura 3.26 a), e o tensiômetro foi acoplado na base metálica. Com a finalidade de garantir o contato entre a pedra porosa e o (CP), foi colocada sobre a base metálica uma pasta de solo, da amostra ensaiada, com uma umidade superior a de compactação (Figura 3.26 b). Em seguida, o (CP) foi retirado do molde tri-partido e colocado sobre a base metálica, já com o tensiômetro acoplado e a pasta de solo entre eles (Figura 3.26 c).

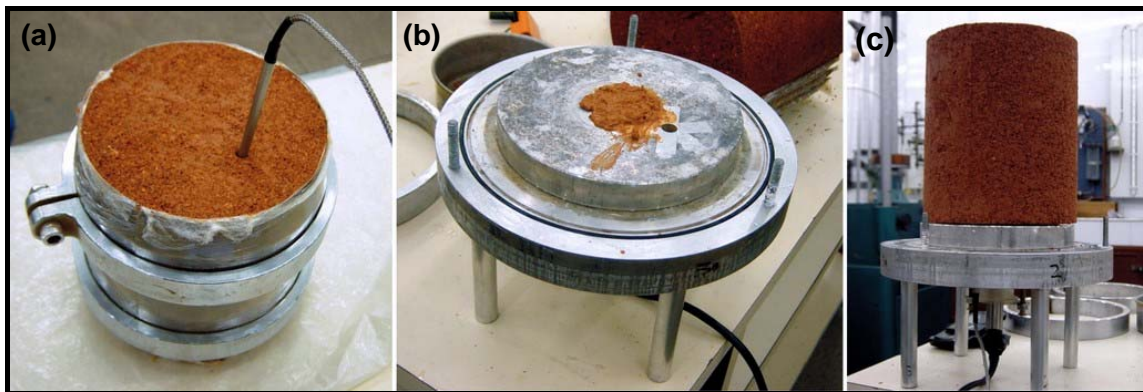


Figura 3.26: (a) transdutor de temperatura acoplado na base do (CP); (b) Pasta de solo sobre o tensiômetro na base metálica; (c) Corpo de prova sobre a base metálica

Depois desse procedimento, colocou-se uma membrana no (CP) com o auxílio do encamisador (Figura 3.27 a e b). Em seguida, esse conjunto foi acoplado no cilindro em acrílico, posteriormente preenchido por água até cobrir por completo o (CP) (Figura 3.27 c).

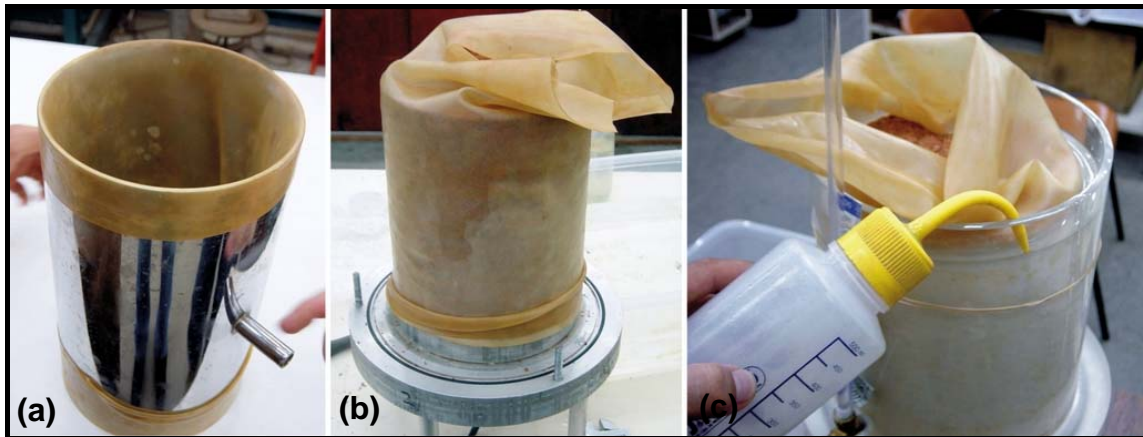


Figura 3.27: (a) Encamisador já com a membrana; (b) Corpo de prova com a membrana; (c) Preenchimento do cilindro em acrílico com água.

Na sequência, colocou-se todo o conjunto em cima da célula de carga (Figura 3.28 a). A partir de então são obtidos dados de temperatura na base do (CP), sucção e peso. Por ultimo, foi acoplado o transdutor de pressão ao tubo de plástico conectado a uma saída de água no cilindro em acrílico (Figura 3.28 b). Ressalta-se que foram tomados os cuidados necessários para eliminar possíveis bolhas de ar presentes tanto no reservatório interno do transdutor quanto no tubo de plástico.

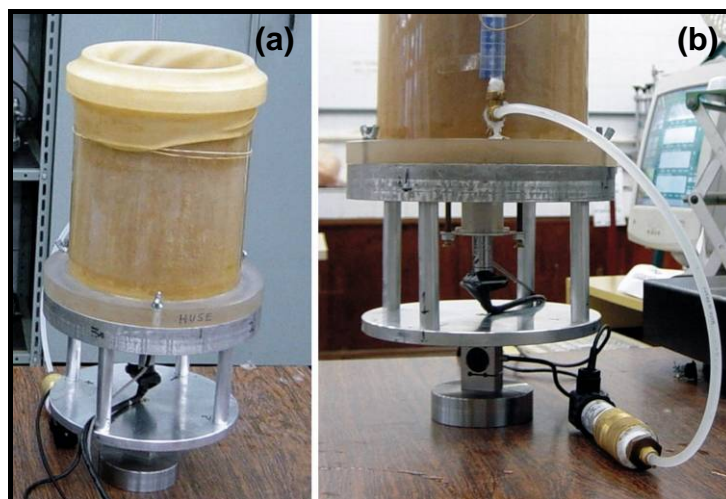


Figura 3.28: (a) Conjunto dos equipamentos sobre a célula de carga; (b) transdutor de pressão conectado ao tubo de plástico.

A partir desse momento todos os dados foram monitorados: umidade (de forma indireta), variação volumétrica, temperatura, sucção e peso. Dessa forma, constitui-se o Ensaio de Ressecamento (Figura 3.29).

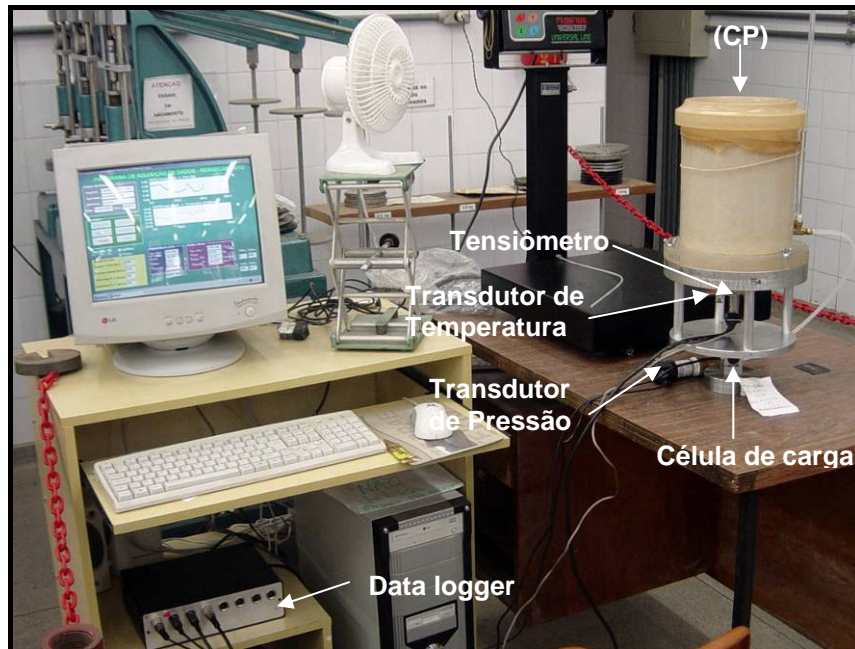


Figura 3.29: Ensaio de Ressecamento completo

Os dados obtidos neste ensaio foram coletados na primeira hora em intervalos de 20 segundos, e depois espaçados para intervalos de 20 minutos. A duração média foi de cinco dias sendo encerrado quando a sucção e o volume apresentaram-se estabilizados. Com o intuito de acelerar o ressecamento colocou-se um pequeno ventilador sobre um macaco hidráulico próximo ao experimento sobre o (CP).

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização física, físico-química e mineralógica dos constituintes. Também serão discutidos os ensaios de compactação, condutividade hidráulica, retenção de água (curva característica) e Ressecamento.

4.1 Granulometria

Os resultados da análise granulométrica dos horizontes A, B e C, suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) e da bentonita pura estão expostos nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 e nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

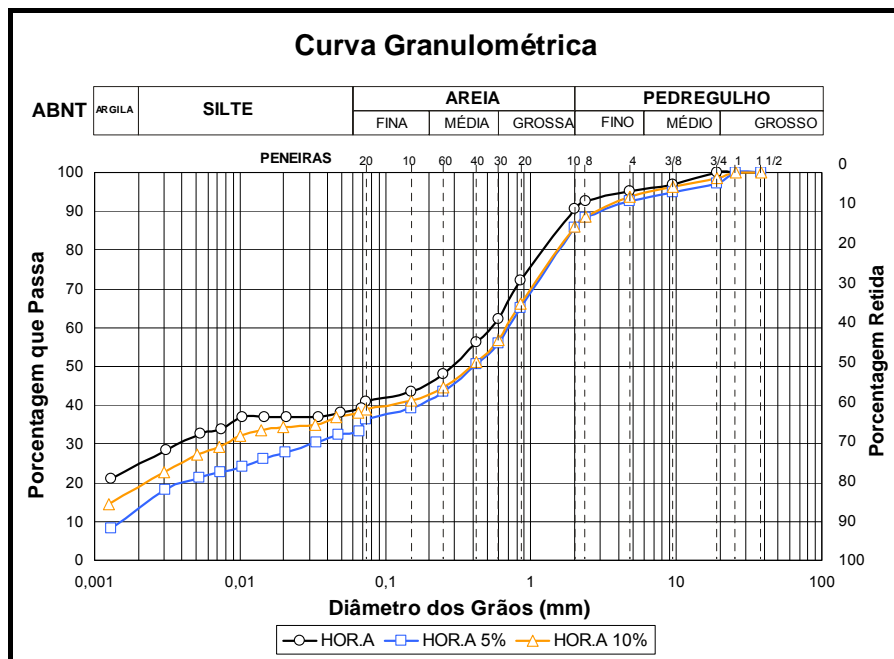


Figura 4.1: Curva granulométrica correspondente ao horizonte A e suas respectivas misturas.

Tabela 4.1: Dados obtidos por meio da combinação do método do peneiramento e da sedimentação para o horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)

	Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
HOR.A	25	14	7	16	29	9
HOR.A 5%	13	20	9	14	30	14
HOR.A 10%	19	19	5	14	29	14

Conforme observado na Tabela 4.1 e na sua respectiva curva granulométrica da Figura 4.1, a composição predominante do horizonte A é areno-argilosa, com cerca de 52% de materiais na fração areia. Com a adição de bentonita na mistura, ao contrário do que era esperado, o teor de argila diminuiu. FARNESI (2006) encontrou resultados semelhantes e levantou duas hipóteses para o ocorrido. A primeira diz que poderia ter acontecido uma ação aglutinadora por parte da bentonita, que agregou os grãos de argila, de modo que os diâmetros das aglomerações formadas ficaram superiores ao do horizonte A puro. A segunda hipótese seria uma possível reação química da bentonita com o agente defloculante utilizado (hexametáfosfato de sódio).

Com o intuito de verificar estas duas hipóteses FARNESI (2006) realizou análises granulométricas dos solos sem a utilização de defloculante e chegou as seguintes considerações: para a bentonita pura não se alterou a quantidade de finos. Desta forma, supõe-se que as reações da bentonita com o agente defloculante é pequena. Verificou-se também que com a adição de bentonita no solo houve um decréscimo na porcentagem de finos em relação à amostra natural. Este fato reforça a possibilidade deste material estar atuando como agente aglutinante.

Na Figura 4.2 e na Tabela 4.2, observa-se que a composição granulométrica predominante no horizonte B é a areia com 54%, seguido de argila com 18%, sendo a amostra caracterizada como areno-argilosa. As misturas com bentonita (5% e 10%) resultaram em um ligeiro aumento na porcentagem de finos, exceto o HOR. B 5% que apresentou uma quantidade inferior no teor de argila. Ressalta-se que foi verificado nesta amostra um aumento de 10% na fração pedregulho, fato esse que pode ser

justificado por um erro na execução do ensaio na parte de quarteamento do material, e desta forma influenciou na porcentagem granulométrica total.

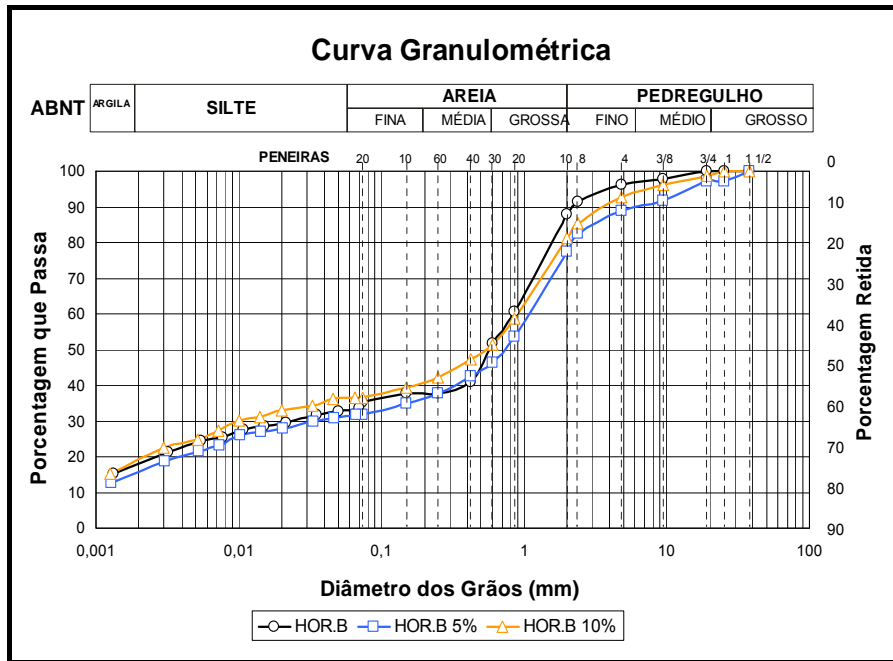


Figura 4.2: Curva granulométrica correspondente ao Horizonte B e suas respectivas misturas

Tabela 4.2: Dados obtidos por meio da combinação do método do peneiramento e da sedimentação para o horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

	Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
HOR.B	18	15	4	14	36	12
HOR.B 5%	16	16	5	10	31	22
HOR.B 10%	19	17	5	11	30	19

No entanto, verifica-se que o horizonte B comporta-se de forma semelhante ao horizonte A apresentado anteriormente, sendo que o comportamento da bentonita adicionada a este solo é menos "aglutinador". Isto pode estar associado ao fato deste horizonte possuir uma quantidade menor de finos do que o horizonte A. Desta maneira a reação da bentonita estaria restrita apenas às partículas mais finas presentes no solo natural.

Pode-se observar na Figura 4.3 e na Tabela 4.3 que o horizonte C possui na sua composição granulométrica predominância de material arenoso com 78%, seguido da fração silte com 16%. Essa amostra é caracterizada como areno-siltosa. Também pode ser verificado que com a adição de bentonita há um acréscimo no percentual de argila do solo, ao contrário do ocorrido nos outros dois horizontes (A e B). Este fato reforça a idéia de que a bentonita só funciona como agente "aglutinador" nas partículas mais finas do solo.

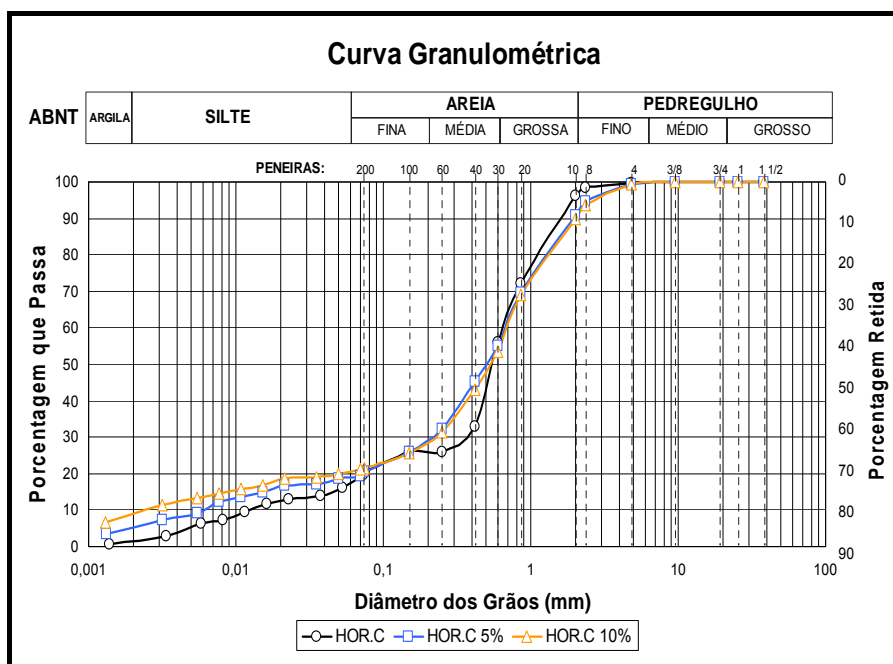


Figura 4.3: Curva granulométrica correspondente ao Horizonte C e suas respectivas misturas

Tabela 4.3: Dados obtidos por meio da combinação do método do peneiramento e da sedimentação para o Horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%)

	Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
HOR.C	2	16	8	30	40	4
HOR.C 5%	5	14	10	26	36	9
HOR.C 10%	9	12	8	25	36	10

A Figura 4.4 e Tabela 4.4 apresentam resultados da bentonita pura. Verifica-se que a amostra é formada predominantemente por finos com 64% de argila, seguido de 27% de silte, totalizando 91%. Desta forma, este material é caracterizado como argilo-siltoso.

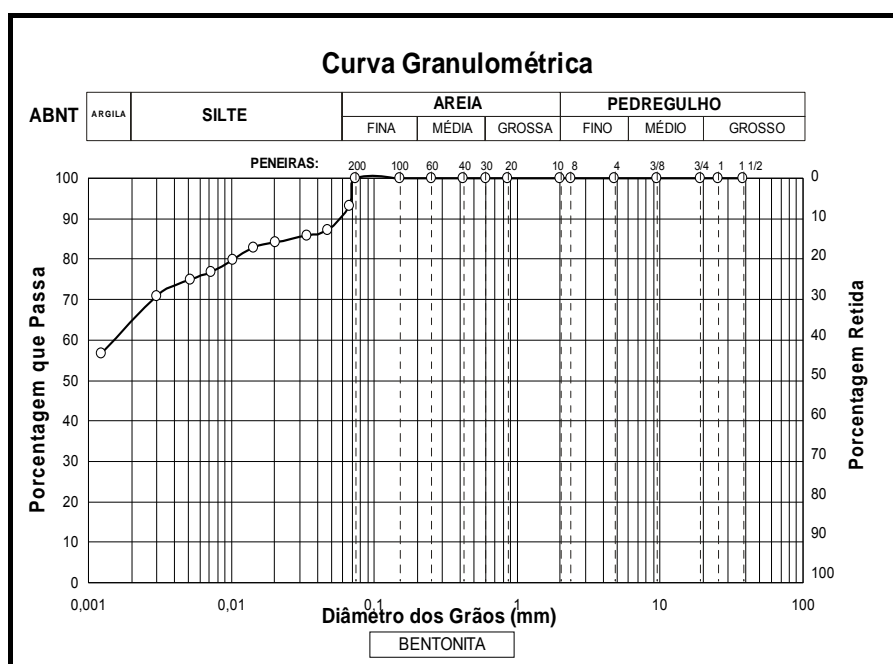


Figura 4.4: Curva granulométrica correspondente a Bentonita

Tabela 4.4: Dados da granulometria da bentonita pura

	Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
Bentonita	64	27	9	0	0	0

No entanto, este resultado encontrado difere dos demais apresentados na literatura para essa mesma bentonita ativada. LUKIANTCHUKI (2007) E HUSE (2007), por exemplo, encontraram 74% de argila e 11% de silte e 86,6% e 13% de silte, respectivamente. Este fato pode ser explicado pela forma como foi preparado o ensaio, considerando a quantidade do material utilizado e o tempo de repouso no defloculante. Ressalta-se que para este estudo foram utilizados apenas 30g de

bentonita e a mesma foi deixada em repouso por 72 horas, enquanto que LUKIANTCHUKI (*op cit*) usou apenas 25g de bentonita e a deixou em repouso por 5 dias. HUSE (*op. cit*) não especificou se houve alguma alteração na norma para preparação do ensaio.

4.2 Densidade Real dos Grãos

Os resultados da densidade real dos grãos dos horizontes A, B e C e de suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 : Resultados da Densidade Real dos Grãos

Densidade Real dos grãos		
HOR.A	HOR.A 5%	HOR.A 10%
2,58	2,62	2,63
HOR.B	HOR.B 5%	HOR.B 10%
2,58	2,61	2,63
HOR.C	HOR.C 5%	HOR.C 10%
2,6	2,61	2,62

De acordo com a Tabela 4.5 pôde-se verificar que com a adição de bentonita no solo, houve um ligeiro aumento no valor da densidade real dos grãos em todos os horizontes. Esse fato já era esperado, uma vez que a bentonita pura é um material de granulometria mais fina e possui um valor de densidade real dos grãos próximo a 2,78 (FERRARI, 2005).

4.3 Limites de Atterberg

Os resultados do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade dos horizontes A, B e C e de suas respectivas misturas com bentonita

(5% e 10%) são apresentados na Tabela 4.6. Ressalta-se que as amostras estudadas foram classificadas segundo Sucs.

A bentonita pura foi analisada pelo Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP onde se constataram-se valores elevados para o LL, LP e IP (543%, 62% e 481%, respectivamente).

Tabela 4.6: Resultados dos ensaios de LL, LP e IP e a classificação das amostras estudadas segundo Sucs (Sistema unificado de classificação de solos).

Amostras	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação Sucs
HOR.A	46	29	17	Argila orgânica de média a alta plasticidade
HOR.A 5%	59	30	29	Argila inorgânica de alta plasticidade
HOR.A 10%	75	32	43	Argila inorgânica de alta plasticidade
HOR.B	45	24	20	Argila inorgânica de mediana plasticidade
HOR.B 5%	63	28	35	Argila inorgânica de alta plasticidade
HOR.B 10%	77	29	48	Argila inorgânica de alta plasticidade
HOR.C	x	x	NP	Não plástico
HOR.C 5%	42	23	19	Argila inorgânica de mediana plasticidade
HOR.C 10%	70	26	44	Argila inorgânica de alta plasticidade

Verifica-se na Tabela 4.6 que a adição de bentonita aos horizontes A, B e C fez com que estes melhorassem suas condições de trabalhabilidade, ou seja, o solo torna-se mais plástico. Este fato já era esperado, uma vez que a bentonita possui uma elevada superfície específica e por conseqüência retêm bastante água tornando os materiais mais plásticos.

Segundo o Sucs as amostras dos horizontes A e B passaram de uma argila de média plasticidade para uma argila de alta plasticidade. Destaque-se a melhora nas condições do horizonte C, que no seu estado natural foi considerado não plástico e após a adição de 10 % de bentonita modificou-se para argila de alta plasticidade.

MESRI & OLSON (1971) concluíram em seu estudo que quanto maior o índice de plasticidade da argila menor será a condutividade hidráulica obtida. Dessa forma, espera-se para esta pesquisa uma diminuição do valor de k em função dos resultados encontrados. Ressalta-se também que esses valores expostos na Tabela 4.6 estão de acordo com os recomendados por alguns órgãos e autores (BAGCHI, 1994, BENSON

et al., 1994, CETESB, 1993; DANIEL, 1993 e EPA, 1989) para serem utilizados como camada selante.

Limite de Contração

Na Tabela 4.7 estão expostos os resultados do limite de contração para todas as amostras estudadas referentes aos horizontes A, B e C puros e suas respectivas misturas com bentonita (5 e 10%).

Tabela 4.7: Resultados do limite de contração das amostras referentes aos horizontes A, B e C puros e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Amostras	Limite de contração (%)
HOR.A	14
HOR.A 5%	17
HOR.A 10%	20
HOR.B	15
HOR.B 5%	19
HOR.B 10%	20
HOR.C	11
HOR.C 5%	16
HOR.C 10%	17
Bentonita	58

Observa-se na Tabela 4.7 que a bentonita pura possui um elevado limite de contração (Figura 4.5). Quando este material é adicionado, em pequenas quantidades, nos horizontes A, B e C puros, afeta sensivelmente o valor do limite de contração (LC) dessas amostras, ou seja, aumenta o comportamento de contração.

Devido à alta contração apresentada pela bentonita pura em ensaios realizados de acordo com a norma NBR 7183 (ABNT, 1982) com amostras submetidas à temperatura de 110 °C (Figura 4.5), decidiu-se simular o mesmo ensaio, porém com este material secando sob temperatura ambiente (Figura 4.6).



Figura 4.5: Foto ilustrativa da contração da bentonita quando submetida a 110°C.

Segundo VARGAS (1978) este comportamento fica evidenciado em solos contendo argila muito ativa, que é o caso da bentonita. Os resultados do Índice de Atividade de Skempton (IA), expostos na Tabela 4.8, confirmam o comportamento das amostras estudadas.

Ressalta-se que quando há no solo uma constante perda de umidade, ocorre uma retração dos meniscos capilares, conseqüentemente aumentando a pressão capilar. Depois que estas pressões atingirem valores que ultrapassem a resistência à tração das argilas, surgem as trincas, que comprometem o bom funcionamento de uma camada selante. No entanto, a bentonita utilizada neste estudo quando submetida à temperatura ambiente, comportou-se de forma diferente. Depois de passado um mês do início do ensaio verificou-se que apesar de ter ocorrido uma grande variação volumétrica (igual ao ensaio normatizado a 100 °C) não se formaram pronunciadas trincas externas (Figura 4.6 c). Este fato pode estar associado ao poder de “cicatrização” desta bentonita, mencionado no item 2.6.

Supõe-se que quando este material é exposto à temperatura ambiente, inicialmente contrai rapidamente formando algumas trincas superficiais (Figura 4.6 a), embora não variando muito de volume. Porém ao longo do tempo começa a ocorrer uma troca de umidade entre a amostra e a atmosfera, favorecendo a “regeneração” destas trincas.

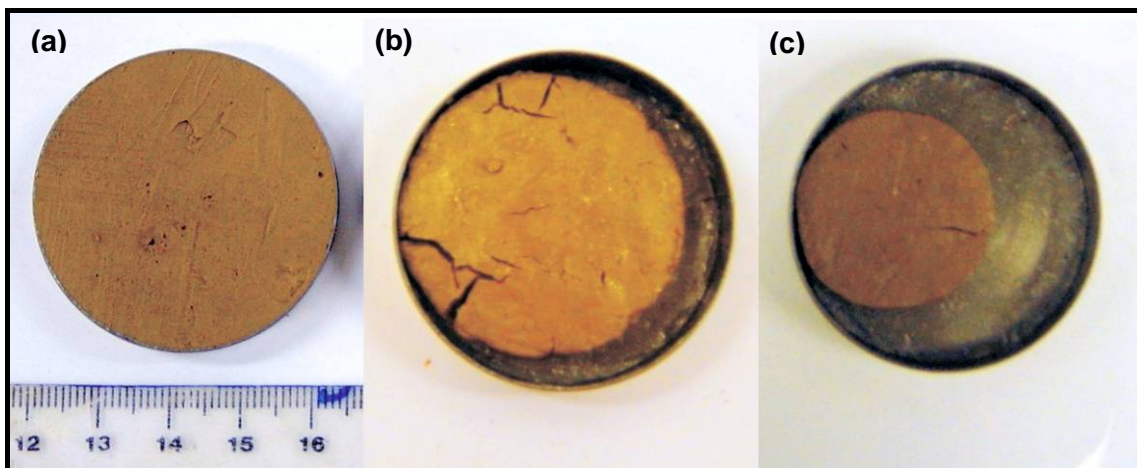


Figura 4.6: foto ilustrativa da bentonita pura durante a evolução da contração sob temperatura ambiente. (a) início do ensaio; (b) 24hs de ensaio; (c) 1 mês de ensaio.

Atividade de Skempton

Os resultados de *IA* das amostras estudadas e suas classificações encontram-se na Tabela 4.8. Percebe-se que os horizontes A, B e C puros apresentam argilominerais inativos, normais e inativos, respectivamente. Quando se adiciona bentonita na mistura há uma mudança na atividade das amostras, passando a se comportar como ativa. Este fato justifica o comportamento das amostras quanto ao limite de contração discutido anteriormente.

Tabela 4.8: Valores do índice de atividade (*IA*) de Skempton para as amostras estudadas

Amostras	IA	Tipo de argila
HOR.A	0,67	Inativa
HOR.A 5%	2,23	<i>Ativa</i>
HOR.A 10%	2,26	<i>Ativa</i>
HOR.B	1,13	Normal
HOR.B 5%	2,22	<i>Ativa</i>
HOR.B 10%	2,51	<i>Ativa</i>
HOR.C	x	Inativa
HOR.C 5%	3,84	<i>Ativa</i>
HOR.C 10%	4,92	<i>Ativa</i>
BENTONITA	7,52	<i>Ativa</i>

4.4 Potencial Hidrogeniônico e ΔpH

Os resultados das medidas do pH em água, em KCl (1N) e também do ΔpH para os horizontes A, B e C e de suas respectivas misturas (5% e 10%), além da bentonita pura, estão apresentados na tabela 4.9. Com estes valores, pode-se determinar a carga líquida superficial das amostras estudadas. Também fica constatado que os horizontes A, B e C puros têm um caráter ácido, sendo a amostra (HOR. A) mais ácida que as demais, pois esta possui matéria orgânica e encontra-se em um estágio mais avançado de intemperismo.

Observou-se também que a adição de bentonita tornou mais alcalina as amostras estudadas. Isto pode ser justificado pelo fato da bentonita pura possuir um pH mais elevado quando comparado com as amostras dos horizontes A, B e C puros. Desta forma, este material apresenta-se com caráter alcalino.

Tabela 4.9: Resultados da medição do pH das amostras com H_2O e KCl e o valor de ΔpH para as mesmas.

pH das amostras			
Amostras	H_2O	KCl	ΔpH
HOR.A	5,1	4,6	-0,5
HOR.A 5%	8,6	7,1	-1,5
HOR.A 10%	8,6	7,4	-1,2
HOR.B	5,5	4,7	-0,8
HOR.B 5%	9,0	7,9	-1,1
HOR.B 10%	9,1	7,9	-1,2
HOR.C	5,7	5,5	-0,2
HOR.C 5%	9,8	9,1	-0,7
HOR.C 10%	10,0	8,9	-1,1
BENTONITA	11,1	8,7	-2,4

Os valores de ΔpH obtidos indicaram que todas as amostras de solo estudadas têm predominância de carga líquida superficial negativa, tendo preferência em adsorver maiores quantidades de cátions do que de ânions. Destaque-se que com a

adição de bentonita, a eletronegatividade das misturas aumentou, ou seja, passou a ter uma maior quantidade de carga líquida superficial negativa.

A bentonita, por sua vez, também possui predominância de carga líquida superficial negativa, fato esse que já era esperado, pois este material está carregado eletronegativamente devido ao desbalanceamento de cargas na sua estrutura.

4.5 Composição Mineralógica

As análises mineralógicas realizadas por difratometria de Raios-X estão representadas nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. Este ensaio foi realizado para fração argila dos horizontes A, B e C e de suas respectivas misturas (5% e 10%), assim como para a bentonita pura. Ressalta-se que estes difratogramas apresentados referem-se somente às amostras guia (natural), ou seja, sem tratamento prévio.

Os difratogramas referentes às amostras normal, glicolada e aquecida dos horizontes A, B e C encontram-se nos anexo II.

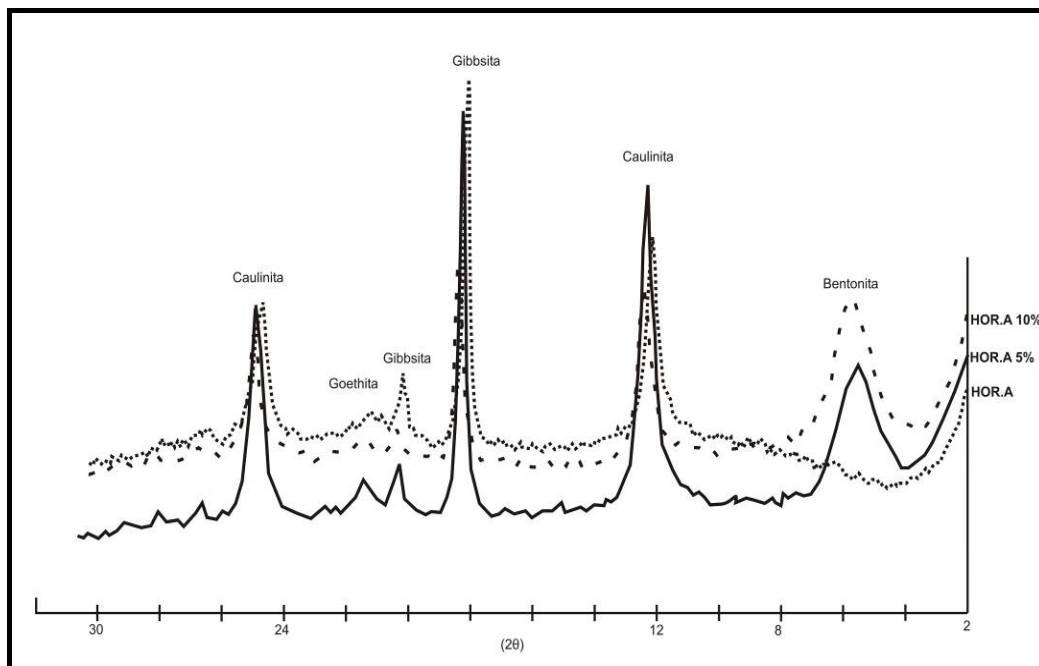


Figura 4.7: Difratoograma referente a fração argila do Horizonte A e de suas respectivas misturas (5% e 10%).

Na Figura 4.7 observa-se que na fração argila do horizonte A, os minerais que aparecem na forma de picos representativos são predominantemente, a gibbsita e a caulinita, e traços de goethita. Essa ordem é determinada pela intensidade dos picos. Quando se adicionou bentonita nas amostras, apareceu no difratograma um novo pico representativo desse material. Ressalta-se que este pico, na verdade, representa os argilominerais do grupo da esmectita, e que “bentonita” é apenas o nome genérico.

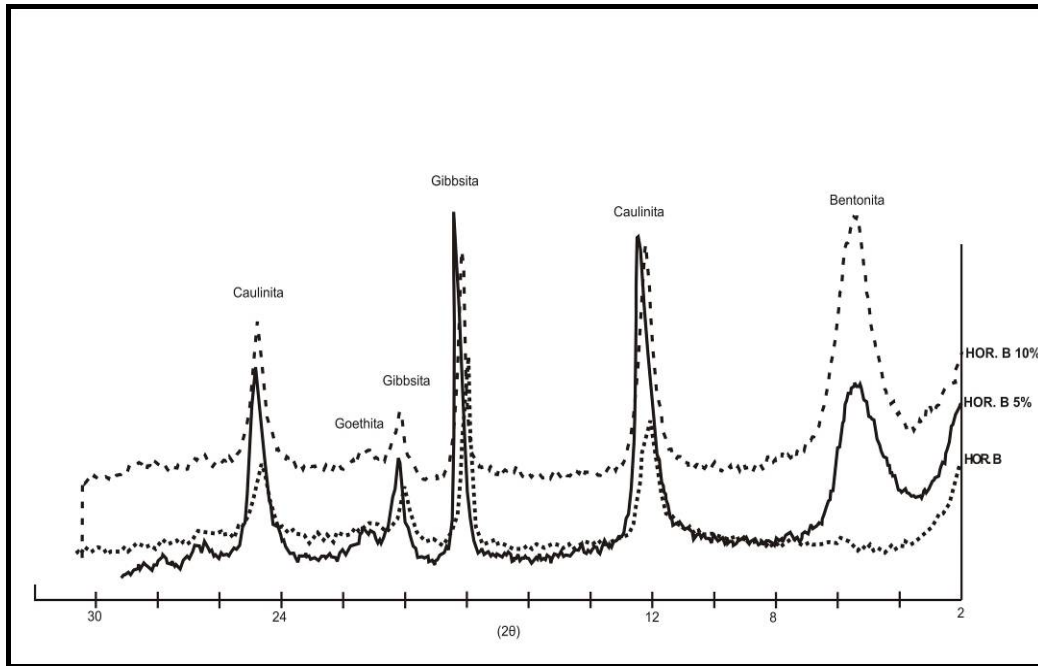


Figura 4.8: Difratoograma referente a fração argila do Horizonte B e de suas respectivas misturas (5% e 10%).

Na Figura 4.8 referente ao Horizonte B e suas respectivas misturas (5% e 10%) pôde-se observar que essa amostra possui os mesmos argilominerais do horizonte A (gibbsita, caulinita e traços de goethita). Verifica-se que com a adição de bentonita apareceu no difratograma um novo pico representativo desse material.

Nota-se que nesta amostra há um aumento na intensidade do pico representativo da bentonita quando comparada ao horizonte A (Figura 4.7). Este fato pode ser explicado pela menor quantidade de argilominerais presentes na amostra pura deste solo, com isso a tendência é que a bentonita predomine na mistura.

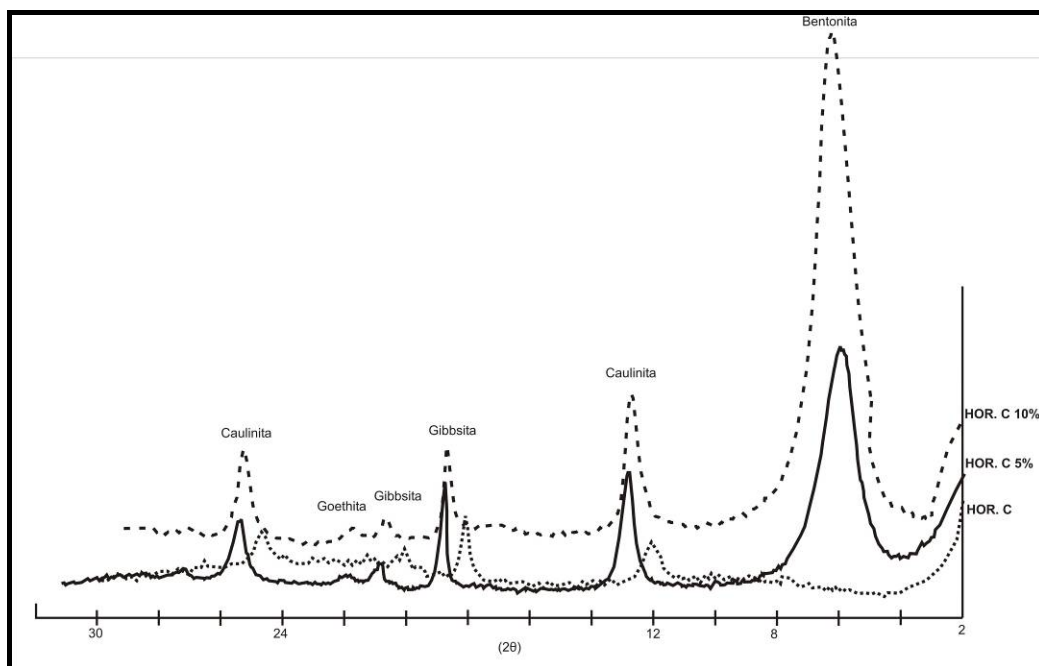


Figura 4.9: Difratoograma referente a fração argila do Horizonte C e de suas respectivas misturas (5% e 10%).

Na Figura 4.9 referente ao horizonte C e suas respectivas misturas (5% e 10%) pôde-se observar que essa amostra possui os mesmos argilominerais do horizonte A e B (gibbsita, caulinita e traços de goethita). Verifica-se que com a adição de bentonita apareceu no difratograma um novo pico representativo desse material.

Nota-se que nesta amostra também há um aumento na intensidade do pico representativo da bentonita quando comparada aos horizontes A e B (Figura 4.7 e 4.8, respectivamente). Este fato pode ser explicado pela menor quantidade de argilominerais presentes na amostra pura deste solo, com isso a tendência é que a bentonita predomine na mistura.

Na Figura 4.10 observa-se o pico representativo dos argilominerais do grupo da esmectita, chamado, neste caso, de bentonita. Para este ensaio utilizou-se somente a amostra de bentonita pura cedida pela Bentonit União Nordeste.

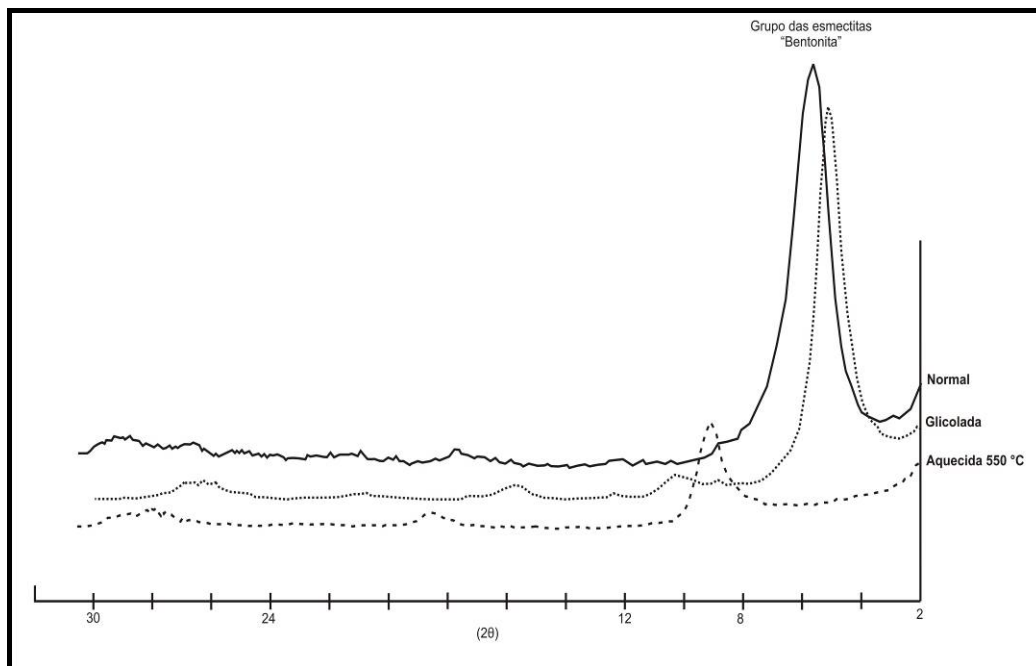


Figura 4.10: Difratoograma referente a Bentonita pura utilizada neste estudo.

4.6 Compactação

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 são ilustradas as curvas de compactação referente às amostras dos horizontes A, B e C com suas respectivas misturas (5% e 10%). Também se observam nessas figuras as curvas que representam o grau 100% de saturação para cada amostra estudada. Na Tabela 4.10 são apresentados os valores de umidade ótima (w_{ot}) e da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) encontrados por meio destas curvas.

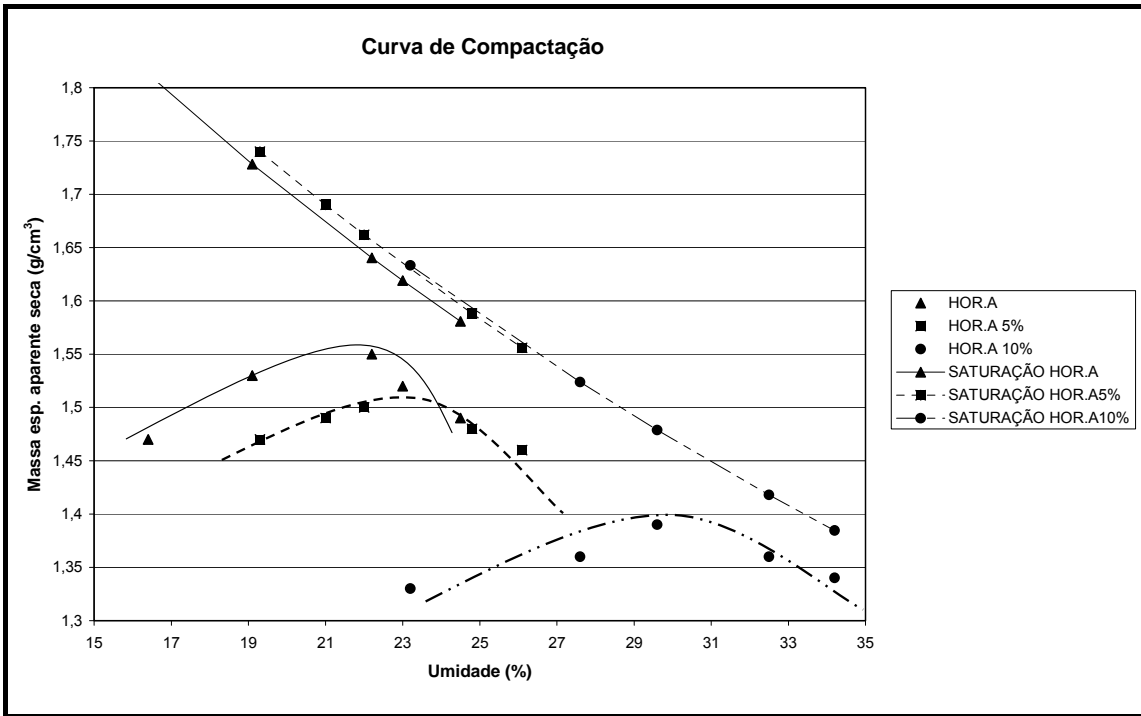


Figura 4.11: Curva de compactação referente ao Horizonte A e de suas respectivas misturas (5% e 10%).

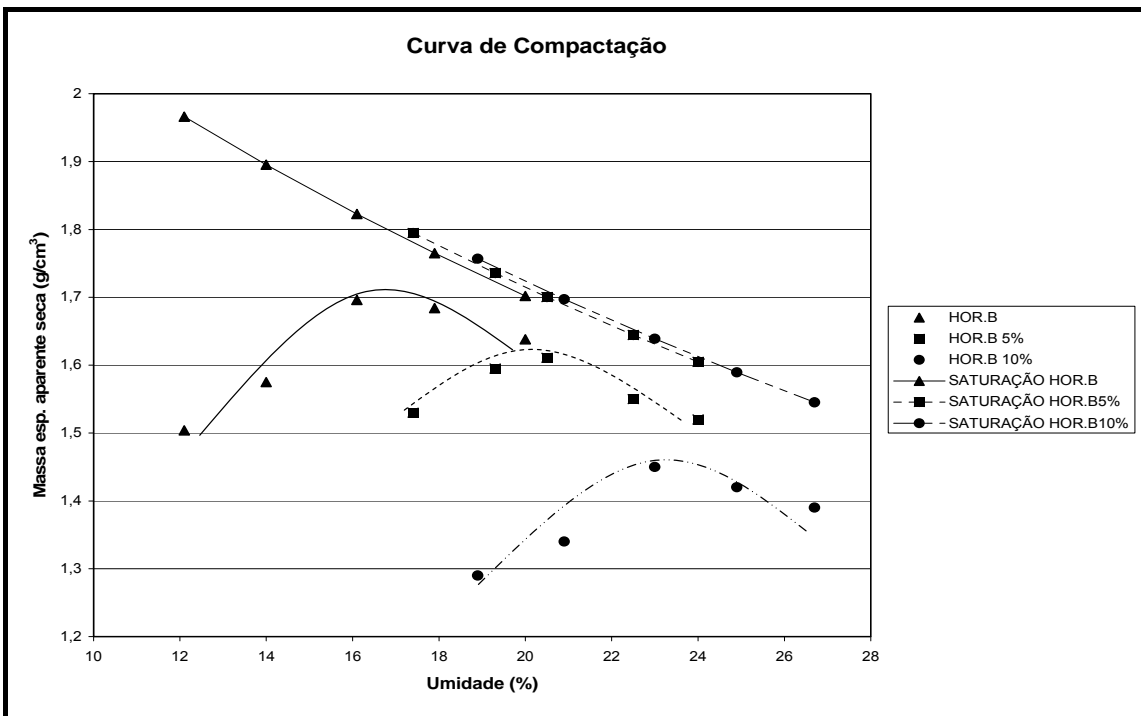


Figura 4.12: Curva de compactação referente ao Horizonte B e de suas respectivas misturas (5% e 10%).

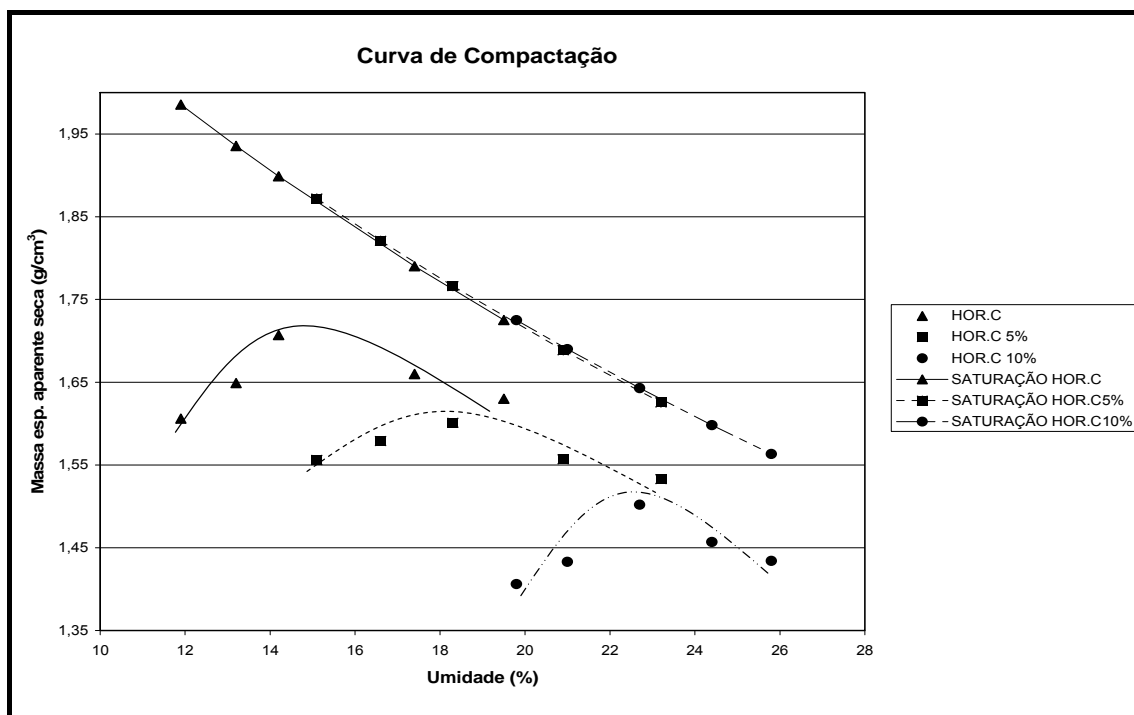


Figura 4.13: Curva de compactação referente ao Horizonte C e de suas respectivas misturas (5% e 10%).

Tabela 4.10: Parâmetros de compactação Proctor Normal das amostras estudadas

Amostras	W_{ot}	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)
HOR. A	22,0	1,56
HOR. A 5%	23,2	1,52
HOR. A 10%	30,3	1,40
HOR. B	17,2	1,71
HOR. B 5%	20,2	1,63
HOR. B 10%	23,1	1,46
HOR. C	14,7	1,71
HOR. C 5%	18,3	1,61
HOR. C 10%	22,7	1,52
BENTONITA	50	0,91

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 e na Tabela 4.10 pôde-se verificar que com a adição de bentonita há um aumento na umidade ótima (w_{ot}) e uma diminuição na massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) das amostras quando comparados aos horizontes A, B e C puros. Isto pode ser justificado pelo fato da bentonita pura ter uma elevada umidade ótima (50%) e uma baixa massa específica aparente seca máxima (0,91).

A bentonita quando presente na mistura, mesmo em pequenas quantidades, faz com que os Horizontes A, B e C desempenhem papéis semelhantes a um solo extremamente argiloso explicado pela a sua alta reatividade. Ressalta-se que esses valores estão de acordo com a literatura, que prevê uma umidade ótima maior para solos argilosos do que para solos arenosos, principalmente pelo fato dos materiais argilosos apresentarem uma maior capacidade de reter água. Por outro lado, a massa específica aparente seca máxima é menor nos solos argilosos, pois estes se adaptam com maior facilidade a modificação estrutural do solo ao longo da curva de compactação.

4.7 Condutividade Hidráulica

Na Tabela 4.11 estão expostos os resultados referentes à condutividade hidráulica das amostras dos horizontes A, B e C puros e com suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Tabela 4.11: Resultados da condutividade hidráulica das amostras deformadas dos horizontes A, B e C e de suas misturas com bentonita (5% e 10%)

Amostras	Condutividade Hidráulica k (cm/s)
HOR. A	$6,7 \times 10^{-5}$
HOR. A 5%	$1,3 \times 10^{-6}$
HOR. A 10%	$1,2 \times 10^{-7}$
HOR. B	$5,1 \times 10^{-6}$
HOR. B 5%	$1,5 \times 10^{-7}$
HOR. B 10%	$1,2 \times 10^{-7}$
HOR. C	$7,4 \times 10^{-4}$
HOR. C 5%	$7,9 \times 10^{-7}$
HOR. C 10%	$1,6 \times 10^{-7}$
BENTONITA	10^{-9}

A partir da Tabela 4.11 verificou-se que a adição de bentonita nos horizontes A, B e C, mesmo em pequenas quantidades, foi suficiente para reduzir o valor de k em

até três ordens, que foi o caso da amostra do horizonte C. Quanto maior a porcentagem de bentonita adicionada na mistura maior a redução de “k”.

Destacam-se na Tabela 4.11 as amostras (HOR. A 10%, HOR. B 5%, HOR. B 10% e HOR. C 10%) que alcançaram o valor de 10^{-7} cm/s, que é tido por inúmeros autores (BAGCHI, 1994; CETESB, 1993; EPA, 1989) como máximo para a construção de camadas selantes. Desta forma fica comprovado a capacidade destes materiais para uso em sistemas de selagem.

Ressalta-se que os valores encontrados neste estudo foram estabelecidos com apenas três dias de ensaio. HOEKS *et al.* (1987), por exemplo, observaram que a condutividade hidráulica ainda decresce por um período de 2-3 meses, pois o alto poder expansivo da bentonita ocorre por um determinado período de tempo. Desta forma, espera-se que as amostras (HOR. A 5% e HOR. C 5%) que não alcançaram o valor tido como ideal (10^{-7} cm/s) para serem utilizadas como camada selante possam atingir tal valor com o decorrer do tempo.

De forma a verificar a influência da estrutura na condutividade hidráulica dos horizontes A, B e C naturais (sem adição de bentonita) determinou-se este parâmetro em amostras indeformadas. Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados do ensaio de condutividade e também as profundidades que as amostras foram coletadas no campo.

Tabela 4.12: Resultados da condutividade hidráulica das amostras indeformadas dos horizontes A, B e C.

Amostras	Profundidade (cm)	Condutividade Hidráulica k (cm/s)
HOR. A	40	$4,7 \times 10^{-3}$
HOR. B	190	$5,4 \times 10^{-3}$
HOR. C	490	$1,8 \times 10^{-3}$

Verifica-se na Tabela 4.12 que o menor valor de k obtido foi para o horizonte C, ao contrário do que se esperava. Este horizonte apesar de ser o mais arenoso em comparação com os outros dois (A e B), apresenta uma porosidade fechada, ou seja,

grande parte dos poros não estão interconectados entre si, por isso, o fluido encontra maiores dificuldades para percolar no solo. Este fato é melhor explicado no item 3.5.1 que destaca a micromorfologia dos materiais.

4.8 Curva Característica

Nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 estão ilustradas as curvas características referentes às amostras dos horizontes A, B e C puros e de suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%). Ressalta-se que para este ensaio foi necessário a utilização de mais uma proporção (2,5% de bentonita) para que se pudesse verificar com mais confiabilidade a influência da bentonita na retenção de água das amostras.

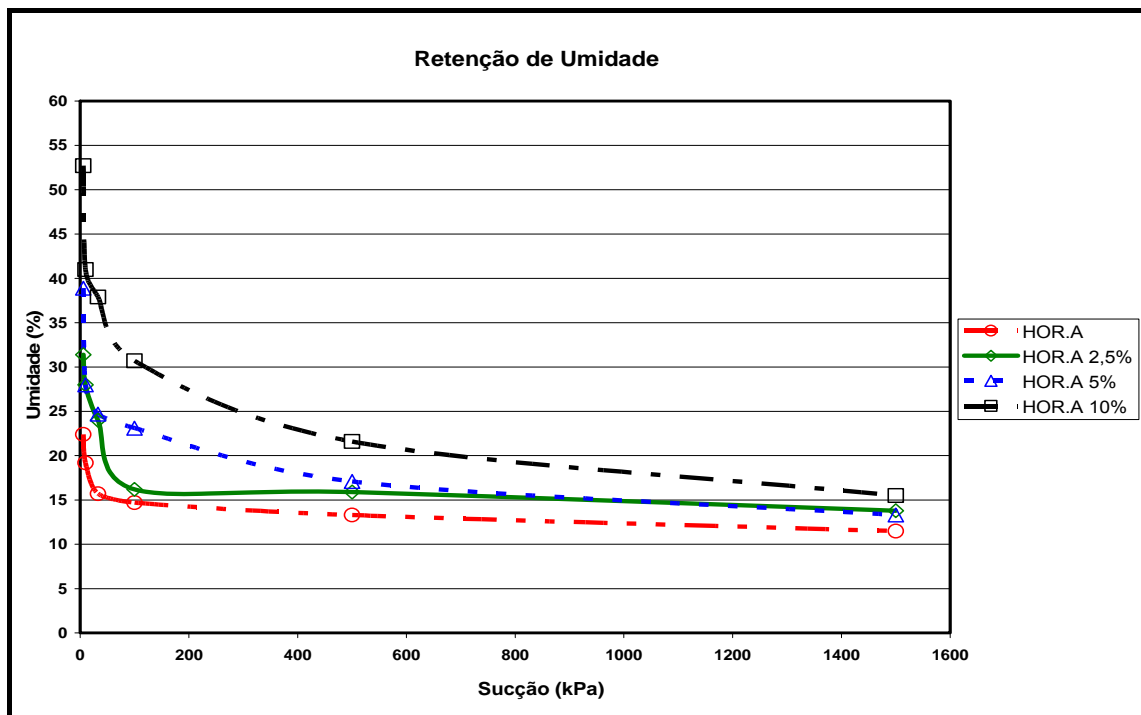


Figura 4.14: Curva característica referente ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%).

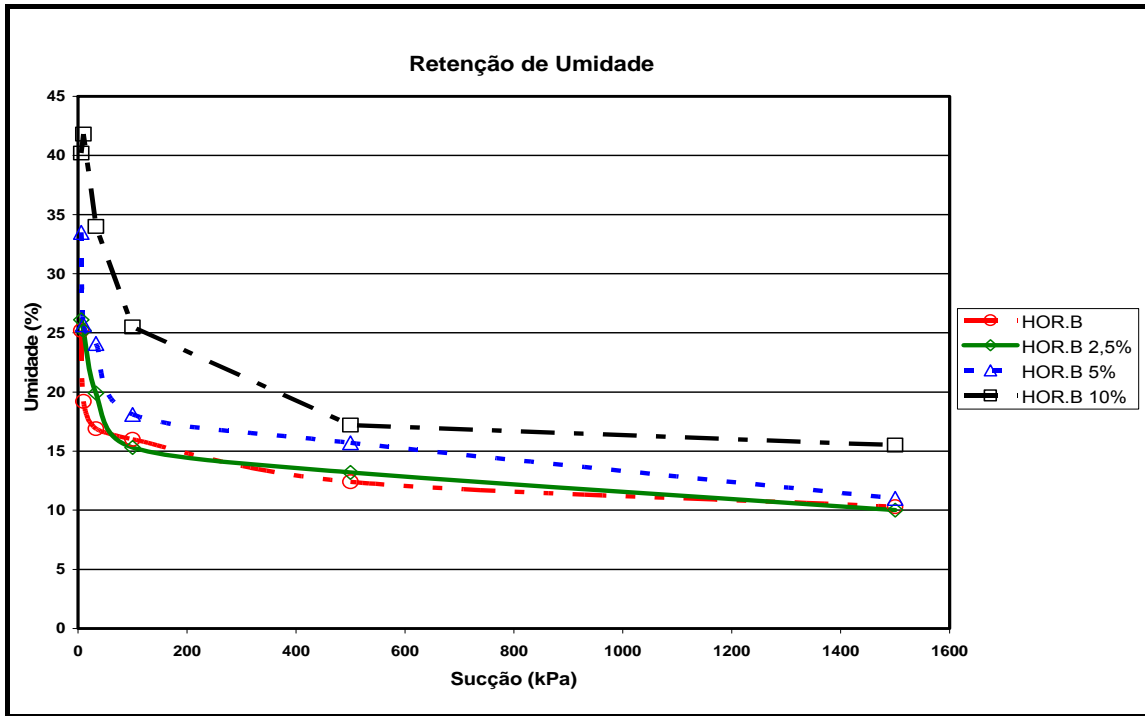


Figura 4.15: Curva característica referente ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%).

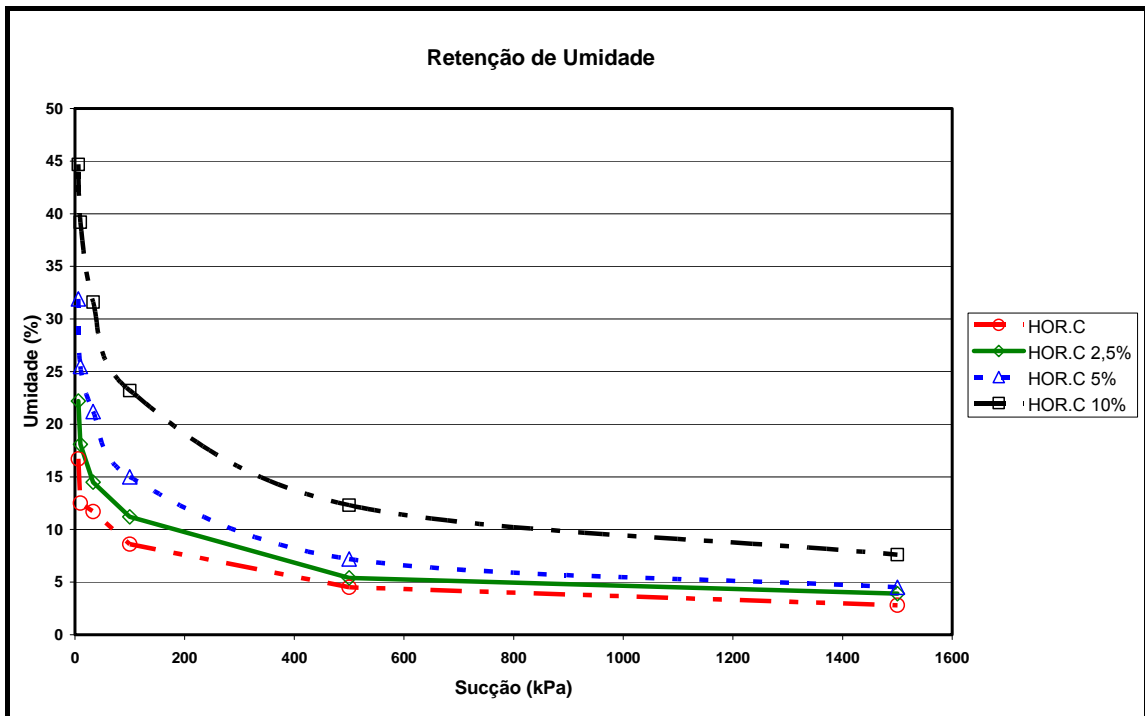


Figura 4.16: Curva característica referente ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (2,5%, 5% e 10%).

A partir das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 pôde-se verificar um comportamento bastante semelhante para todas as amostras. Observou-se que com uma pequena adição de 2,5% de bentonita, a curva característica sofre um sensível deslocamento, em comparação as amostras dos horizontes A, B e C puros (sem adição de bentonita). A umidade residual também sofre um ligeiro aumento. Este fato é crescente à medida que se adiciona bentonita na mistura.

Segundo MONTAÑEZ (2002) quando a sucção atinge valores entre 1000 e 3000 kPa, toda a água presente na mistura está associada a bentonita. Desta forma, quando se compara para o mesmo valor de sucção, como, por exemplo, 1500 Kpa (umidade residual), a diferença observada entre as curvas (com e sem adição de bentonita) se deve ao fato da presença e da quantidade de bentonita na mistura.

Constatou-se também que as amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita se comportaram de forma mais contínua, apesar apresentarem menores valores de umidade, quando comparados aos outros horizontes (A e B). Estes fatos estão relacionados com a textura do solo (tamanho dos grãos) que no horizonte C são na maioria do tamanho areia. Desta forma, supõe-se que quando a bentonita é adicionada a um solo arenoso consegue desempenhar melhor suas propriedades sem tanta interferência de outros argilominerais.

4.9 Ensaio de Ressecamento

Este ensaio consistiu basicamente na montagem e no monitoramento de alguns corpos de prova compactados referentes às amostras dos horizontes A, B e C puros e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) instalados no equipamento de ressecamento. A partir deste ensaio obtiveram-se dados de sucção, peso, umidade (indiretamente), volume e temperatura durante o processo de secagem do solo (perda de umidade).

Os resultados deste ensaio foram elaborados em três diferentes tipos de gráficos: sucção versus tempo, sucção versus umidade (curva característica) e volume versus tempo.

Sucção X Tempo

Nas figuras 4.17, 4.18 e 4.19 estão expostos as curvas obtidas durante o ressecamento das amostras estudadas.

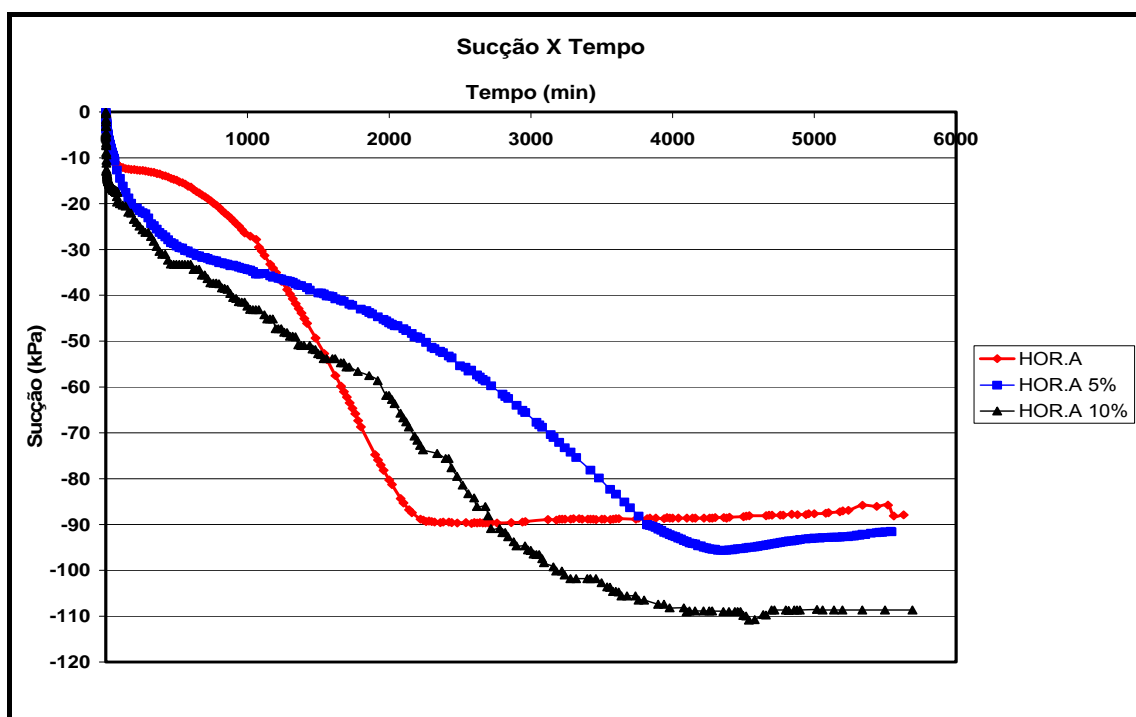


Figura 4.17: Curva sucção versus tempo obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.17 verifica-se que com a adição de bentonita nas misturas, o valor da sucção final é maior quando comparado à amostra do horizonte A puro (sem adição de bentonita). Observa-se também que a sucção na amostra (HOR. A) se estabilizou primeiro quando comparado com as outras duas (HOR. A 5% e HOR. A 10%). Estes fatos são justificados, basicamente, por causa da quantidade de materiais finos presentes nas amostras. Quando se adiciona bentonita na mistura, conseqüentemente

a amostra sofrerá um aumento na quantidade de finos, o que irá favorecer o aumento da sucção. Por outro lado, esse aumento na quantidade de finos dificulta a estabilização da sucção que ocorrerá de forma gradual (mais lenta), enquanto que para materiais mais arenosos a água sai com maior facilidade dos poros estabilizando rapidamente a sucção.

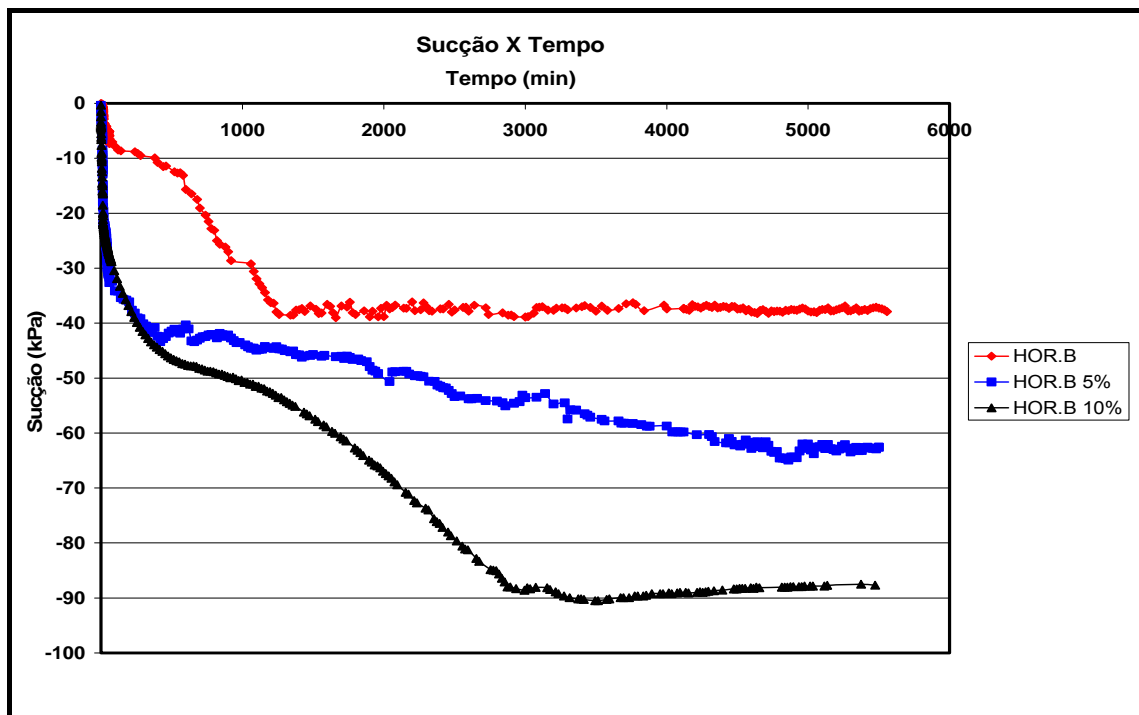


Figura 4.18: Curva sucção versus tempo obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.18 verifica-se para o horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%) um comportamento semelhante ao descrito anteriormente para o horizonte A e suas misturas, porém obteve-se valores menores de sucção final.

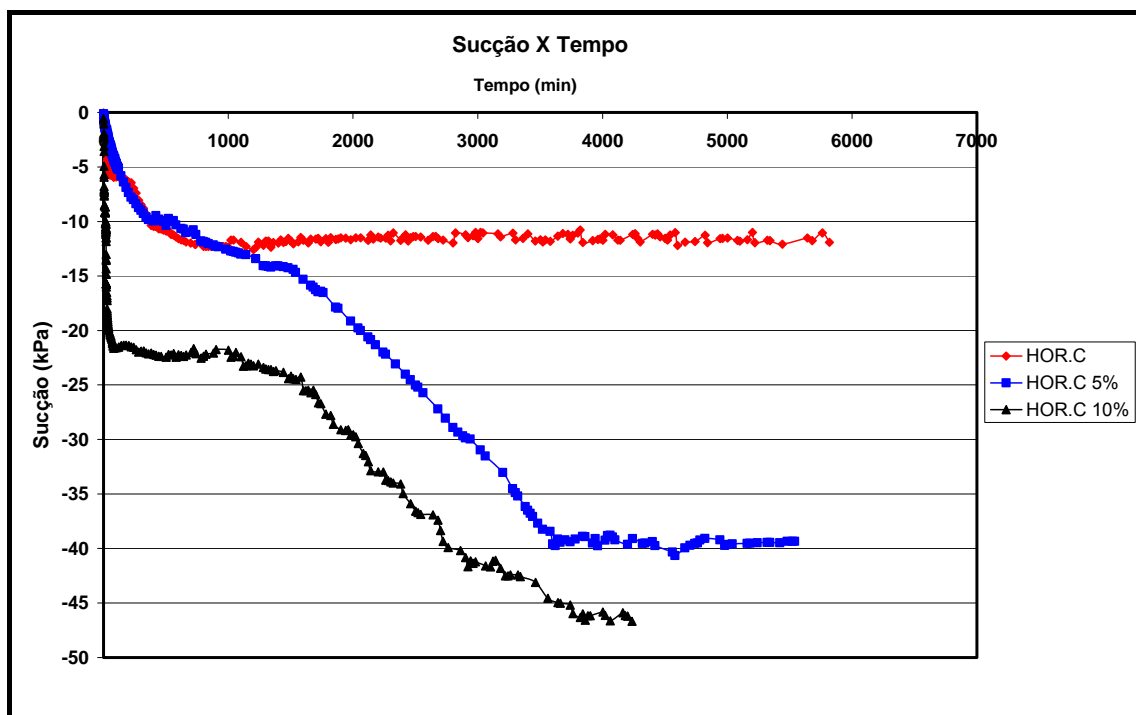


Figura 4.19: Curva sucção versus tempo obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.19 nota-se um comportamento, para o horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita, parecido com os descritos anteriormente para as amostras do horizonte A e B e suas misturas. Entretanto, os valores finais de sucção encontrados foram bem menores. Isto pode ser justificado pelo fato do horizonte C ser predominantemente arenoso, com isso alcança menores valores de sucção do que os demais horizontes (A e B).

Umidade X Sucção

Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 estão expostas as curvas umidade versus sucção, também conhecida como curva característica, obtidas durante o ressecamento das amostras estudadas. A sucção foi representada por valores absolutos apenas por uma questão de representação gráfica.

Ressalta-se que a forma das curvas aqui apresentadas são diferentes das obtidas por meio da Panela de Richards, pois no ensaio de ressecamento a perda de

umidade acontece de forma natural, ao contrário da Panela de Richards que é injetada uma determinada sucção nas amostras induzindo a perda de umidade. Além disso, no ensaio de ressecamento a umidade inicial do ensaio está em torno da umidade ótima utilizada para compactar o corpo de prova. Por outro lado na Panela de Richards o ensaio é iniciado com amostra saturada e sem compactação.

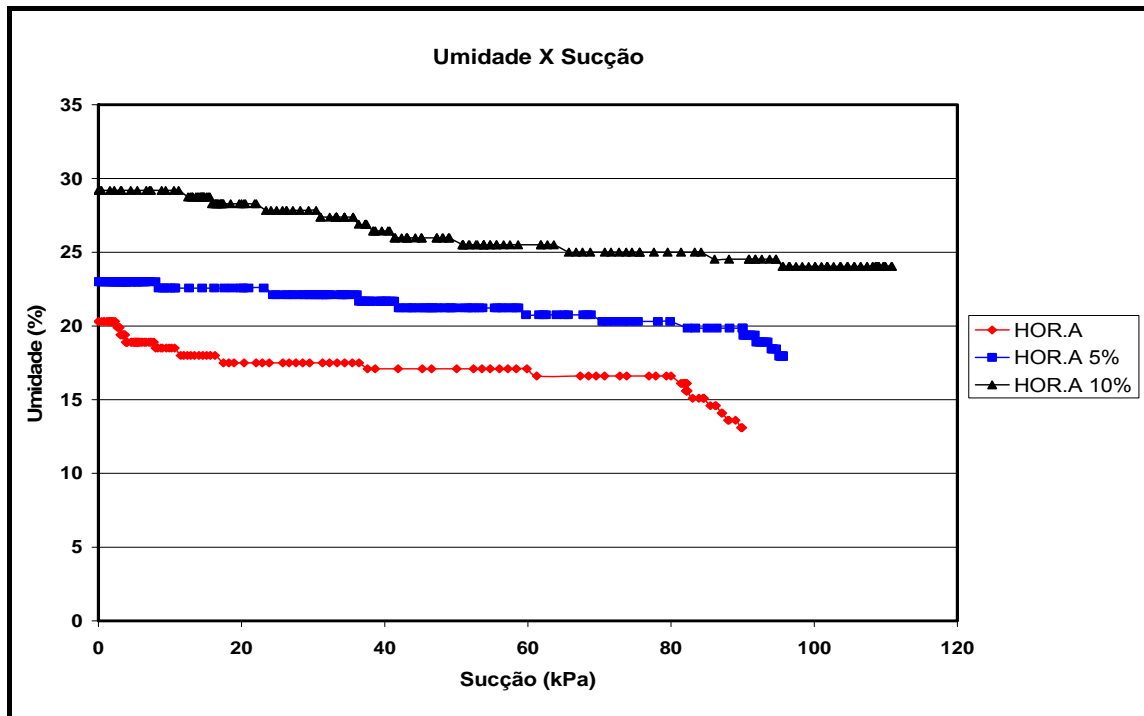


Figura 4.20: Curva umidade versus sucção obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.20 observa-se que o decréscimo da umidade em todas as amostras ocorre de forma gradual, evidenciando um comportamento argiloso para este material. Ainda nesta figura verifica-se que com a adição de bentonita houve um deslocamento da curva, quando comparada a amostra do horizonte A puro. Nota-se que para um mesmo valor de sucção, a umidade correspondente encontrada é maior nas amostras onde a bentonita está presente. Isto se deve ao fato da bentonita possuir uma elevada capacidade de reter água.

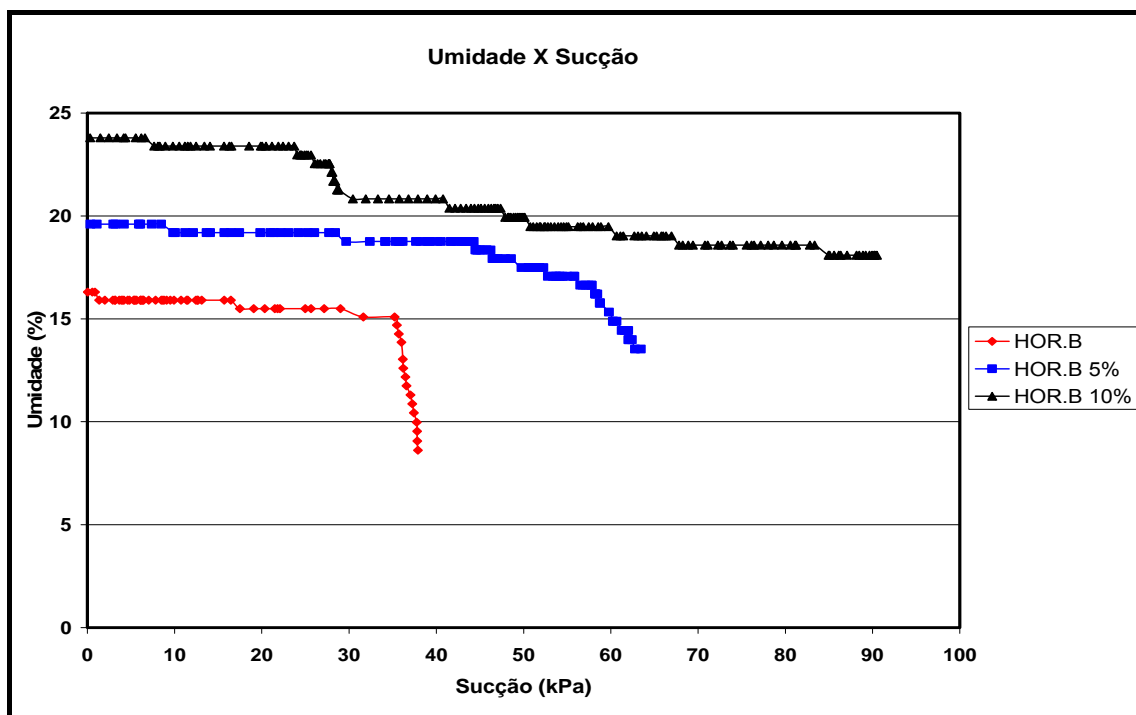


Figura 4.21: Curva umidade versus sucção obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.21 observa-se que apenas a amostra referente ao horizonte B 10% sofreu um decréscimo gradual na umidade. As outras duas amostras (HOR. B e HOR. B 5%) registraram uma queda mais acentuada na umidade. Isto pode ser justificado pelo fato destas amostras apresentarem uma quantidade menor de finos, facilitando a retirada de água mesmo com pouca variação da sucção.

Com a adição de bentonita na amostra referente ao horizonte B, nota-se um comportamento semelhante ao descrito anteriormente para o horizonte A e suas misturas com bentonita. Para um mesmo valor de sucção, a umidade correspondente é maior na amostra com a presença da bentonita. Ressalta-se que este comportamento é crescente com a adição deste material.

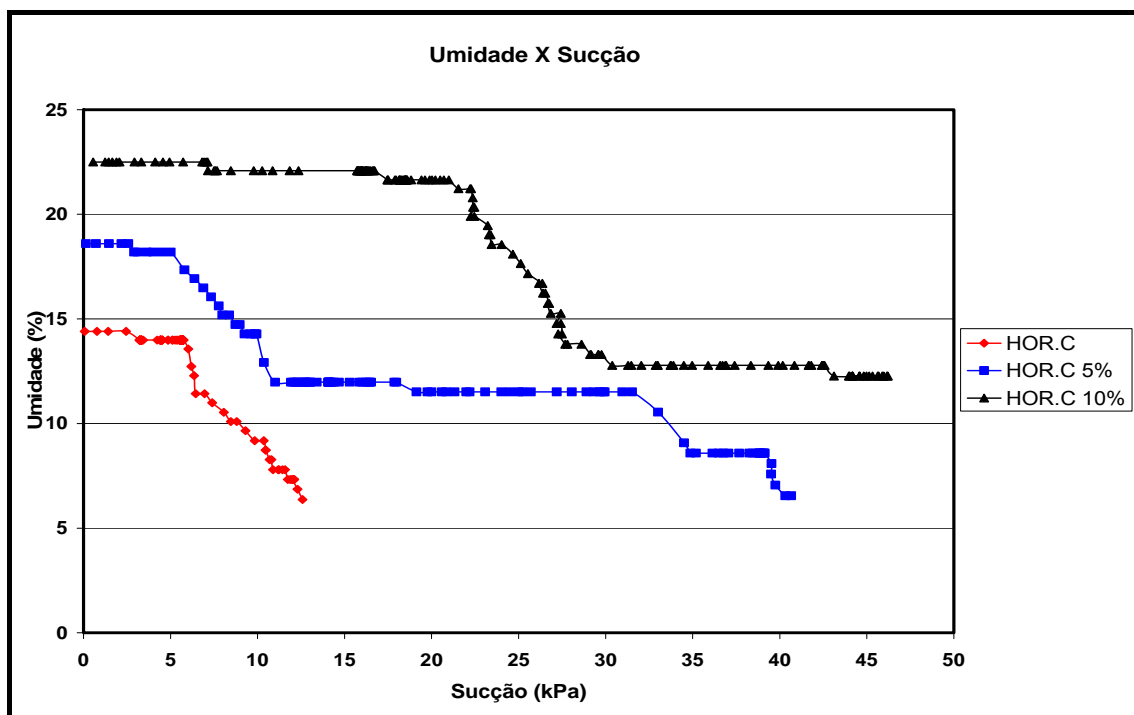


Figura 4.22: Curva umidade versus sucção obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.22 verifica-se que a umidade sofre uma queda acentuada em todas as amostras. Este fato se deve, principalmente, ao comportamento granular (arenoso) do horizonte C, que permite a remoção de água com maior facilidade.

Com a adição de bentonita observa-se que as curvas apresentam um comportamento parecido com os descritos anteriormente para os horizontes A e B e suas misturas, onde para um mesmo valor de sucção a umidade associada é maior nas amostras onde a bentonita está presente.

Volume X Tempo

Nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 estão expostas as curvas volume versus tempo das amostras estudadas. Os dados para formação desta curva foram obtidos durante o ressecamento das amostras estudadas. Ressalta-se que os valores de volume

indicados nas curvas com sinais negativos apontam que as amostras sofreram contração.

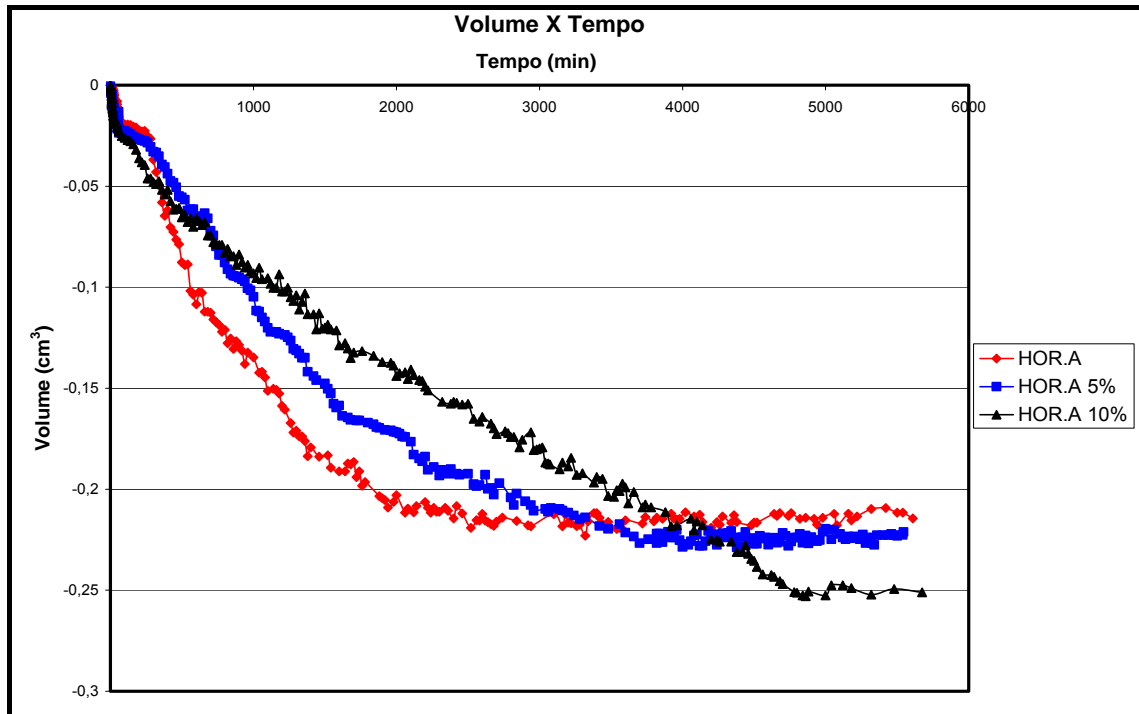


Figura 4.23: Curva volume versus tempo, obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte A e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.23 observa-se que ocorreu uma mínima variação volumétrica nas amostras do horizonte A puro e de suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%). No entanto, no final do ensaio, essa variação foi maior nas amostras com adição de bentonita indicando que houve uma maior contração destes materiais. Isto pode ser justificado pelo fato da bentonita ser um material ativo, ou seja, aumenta e diminui de volume com facilidade. Ressalta-se que não foi detectada a formação de trincas externas no corpo de prova. Estes resultados corroboram com os encontrados no ensaio de limite de contração (LC), discutidos no item 4.3.

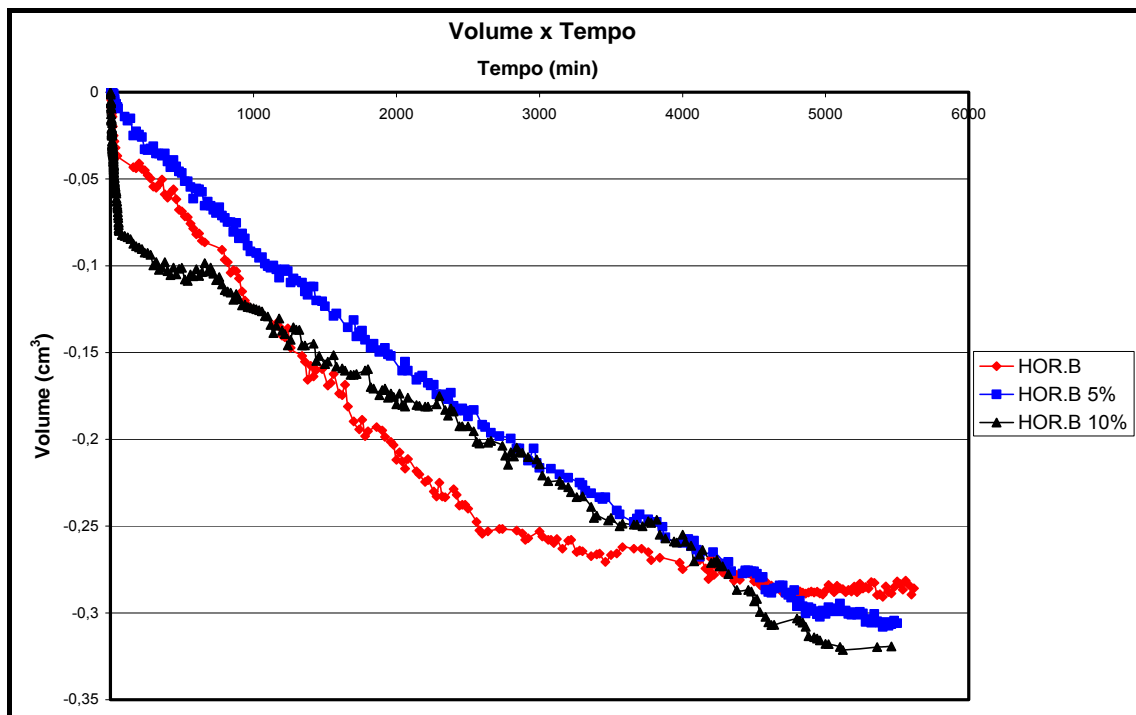


Figura 4.24: Curva volume versus tempo, obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte B e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

Na Figura 4.24, nota-se uma pequena variação volumétrica nas amostras estudadas. Estes materiais apresentaram comportamento semelhante ao descrito anteriormente para o horizonte A puro e suas misturas com bentonita (5% e 10%), ou seja, com a adição de bentonita verificou-se, no fim do ensaio, um pequeno aumento na contração dos materiais.

Este comportamento também é observado na Figura 4.25, porém, as diferenças entre as curvas foram mais contrastantes. Isto se deve ao fato da amostra referente ao horizonte C ser mais arenosa, quando comparada aos outros horizontes A e B, com isso possui uma mínima variação volumétrica. À medida que se adiciona bentonita na amostra, o comportamento das misturas passa a ser mais reativo e plástico. Desta forma, supõe-se que quando a bentonita é adicionada a um solo arenoso, mesmo em pequenas quantidades, já resulta em uma maior diferença na variação volumétrica.

Nos corpos de prova referentes aos horizontes B e C e suas misturas com bentonita (5% e 10%) não foram detectadas a formação de trincas externas.

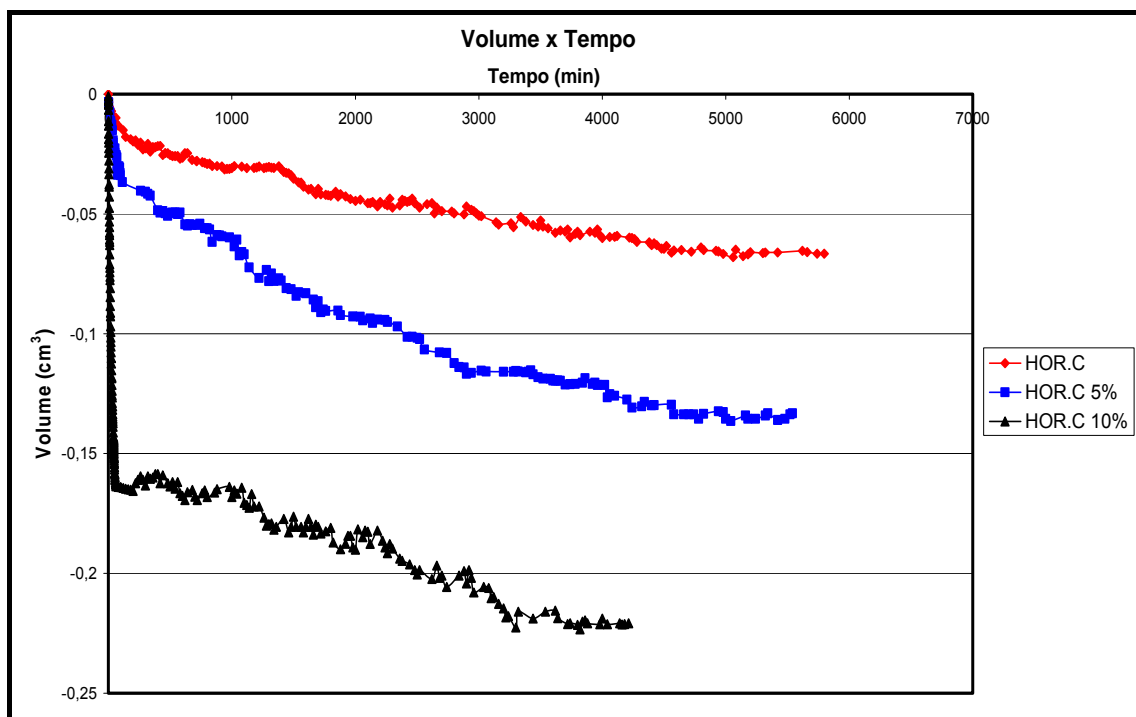


Figura 4.25: Curva volume versus tempo, obtida durante o ressecamento das amostras referentes ao horizonte C e suas respectivas misturas com bentonita (5% e 10%).

As curvas Temperatura versus Tempo, obtidas durante a execução do ensaio de Ressecamento para as amostras dos horizontes A, B e C e suas misturas com bentonita (5% e 10%) encontram-se no anexo III. Destaque-se que a temperatura foi medida apenas como parâmetro de controle, de maneira que não se estabeleceu nenhuma relação entre os resultados deste parâmetro com os outros obtidos (umidade, sucção e volume). Os corpos de prova sofreram uma variação de aproximadamente 1 °C durante todo o período do ensaio, exceto as amostras (HOR. C, HOR. C 5% e HOR.C 10%) que variaram até 5 °C.

5. Conclusões e Sugestões

Com os resultados obtidos das análises físicas pôde-se concluir que os horizontes A, B e C puros são predominantemente arenosos (52%, 54% e 78%, respectivamente), sendo os dois primeiros classificados como areno-argiloso e o último como areno-siltoso. Isto pode ser explicado pelo fato das três amostras terem sido coletadas em um mesmo perfil intempérico em diferentes estágios de evolução. O horizonte A, que é o mais superficial, está em estágio mais avançado de intemperismo, portanto possui menos material arenoso e mais argiloso. Por outro lado o horizonte C é o menos alterado, com predominância de areia e pouca quantidade de argila. Quando se adiciona bentonita nos horizontes A, B e C puros, o comportamento granulométrico é diferenciado pelo teor de argila natural nestas amostras. Nos horizontes com maior teor de argila (HOR. A e HOR. B), ao contrário do que era esperado, a quantidade medida de argila diminuiu. Supõe-se que a bentonita teria funcionado como um agente aglutinante, que agregou os grãos de argila presentes na amostra natural. Com isso houve um aumento nos diâmetros das aglomerações formadas. Ressalta-se que FARNESI (2007) encontrou resultados semelhantes. O horizonte C como possui apenas 2% de argila, não teve seu comportamento afetado e com a adição de bentonita nessa amostra houve aumento no teor final de argila.

Quanto a densidade real dos grãos, todas as amostras puras (sem adição de bentonita) obtiveram valores próximos (2,58 a 2,60), o que já era esperado, pois são derivados da mesma rocha e com isso possuem os mesmos minerais. A bentonita pura, por sua vez, ocupa para o mesmo volume um peso maior que os horizontes A, B e C puros, portanto, quando é adicionada na mistura o valor da densidade real dos grãos aumenta.

A partir dos limites de Atterberg pôde-se concluir que os horizontes A e B puros são, segundo Sucs, moderadamente plásticos, enquanto que o horizonte C apresentou-se como não plástico, devido ao mínimo teor de argila presente. Contudo, a adição de bentonita tornou as argilas dos horizontes A, B e C altamente plásticas, exceto para a amostra HOR. C 5% que se comportou como moderadamente plástica.

Com os resultados obtidos no ensaio do limite de contração, concluiu-se que a bentonita pura possui um elevado limite de contração. Quando este material é adicionado, em pequenas quantidades, aos horizontes A, B e C puros, afeta sensivelmente o valor do limite de contração (LC) dessas amostras, ou seja, aumenta o comportamento de contração.

Estes fatos acima discutidos também são explicados com o auxílio dos resultados do índice de atividade de Skempton. A partir deste índice verificou-se que os horizontes A, B e C puros (sem adição de bentonita) possuem argilominerais inativo, normal e inativo, respectivamente, e depois de misturados a bentonita, mesmo em pequenas quantidades, comportaram-se como ativos. Este fato comprova que a bentonita pura é uma argila ativa, e que quando está presente na mistura altera o comportamento dos materiais, ou seja, aumenta a influência das propriedades mineralógicas e química-coloidal da fração argila nas propriedades geotécnicas.

Por meio da análise físico-química (potencial hidrogeniônico), pôde-se concluir que os horizontes A, B e C puros possuem um caráter ácido com valores de pH em água (5,1, 5,5 e 5,7, respectivamente). A bentonita pura apresenta um caráter mais alcalino ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 11,7$), dessa forma, quando este material está presente na mistura, torna mais alcalina as amostras estudadas.

Quanto aos valores de ΔpH obtidos, conclui-se que os horizontes A, B e C puros e a bentonita têm predominância de cargas superficiais negativas, com isso há uma preferência em adsorver maiores quantidades de cátions do que de ânions. Ressalta-se que a adição de bentonita, aumenta a eletronegatividade das misturas.

Esta característica é de suma importância quando se trata de camadas selantes que envolvem resíduos, principalmente metais pesados.

Quanto à mineralogia ficou constatado que a fração argila dos horizontes A, B e C puros é formada predominantemente pela assembléia mineralógica gibbsita, caulinita e traços de goethita. A bentonita pura, como já era esperado, só apresentou argilominerais do grupo da esmectita. Portanto as amostras dos horizontes A, B e C misturadas à bentonita apresentaram uma combinação da assembléia mineralógica mencionada anteriormente com os argilominerais do grupo da esmectita.

Com os resultados do ensaio de compactação concluiu-se que com a adição de bentonita nos horizontes A, B e C, houve um aumento no valor da umidade ótima (w_{ot}) e uma diminuição na massa específica aparente seca máxima (μ_s). Este fato já era esperado, uma vez que, quanto mais argiloso for o material, maior será sua umidade ótima e menor a massa específica aparente seca máxima. Além disso, bentonita pura possui uma elevada superfície específica e conseqüentemente uma alta adsorção de água.

Por meio do ensaio de Condutividade hidráulica concluiu-se que a adição de bentonita nos horizontes A, B e C, mesmo em pequenas quantidades (5%), foi suficiente para reduzir significativamente o valor de k. No caso do horizonte C, esta redução foi de três ordens (10^{-4} para 10^{-7}).

Concluiu-se também que as amostras (HOR. A 10%, HOR. B 5%, HOR. B 10% e HOR. C 10%) alcançaram o valor de 10^{-7} cm/s, que é tido por inúmeros autores (BAGCHI, 1994; CETESB, 1993; EPA, 1989) como máximo para a construção de camadas selantes. Ressalta-se que a bentonita pode se expandir durante 2-3 meses quando em contato com a água, e os valores nesse estudo foram obtidos com apenas três dias de ensaio. Dessa forma a condutividade hidráulica ainda pode diminuir significativamente.

Quanto à curva característica determinada a partir da panela de Richards, concluiu-se para os horizontes A, B e C que com uma pequena adição de bentonita

(2,5%), o valor da umidade residual sofreu um ligeiro aumento, sendo crescente à medida que se adiciona mais bentonita na mistura, fato esse explicado novamente pela capacidade da bentonita em reter água.

A partir do ensaio de Ressecamento concluiu-se que quando as amostras estudadas são submetidas a um processo de secagem natural, variam muito pouco de volume mesmo depois de adicionada a bentonita. Notou-se que houve um aumento na contração das amostras com bentonita, porém foram valores mínimos.

Conclui-se também que a adição de bentonita nos horizontes A, B e C eleva a sucção destes materiais, aumentando a sua resistência.

Por fim, fica comprovado que a bentonita é uma alternativa viável, quando considerado apenas os aspectos técnicos, para serem utilizadas como camada selantes.

Este material quando adicionado, em pequenas quantidades, a solos com características semelhantes às descritas neste estudo, podem desempenhar bem o papel de selo, ou seja, dificultar a movimentação de água no solo. Portanto podem ser usadas em camadas de cobertura e basais em aterros sanitários, barreiras hidráulicas verticais e horizontais, diques de contenção, lagoas de decantação, lagoas de tratamento, proteção de encostas, entre outros, porém é necessário em cada obra um estudo mais completo considerando os aspectos construtivos e a compatibilidade entre os materiais.

Sugestões para Pesquisas Futuras

Recomenda-se a utilização de outros solos com características semelhantes ao cambissolo estudado nesta dissertação, de forma a confirmar o comportamento destes com a adição de bentonita.

Sugere-se também a realização de ensaios de condutividade hidráulica em misturas de solo com bentonita, observando o comportamento destes materiais ao

longo de aproximadamente três meses, que é o tempo máximo estipulado para que a bentonita alcance sua capacidade máxima de expansão.

Quanto ao ensaio de ressecamento, recomenda-se a aplicação de ciclos de umedecimento e secagem, de forma a avaliar a influência dessa ciclagem no processo de expansibilidade.

Recomenda-se estudos sobre a interação solo-bentonita com diferentes contaminantes, e com isso avaliar a influência deste material ativo no mecanismo de sorção do solo.

Referências Bibliográficas

ACHARI, G., 1995. **Modified bentonite and fly ash bentonite landfill liners**. 305p. Tese doutorado - Department of Civil Engineering - Calgary, Alberta.

AL WAHAB, R. M., EL-KEDRAH, M. A., 1995. "Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay". In: *Geoenviroement 2000 - Characterization, Containment, Remediation and Performance in Enviroment Geotecchnics*, New Orleans. Proceedings... ASTM STP n. 46, ASTM, v.1, 2v, p. 791-805.

ALAMINO, R. C. J., 2004, **A Influência do Acréscimo de Bentonita nos Mecanismos de Sorção de Zinco, Cádmio e Níquel em Solos Residuais**. p. 146. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Depto de Geologia, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

ALMEIDA, F. F. M., AMARAL, G., CORDANI, H. G., KAWASHITA, K., 1973. "The precambrian evolution of South American cratonic margim, South of Amazon River". In: **A.E.M. Nairs & F.G. Stehli** (eds.) *The ocean basins and margins*.pp. 411-446.

ALSTON, C., DANIEL, D. E., DEVROY, D. J., 1997. "Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon", Marathon, Ontario. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 34, n. 6, p. 841-852, 1997.

AMORIM, L. V., VIANA J. D., FARIAS, K. V., BARBOSA, M. I. R., FERREIRA, H. C., 2006. "Estudo Comparativo entre Variedades de Argilas Bentoníticas de Boa Vista, Paraíba". **Revista Matéria**, v. 11, n. 1, pp. 30 – 40, disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10699>. Acesso em out. 2007.

ANDERSON, S. A., HEE, B. H., 1995. "Hydraulic conductivity of compacted lateritic soil with bentonite admixture". **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 1, n. 3, p. 299-312.

ARANHA, I. B., OLIVEIRA, C. H., NEUMANN, R., NETO, A. A., Luz, A. B., 2002. "Caracterização mineralógica de bentonitas brasileiras". **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, 19, Recife. p. 554-561.

ARANHA, I. B., PORTO, J. P. P., 2002. "Caracterização Cristalquímica Preliminar de Bentonitas Brasileiras" In: **X anais...** Centro de Tecnologia Mineral **Disponível em:** www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_X_jic_2002/Joao.pdf. Acesso Out 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181.**, 1984. "Solo – Análise Granulométrica (Método de ensaio)". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7180.**, 1984. "Solo - Determinação do Limite de Plasticidade (Método de ensaio)". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 6459.**, 1984. "Solo - Determinação do Limite de Liquidez (Método de ensaio)". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7183.**, 1982. "Solo - Determinação do Limite de Contração (Método de ensaio)". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7182.**, 1986. "Solo – Ensaio de Compactação (Método de ensaio)". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 6457.**, 1986. Determinação do Teor de Umidade. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 9604.**, 1986. "Abertura de poço ou trincheira de inspeção com retirada de amostra deformada e indeformada". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 13292.**, 1995. "Determinação do coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares a Carga Constante". Rio de Janeiro.

_____. **NBR 14545.**, 2000. "Determinação do coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável". Rio de Janeiro.

AZAMBUJA, R. M. B., 2004, **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para aplicação em barreiras verticais de contenção de**

contaminantes. p. 98. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil.

BAGCHI, A., 1994. "Design, Construction and Monitoring of Landfills". **Wiley Interscience**, New York.

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

BENSON, C. B., DANIEL, D. E., 1990. "Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted". **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 8, p.1231-1248.

BENSON, C. H., ZHAI, H., WANG, X., 1994. "Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners", **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Vol. 120, No. 2, p.280-291.

BOIVIN, P., GARNIER, P., TESSIER, T., 2004. "Relationship Between Clay Content, Clay Type and Shrinkage Properties of Soil Samples". **Soil Science and Society American Journal**, 68, pp.1145-1153.

BOWDERS, J. J., DANIEL, D., 1987. "Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals". **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, 113, n. 12, p.1432-1448, 1987.

BRADY, N. C., 1989. **Natureza e propriedade dos solos**. (A. B. N. Figueiredo, trad.). Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 647p.

BRANDL, H., 1992. "Mineral liners for hazardous waste contaminant". **Géotechnique**, London, v.42, n.1, p.57-65.

BRAUDEAU, E., COSTANTINI, J. M., BELLIER, G., COLLEUILLE, H., 1999. "New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization". **Soil Science and Society American Journal**. 63:525–535.

BRODERICK, G. P., DANIEL, D., 1990. "Stabilising compacted clay against chemical attack". **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, 116, n. 10, p.1549-

1567.

BROOKS, R., COREY, A., 1966. "Properties of porous media affecting fluid flow". **J. Irrig. And Drain. Div.**, ASCE, 92(2), p. 61-88.

BULLOCK, P., FEDOROFF, N., JONGERIUS, A., STOOPS, G., TURSINA, T., 1985. "Handbook for soil thin section description". **Waine Research Publs**, 152 p.

CANCELLI, A., COSSU, R., MALPEI, F. E., OFFREDI, A., 1994, "Effects of leachate on the permeability of sand-bentonite mixtures". **Landfilling of Waste: Barriers**, p. 259-293. London: E & FN SPON.

CASTRO, S. S., 1989a. "Micromorfologia de solos: pequeno guia para confecção de lâminas delgadas". **Apostila (mimeografada)**. IPT - CAPES X COFECUB. DG. São Paulo, 87 p.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), 1993. **Resíduos Sólidos Industriais**, 2ed. rev. ampl., São Paulo.

CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), 2002. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Inovação Tecnológica – CTEC. CT2002-188-00. **Comunicação Técnica elaborada para o Livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil**. Disponível em www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-188-00.pdf. Acesso Dez 2007

CHALERMYANONT, T., ARRYKUL, S., 2005, "Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners". **Songklanakarin j. sci. technol**, v.27, n.2, p.314-323,

CHAPUIS, R. P., 1990, "Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests". **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, p. 47-57.

CRONEY, D., COLEMAN, J. D., 1961. "Pore pressure and suction in soils". In: **Conference on Pore Pressure and Suction in Soils**, Proc. Of...Butterworths, London, pp. 31 – 37.

CURI, N., 1985. "Terminologia de Micromorfologia do Solo". SBCS. **Bol. Informativo** 33, Campinas, 44p.

DANIEL, D. E., BENSON, C. H., 1990 "Water Content-Density Criteria for compacted Soil Liners", **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Vol. 116, No. 12, p.1811-1830.

DANIEL, D. E., LILJESTRAND, H. M., 1984. "Effects of landfill leachates on natural liner systems". **Geotechnical Engineering Center (Austin)**.

DANIEL, D. E., 1987. "Hydraulic conductivity tests for clay liners". **Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management**, p. 15-34.

DANIEL, D. E., 1993. **Geotechnical practice for waste disposal**. Chapman & Hall, 1 ed., London, 683p.

DANIEL, D. E., KOERNER, R. M., 1995."Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems". **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, ASCE, New York. 354p.

D'APPOLONIA, D.J., 1980. "Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff". **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v.107, n 4, p. 393-409.

DE CAMPOS, T. M. P., DELGADO, C. C., TIBANA, S., AGUILAR, S. A. S., FONSECA, E. C., 1992. "Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório". In: **1a Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - 1a COBRAE, 1992. Anais da 1a Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - 1a COBRAE, 1992**. v. III. p. 843-851.

DRM/GEOSOL (Departamento de Recursos Minerais/Geologia e Sondagens Ltda), 1982. "Projeto Carta Geológica, Folhas: Nova Friburgo; Teresópolis; Anta; e Duas Barras". **relatório final**. Rio de Janeiro: Secretaria do Estado de Indústria, Comércio e Turismo.

DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), 1964. "Determinação da Densidade Real dos Solos". (**DNER - DPT M 093/64**).

EGLOFFSTEIN, T. A., 2001. "Natural Bentonites– Influence of the Ion Exchange and Partial Desiccation on Permeability and Self-healing Capacity of Bentonites Used in GCLs". **Geotextiles and Geomembranes**, 19, pp. 427-444.

EMBRAPA – CNPS., 1997. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. 212p.

EPA (United States Environment Protection Agency)., 1989. "Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure", Seminar Publication, Cincinnati.

FARNESI, M.K., 2006 . **Alternativa de Melhoria de Solos tropicais para uso em sistemas Basais de Selagem, através da aplicação de Bentonita**. Dissertação de M.sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

FERRARI, A. A. P., 2005, **Viabilidade da Utilização de Silte Compactado como Material de Impermeabilização em Aterros de Resíduos**. Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil.

FETTER, C. W., 1993, **Contaminant hydrogeology**. NY: Macmillan Publishing Company, p. 458.

FORMOSO, M. L. L., 1984. "Difratometria de Raios X" in: **C. B. GOMES (Ed) Técnicas analíticas instrumentais**. Ed. Edgard Blucher Ltda., p 1 – 43.

FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H., 1993. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", **Wiley Interscience**, New York.

FREDLUND, D. G., XING, A., 1994. "Equation for Soil-Water Characteristic Curve". **Canadian Geotechnical Journal**, v.37, pp.521-532.

FREDLUND, D., XING, A., HUANG, S., 1994. **Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve**. Can. Geotech. J., Ottawa, Canada, 32, 533-546.

GLEASON, N. H., DANIEL, D. E.; EYKHOLT, G. R., 1997. "Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications". **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, ASCE, New York, v. 123, n. 5, p. 438 - 445, 1997.

GOMES, C. F., 1986. **ARGILAS O que são e para que servem**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 457p.

GOPINATH, T. R., CRUZ, V. C. A., FREIRE, J. A., 2003. "Estudo Comparativo da Composição Química e as Variedades de Argilas Bentoníticas da Região de Boa Vista, Paraíba". **Revista de Geologia**, Vol. 16 (nº1), 35-48. disponível em: www.revistadegeologia.ufc.br. Acesso em dez 2007.

GOUVEIA FILHO, P.P.F., OLIVEIRA, F.J.P., 2005. "Use of Soil/Bentonite Mix in Waterproofing Layer Composition of Upper Waterproofed Capping of Industrial Waste Landfill". **Tenth International Waste Management and Landfill Symposium**, Cagliari, Itália.

GOUVEIA FILHO, P.P.F. (2007). Comunicação Pessoal

GRAHAM, J., SAADAT, F., GRAY, M. N., DIXON, D. A., ZHANG, Q. Y., 1989. "Strength and volume change behaviour of a sand-bentonite mixture". **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 26, n. 2, p. 292-305, 1989.

GRIM, R. E., 1968. **Clay Mineralogy**. New York: McGraw-Hill Book Company. 596p.

HAN, D., 1996. "Use potential of fly ash-residual soil mixture as a dyke material". **Environmental Geotechnics**. Balkema, Rotterdam, p. 721-726.

HEINECK, K. S., 2002. **Estudo Do Comportamento Hidráulico E Mecânico De Materiais Geotécnicos Para Barreiras Horizontais Impermeáveis**. Tese de Doutorado, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil - PPGEC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, RS. 261p.

HOEKS, J., GLAS, H., HOFKAMP, J., RYHINER, A. H., 1987. "Bentonite Liners for Isolation of Waste Disposal Sites". **Waste Management & Research**, 5, pp. 93-105.

HUSE, K., 2007. **Estudo da Formação de Trincas na Camada de Cobertura de um Aterro de Resíduos Sólidos**. p. 131. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

JACKSON, M.L., 1969. **Soil chemical analysis: advanced course**. Madison: University of Wisconsin, 895p.

JOINT COMMITTEE ON POWDER DIFFRACTION STANDARDS – JCPDS., 1980. “Mineral powder diffraction files data Book”. **Swarthmore International Center Diffraction Data**. 1168p.

JUCÁ, J. F. T., 1990. **Comportamiento de los solos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

JUNHO, M. C. B., 1992. “Granitóides brasileiros na região central do estado do Rio de Janeiro”. In: **congresso brasileiro de Geologia**, 37, São Paulo, *Boi. Resumos Expandidos...* São Paulo, SBG., p.398-400.

KEENEY, T., VAN VEEN, M., SWALLOW, M. E., SINGALIA, M., 1992, “Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures”. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 29, n. 3, p. 364-374.

KLEPPE, J. H., OLSON, R. E., 1985. “Desiccation Cracking of Soil Barriers”. **American society for Testing and Materials**, pp. 263-275.

KOZICKI, P., HARTY, S., KOZICKI, J. P., 1994. “Design and construction of soil-bentonite liners and two case histories”. In: **1ST International Congress on Environment Geotechnics**, Jul 1994, Alberta, Canada. Proceedings. 1v., p. 713-719.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V., 1969. **Soil mechanics**, SI version. New York, John Wiley and Sons Inc. 553 p.

LEE, H. C., WRAY, W. K., 1995. “Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable”. **Unsaturated Soils**, Vol. 2, 615- 622.

LEITE, J. C., ZUQUETTE, L., 1995. “Prevenção da contaminação e poluição de aquíferos: a utilização de liners”. **Boletim de Geociências**, São Paulo, V.14 (1), p. 167 – 178.

LEMOS, R. G., 2006. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LEON, T., BIONEL, A., 2002. **Modificação estrutural de bentonitas nacionais: Caracterização e estudo de adsorção.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

LUKIANCHUKI, J. A., 2007. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira selante.** p. 150. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

MACAMBIRA, I. Q., 2002. **Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável.** 117 p. Dissertação de Mestrado, EESC - USP, São Carlos/SP, Brasil.

MAHER, M. H., HO, Y. C., 1993. "Behavior of fiber-reinforced cement sand under static and cyclic loads". **Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, ASCE**, v.16, n.3, p.330-338.

MAHLER, C.F. & SOUZA, H.G. (2004). "Tensiômetro para medições de sucções elevadas em solo p/ prospecções geotécnicas". **Deposito Nacional de Patente: PI 0403670-0.** 01/09/2004.

MANASSERO, M., PASQUALINI, E., VEGGI, S., 1994. "Stability of compacted clay liners at landfill sidewalls". In: **XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, New Delhi. Proceedings... v.4, 6v, p.1587-1590.

MANASSERO, M., PARKER, R., PASQUALINI, E., SZABÒ, I., ALMEIDA, M. S. S., BOUAZZA, A., DANIEL, D. E., ROWE, R. K., 1998. "Controlled landfill design (Geotechnical Aspects)". In: **International Congress on Environmental Geotechnics**, 3., Lisboa, Portugal. Anais...Rotterdam: Ed. Seco e Pinto. p. 1001-1038.

MESRI, G., OLSON, R. E., 1971, "Mechanisms controlling the permeability of clays". **Clays and Minerals** , v. 19.

MONTAÑEZ, J. E. C., 2002. **Suction and Volume Changes of compacted Sand-Bentonite Mixtures**. Tese de D. Sc. University of London, Londres, Inglaterra.

MITCHELL, J. K., HOOPER, D. R., CAMPANELLA, R. G., 1965. "Permeability of compacted clay". **Journal soil mechanics and foundations** div., ASCE, 91 (SM4), p. 41 – 65.

OLIVEIRA, M. L., 2004. "Bentonita". **Sumário Mineral 2004**. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, v. 24, p. 41-42, Brasília. Disponível em:<http://www.dnmp.gov.br/dnmp_legis/sm2004.html>. Acesso em dez. 2007.

OLSEN, H. W., 1962. "Hydraulic flow through saturated clays". **Clays and Clays Minerals**. v.9, n.2, p.131-161.

OLSON, R. E., DANIEL, D. E., 1981. "Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils, permeability and groundwater contaminant transporte". ASTM STP 746, T.F. Zimme and C.O. Riggs, Eds., **American society for testing and materials, Philadelphia**, pp. 18 – 64.

ORSO, J. M; THOMÉ, A. 2007. "Execução de contenção de barreiras com solo-bentonita". In: **IV Seminário de Engenharia geotécnica do Rio Grande do Sul**.

PENHA, H. M., FERRARI, A. L., RIBEIRO, A., AMADOR, E. S., PENTAGNA, F. V. P., JUNHO, M. C. B., BRENNER, T. L., 1979. "Projeto Carta Geológica", **Folha Petrópolis: relatório final**. Rio de Janeiro: Convênio DRM / IG - UFRJ, 1979.

PENHA, H. M., FERRARI, A. L., SOUZA, S. L. A., JUNHO, M. C. B., BRENNER, T. L., 1981. "Projeto Carta Geológica", **Folha Itaipava: relatório final**. Rio de Janeiro: Convênio DRM / IG - UFRJ, 1981.

POLIVANOV, H., 2003. **Apostila de Pedologia**. 120p.

POLUIÇÃO DO SOLO – Disponível em: www.achetudoeregiao.com.br. Acesso out de 2007.

PRESA, E. P., 1982. **Deformabilidade de las Arcilas Expansivas bajo Succión Controlada**. Tese Doutorado, E. T. S. de Ing. de caminos canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

PROGRAMA Google Earth (2007).

REICHARDT, K., 1987. **A Água em Sistemas Agrícolas**, 1 ed. Editora Manole, São Paulo. p. 188..

REZENDE, M. M., SILVA, L. R., CANO, T. M., 2007. “Bentonita”. **Sumário Mineral**. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2007/Bentonita_SM2007.doc>. Acesso em out. 2007.

RODRIGUES, M. G. F., SILVA, M. P. L., SILVA, M. G. C., 2004, “Caracterização da argila bentonítica para utilização na remoção de chumbo de efluentes sintéticos”. **Cerâmica**, v.50, n. 315, p. 190-196. São Paulo.

ROSIER, G. F., 1957. “A Geologia da Serra do Mar, entre os picos de Maria Comprida e do Desengano (Estado do Rio de Janeiro)”, **Bol. 166 da D.G.M. do D.N. P.M.**, 41pp.

ROWE, R. K., QUIGLEY, R. M. E., BOOKER, J. R., 1995. “Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities”. **E & FN SPON**, London.

ROWE, R. K., 2000. “Barrier Systems”. In: **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Ontario, Kluwer academic publishers, CHAPTER 25, P. 739 – 788.

SAHA, U. K., TANIGUCHI, S. E., SAKURAI, K., 2001. “Adsorption behavior of cadmium, zinc, and lead on hydroxyaluminum-and hydroxyaluminosilicate-montmorillonite complexes”. **Soil Science Society of America Journal**, 65. p. 694-703.

SAHA, U. K., TANIGUCHI, S. E., SAKURAI, K., 2002, "Simultaneous adsorption of cadmium, zinc, and lead on hydroxyaluminum-and hydroxyaluminosilicate-montmorillonite complexes". **Soil Science Society of America Journal**, 66. p.117-128.

SALLFORDS, G. R., ÖBERGH-HÖGSTA, A. L., 2002, "Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes". – **Geotechnical and Geological Engineering**, Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

SALOMÃO, F. X. T., ANTUNES, F. S., 1998, "Solos em Pedologia". In: OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. 1 ed. Cap.6. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 87-99.

SANTOS, P. S. 1989. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª edição. Vol1. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda. 408p.

SHACKELFORD, C. D., 1994. **Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, ASTM STP 1142, p. 111-166. Philadelphia.

SHACKELFORD, C. D., GLADE, M. J., 1994. "Constant-flow and constant-gradient permeability tests on sand-bentonite-fly ash mixtures". In: **Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, Philadelphia. Proceedings... ASTM STP 1142, ASTM, 1994. p. 521-545.

SILVA, A. S., 2006. **Influência da Erosão na Remoção de Nutrientes e Metais Pesados em uma Toposequência em Petrópolis (RJ)**. Tese (Doutorado) – UFRJ/ IGEO/ Programa de Pós-Graduação em Geologia. Rio de Janeiro, Brasil. 238p.

SIVAPULLAIAH, P. V., SRIDHARAN, A. E., STALIN, V. K., 1998. "Evaluation of bentonite and sand mixtures as liners". In: **International Congress on Environmental Geotechnics**, 3., Lisboa, Portugal. Anais... Rotterdam: Ed. Seco e Pinto, p. 17-21.

SOUSA PINTO, C., 2002. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos. 355p.

TAY, Y. Y., STEWART, D. I., COUSENS, T. W., 2001. "Shrinkage and Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners". **Engineering Geology**, 60, pp.263-274.

THEISEN, A. A., HARWARD, M. E., 1962. "A Paste Method for Preparation of Slides for Clay Mineral Identification by X-ray Diffraction". **Soil Science of American Proceedings**, Madison, 26:90-91. 1962.

THOMÉ, A., ORSO, J. M., 2007, "Execução de contenção de barreiras com solo-bentonita". IV Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul.

TUPINAMBÁ, M., 1999. **Evolução tectônica e magmática da faixa Ribeira na região serrana do estado do Rio de Janeiro**. São Paulo. Tese de doutorado, IG/USP, São Paulo, 221pp.

UERJ/IBGE (Universidade Estadual do Rio de Janeiro/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)., 1999. **Estudo ambiental como subsídio à metodologia para o ordenamento territorial através de análise de caso: município de Teresópolis, RJ**. Rio de Janeiro.. v. 3. 253p.

UNAL, G. Y., TOGROL, E., 2001. "Shrinking to the Limit". **Proceeding of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Istanbul.

VAN GENUCHTEN, M., 1980. "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils". **Soil Science and Society American Journal**, 44, pp.892-898.

VANAPALLI, S. K., FREDLUND, D. G., PUFAHL, D. E., 1999. "The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till". **Geotechnique** 49, n 2, pp.143-159.

VARGAS , M., 1978. **Introdução à Mecânica dos Solos**. McGraw Hill do Brasil. 509p.

YAN REE, C. C. D., WESTSTRATE, F. A., MESKERS, C. G., BREMMER, C. N., 1992. "Design aspects and permeability testing of natural clay and sand-bentonite liners". **Géotechnique**, London, v.42, n.1, p.49-56, 1992.

Anexos

Anexo I (Descrição detalhada da micromorfologia dos horizontes A, B e C)

Horizonte A

Características gerais

- Lâmina homogênea
- Material pédico (forma agregados)
- Pedalidade (grau de desenvolvimento dos pedis): moderada
- Seleção: fraca
- Forma dos agregados: subangulares
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição referida: não referida
- Distribuição relativa: Porfírica (partículas maiores se distribuem numa matriz de material mais fino)
- Orientação de base: não orientada
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada

Fundo Matricial

Plasma

- Cor natural: vermelho-amarelado
- Cor Nicóis cruzados: vermelho-escuro
- Constituintes: argila e ferro (30%)
- Origem: pedoplasma
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição relativa: porfírica

- Orientação de base: não orientado
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada

Poros

- Morfologia: cavidades e empilhamentos
- Alisamento (rugosidade): ortoporos e metaporos (bioporos – paredes alisadas e plasma reorganizado)
- Distribuição: distribuídos em toda a lâmina
- Dimensão: desde macro até microporos (pouco visíveis) (40%)
- Gênese: pedoporos e bioporos
- Distribuição de base: aleatória
- Orientação de base: não orientada

Esqueleto

- Dimensão: areia fina, média, grossa e silte.
- Seleção: Mal selecionado
- Mineralogia: Quartzo, feldspato (alguns em alteração formando *box work* de gibbsita) e outros
- Arredondamento / esfericidade: angular a subangular / subesférico
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição referida: não referida
- Distribuição relativa: Porfírica
- Orientação de base: não orientada
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada
- Gênese funcional: Porfírica (conjunção – com plasma)

Horizonte B

Características gerais

- Lâmina homogênea
- Material pédico (forma agregados)
- Pedalidade (grau de desenvolvimento dos ped): moderada
- Forma dos agregados: subangulares
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição referida: não referida
- Distribuição relativa: Porfírica (partículas maiores se distribuem numa matriz de material mais fino)
- Orientação de base: não orientada
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada

Fundo Matricial

Plasma

- Cor natural: vermelho-amarelado
- Cor Nicóis cruzados: vermelho-escuro
- Constituintes: argila e ferro (40%)
- Origem: pedoplasma
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição referida: não referida
- Distribuição relativa: porfírica
- Orientação de base: não orientado
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada

Poros

- Morfologia: cavidades e fissuras

- Alisamento (rugosidade): ortoporos (paredes não alisadas)
- Distribuição: distribuídos em toda a lâmina
- Dimensão: desde micro até macroporos (pouco visíveis) (30%)
- Gênese: pedoporos
- Distribuição de base: aleatória
- Orientação de base: não orientada

Esqueleto

- Dimensão: areia fina, média, grossa e silte.
- Seleção: mal selecionado
- Mineralogia: quartzo, feldspato (alguns em alteração formando *box work* de gipsita) e outros
- Arredondamento / esfericidade: angular a subangular / subesférico
- Exoscopia (rugosidade superficial): rugosa
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição referida: não referida
- Distribuição relativa: Porfírica
- Orientação de base: não orientada
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada
- Gênese funcional: Porfírica (conjunção – com plasma)

Horizonte C

Características gerais

- Lâmina homogênea
- Material apédico (não forma agregados)
- Seleção: moderada (10 – 30% de outras frações)
- Dimensão: Areia muito grossa a silte

- Frequência: 90% areia – 9% silte – 1% argila
- Distribuição de base: aleatória
- Distribuição referida: não referida
- Distribuição relativa: Mônica (as partículas pertencem em sua maioria à fração esqueleto)
- Orientação de base: não orientada
- Orientação referida: não referida
- Orientação relativa: não relacionada

Fundo Matricial

Plasma

Não há plasma presente na lâmina para que pudesse ser realizada a descrição desta fração.

Poros

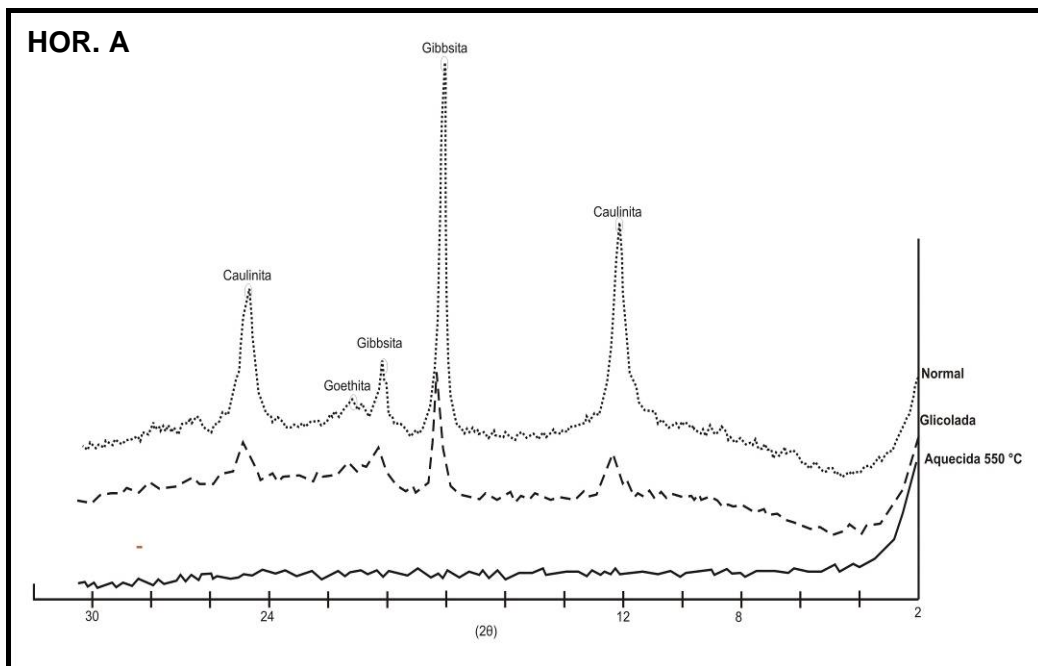
- Morfologia: vesículas de dissolução dos minerais
- Alisamento (rugosidade): ortoporos (paredes não alisadas)
- Distribuição: distribuídos em toda a lâmina
- Dimensão: desde micro até macroporos (pouco visíveis)
- Gênese: litoporos
- Distribuição de base: aleatória
- Orientação de base: não orientada

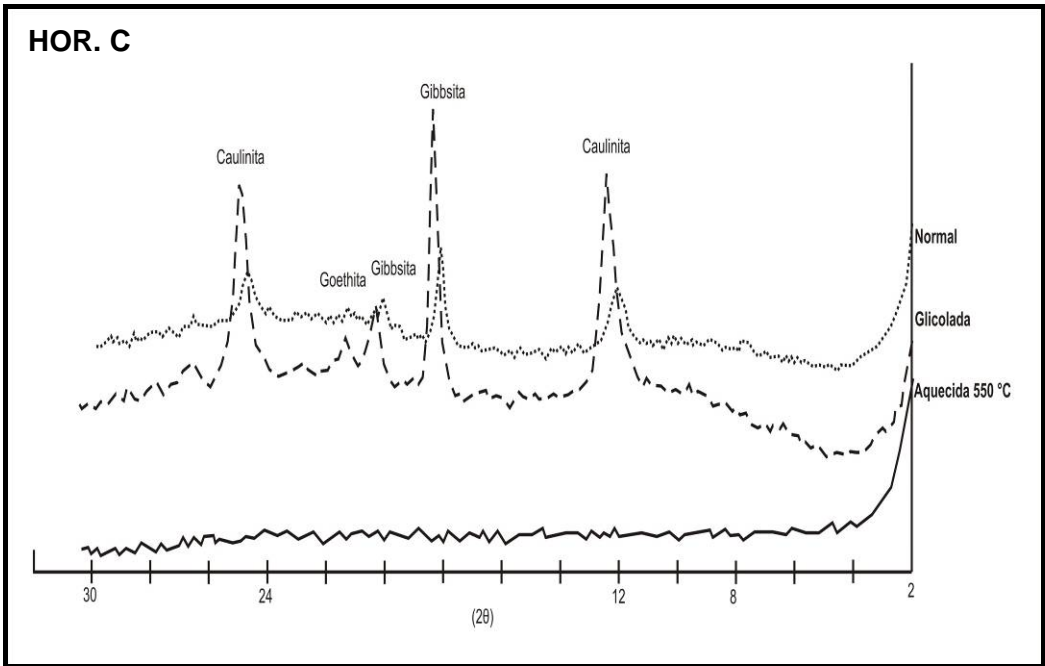
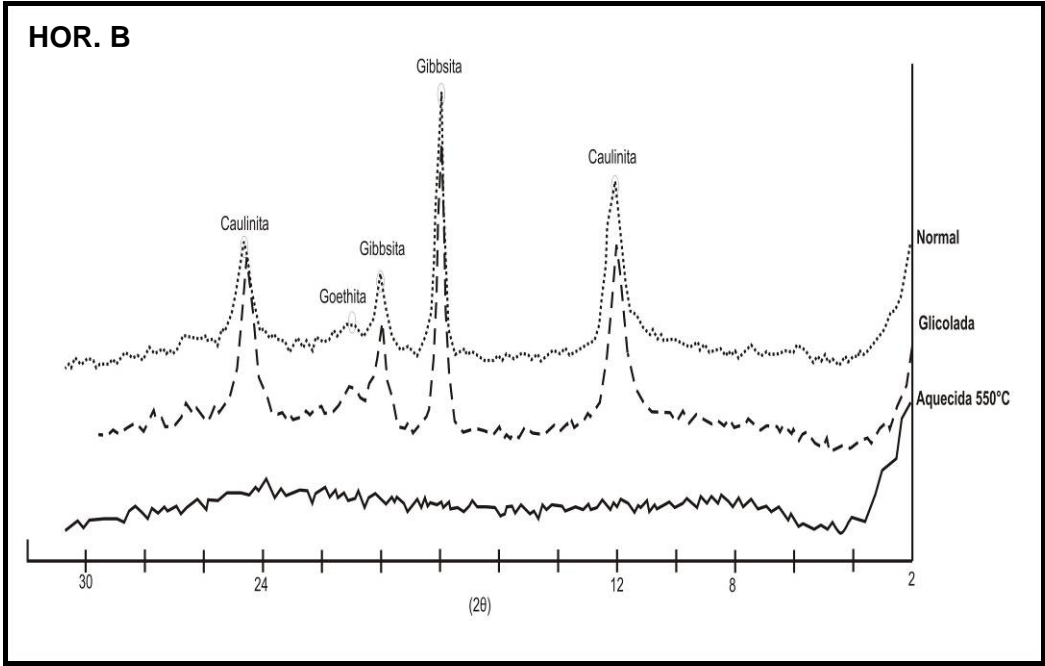
Esqueleto

- Dimensão: areia grossa a silte fino.
- Seleção: perfeitamente selecionado (apenas esqueleto)
- Mineralogia: Feldspato, quartzo, mica (em alteração para caulinita) e outros
- Arredondamento / esfericidade: angular / subesférico
- Exoscopia (rugosidade superficial): rugosa
- Distribuição de base: aleatória

- Distribuição referida: não referida
- Orientação de base: não orientada
- Gênese funcional: Mônica (disjunção – sem plasma)

Anexo II (Difratogramas referentes as amostras normal, glicolada e aquecida dos horizontes A, B e C, respectivamente)





Anexo III (Curvas Temperatura versus Tempo obtidas durante a execução do ensaio de Ressecamento para as amostras do horizonte, A, B e C e suas misturas com bentonita (5% e 10%).

