



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II – CAMPINA GRANDE

VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DE UMA ARGILA EXPANSIVA
DO LITORAL NORTE DE PERNAMBUCO

EDINALVA GOMES BASTOS

CAMPINA GRANDE

OUTUBRO DE 1994

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DE UMA ARGILA EXPANSIVA
DO LITORAL NORTE DE PERNAMBUCO

Edinalva Gomes Bastos

José Fernando Thomé Jucá
Orientador

Ademir Montes Ferreira
Co-orientador

D. 624.131.44.2
324 22

(743)



B324v Bastos, Edinalva Gomes.
Variação volumétrica de uma argila expansiva do litoral norte de Pernambuco / Edinalva Gomes Bastos. - Campina Grande, 1994.
153 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1994.

Referências.
"Orientação : Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá, Prof. M.Sc. Ademir Montes Ferreira".

1. Solo - Propriedades. 2. Argila. 3. Variações Volumétricas. 4. Solo Expansivo. 5. Dissertação - Engenharia Civil. I. Jucá, José Fernando Thomé. II. Ferreira, Ademir Montes. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

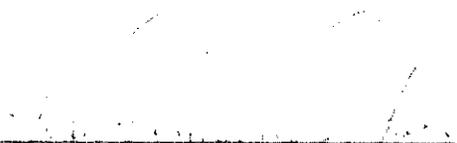
CDU 624.131.22(043)

**VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA DE UMA ARGILA EXPANSIVA
DO LITORAL NORTE DE PERNAMBUCO**

Autora: *Edinalya Gomes Bastos*

Data: 27 de Outubro de 1994

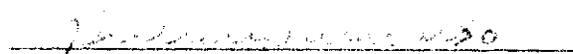
Comissão Examinadora:



José Fernando Thomé Jucá, D.Sc.
Orientador



Ademir Montes Ferreira, M.Sc.
Co-orientador



João Batista Queiroz de Carvalho, Ph.D.
Examinador interno



Erundino Pousada Presa, D.Sc.
Examinador externo

Campina Grande - Paraíba

BASTOS, EDINALVA GOMES

Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva do Litoral
Norte de Pernambuco.

xiii, 153 p. 29,7 cm (CCT/UFPB, M.Sc., Engenharia Civil, 1994)

Dissertação - Universidade Federal da Paraíba, CCT, Campina Grande.

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| 1. Solo Expansivo | 2. Variação Volumétrica |
| 3. Ensaio de Solo | |
| I. UFPB/CCT | II. Título (série). |

A meus pais,
Iracema & Blaudecy Bastos

A meu irmão,
Edinaldo Gomes Bastos

AGRADECIMENTOS

A minha família, por todo apoio, incentivo, entusiasmo e constantes exemplos.

Ao professor José Fernando Thomé Jucá, pela excelente orientação e sugestões, além do incentivo, apoio e amizade, não apenas durante a realização deste trabalho, mas desde o curso de graduação.

Ao professor José Maria Justino da Silva, pela valiosa ajuda na realização dos trabalhos de campo, sugestões e amizade.

Ao professor Tarcisio Ferreira Silva, pela valiosa ajuda na realização das medições de nivelamento.

Ao professor Ademir Montes Ferreira, pelo valioso apoio na resolução de questões administrativas durante a realização deste trabalho.

Ao professor Heber Carlos Ferreira, pela valiosa ajuda na realização e interpretação dos ensaios químicos e mineralógicos.

Ao Departamento de Engenharia Civil e ao Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, por ceder instalações e equipamentos para a realização deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Solos e Instrumentação, em especial a Antônio Brito e Severino Costa, pela valiosa ajuda em toda a fase experimental deste trabalho. Como também a João Telles, Francisco Moura e Everaldo Paulo.

Aos Laboratório de Análise Mineral e Laboratório de Irrigação da Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande, Laboratório de Análises Minerais e Solos - SUDENE e ao ITEP - Instituto Tecnológico de Pernambuco, pela realização dos ensaios químicos e mineralógicos.

À COMPESA, em especial à equipe da ETE-Janga, por todo apoio durante a realização dos trabalhos de campo.

Aos professores, funcionários e colegas do mestrado em geotecnia da Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande, pela convivência e amizade.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Solos e Instrumentação, por todo o apoio, incentivo e amizade, desde a época do curso de graduação.

Aos amigos, alunos do mestrado em geotecnia e bolsistas do Laboratório de Solos e Instrumentação - UFPE, pela convivência, incentivo e entusiasmo.

Aos amigos de Campina Grande, em especial a Maria José & família, Soenia, Marilda & Ernani, Cíntia, Carmem, José Alberto, Bardou, Adriani e Gilmar, pela amizade e carinho com que me receberam, não apenas durante o curso de mestrado, como também em minhas frequentes visitas. Além da ajuda, com a qual sempre tenho contado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

RESUMO

O mecanismo de variação volumétrica em solos expansivos é influenciado por vários fatores, que podem ser classificados em três grupos: as propriedades do solo, as condições ambientais e o estado de tensões. O objetivo deste trabalho é estudar a variação volumétrica de uma argila expansiva não saturada do município de Paulista, no litoral norte de Pernambuco, através de ensaios de laboratório e campo, que procurem reproduzir os fenômenos reais. Estes resultados foram comparados com os de observações diretas do comportamento *in situ*, por meio de instrumentação. A investigação experimental compreende: o estudo das condições locais, a caracterização do solo, a determinação dos perfis de umidade e sucção do solo *in situ*, até a profundidade de 4.5 m, além de um extenso programa de ensaios, que permitiram determinar parâmetros do solo não saturado. Os perfis de umidade e a instrumentação local definiram a profundidade da camada ativa de 3 m. A sucção do solo *in situ* foi determinada pelo método de papel filtro, que para condições climáticas extremas variou de 40 kPa a 6000 kPa, a 1.0 m de profundidade. As variações de volume foram determinados com o uso de ensaios edométricos com controle da tensão vertical e da sucção. Os parâmetros de potencial e pressão de expansão foram determinados também, através de edômetros convencionais. As relações sucção-umidade foram determinadas utilizando-se células de pressão com membrana semi-permeável. As previsões de deslocamento, realizadas por três métodos simples, permitiram verificar a adequação dos parâmetros obtidos nos ensaios, em relação às medidas de deslocamento vertical *in situ*, embora apresentando uma tendência geral de sobreestimação das expansões e contrações. No que se refere à variação volumétrica, a sucção mostrou ser um parâmetro mais conveniente que o teor de umidade para controle do comportamento do solo em condições não saturadas.

ABSTRACT

The mechanism of volume change on expansive clays is influenced by a number of factors, which can be considered in three groups: the soil properties, the environmental conditions and the state of stress. The main purpose of this thesis is to present the volume change behavior of an unsaturated expansive clay from the north coast of Pernambuco. The experimental research carried out involved soil characterization, soil suction and soil moisture content profiles up to 4.5 m. These profiles were used to determine the depth of active layer. In situ soil suction is measured by employing the filter paper method. For extreme climate conditions the soil suction varies from 40 kPa to 6.000 kPa at 1.0 m depth. Volume changes behavior was investigated using oedometer tests under controlled vertical stress and suction. The potential swell and swell pressure parameters were also determined using the standard oedometer tests. Membrane pressure cells were used in the determination of suction-moisture content relationships. These studies were used to predict volume changes using three simple methods based on laboratory and field tests data. Shrink/swell prediction results are shown to be a reasonable agreement with the observations. In general, the predicted results tends to overestimate field shrink/swell. With reference to volume change, the soil suction parameter allows a best ability to represent unsaturated soils.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1. Fases Constituintes do Solo.....	04
2.1.1. Introdução.....	04
2.1.2. Fase Sólida.....	04
2.1.3. Fase Líquida.....	09
2.1.4. Fase Gasosa.....	10
2.2. Estado Tensional Microestrutural.....	11
2.2.1. Microestrutura.....	11
2.2.2. Camada Dupla Difusa.....	12
2.2.3. Interação Entre Partículas.....	14
2.3. Sucção.....	15
2.3.1. Estado de Energia.....	15
2.3.2. Potencial da Água do Solo.....	16
2.3.2.1. Potencial Gravitacional.....	17
2.3.2.2. Potencial Osmótico ou de Solute.....	18
2.3.2.3. Potencial Matricial ou Capilar e de adsorção.....	19
2.3.2.4. Potencial Pneumático ou de Pressão Externa de Gás.....	20
2.3.3. A Sucção do Solo.....	21
2.3.3.1. Sucção Matricial.....	23
2.3.3.2. Sucção Osmótica ou de soluto.....	24
2.3.3.3. Medida da Sucção.....	26
2.3.4. Tensão Intersticial Negativa.....	32
2.4. Mecanismos de Expansão.....	33
2.4.1. Introdução.....	33
2.4.2. Atração das Partículas de Argila.....	34

2.4.3. Hidratação de Cátions.....	35
2.4.3. Repulsão Osmótica.....	35
2.5. Fatores que Influenciam na Expansão.....	36
2.5.1. Introdução.....	36
2.5.2. Fatores Internos.....	36
2.5.2.1. Composição Mineralógica.....	36
2.5.2.2. Capacidade de Troca de Cátions.....	37
2.5.2.3. Cátions Trocáveis.....	38
2.5.2.4. Estrutura do Solo.....	38
2.5.2.5. Cimentações e Ligações Diagenéticas.....	39
2.5.2.6. Sucção.....	40
2.5.3. Fatores Externos.....	40
2.5.3.1. Tempo Permitido para a Expansão.....	40
2.5.3.2. Teor de Umidade e Densidade Aparente Iniciais.....	40
2.5.3.3. Temperatura.....	41
2.5.3.4. Efeito da Água.....	41
2.5.3.5. Ciclos de Secagem e Umedecimento.....	45
2.5.3.6. Fatores Ambientais.....	46
2.5.3.7. Pressão Vertical.....	47
2.5.3.8. Trajetória das Tensões.....	48
2.6. Contração por Ressecamento.....	48
2.6.1. Introdução.....	48
2.6.2. Processo de Ressecamento do Solo.....	49
2.7. Variáveis de Estado Tensional.....	51

3. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Condições Locais.....	56
3.2. Caracterização e Perfis Geotécnicos.....	59
3.2.1. Caracterização do solo.....	59
3.2.2. Perfil de Sondagem.....	60

3.2.3. Perfil de Umidade.....	60
3.2.4. Características Mineralógicas e Físico-Químicas.....	61
3.2.4.1. Difração de Raios-X.....	61
3.2.4.1. Análises Químicas.....	62
3.2.4.2. Análise Térmica Diferencial.....	63
3.3. Sucção do Solo.....	63
3.3.1. Célula de Pressão com Membrana.....	63
3.3.1.1. Descrição do Equipamento.....	63
3.3.1.2. Descrição dos Ensaios.....	65
3.3.1.3. Execução dos Ensaios.....	67
3.3.2. Papel Filtro.....	67
3.3.2.1. Descrição dos Materiais e Métodos.....	67
3.3.2.2. Calibração dos Papéis Filtro.....	70
3.3.2.3. Execução dos Ensaios.....	73
3.3.3. Dessecador de Vácuo.....	77
3.3.3.1. Descrição do Método.....	77
3.3.3.2. Execução dos Ensaios.....	79
3.4. Variação Volumétrica do Solo.....	80
3.4.1. Edométricos com Umidade Controlada.....	80
3.4.1.1. Descrição dos Equipamentos.....	80
3.4.1.2. Descrição dos Ensaios.....	80
3.4.1.3. Execução dos Ensaios.....	81
3.4.2. Expansão com Águas de Diferentes Composições.....	88
3.4.2.1. Descrição dos Materiais e Métodos.....	88
3.4.2.2. Execução dos Ensaios.....	89
3.4.3. Ensaios Edométricos com Sucção Controlada.....	91
3.4.3.1. Descrição do Equipamento.....	91
3.4.3.2. Descrição dos Ensaios.....	93
3.4.3.3. Execução dos Ensaios.....	93
3.4.4. Contração por Secagem.....	94
3.4.4.1. Execução dos Ensaios.....	94
3.4.5. Variação Volumétrica <i>In Situ</i>	97

3.4.5.1. Instrumentação.....	97
3.4.5.1. Deslocamentos Verticais.....	98

4. PREVISÃO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DO SOLO

4.1. Introdução.....	100
4.2. Potencial de Expansão.....	100
4.3. Deslocamentos Verticais.....	101
4.3.1. Método Baseado nos Ensaios Edométricos.....	101
4.3.2. Método Baseado nos Ensaios de Sucção do Solo, Proposto por Fredlund (1987).....	105
4.3.3. Método de Mitchell.....	107

5. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS

5.1. Introdução.....	111
5.2. Caracterização e Perfis do Solo.....	111
5.3. Sucção do Solo.....	113
5.3.1. Membrana de Pressão.....	113
5.3.2. Papel Filtro.....	115
5.3.3. Dessecador de Vácuo.....	117
5.4. Variação Volumétrica do Solo.....	118
5.4.1. Ensaios Edométricos com Umidade Controlada.....	118
5.4.2. Ensaios Edométricos com Sucção Controlada.....	120
5.4.3. Contração Livre por Ressecamento.....	121
5.5. Variação Volumétrica <i>In Situ</i>.....	126
5.6. Previsão de Deslocamento Vertical do Solo.....	129
5.6.1. Potencial de Expansão.....	129
5.6.2. Deslocamento Vertical.....	129

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Revisão Bibliográfica.....	131
6.2. Investigação Experimental.....	131
6.3. Previsão de Deslocamentos Verticais.....	133
6.4. Recomendações Para Futuras Pesquisas.....	133

LISTAS DE FIGURAS E QUADROS.....	135
---	------------

BIBLIOGRAFIA.....	144
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na região Nordeste, onde predomina o clima semi-árido com ciclos bem definidos de umedecimento e ressecamento, encontram-se solos não saturados e com grande deficiência de umidade.

O conhecimento sobre o comportamento do solo não saturado ainda é escasso, devido à complexidade e à grande quantidade de fatores envolvidos, como por exemplo: a sucção, a histerese, a não linearidade do fluxo. A maior complexidade dos ensaios não saturados tem feito com que o desenvolvimento de estudos e projetos geotécnicos sejam conduzidos mais frequentemente na condição saturada, que via de regra é mais desfavorável. Isto porque os equipamentos e técnicas tradicionais de ensaio de laboratório, baseiam-se nesta condição, que muitas vezes não representa a situação encontrada na natureza. Grande parte dos problemas geotécnicos ocorre em solos não saturados, cujo comportamento está associado às variações de umidade, as quais podem ser tanto de origem natural como artificial, e modificam o comportamento mecânico dos solos, alterando o desempenho das obras neles assentes ou a estabilidade de taludes envolvendo esses solos.

O estudo dos solos não saturados, visa analisar os problemas geotécnicos através de parâmetros representativos do estado tensional *in situ*, utilizando-se vários equipamentos e técnicas de ensaios que permitem o controle e/ou a determinação da sucção através de métodos diretos e indiretos. Este estudo pode ser realizado através de diferentes procedimentos, tais como:

- a) observação direta do comportamento do solo ou das construções assentes sobre ele, através de instrumentação e ensaios de campo, determinando-se os parâmetros necessários para as análises;

- b) realização de ensaios em laboratório, procurando reproduzir os fenômenos reais, e analisando a influência de determinados parâmetros em seu comportamento;
- c) elaboração de formulações empíricas, que relacionem os comportamentos observados com os parâmetros ou procedimentos adotados em casos concretos;
- d) elaboração de modelos que permitam prever o comportamento geral do solo em campo ou no laboratório.

Em solos que apresentem um comportamento especial, como no caso dos solos potencialmente expansivos, a variação de umidade provoca uma instabilidade volumétrica, que é transferida às obras através de suas fundações, com levantamento nos períodos mais úmidos e recalque, devido à contração do solo, nos períodos secos. Os mecanismos de variação volumétrica destes solos dependem de uma quantidade de fatores que envolvem as propriedades do solo, do meio ambiente e o estado tensional a que estão submetidos.

Embora o fenômeno da expansão do solo já fosse conhecido há bastante tempo, só após o crescimento das construções nas regiões áridas, como o oeste dos Estados Unidos e Canadá, a Austrália e a África, é que os problemas associados com a expansão e a contração do solo passaram a receber maior atenção.

No Nordeste do Brasil existem extensas áreas, distribuídas nos estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte, Alagoas e Bahia, onde foi constatada a ocorrência de solos potencialmente expansivos. No litoral norte de Pernambuco, encontra-se grandes áreas que apresentam argilas potencialmente expansivas.

O objetivo deste trabalho é estudar a variação volumétrica de uma argila expansiva não saturada do município de Paulista, situado a 20 km ao norte do Recife, através de ensaios de laboratório, que procurem reproduzir os fenômenos de forma mais real e comparações entre estes resultados e aqueles provenientes de observações diretas do comportamento *in situ*, por meio de instrumentação e ensaios de campo.

O trabalho está dividido em 6 capítulos: o capítulo 2 apresenta o estado atual do conhecimento dos solos não saturados, em especial dos solos potencialmente expansivos. Este capítulo inclui as fases constituintes dos solos, o estado tensional microestrutural, a sucção e suas componentes, os mecanismos de expansão do solo, os fatores que influenciam nesta expansão e as variáveis do estado tensional.

A investigação experimental, composta da descrição das condições locais, caracterização, perfis do solo e de umidade, sucção e variação volumétrica, compõem o capítulo 3. Neste capítulo estão apresentadas as descrições dos equipamentos e técnicas de ensaios, metodologia dos ensaios de laboratório e de campo e resultados das medidas realizadas através da instrumentação instalada no campo experimental.

O capítulo 4 apresenta a previsão do deslocamento vertical do solo. Esta previsão foi realizada com o objetivo de comparação com as medidas realizadas através da instrumentação instalada no campo experimental. Utilizou-se três métodos analíticos simples, a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório e campo. Apresenta-se, também, uma classificação do potencial de expansão, por meio de diferentes critérios.

O capítulo 5 apresenta os resultados e as análises da investigação experimental, enquanto que as conclusões e recomendações são apresentadas no capítulo 6.

CAPÍTULO 2

ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1. Fases Constituintes do Solo

2.1.1. Introdução

Na literatura existem diferentes considerações sobre as fases constituintes dos solos não saturados. Alguns autores consideram o solo não saturado constituído de quatro fases: ar e água, como as fases fluídas, e os grãos e a interface entre o ar livre e a água livre (*membrana contrátil*), como as fases sólidas (Fredlund & Morgenstern, 1977). Entretanto, outros autores consideram o solo não saturado constituído de três fases: sólidos, ar e água. A fase sólida sendo composta por partículas sólidas e água adsorvida. A fase líquida composta por água livre, ar dissolvido na água e sais dissolvidos na água. E a fase gasosa composta por vapor de água e ar livre.

Neste trabalho, o solo será considerado um sistema trifásico, composto de um esqueleto sólido cujos poros são preenchidos por água e ar.

2.1.2. Fase Sólida

Os sólidos podem ser: *amorfos*, quando suas unidades elementares (íons, átomos ou moléculas) apresentam uma desordem aleatória; e *cristalinos*, quando suas unidades elementares formam uma rede espacial bem definida.

Os sólidos cristalinos podem ser classificados pelo tipo de ligação química entre os átomos da sua estrutura, existindo uma correlação direta entre o tipo de ligação e as propriedades físicas destes sólidos. Estas ligações podem ser de quatro tipos: *iônicas*, *covalentes*, *metálicas* e *Van der Waals*; que conferem a esses sólidos propriedades físicas e estruturais características para cada caso.

A fase sólida do solo é constituída de partículas minerais, que variam de tamanho, forma, textura, composição mineralógica, superfície específica e configuração cristalográfica; e também, de disposição de água adsorvida.

No caso da argila, a partícula sólida tem forma laminar, com o diâmetro muito maior que a espessura, predominando na superfície os íons de oxigênio e hidroxilas, o que provoca um excesso de carga negativa nas faces.

As argilas são constituídas, principalmente, por minerais cristalinos de estrutura laminar formados de silicatos de alumínio, de magnésio e de ferro, denominados de *argilominerais*. Embora apresentem, também, outros minerais cristalinos e amorfos.

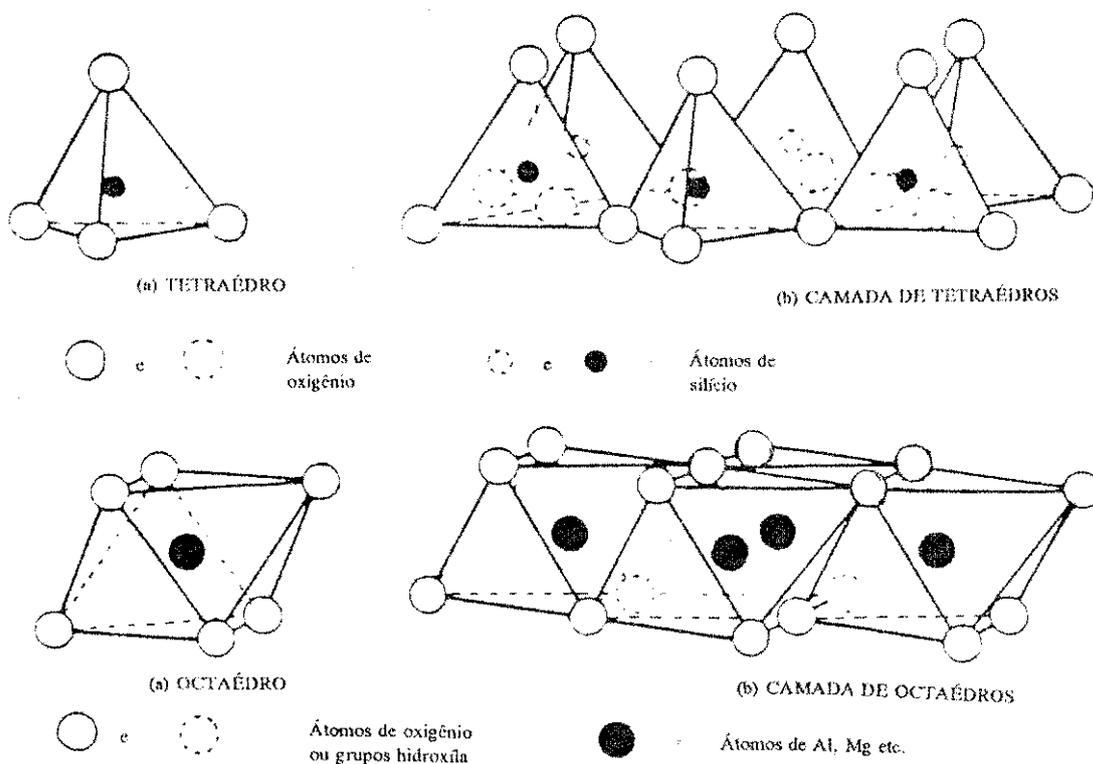


Figura 2.1. Unidades Elementares e Camadas Básicas das Unidades Estruturais Laminares dos Argilominerais

Os argilominerais foram definidos pelo Comité International Pour L'étude des Argiles, como:

Argilominerais cristalinos são silicatos hidratados de reticulado ou rede cristalina em camadas (lamelar) ou de estrutura fibrosa, constituídos por folhas, planos ou camadas contínuas de tetraédros SiO_4 , ordenados em forma hexagonal, condensados com folhas ou camadas octaédricas. Os argilominerais são essencialmente constituídos por partículas de pequenas dimensões.

Quimicamente, os argilominerais são silicatos constituídos de camadas planas de duas unidades elementares:

- a) *tetraédros de silício*, com quatro átomos de oxigênio em volta de um de silício,
- b) *octaédros de alumínio, magnésio etc.*, com seis átomos de oxigênio ou grupo de hidroxila em volta de um de alumínio, magnésio etc.

Na formação dos silicatos, pode ocorrer substituições isomórficas, com o alumínio substituindo o silício nos tetraédros e o magnésio, o ferro ou alguns cátions de tamanho semelhante, substituindo o alumínio nos octaédros. Estas substituições provocam deformações na rede cristalina e deficiência de carga positiva, pois os íons substitutos são de tamanhos diferentes e com carga positiva de valência, geralmente, inferior aos originais. Os cátions trocáveis tendem a neutralizar esta deficiência de carga positiva.

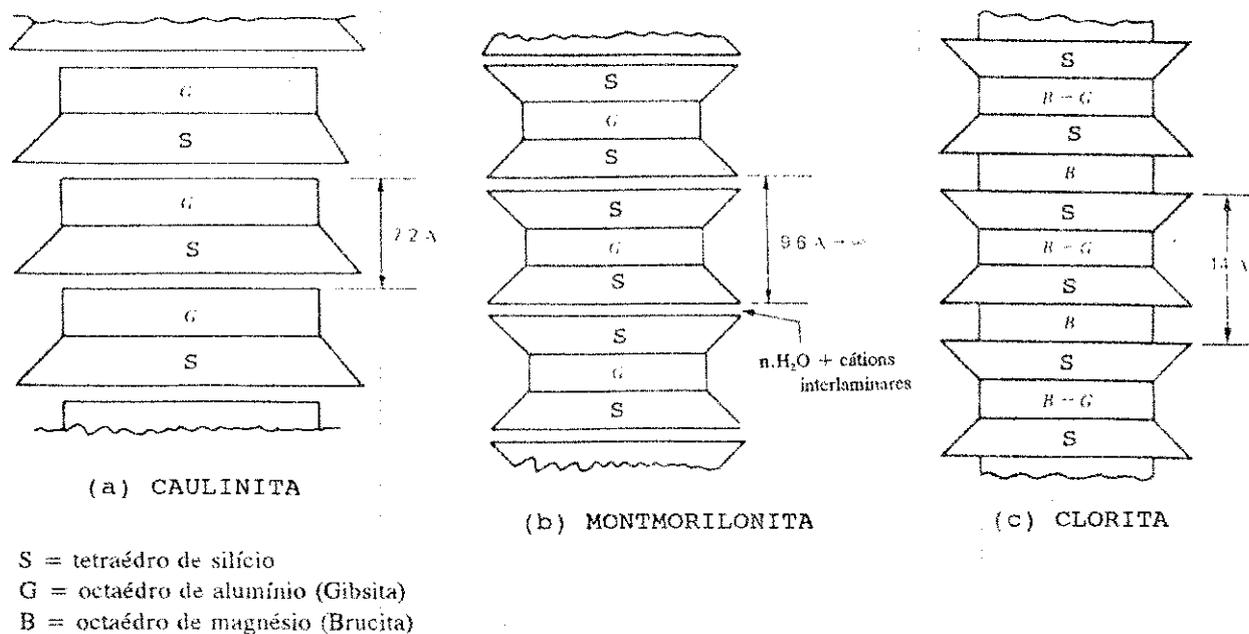


Figura 2.2. Unidades Estruturais dos Argilominerais

Os argilominerais apresentam três tipos de unidade estrutural (Figura 2.2):

- a) *difórmicas*, ou de camada dupla, constituídas de camadas alternadas de tetraédros e octaédros, como a caulinita (silicato de alumínio hidratado),
- b) *trifórmicas*, ou de camada tripla, constituídas de uma camada de octaédros entre dois tetraédros, como a illita, a montmorilonita e a vermiculita,
- c) *camada mista*, constituída de inter-estratificação, regular ou aleatória, de argilominerais de duas ou três camadas, como a clorita.

As partículas de argila possuem diâmetro equivalente menor que $2 \mu\text{m}$. Um solo terá mais possibilidade de conter minerais expansivos quanto menor seja o tamanho das suas partículas (Delgado, 1986). Como a área específica da partícula é inversamente proporcional ao seu tamanho, a montmorilonita é o argilomineral que apresenta maior área específica (700-800 m^2/g).

As argilas expansivas são constituídas, predominantemente, por minerais trifórmicos, em especial os do grupo esmectita (ou montmorilonita). Os argilominerais deste grupo são constituídos de uma camada de octaédros de alumínio entre duas de tetraédros de silício, unidas entre si por oxigênios comuns às camadas; enquanto que a união entre unidades estruturais vizinhas é feita por forças de Van der Waals e cátions, que podem estar presentes para balancear a deficiência de cargas na estrutura. Essas ligações são fracas e facilmente separadas por clivagem decorrente da adsorção de água ou de outro líquido polar, permitindo seu espaçamento basal variar de cerca de $9,6 \text{ \AA}$ até sua completa separação (Mitchell, 1976).

A outra componente da fase sólida é a água adsorvida, que faz parte da camada dupla difusa, não podendo ser retirada por ações hidrodinâmicas. Esta água é encontrada em volta da superfície das partículas sólidas da argila, e apresenta estrutura mais rígida e mais ordenada que a água livre, com grande viscosidade quando em poros muito finos.

As moléculas de água, que são dipolos elétricos, são atraídas para a superfície da partícula por: excesso de carga negativa nas faces da partícula, hidratação de íons trocáveis, fenômenos osmóticos e forças de Van der Waals.

A espessura da camada de água adsorvida é da ordem de 10 Å, já que mais de uma camada de molécula de água pode ser adsorvida. Por ser um dipolo, a molécula de água apresenta uma orientação dominante, que vai diminuindo a medida que aumenta a distância à superfície da partícula, até se tornar água livre. A Figura 2.3 apresenta os mecanismos de adsorção da água pela superfície argilosa.

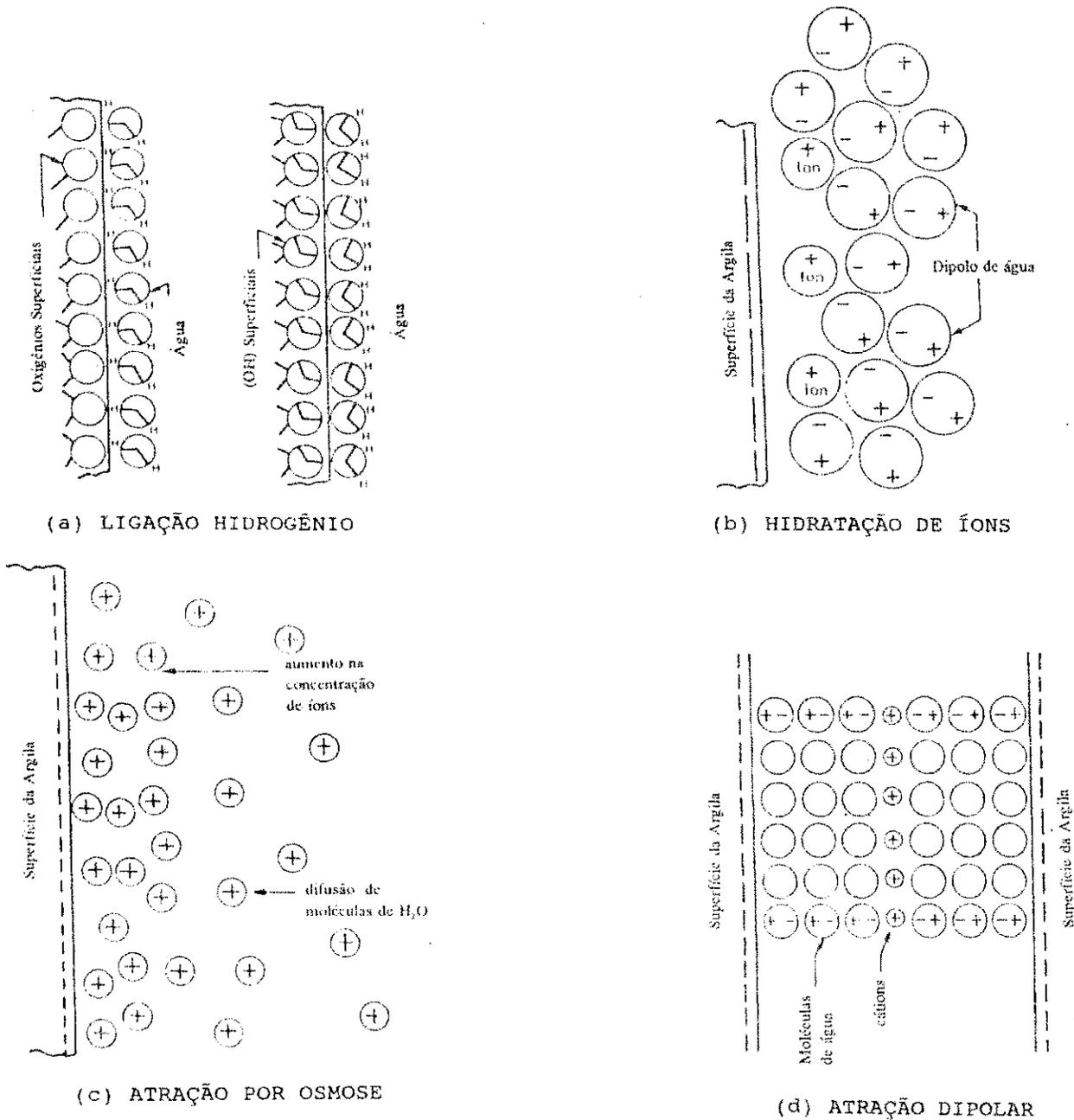


Figura 2.3. Mecanismo de Adsorção de Água pela Superfície Argilosa

2.1.3. Fase Líquida

A fase líquida, que pode conter sais e ar dissolvidos, é constituída de:

- a) *água de adsorção*: retida por forças de adsorção,
- b) *água capilar*: retida por forças capilares, provenientes da tensão superficial,
- c) *água gravitacional*: água que circula livremente submetida fundamentalmente a forças de gravidade.

A molécula de água é esférica, com os átomos de hidrogênio ligados ao de oxigênio, formando um ângulo de cerca de 105° (Figura 2.4). Esta distribuição dos átomos de hidrogênio e oxigênio faz da molécula de água um dipolo elétrico, onde prevalece excesso de carga negativa no lado do oxigênio e excesso de carga positiva no lado do hidrogênio, atraindo moléculas vizinhas em uma certa orientação. O átomo de hidrogênio atua como elemento de ligação entre moléculas, sendo compartilhado por dois átomos fortemente eletronegativos, formando uma rede estrutural hexagonal.

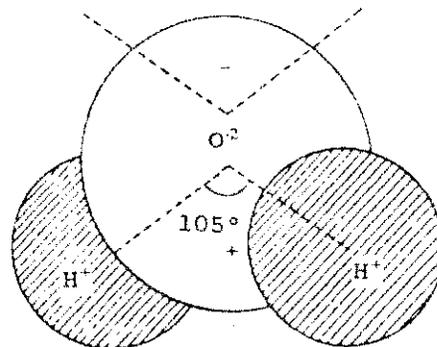


Figura 2.4. Modelo da Molécula de Água Consistindo de Um Átomo de Oxigênio e Dois Átomos de Hidrogênio

O ar dissolvido na água segue a lei de Henry, ou seja, a concentração de massa de gás dissolvido (C_m) é proporcional à pressão parcial de gás (P_i):

$$C_m = S_c \cdot \frac{P_i}{P_o} \quad (2.1)$$

onde: S_c = coeficiente de solubilidade do gás na água

P_o = pressão total da atmosfera.

A concentração de gases na água, geralmente, aumenta com a pressão e diminui com a temperatura (Hillel, 1971).

Os sais dissolvidos na água interferem no desenvolvimento da camada dupla difusa, que diminui com o aumento da concentração. A variação da concentração destes sais pode resultar em expansão ou contração do solo e variações de resistência.

2.1.4. Fase Gasosa

A fase gasosa é composta por vapor de água e ar livre.

A pressão de vapor é o mecanismo que regula a quantidade de vapor que existe em contato com o líquido, nas condições de equilíbrio entre a água que se evapora e a que se condensa através de sua superfície (Lloret, 1982). Esta pressão de vapor depende da temperatura, da pressão parcial do ar mesclado com o vapor, da forma da superfície de separação entre as fases líquida e gasosa.

O ar livre no solo, em pressões e temperaturas usuais, é considerado um gás perfeito, obedecendo à lei de Boyle-Gay-Lussac.

Como o solo não saturado apresenta as três fases, deve-se considerar a existência da interface ar-água e suas consequências para o equilíbrio interno das forças envolvidas (Pousada Presa, 1982). Estas forças são:

- a) *forças matriciais*: capilares e de adsorção,
- b) *forças osmóticas*: devido a variações na concentração de substâncias dissolvidas na fase líquida,
- c) *forças pneumáticas*: devido à pressão na fase gasosa,
- d) *forças exteriores*: devido a sobrecargas,
- e) *forças de massa*: devido à gravidade.

2.2. Estado Tensional Microestrutural

2.2.1. Microestrutura

A partícula lamelar de argila possui carga elétrica negativa nas faces. Esta carga negativa pode se originar da combinação ou ação isolada dos seguintes fatores: substituição isomórfica, dissociação de íons hidroxila na superfície, ausência de cátions na estrutura cristalina, adsorção de íons ou presença de matéria orgânica. Dentre esses fatores, a substituição isomórfica é o que tem maior responsabilidade na origem dessas cargas negativas.

Devido a esta carga elétrica negativa na superfície da partícula e ao caráter de dipolo da molécula de água, forma-se uma camada de água adsorvida, que estando ligada diretamente à superfície da partícula, apresenta características físicas diferentes da água líquida. Estas características, entretanto, restringem-se a pequenas distâncias da superfície da partícula (8 a 28 Å, de acordo com Grim, 1968), podendo apresentar uma transição abrupta ou gradual, para a água líquida.

O processo pelo qual a adsorção toma lugar é descrito algumas vezes como atração eletrostática, outras como um efeito de superfície da estrutura. Existe do lado externo da camada adsorvida, água ordenada e bem menos ligada aos cátions trocáveis. Esta camada de água é chamada de *camada dupla difusa* ou *camada dupla de Gouy-Chapman*. As variações na espessura destas camadas causam expansão e contração dos solos argilosos (Schreiner, 1987).

A magnitude da carga elétrica tem relação com a área da superfície da partícula, que é, portanto, uma boa indicação da influência das forças elétricas no seu comportamento.

Uma partícula que tem seu comportamento controlado mais pelas forças de superfície que pelas forças de massa é chamada de *partícula coloidal*. A partícula de argila, devido ao seu pequeno tamanho, é coloidal.

2.2.2. Camada Dupla Difusa

A partícula de solo, em estado natural, atrai íons que neutralizam sua carga. Estes íons podem ser trocados por outros íons, em solução aquosa, sem provocar modificações na sua estrutura cristalina; e são chamados de *íons trocáveis*. Os íons trocáveis influem nas propriedades físico-químicas e tecnológicas dos argilominerais.

Para a montmorilonita a capacidade de troca catiônica varia de 80 a 150 meq por 100 g, enquanto que para a caulinita é de 3 a 15 meq por 100 g. Esta capacidade de troca catiônica pode resultar do desequilíbrio de cargas devido à substituição isomórfica no reticulado cristalino, ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e substituição de hidrogênio por hidroxilas.

Os cátions adsorvidos à superfície da argila neutralizam sua eletronegatividade. Os cátions excedentes, junto com seus ânions associados, são apresentados como sais precipitados (Mitchell, 1976).

Como a concentração dos cátions é muito alta perto da superfície da partícula, eles tendem a se difundir, afastando-se da superfície para igualar a concentração. Por outro lado estabelecem-se forças atrativas resultantes das cargas negativas superficiais, que diminuem com o aumento da distância à superfície, diminuindo a concentração de cátions. Os cátions ficam confinados entre duas lâminas do mineral.

A carga negativa da superfície da partícula e a carga positiva distribuída na fase líquida adjacente formam a *camada dupla difusa*. A espessura desta camada é a distância da superfície que neutraliza as cargas na partícula.

O modelo da camada dupla, apresenta uma camada de íons do eletrólito estabilizante rigidamente ligada à superfície (camada de Stern). A camada difusa de íons do eletrólito estabilizante começa a uma distância dada por uma distribuição de Poisson, conforme é indicado na Figura 2.5 (Souza Santos, 1976).

A variação do potencial da camada dupla com a distância obedece uma lei exponencial e sua espessura decresce inversamente à raiz quadrada da concentração de íons atraídos pela superfície e à valência deles; e aumenta com a raiz quadrada da constante dielétrica e da temperatura, conforme demonstra Mitchell (1976) na equação:

$$\frac{1}{K} = \left[\frac{D k T}{8 \pi n_0 e^2 v^2} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

- onde:
- 1/K = espessura da camada dupla (Å)
 - D = constante dielétrica
 - k = constante de Boltzmann (1.38x10⁻¹⁶ erg/°K)
 - T = temperatura (°K)
 - n₀ = concentração de íons
 - e = carga eletrônica unitária (16.0x10⁻²⁰ Coulomb)
 - v = valência dos íons

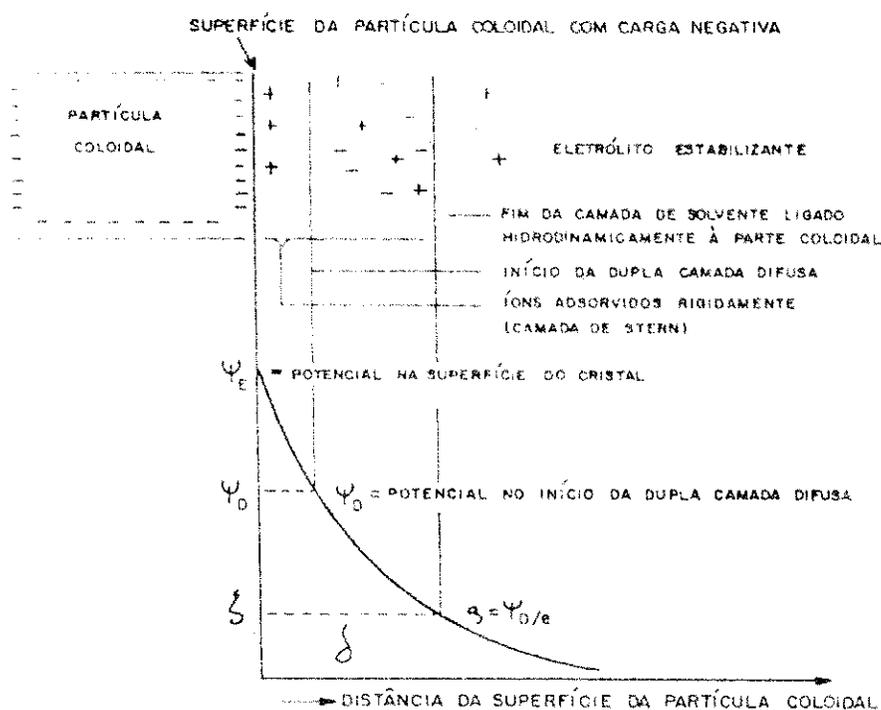


Figura 2.5. Estrutura Esquemática da Distribuição de Cargas Elétricas em uma Partícula Coloidal Negativa (adaptada de Olphen, 1963, e Sennet & Olivier, 1965)

A camada dupla tem seu desenvolvimento afetado por vários fatores, sendo o principal o tipo de cátions trocáveis. De acordo com Schreiner (1987), este desenvolvimento é maior para os cátions de sódio, cálcio e ferro, em ordem decrescente. Também influi a composição do fluido intersticial. Quanto maior a concentração de sais no fluido, menor o desenvolvimento da camada dupla. A expansão e a contração dos solos argilosos podem sofrer alterações pela concentração de sais no fluido.

2.2.3. Interação Entre Partículas

A interação entre as partículas de argila não ocorre pelo contato sólido-sólido, mas através da camada dupla.

Se a distância entre duas partículas de argila em solução aquosa, é superior à espessura de suas respectivas camadas duplas, não ocorre interferência entre os íons de cada camada. Entretanto, diminuindo-se esta distância, ocorrem forças de repulsão, já que os íons são de mesmo sinal. Estas forças decrescem exponencialmente com o aumento da distância entre as partículas.

Segundo a teoria da camada dupla (Verwey & Overbeek, 1948), a força de repulsão aumenta com o aumento da constante dielétrica do fluido intersticial ou da temperatura, e também com a diminuição da concentração eletrolítica ou da valência dos cátions. Entre as partículas atuam estas forças de repulsão que são devido à interação das respectivas camadas dupla, e forças de atração provocadas pelas forças de Van der Waals. Quando a resultante das forças de interação entre as partículas é de repulsão, ocorre a dispersão. Enquanto que, quando a resultante é de atração, ocorre a floculação das partículas.

Nas interações *face-face* (a) e *borda-borda* (b), predomina a interação entre as duas camadas iônicas difusas. Já na interação *face-borda* (c) predomina a interação eletrostática, devido às cargas opostas das camadas difusas. Apresentando, portanto, a resultante de atração que leva à condição de floculação. A Figura 2.6 mostra os três processos de interação entre as partículas:

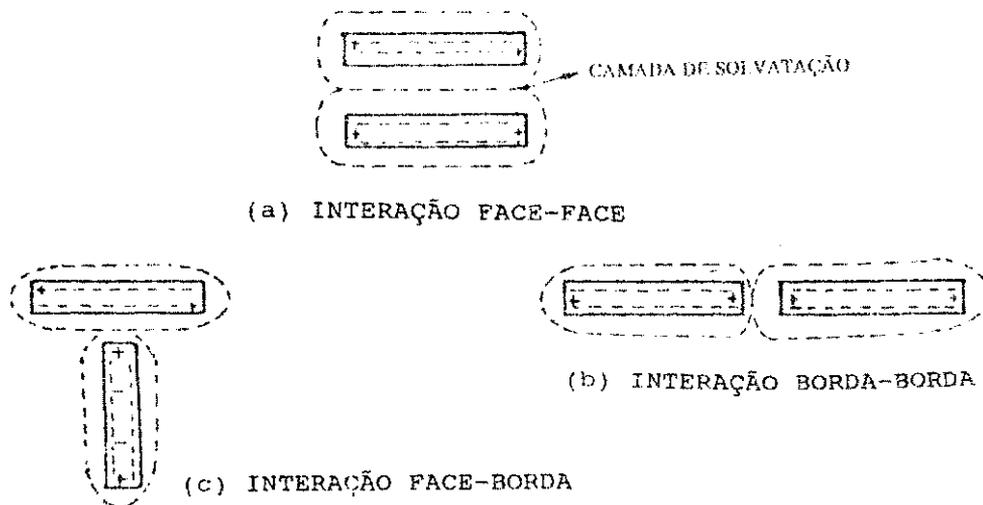


Figura 2.6. Esquema dos Três Tipos de Interação em Solução Aquosa de Partículas Defloculadas de Caulinita ou Montmorilonita

2.3. Sucção

2.3.1. Estado de Energia

A energia livre da água do solo relativa à água pura livre (Δf), pode expressar quantitativamente a retenção de água no solo e os gradientes que causam o fluxo de água (Aitchison, Russam & Richards, 1965).

A água do solo apresenta as duas formas principais de energia da física clássica:

- a) *energia cinética*: que por ser proporcional ao quadrado da velocidade, não é de grande importância no solo, já que o movimento desta água é muito lento.
- b) *energia potencial*: que por ser devido à posição ou condição interna, é de grande importância na água do solo, já que a tendência da água fluir dentro do solo é provocada pela diferença na sua energia potencial entre dois pontos dados.

A água do solo tende a buscar o equilíbrio, movendo-se de onde a energia potencial é alta para onde é baixa. A razão da diminuição da energia potencial com a distância, é a força de movimento que causa o fluxo (Hillel, 1971). Assim, para os estudos de fluxo, o importante não é a quantidade de energia potencial da água, mas o nível relativo desta energia em diferentes regiões do solo.

O movimento da água no solo pode ser expresso através da energia livre (Δf), que é definida por Edlefsen & Anderson (1943), citados por Aitchison, Russam & Richards (1965), como:

$$\Delta f = e + P.v - T.s = H - T.s \quad (2.3)$$

onde:

- e = energia interna (L^2/T^2)
- P = pressão (M/LT^2)
- v = volume específico (L^3/M)
- T = temperatura ($^{\circ}K$)
- s = entropia
- H = quantidade de calor (L^2/T^2)

Como a energia livre diminui com a remoção da água do solo, se $f_{\text{água livre}}$ é definida como zero, a energia livre da umidade em solo não saturado é sempre menor que zero, originando os termos *sucção* e *pressão intersticial negativa*, quando se expressa essa energia em termos de unidades de pressão.

A energia livre sofre efeitos da temperatura, da pressão externa, da pressão de soluto, dos campos de força gravitacional e de adsorção. O estado de energia da água do solo pode ser expresso de muitas formas, tais como: *potencial da água do solo* e *pressão ou sucção da água do solo*.

2.3.2. Potencial de Água do Solo

A diferença em energia livre entre a água do solo e a água em uma referência padrão, constitui o conceito de potencial de água do solo. Segundo Aslyng et al (1963), citado

por Hillel (1971) e vários outros autores, a International Soil Science Society definiu o potencial total de água do solo (ϕ_t), como:

A quantidade de trabalho que deve ser feito por quantidade unitária de água pura a fim de transpor, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório de água pura, em uma elevação especificada e à pressão atmosférica, para a água do solo, em um ponto considerado.

O potencial é função do grau de saturação e diminui com o aumento do teor de umidade do solo, devido à diminuição das forças que retêm a água. Em face da complexidade das forças de interação entre a água e a matriz sólida do solo, torna-se difícil selecionar variáveis independentes para formular uma equação de aplicação prática para o potencial de água do solo.

Como o potencial total é a soma de vários campos de força que atuam na água do solo, tais como gravitação, atração da matriz sólida por água (de adsorção e capilar), pressão de solutos, pressão externa de gás, esse conceito de potencial total fornece uma medida unificada para avaliar o estado da água no solo, em um dado momento, e pode ser expresso pela equação:

$$\phi_t = \phi_g + \phi_o + \phi_m + \phi_p \quad (2.4)$$

onde:

- ϕ_g = potencial gravitacional
- ϕ_o = potencial osmótico ou do soluto
- ϕ_m = potencial matricial ou mátrico (de adsorção e capilar)
- ϕ_p = potencial pneumático ou de pressão externa de gás.

Esses componentes do potencial de água do solo, foram definidos pela International Society of Soil Science, conforme se indica a seguir.

2.3.2.1. Potencial Gravitacional

É a quantidade de trabalho que deverá ser feito por quantidade unitária de água pura, para transportar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água

de um reservatório contendo uma solução idêntica, em composição, à água do solo, numa elevação especificada e na pressão atmosférica, para um reservatório de mesma elevação que a do ponto considerado.

Esta componente resulta da energia potencial gravitacional armazenada na água, devido à elevação do ponto dado relativa a um nível de referência arbitrário, independentemente das condições químicas e de pressão da água do solo.

O nível de referência é, geralmente, tomado ou em um ponto conveniente dentro do solo ou abaixo do perfil do solo considerado. Seu valor, portanto, é positivo ou zero, podendo ser expresso em termos de energia potencial por unidade de massa, como:

$$\phi_g = g \cdot Z \quad (2.5)$$

onde: g = aceleração da gravidade

Z = altura acima do nível de referência.

2.3.2.2. Potencial Osmótico ou de Sóluto

É a quantidade de trabalho que deve ser feito por quantidade unitária de água pura, para transportar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água, de um reservatório de água pura, em uma elevação especificada e na pressão atmosférica, para um reservatório contendo uma solução idêntica, em composição, à água do solo no ponto considerado, mas em todos os outros aspectos idêntica à do reservatório de referência.

Esta componente resulta da interação da água com forças de campo provenientes das substâncias dissolvidas. Os solutos afetam as propriedades termodinâmicas e baixam a energia potencial da água do solo. Embora o potencial osmótico não possa afetar, significativamente, o fluxo de massa líquida, ele sempre age na presença de uma membrana que permita a passagem da água, e não dos sais. Este potencial pode ser expresso como:

$$\phi_o = -g \cdot s_o \quad (2.6)$$

onde: s_o = sucção osmótica

Com o sinal negativo indicando a diminuição do potencial com o aumento da sucção.

2.3.2.3. Potencial Matricial ou Capilar e de Adsorção

É a quantidade de trabalho que deverá ser feito por quantidade unitária de água pura para transportar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório contendo uma solução idêntica, em composição, à água do solo, na elevação e pressão externa de gás do ponto considerado, para a água do solo, em um ponto considerado.

Esta componente resulta das forças capilares e de adsorção devido à matriz do solo, que atraem e prendem água no solo reduzindo sua energia potencial. Em Geotecnia, geralmente, é expressa em unidade de pressão negativa (valores positivos de sucção ou negativos de pressão intersticial). Os fenômenos capilares resultam da tensão superficial da água e seus ângulos de contato com as partículas sólidas, enquanto os de adsorção resultam das películas de hidratação sobre a superfície da partícula. Esses dois fenômenos são representados esquematicamente na Figura 2.7.

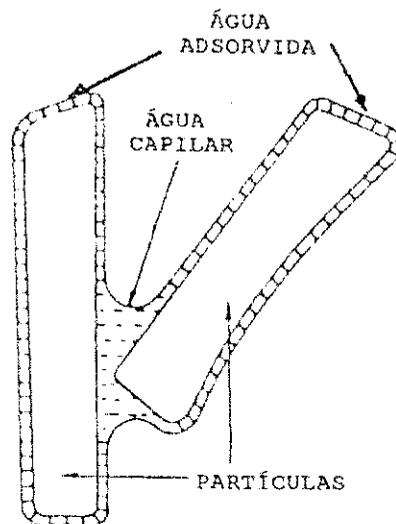


Figura 2.7. A Água em Solo Não Saturado Está Sujeita à Capilaridade e Adsorção, que Combinadas Produzem a Sucção Matricial

O potencial de pressão negativa, que é o resultado dos efeitos combinados destes dois fenômenos, pode ser expresso, como:

$$\phi_m = -g \cdot s_m \quad (2.7)$$

onde: s_m = sucção matricial ou mátrica

Os efeitos da adsorção e da capilaridade são mais importantes em solos argilosos e em altas sucções, sofrendo influência da camada dupla elétrica. Enquanto que, em solos arenosos, a adsorção não tem muita importância, predominando a capilaridade (Hillel, 1971).

2.3.2.4. Potencial Pneumático ou de Pressão Externa de Gás

Esta componente resulta da diferença na energia da água, provocada por uma diferença entre a pressão externa de gás e a pressão atmosférica atuante no reservatório de referência. Em laboratório é comum variar a pressão da água do solo, aplicando-se uma pressão de ar. O potencial pneumático pode ser expresso como:

$$\phi_p = g \cdot h_a \quad (2.8)$$

onde: h_a = diferença de pressão da fase gasosa em relação à atmosfera, expressa em termos de altura de coluna de água equivalente

Em relação a estas duas últimas componentes, quando a pressão hidrostática da água do solo for maior que a pressão atmosférica, o potencial de pressão será positivo, como no caso da água sob uma superfície de água livre, onde o potencial do solo é maior que o do estado de referência. Enquanto que, se a pressão hidrostática da água do solo for menor que a pressão atmosférica, o potencial de pressão será negativo.

De uma forma geral, o potencial de água do solo pode ser expresso como a altura da coluna de água correspondente à pressão medida, que é definida como a carga hidráulica no ponto considerado. Esta carga hidráulica, no caso dos potenciais de pressão negativa da água dos solos não saturados, assume valores que podem variar em faixas muito amplas. Schofield (1935), citado por Hillel (1971), sugeriu o uso da *escala pF*, que corresponde ao logaritmo da pressão negativa expressa em altura de coluna de água equivalente:

$$pF = \log | H | \quad (2.9)$$

onde: H = altura da coluna de água em cm

2.3.3. A Sucção do Solo

A *sucção* permite avaliar a absorção potencial de água pelo solo, ou seja, ter-se uma medida da afinidade que o solo tem por água. Portanto, para uma mesma estrutura, quanto mais seco estiver o solo, maior será a sucção.

A *sucção total* ou energia livre, é uma medida do potencial da água do solo sob um determinado teor de umidade (Mitchell, 1984), podendo ser identificada com o potencial total quando se despreza as componentes de potencial gravitacional e potencial pneumático, como pode ser demonstrado a partir da equação (2.4) do potencial total da água do solo :

$$\begin{aligned}\phi_t &= \phi_g + \phi_o + \phi_m + \phi_p \\ \phi_t &= g.(Z - s_o - s_m + h_a)\end{aligned}\tag{2.10}$$

Já que o potencial total de sucção é expresso por :

$$\begin{aligned}\phi_s &= -g.(s_o + s_m) \\ \phi_s &= -g.s\end{aligned}\tag{2.11}$$

A nível da macroestrutura, o gradiente de sucção dentro do perfil do solo governa o fluxo de água através do solo, que ocorre sempre de uma região de baixa sucção para outra de alta sucção. Como a variação da sucção do solo é controlada mais pelo meio-ambiente, que pelo próprio solo, sua tendência é alcançar um valor uniforme no solo por meio da dissipação de algum gradiente de potencial.

O termo *sucção total* representa a contribuição coletiva de todo mecanismo de retenção de água do solo e pode ser definido como a energia livre da água do solo com relação à do reservatório de água pura na mesma elevação (Edil & Motan, 1984).

A aproximação termodinâmica para explicar o movimento de água do solo, mostra que a energia livre de solos não saturados é sempre menor que zero. A sucção total pode ser estabelecida em termos de pressão exercida por uma coluna de água é definida através da equação de Kelvin, em gm-cm/gm, como:

$$s = \frac{R.T}{m.g} \ln \frac{H}{100} \quad (2.12)$$

onde:

- R = constante universal dos gases (8.314×10^7 ergs-K/mole)
- T = temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$)
- m = peso molecular da água (18.02 g/mole)
- g = aceleração da gravidade
- H = umidade relativa (%)

A sucção total representa a medida do estado de energia da água do solo. Perda ou ganho de água, afeta diretamente o solo proporcionalmente à perda ou ganho de energia associado com a variação de umidade (McKeen, 1992), e é definida pela International Society of Soil Science como:

Sucção total do solo é a medida de pressão negativa, relativa à pressão externa de gás na água do solo, para a qual um reservatório de água pura deve ser submetido para estar em equilíbrio através de uma membrana semipermeável, com a água do solo.

A sucção pode ser aplicada por meio de campos elétricos (*eletro-osmose*), elevação da pressão de gás acima da pressão atmosférica (*translução de eixos*), gradientes térmicos (*termo-osmose*) ou diferentes concentrações do soluto (*osmose química ou de soluto*), e é constituída da soma de duas componentes: *sucção matricial* e *sucção osmótica*

$$s = s_m + s_o \quad (2.13)$$

Estas componentes foram definidas pela International Society of Soil Science, conforme se indica a seguir:

2.3.3.1. Sucção Matricial

É a medida da pressão negativa, relativa à pressão externa de gás, na água do solo, para a qual uma solução idêntica, em composição, à água do solo, deve ser submetida para estar em equilíbrio, através de uma parede porosa permeável, com a água do solo.

Esta componente é devido à matriz do solo, ou seja, a retenção da água é obtida pelas forças relativas à matriz sólida do solo: *força de adsorção*, que é o efeito das forças de superfície da partícula; e *força de capilaridade*, que é devido à tensão superficial dos meniscos, está relacionada à distribuição espacial e tamanho dos poros do solo. Ela representa a diferença entre a pressão intersticial do ar e a pressão neutra da água

$$s = (u_a - u_w) \quad (2.14)$$

A sucção matricial influencia no comportamento de resistência e deformação do solo não saturado, e também controla o movimento de umidade no solo com elevados graus de saturação (Edil & Motan, 1984). A Figura 2.8 representa o mecanismo de sucção no solo.

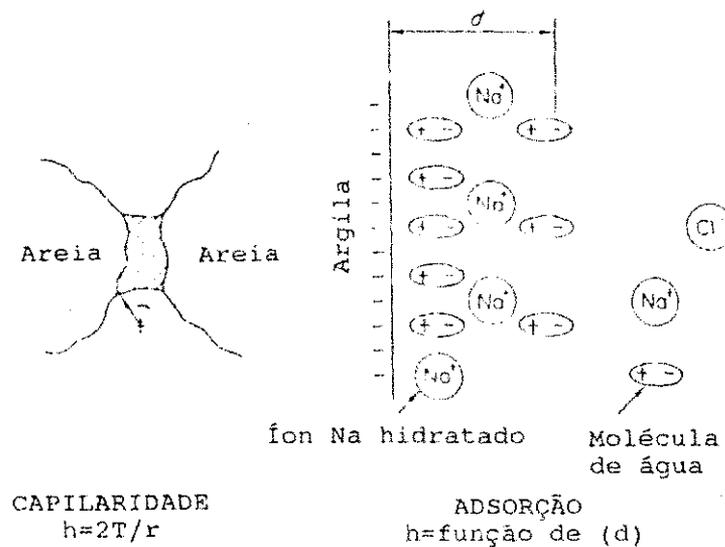


Figura 2.8. Mecanismo de Sucção do Solo

2.3.3.2. Sucção Osmótica ou de Solute

É a medida da pressão negativa para a qual um reservatório de água pura, deve ser submetido para estar em equilíbrio, através de uma membrana semi-permeável (permeável apenas às moléculas de água), com um reservatório contendo uma solução com a mesma composição, da água do solo.

Esta componente é devido ao efeito de substâncias dissolvidas na água retida no solo e resulta de diferenças nas concentrações do soluto em diferentes pontos no solo. Seu valor depende da composição da água que entra em contato com o solo; quando esta água é pura a sucção osmótica é máxima; e quando ela tem a mesma composição da água intersticial, a sucção osmótica é nula. A pressão osmótica pode ser expressa como:

$$p_o = RT (C_i - C_o) \quad (2.15)$$

onde:

- R = constante universal dos gases (8.314×10^7 ergs-K/mole)
- T = temperatura absoluta ($^{\circ}$ K)
- C_e = n^o moles/litro na água livre
- C_o = n^o moles/litro na água do espaço interlaminar

A sucção osmótica influencia no comportamento dos solos finos, dependendo do tipo e concentração do soluto, enquanto que nos solos saturados esta influência depende, também, das interações físico-químicas entre os íons dissolvidos e as partículas de argila. Pode ser expressa em centímetros de água, pela equação:

$$s_o = \frac{R.T}{g} \cdot \frac{m_s}{m_1 + m_s} \quad (2.16)$$

onde:

- g = aceleração da gravidade
- m_s = moles do solvente
- m_1 = moles do soluto

Segundo Schreiner (1987), as variações tanto na sucção osmótica quanto na matricial afetam o comportamento do solo, mas por mecanismos um pouco diferentes.

Richards (1974), fornece a seguinte representação esquemática para as componentes da sucção, relacionando-as com as componentes do potencial:

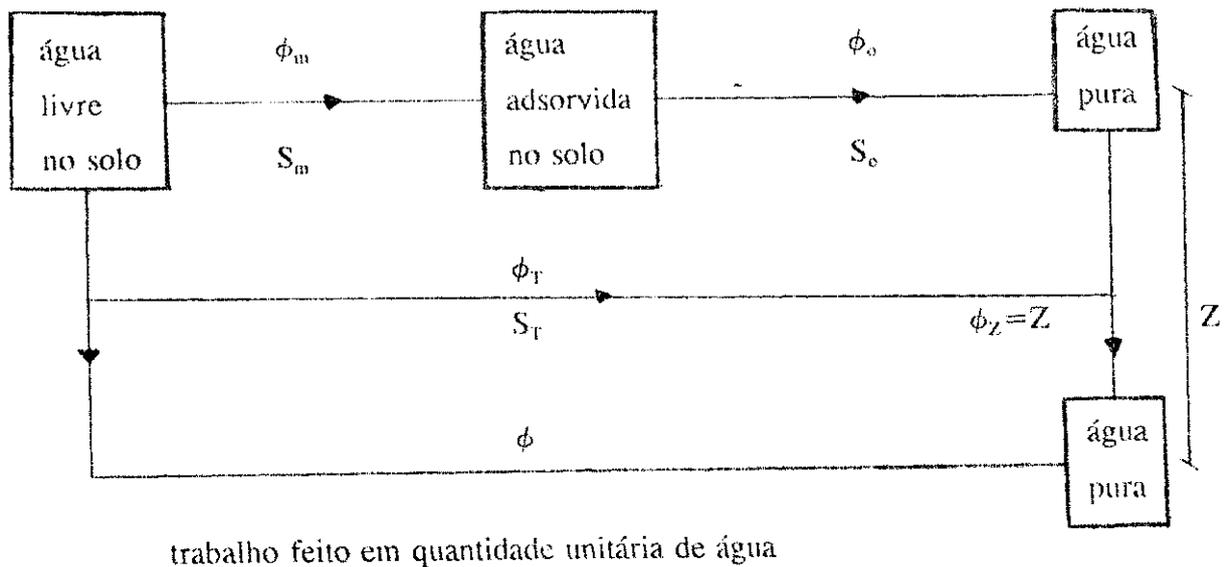


Figura 2.9. Representação das Componentes de Sucção (Adaptada de Richards, 1974)

Jucá (1990) cita que vários autores (e.g. Blight, 1983; Edil & Motan, 1984; Fredlund, 1979; Alonso et al, 1987) consideram que a sucção matricial é suficiente para descrever o comportamento do solo, enquanto que outros autores (e.g. Jiménez Salas et al, 1973; Reginatto & Ferrero, 1973; Richards et al, 1984; Mitchell, 1984) observam significativas mudanças de comportamento, principalmente no que se refere a variações volumétricas devido à variação da sucção osmótica; e cita também que Blight (1983) explica a dificuldade na resolução deste problema, devido à fatores como: confiabilidade de obtenção de cada componente e dificuldade em diferenciar a influência da sucção osmótica nas variações de umidade induzidas por gradientes de concentração de solutos.

2.3.3.3. Medida da Sucção

A medida da sucção pode ser feita por *métodos diretos*, quando a energia para equilíbrio com a água do solo é determinada mediante medida direta da pressão, ou por *métodos indiretos*, quando esta energia é calculada por relações termodinâmicas. Entre os métodos diretos estão: placa de sucção, centrífuga, célula de pressão, membrana de pressão,

tensiômetro; enquanto que entre os métodos indiretos estão: dessecador de vácuo, psicrômetro, papel filtro, entre outros. O Quadro 2.1, adaptado de Marinho (1994), apresenta um resumo destes métodos.

Quadro 2.1. Técnicas de Medidas da Sucção do Solo

Técnica	Sucção			Faixa (kPa)	Referência
	Matricial	Osmótica	Total		
Psicrômetro		X	X	100-8000	Spanner (1951) Dimos (1991)
Papel Filtro	X		X	0-29000	Chandler et al (1991)
Tensiômetro	X		X	0-90 0 > > 1000	Stannard (1992) Ridler and Burland (1993)
Translação de Eixos	X			0-1500 1.5 x 10 ⁴	Richards, L.A. (1941) Richards, B.G. (1980)
Condutividade Térmica	X			0-400	Fredlund & Rahardjo (1993)
Condutividade Elétrica	X	X		toda a faixa	Krahn & Fredlund (1972)

A sucção pode ser medida no campo ou no laboratório. A escolha do método será de acordo com a magnitude da sucção a ser medida, considerando-se que cada método de ensaio abrange uma faixa de sucção (Figura 2.10). Portanto, mais de um método pode ser usado para cobrir uma faixa de umidade do solo, de saturado até seco em estufa.

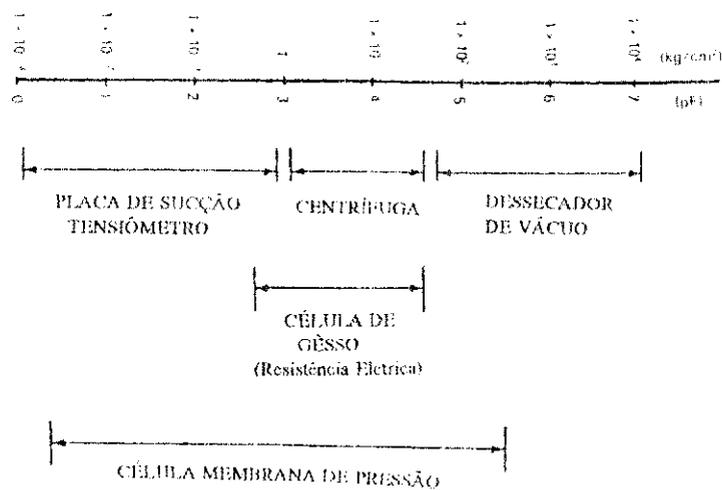


Figura 2.10. Métodos para a Medida da Sucção e suas Faixas de Validade.

O princípio de controle da sucção pode ser mecânico ou energético. O *princípio mecânico* é obtido, ou através de uma sucção da água em contato com o solo, por meio de dreno; como no caso da placa de sucção. Ou então, através do princípio de translação de eixos (Hilf, 1956), onde o aumento de pressão na fase líquida do solo é obtido pelo aumento de pressão na fase gasosa, por meio de aplicação de pressão positiva de ar; como ocorre no caso da membrana de pressão.

O *princípio energético* ou *termodinâmico*, utiliza o potencial de sucção total da água do solo, através da energia livre relativa do gás em equilíbrio com a fase líquida do solo.

A expressão para o potencial de sucção total da água do solo é obtida a partir da equação de estado dos gases e relaciona sucção total com umidade relativa (Equação 2.12).

A sucção total diminui com o aumento da umidade, e a quantidade de água retida no solo em equilíbrio é uma função da sucção matricial, já que depende de suas composição granulométrica e estrutura.

Graficamente esta relação é representada pela *curva característica do solo*, também chamada de *relação sucção-teor de umidade*, *curva característica de sucção* ou *curva característica de retenção de umidade*, que corresponde a um determinado solo.

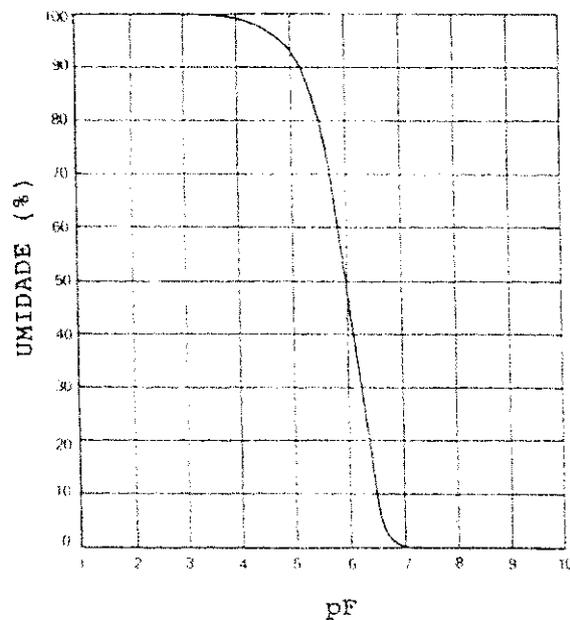


Figura 2.11. Relação Entre Umidade e Sucção da Água do Solo

Para solos com sucções matriciais baixas a quantidade de água retida nele é influenciada pela sua estrutura, pois depende sobretudo da capilaridade e da distribuição dos tamanhos dos poros. Enquanto que para sucções altas, a retenção de água no solo é influenciada pela textura e superfície específica, pois depende sobretudo da adsorção (Hillel, 1971).

A Figura 2.12 mostra o efeito da textura na retenção da água no solo, enquanto o efeito da estrutura do solo é mostrado na Figura 2.13.

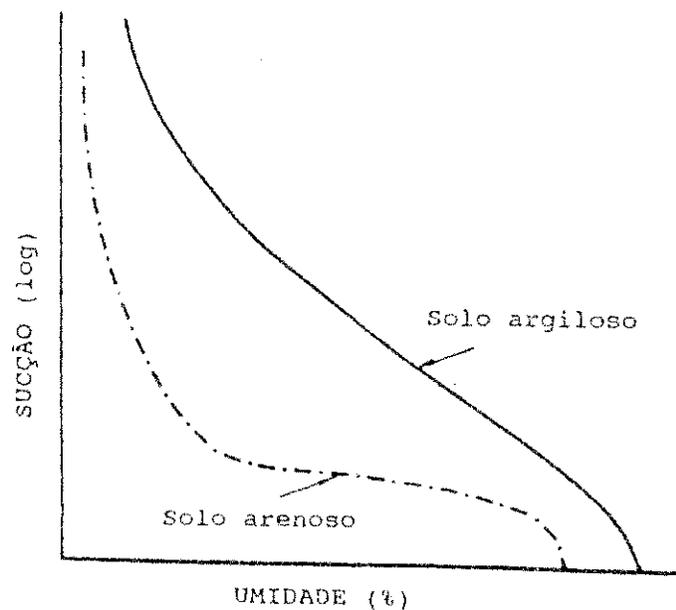


Figura 2.12. Efeito da Textura na Retenção de Água no Solo

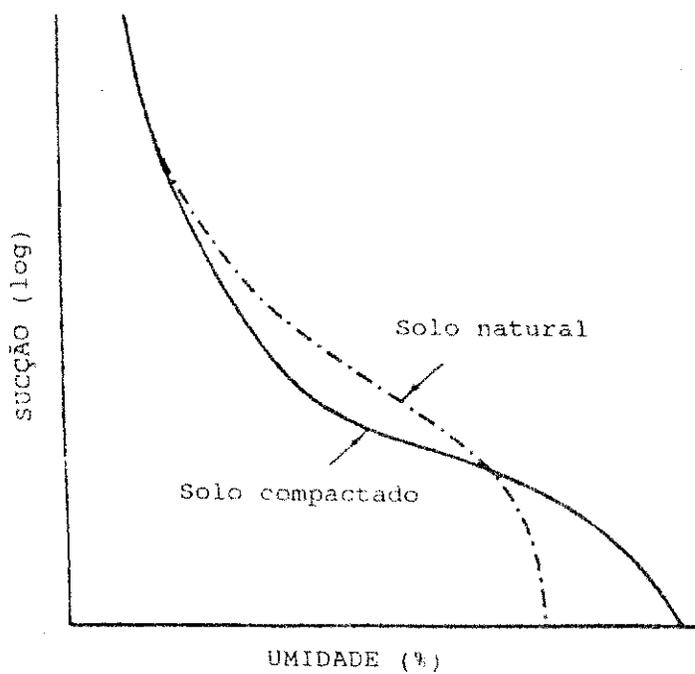


Figura 2.13. Efeito da Estrutura na Retenção de Água no Solo.

No caso de solos compactados (Figura 2.14), umidade e energia de compactação são fatores determinantes da estrutura, e influenciam de forma significativa a curva característica.

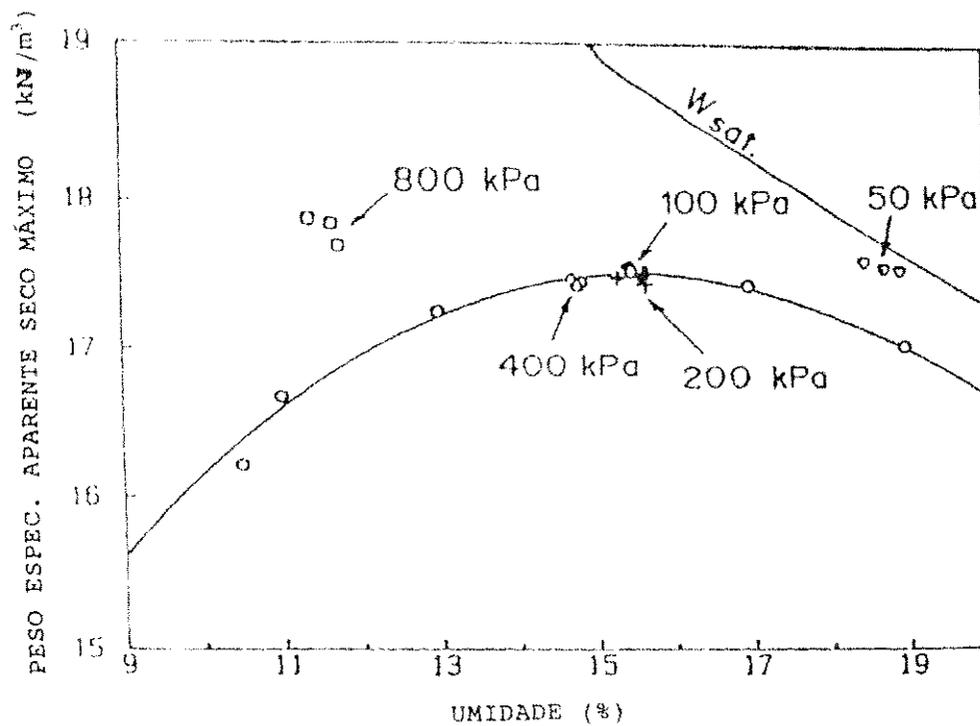


Figura 2.14. Variação da Sucção em Solo Compactado (Delage et al, 1993)

Para sucções altas, as curvas para solo compactado e natural podem ser idênticas (Hillel, 1971). Nas argilas, caracterizadas pela compressibilidade e poder de retenção, a variação volumétrica com expansão no umedecimento e contração na secagem, afeta a curva característica de sucção.

A curva obtida na secagem não é a mesma obtida no umedecimento, pois a quantidade de água retida é maior na secagem. Este é o fenômeno da *histerese* que, segundo diversos autores, tem várias causas:

- a) Geometria não uniforme dos poros individuais intercomunicados por pequenas passagens, permitindo diferentes condições à passagem de água na secagem e no umedecimento (Figura 2.15).
- b) Efeito do ângulo de contato, que devido à rugosidade da superfície varia segundo o menisco avance (umedecimento) ou retroceda (secagem).
- c) Presença de ar preso nos poros, reduzindo a umidade no umedecimento, não permitindo a completa saturação na sucção nula.
- d) Variações na estrutura do solo devido à expansão (umedecimento) e contração (secagem).

e) Solução gradual do ar, ou a liberação do ar dissolvido na água, pode também ter efeito diferencial nas curvas sucção-umidade, em umedecimento e ressecamento.



a) drenagem ou secagem

b) umedecimento

Figura 2.15. Geometria dos poros

A Figura 2.16 mostra os ramos principais da curva, quando a umidade varia do grau de saturação 0 a 1, e de 1 a 0. E ramos secundários, quando em uma dada sucção o processo se inverte, produzindo um ciclo interno.

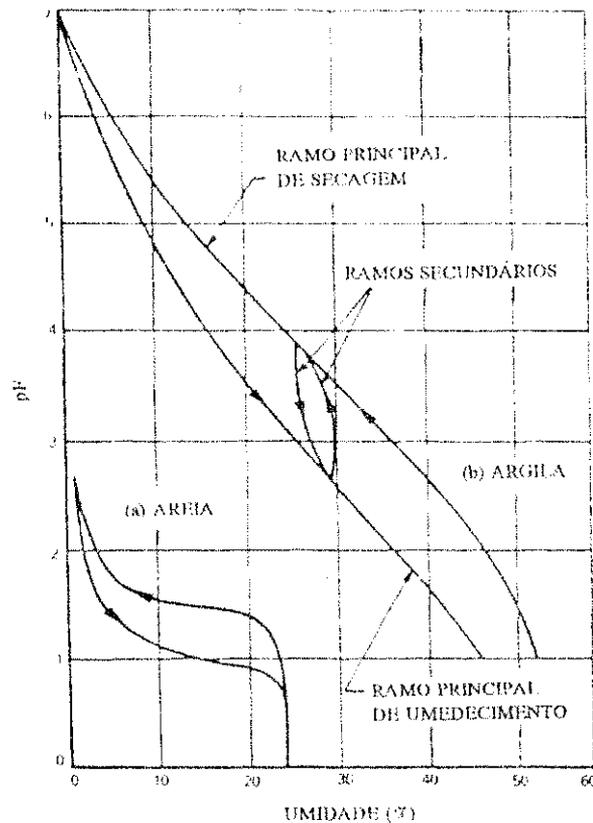


Figura 2.16. Fenômeno de Histerese nas Curvas Sucção-Teor de Umidade

Nas argilas amolgadas não há histerese, devido à homogeneidade na distribuição das partículas (Croney & Coleman, 1960; citados por Delgado, 1986).

A histerese é importante no estudo da permeabilidade de solos naturais expostos a umedecimento e secagem, e em processos onde ocorre umedecimento e secagem sequencialmente.

2.3.4. Tensão Intersticial Negativa

De acordo com Pousada Presa (1982), alguns autores denominam de *sucção* a pressão negativa da água do solo em relação à atmosférica, em amostras sem solicitações externas. É de *tensão intersticial negativa*, a pressão negativa da água do solo em relação à atmosférica, em amostras submetidas a solicitações externas ou em terrenos *in situ*. Atualmente, em geotecnia, há uma tendência geral de usar os termos *sucção* e *pressão intersticial negativa* indistintamente.

O potencial de pressão intersticial pode ser determinado partindo do potencial total:

$$\begin{aligned}\phi_u &= \phi_s + \phi_a + \phi_p \\ \phi_u &= g \cdot (-s + h_a + h_p) \\ \phi_u &= g \cdot u\end{aligned}\tag{2.17}$$

onde: u = pressão intersticial

$$h_a = \frac{\Delta P_a}{\gamma_w}$$

onde: ΔP_a é a diferença de pressão da fase gasosa em relação à atmosférica.

$$h_p = \alpha \cdot \frac{\Delta P_a}{\gamma_w}$$

$$u = -s + h_a + h_p$$

Quando a pressão da fase gasosa é igual à atmosférica, $h_a = 0$, logo:

$$u = -s + h_p\tag{2.18}$$

Esta pressão intersticial é definida como :

A pressão, relativa à pressão de ar no solo, a que tem de se submeter a água pura para que permaneça imóvel quando em contato com a água do solo, em um determinado ponto do terreno, através de uma membrana semipermeável.

2.4. Mecanismos de Expansão

2.4.1. Introdução

Chama-se *solo expansivo* ou *potencialmente expansivo*, àquele solo que é constituído por argilominerais de estrutura laminar metaestável. Geralmente, seu índice de plasticidade e seu limite de liquidez são altos, apresenta-se rijo quando seco e perde facilmente sua resistência ao absorver água.

O aumento de volume nestes solos, depende da disponibilidade e variação da quantidade de água presente, visto que a expansão é devido, principalmente, à absorção de água do solo para atender à adsorção pelas superfícies exteriores e interiores (entre as unidades estruturais) dos argilominerais, para satisfazer à deficiência de carga das partículas.

Como foi visto anteriormente, o processo de adsorção de moléculas de água juntamente com a adsorção de íons, que origina a camada dupla difusa, é essencial no desenvolvimento dos mecanismos de expansão. Estes mecanismos de expansão geralmente se interrelacionam, de maneira que não é possível determinar a influência exata de cada um para a expansão total. Esta influência depende do tipo do argilomineral, da disponibilidade de água, do tipo e quantidade de cátions trocáveis, da ordem de interação entre a água e estes cátions.

Ainda que vários autores tenham apresentado diversos mecanismos de expansão; na literatura atual, considera-se que eles podem ser agrupados em três tipos básicos:

- a) atração das partículas de argila,
- b) hidratação de cátions.
- c) repulsão osmótica.

Embora se saiba que os três tipos de mecanismos estão interrelacionados, não se tem atualmente como descrever o seu comportamento com base em cada mecanismo isolado. Assim, na prática, mede-se o seu resultado final, que é a variação de volume da massa de solo, e os resultados com base no controle da sucção, já que esta descreve a interação entre as partículas de solo e água e determina o comportamento físico-químico da massa do solo (Aitchison, 1965).

A sucção total do solo reflete a influência dos três mecanismos principais de expansão. A sucção matricial representa os mecanismos de atração das partículas de argila e de hidratação dos cátions, enquanto que a sucção osmótica representa o mecanismo de repulsão osmótica (Snethen, 1979; citado por Pousada Presa, 1984).

Considera-se que grande parte da expansão é causada pela repulsão osmótica, que tem maior influência em umidades altas, normalmente acima da umidade ótima do ensaio Proctor normal. Enquanto que para umidades abaixo da ótima, a maior influência é da atração das partículas e hidratação de cátions. (Pousada Presa, 1984; Delgado, 1986).

2.4.2. Atração das Partículas de Argila

A forma do mineral e sua estrutura cristalina interna provoca as ligações atrativas de superfície entre os minerais de argila; entre estes minerais e água e entre eles e cátions.

A carga elétrica negativa da superfície da partícula de argila, origina forças atrativas que atraem cátions e moléculas polares (como a água) e atuam como força de fixação da água da camada dupla.

O volume da água da camada dupla aumenta, até que ocorra uma variação de volume suficiente na massa de solo, pois a força de adsorção de água pela partícula diminui com a distância à superfície desta. A atração e fixação de moléculas ocorre através da ligação de hidrogênio das moléculas de água à superfície do mineral e da atração dipolo-dipolo das moléculas de água (Mitchell, 1976).

2.4.3. Hidratação de Cátions

A superfície negativa da partícula de argila atrai cátions que anulam sua carga negativa. Entretanto, alguns cátions após neutralizar a carga negativa da partícula, permanecem com uma certa quantidade de carga não neutralizada. Desta maneira, atraem moléculas de água através dos polos negativos destas, que por meio de seus polos positivos atraem outras moléculas de água.

Na hidratação de cátions ocorre estas forças de atração sobre as moléculas de água e um aumento do raio iônico dos cátions, que promovem um aumento de volume da massa do solo.

2.4.4. Repulsão Osmótica

A passagem de líquido de uma solução de menor concentração para outra de maior concentração, através de uma membrana semipermeável, é denominada *osmose*. E a pressão que se aplica à solução para impedir esta passagem é denominada *pressão osmótica*.

A repulsão osmótica é resultado dos gradientes de pressão desenvolvidos nas camadas duplas por variações na concentração iônica nestas camadas, pois a atração de íons e moléculas de água é mais forte próximo à superfície da partícula, diminuindo com o aumento da distância à esta.

Quando o sistema argila-água-cátions é posto em contato com água com menor concentração iônica, o limite da camada dupla atua como uma membrana semipermeável. A água, então, tende a passar esta membrana para igualar, por osmose, as concentrações dos dois lados da membrana. O que resulta no aumento da espessura da camada dupla e, conseqüentemente, do volume da massa do solo.

2.5. Fatores que Influenciam na Expansão

2.5.1. Introdução

Para que um solo sofra expansão é necessário que ocorra uma variação no seu estado tensional externo (sucção ou pressão equivalente da água intersticial) ou interno (resultante da pressão total aplicada).

Muitos autores apresentam os fatores que influenciam no comportamento dos solos expansivos. A influência é uma função de combinações e interrelações destes fatores, que estão relacionados às propriedades intrínsecas das partículas, às condições da massa do solo, às propriedades do fluido dos poros e ao meio ambiente. Os fatores podem ser divididos em *internos e externos*.

O *potencial de variação de volume* é determinado sobretudo pela composição mineralógica e quantidade de argilominerais expansivos presentes, bem como pela natureza do fluido dos poros. Já a *magnitude da expansão* é determinada também por outros fatores intrínsecos, pela condição inicial do fluido dos poros e pelo meio ambiente.

2.5.2. Fatores Internos

2.5.2.1. Composição Mineralógica

Tipo, quantidade, tamanho e superfície específica do argilomineral são fatores interdependentes que influem na composição mineralógica dos solos. Os três grupos principais de argilominerais são: a montmorilonita, a ilita e a caolinita. Embora existam muitos outros argilominerais, inclusive alguns com tendência expansiva, como a vermiculita ou a nontronita, mas que são encontrados em pequenas quantidades nos solos.

A *montmorilonita*, que é o argilomineral mais expansivo, possui unidade estrutural elementar com duas camadas de tetraédros (Si) e uma de octaédros (Al). Como a ligação

entre duas unidades estruturais elementares é fraca, moléculas de água se introduzem entre elas provocando a expansão. A montmorilonita está frequentemente presente nos solos expansivos.

A *illita* tem estrutura e composição química semelhante à montmorilonita, entretanto, por possuir grande parte da deficiência de carga equilibrada por cátions K^+ que, ao contrário dos da montmorilonita, normalmente não são trocáveis e conferem à estrutura uma maior estabilidade, permitindo, portanto, muito menos entrada de moléculas de água entre suas unidades elementares. A *illita* é o argilomineral mais frequente na natureza.

A *caulinita*, que é o argilomineral menos expansivo dos três, possui unidade elementar com uma camada de tetraédros e uma de octaédros. Suas unidades estruturais elementares são unidas por ligações de hidrogênio que são mais fracas que as ligações químicas, porém são muito mais fortes que as ligações da montmorilonita, que são devido sobretudo a forças de Van der Waals.

O tamanho da partícula do argilomineral, que é inferior a $2 \mu m$, influencia na sua área específica e, conseqüentemente, no desenvolvimento da camada dupla. Quanto menor a partícula, maior será a sua área específica, medida em m^2/g . Segundo Gromko (1970), citado por Pousada Presa (1982), a expansão cresce com o aumento da área específica. Para um solo com reduzida fração argila, o seu potencial expansivo será pequeno, mesmo possuindo argilominerais muito expansivos.

2.5.2.2. Capacidade de Troca de Cátions

Íons de carga positiva são atraídos para neutralizar as cargas negativas da superfície da partícula. Como as ligações que os unem à superfície são fracas, eles podem ser substituídos por outros de maior afinidade. Esta capacidade de um mineral adsorver cátions é definida como a quantidade de cátions trocáveis que um solo é capaz de adsorver, medida em miliequivalente por 100 gramas de solo seco.

A *capacidade de troca de cátions* de um argilomineral, (CTC), pode resultar de vários fatores, como o desequilíbrio de cargas resultante da substituição isomórfica no reticulado cristalino, as ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e a substituição de hidrogênio por hidroxilas.

Na montmorilonita a capacidade de troca de cátions resulta, principalmente, das substituições isomórficas da camada de tetraédros; na illita resulta das ligações quebradas e da troca de íons K^+ nas arestas; já na caulinita resulta, principalmente, das ligações quebradas, influenciando também sua menor cristalinidade.

As propriedades expansivas dos argilominerais crescem com o aumento da capacidade de troca de cátions. Para a montmorilonita o valor da CTC é de 80 a 150 meq/100g; para a illita, de 10 a 40 meq/100g e para a caulinita, de 3 a 15 meq/100g.

2.5.2.3. Cátions Trocáveis

Os cátions, que se unem à superfície da partícula para neutralizar sua carga negativa, influem consideravelmente na expansão desenvolvida por osmose e por hidratação de cátions.

A adsorção ocorre em diferentes graus de intensidade ou preferência, de acordo com as características de cada cátion como valência, raio iônico e propriedades de hidratação. Em geral, quanto menor seja o raio iônico e maior seja a valência, mais fortemente será adsorvido o íon (Pousada Presa, 1984). Os íons adsorvidos com maior frequência são Na^+ , Ca^{++} , Mg^+ e K^+ .

Como para um maior raio iônico ocorre uma maior hidratação, a expansão também será maior. Por isto a montmorilonita sódica apresenta maior expansão que a montmorilonita cálcica.

2.5.2.4. Estrutura do Solo

O solo apresenta uma estrutura primária e outra secundária. A estrutura primária,

chamada de *microestrutura*, está relacionada com a forma, tamanho, distribuição e forças adjacentes entre as partículas, sendo definida pela orientação espacial destas partículas. A definição da microestrutura depende das forças de atração e repulsão durante a formação do solo, que por sua vez, dependem da quantidade e tipo de argila, cátions trocáveis, concentração de eletrolito, acidez, matéria orgânica, etc. (Mitchell, 1976).

Quando as forças predominantes são de repulsão, as partículas apresentam paralelismo formando a estrutura *dispersa*. Quando as forças são de atração, não ocorre orientação predominante das partículas formando a estrutura *floculada*.

No caso de solos naturais, argilas sedimentadas em água do mar apresentam microestrutura mais flokulada, enquanto que as sedimentadas em água doce são mais dispersas. Já no caso de solos compactados, a estrutura é mais flokulada no ramo seco e mais dispersa no ramo úmido. Para um mesmo solo, ela é mais flokulada para amostra compactada que para amostra inalterada. E como as estruturas flokuladas apresentam maior expansão e maior pressão de expansão, esse é um dos motivos de amostras compactadas poderem apresentar maior expansão que as inalteradas.

A estrutura secundária, *macroestrutura*, pode ser desenvolvida após a formação dos solos, em decorrência do surgimento de fraturas, laminações, inclusões, etc. Nas argilas expansivas a macroestrutura pode apresentar descontinuidade como fissuras e gretas, produzidas pela contração no período seco.

2.5.2.5. Cimentações e Ligações Diagenéticas

As partículas de argila podem estar interligadas por *minerais cimentantes*. Cada mineral cimentante apresenta um comportamento distinto quanto a variações de temperatura, pressão e umidade. Os minerais cimentantes desenvolvem ligações entre pontos de contato, reduzindo os movimentos de partículas ou grupos de partículas adjacentes; e podem revestir as partículas ou grupos de partículas, reduzindo sua capacidade de tirar água dos argilominerais. Os mais frequentes são o carbonato de cálcio, os óxidos e hidróxidos de ferro e várias formas de silicatização. Os materiais com alto grau de cimentação são menos expansivos.

Já as *ligações diagenéticas* são uniões, desenvolvidas em pontos de contato, entre as partículas individuais. Ocorrem durante a recristalização dos argilominerais e são influenciadas, principalmente, pela pressão e a longo prazo pela temperatura, tempo e alcalinidade da água intersticial. Estas ligações são a razão principal da diferença entre os comportamentos de amostras amolgadas e naturais de solo expansivo, em igualdade de condições. Tanto cimentações quanto ligações diagenéticas, se opõem às variações de volume.

2.5.2.6. Sucção

A sucção do solo é uma medida da energia livre da água do solo, que permite definir a afinidade do solo por água pura. Um gradiente de sucção produz um fluxo de umidade através do solo, com a umidade se deslocando de regiões onde o valor da sucção é mais baixo, para regiões onde é mais alto (Mitchell & Avalle, 1984).

Todos os fatores condicionantes da expansão de argila estão, de alguma forma, relacionados com a sucção, pois ela é quem melhor expressa o estado de umedecimento ou secagem do solo.

2.5.3. Fatores Externos

2.5.3.1. Tempo Permitido para a Expansão

O tempo para que a expansão se complete pode ser considerável e depende de fatores como permeabilidade ou condutividade hidráulica do solo, teor de umidade e densidade aparente seca iniciais e espessura da amostra.

2.5.3.2. Teor de Umidade e Densidade Aparente Iniciais

A expansão das argilas aumenta, em geral, com o aumento da densidade aparente seca inicial e, principalmente, com a diminuição do teor de umidade inicial, isto ocorre tanto na expansão livre como na expansão sob carregamento.

Alguns autores consideram que a pressão de expansão depende apenas da densidade aparente seca inicial, enquanto outros consideram que também dependem do teor de umidade inicial.

Para variações moderadas de densidade e umidade, a pressão de expansão é mais dependente da densidade seca inicial, ainda que sofra influência da umidade inicial.

2.5.3.3. Temperatura

A variação da temperatura depende de aspectos físico-químicos relacionados com sua influência nas forças interpartículas e nas pressões da água nos poros (Pousada Presa, 1982). A temperatura pode ser um fator importante no campo, por influenciar a migração de umidade. Pois, com uma diminuição da temperatura ocorre um aumento da tensão superficial e um incremento da sucção e, conseqüentemente, a redução do potencial de água do solo que, aliada à maior concentração iônica nas zonas mais quentes provoca um movimento de água líquida e em forma de vapor, para áreas mais frias.

2.5.3.4. Efeito da Água

As propriedades da água dos poros de um solo expansivo, influem no seu comportamento, pois a variação de volume é resultado da disponibilidade e variação na quantidade de água.

A água atua no solo expansivo tanto como fator interno, quanto como fator externo. Como fator interno, pois um dos fatores principais da variação de volume do solo expansivo, é a adsorção de água pela superfície do argilomineral. Esta adsorção depende da quantidade e tipo de íons adsorvidos e da quantidade e tipo de íons na água dos poros. Quando a água possui uma alta concentração de sais solúveis, a magnitude da variação de volume tende a sofrer uma redução.

A água atua, na expansão do solo, como fator externo através de efeitos climáticos, pois estes influem nas variações de umidade.

a) Quanto ao clima:

O clima influencia a sucção e a umidade das camadas superficiais do terreno, visto que depende do balanço entre a precipitação e a evapotranspiração. Para quantificar o efeito do clima, usa-se vários índices climáticos, sendo o mais comum o *Índice de Thornthwaite*, que é determinado com dados de temperatura e chuvas, através da fórmula:

$$I = \frac{(100 D - 60 d)}{E_p} \quad (2.19)$$

onde: D = drenagem do excesso de água no solo
 d = deficit de água no solo
 E_p = evapotranspiração potencial

Jimenez Salas (1980), analisando o mapa da Espanha com o Índice de Thornthwaite, conclui que a grande maioria das áreas que apresenta os fenômenos de argila expansiva tem índice negativo e que as áreas onde os danos são mais graves estão na zona de clima seco-sub úmido (índice entre 0 e -20).

b) Quanto a variações climáticas:

As variações de clima que ocorrem devido às estações, provocam variações na umidade da camada superficial do terreno, provocando sua expansão.

O perfil de sucção que corresponde a um eixo vertical, para diversas épocas do ano, apresenta uma curva para o período seco e outra para o período úmido, que a partir de certa profundidade se fundem em uma curva única, indicando a independência em relação às variações climáticas. O extrato superficial do terreno afetado pelas variações climáticas é denominado de *camada ativa*, nela a variação da umidade é máxima na superfície, diminuindo até atingir certa profundidade, abaixo da qual o solo permanece estável (Figura 2.17).

As variações de umidade na camada ativa, devido às modificações das estações do ano, provocam expansões e contrações no solo. A espessura da camada ativa depende do

clima, profundidade do nível freático e tipo do terreno. Tanto pode ser de poucos centímetros, como pode chegar a mais de 10 metros (Delgado, 1986). Seu valor pode ser calculado por vários métodos como: *medidas diretas*, através de nivelamento de placas de recalque instaladas à várias profundidades; *medidas da sucção* para determinar a profundidade em que não ocorre variações; *medidas da umidade* nas estações seca e úmida; *cálculos* a partir da difusividade, entre outros.

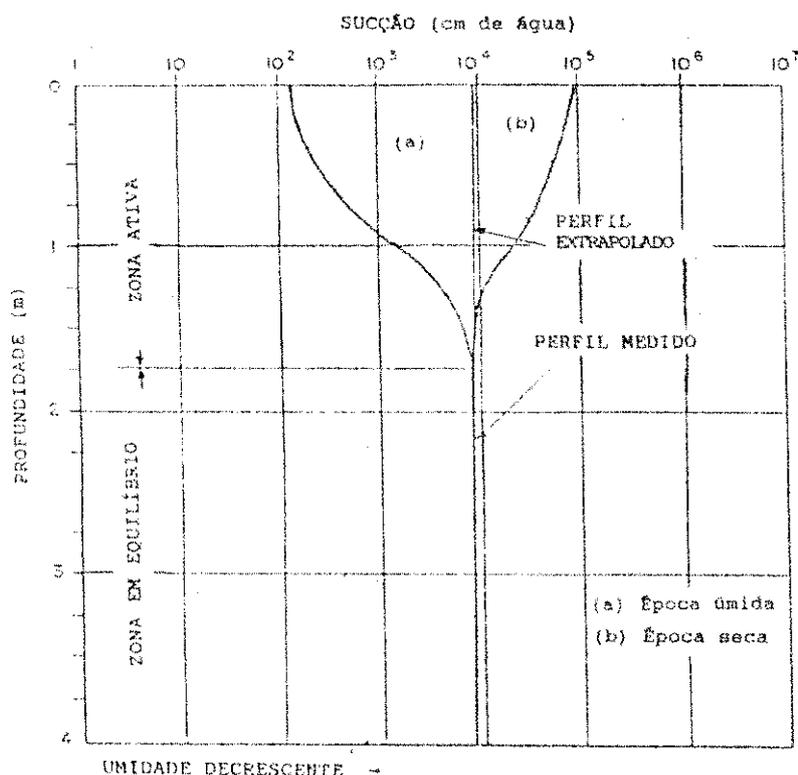


Figura 2.17. Perfil Dinâmico de Sucção Típico

c) Quanto à sucção e umidade de equilíbrio:

Como para o solo *in situ*, natural ou compactado, o potencial de água sofre influência das condições atmosféricas e hidrológicas, pode-se determinar os perfis de sucção e umidade através de métodos empíricos que considerem os efeitos climáticos e suas influências na profundidade da camada ativa, na ação da vegetação, no recobrimento do terreno, na profundidade do nível freático, etc.

A sucção do terreno descoberto é função da profundidade do ponto considerado e do tempo a partir de um instante inicial arbitrário. Enquanto que a sucção sob uma área coberta, é função também, da distância entre o ponto considerado e a zona descoberta. O movimento vertical é função da sucção e esta é variável na camada ativa.

A sucção, sob a área coberta, pode ser uma função cíclica (equilíbrio dinâmico), ou pode variar até um valor final estável (equilíbrio estático). Este valor final da sucção, quando expresso em função da profundidade, é chamado de *perfil estacionário de projeto*. Com este perfil se calcula a umidade de equilíbrio a partir da sucção estimada, através da determinação em laboratório da relação sucção-umidade. Para o nível freático médio ou profundo, se não é possível medir a sucção sob a camada ativa, usa-se a relação entre a sucção de equilíbrio e o Índice de Thornthwaite.

A *umidade de equilíbrio* é aquela a que tenderia o solo se todas as condições fossem constantes; se existisse um nível freático a uma certa profundidade e uma evaporação constante na superfície (Jimenez Salas, 1980). Como este teor de umidade é influenciado pela histerese da relação sucção-umidade, quando o solo chega ao equilíbrio pelo processo de umedecimento, seu teor de umidade será inferior àquele alcançado através do processo de secagem.

Um determinado estado de equilíbrio de umidade, não ocorre de forma indefinida em solos não saturados. Pode-se estabelecer um equilíbrio dinâmico, no caso em que o fluxo intersticial tenha uma velocidade constante, como em processos estáveis de evaporação ou infiltração (Yoshimi & Osterberg, 1963; citado por Jucá, 1990). A umidade de equilíbrio do solo remoldado é maior que a do solo inalterado.

Quando não se tem condições para determinar o perfil de equilíbrio, pode-se utilizar alguns indicadores, como a relação umidade natural/limite plástico, pois sob a área coberta após o equilíbrio esta relação é aproximadamente constante na mesma linha vertical e no caso de argilas expansivas é, geralmente, próxima da unidade. Como também a umidade ótima do ensaio Proctor Normal, já que em várias argilas estudadas, esta umidade é muito próxima do limite plástico. Estas relações são utilizadas no caso de nível freático profundo. Já no caso

de nível freático superficial, pode-se utilizar como umidade de equilíbrio, aquela existente no terreno homogêneo 60 cm acima deste nível.

O comportamento do solo não saturado está associado às variações de umidade. A velocidade destas variações importa na análise de deformações e resistência ao cisalhamento.

No caso de ensaios de laboratório, o tempo de equilíbrio de umidade sofre influência da impedância do sistema (características de permeabilidade do solo e da drenagem do equipamento). Tem grande importância nos ensaios com sucção controlada, onde também é influenciado pela trajetória de tensões seguida. Teoricamente, pode ser determinado através das equações de fluxo, para condições de variação nula de umidade. Nos ensaios de expansão, o tempo para o equilíbrio de deformação é menor quanto maior seja a pressão externa aplicada.

2.5.3.5. Ciclos de Secagem e Umedecimento

O teor de umidade final de uma amostra de argila expansiva vai diminuindo a medida que ele é submetido a ciclos de secagem e umedecimento.

Pousada Presa (1982), apresenta resultados obtidos por Warkertin & Bozozuk (1961) ensaiando argila ligeiramente siltosa, que mostram um decréscimo progressivo no teor de umidade final, quando as amostras vão sendo submetidas a ciclos de secagem e umedecimento. Os autores explicam este comportamento através de variações na orientação das partículas durante os ciclos e de efeitos cimentantes. Assim a repetição dos ciclos diminui significativamente a necessidade de água final.

Por sua vez, Chen (1965) realizando ensaios com ciclos de secagem - umedecimento, em que permitiu a expansão livre por imersão, com posterior secagem até a umidade inicial do solo, encontrou o que ele chamou de *fadiga de expansão*, ou seja, argilas expansivas submetidas a estes ciclos tendem a alcançar um ponto de variação de expansão residual depois de um certo número de anos.

E finalmente Chu (1973), também observou esta redução da expansão com a repetição dos ciclos, constatando que no primeiro ciclo a expansão foi sensivelmente maior que nos seguintes.

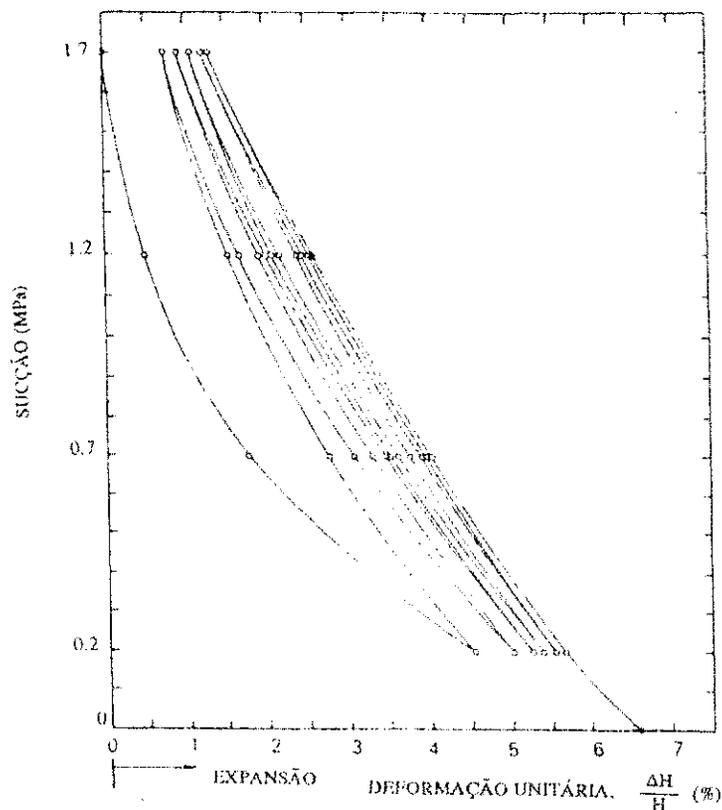


Figura 2.18. Ciclos de Secagem e Umedecimento (Pousada Presa, 1982)

2.5.3.6. Fatores Ambientais

Os principais fatores ambientais que provocam variações na umidade do solo são o clima, a vegetação e as construções. O clima é um fator importante nas variações de umidade e sucção, como foi comentado no ítem 2.5.3.4.

a) Quanto à vegetação:

Os problemas que a vegetação provoca nos solos expansivos dependem das condições do terreno e água freática, do clima, do tipo e quantidade de vegetação, da distância da estrutura à vegetação.

As plantas durante seu desenvolvimento requerem uma quantidade considerável de água, o que leva a uma diminuição da umidade do solo a sua volta, provocando deslocamentos verticais diferenciais e, às vezes, deslocamentos laterais com relação a uma fila de árvores.

Por outro lado, a retirada de árvores de uma área de argila expansiva causa o desaparecimento do efeito de diminuição de umidade devido à vegetação, podendo provocar a expansão do solo. Blight (1987) relata ascensão de nível d'água de 6.0 m após retirada de uma floresta de eucalíptos, na África do Sul.

Os danos causados pelas árvores podem demorar bastante tempo para se apresentar (de 6 a 12 anos), até que elas alcancem seu desenvolvimento adulto (Escario, 1986).

b) Quanto às construções:

As construções bloqueiam a evaporação normal da umidade do solo acima do nível freático. Agindo como proteção da camada ativa em relação às condições atmosféricas, elas provocam a estabilização da umidade em um valor médio entre os extremos, desta forma se no momento da construção o terreno estiver do lado mais seco, a estrutura tenderá a levantar-se, e se estiver do lado mais úmido, tenderá a descer.

Os efeitos da ação impermeabilizante das construções são analisados levando em consideração à profundidade do nível freático. Para o nível freático profundo, o perfil de sucção sob a construção depende do balanço entre a precipitação e a evapotranspiração. Já para o nível freático superficial, quando a estrutura é suficientemente larga, o perfil de sucção sob o seu centro alcançará um equilíbrio estático; enquanto que para uma estrutura estreita, este perfil permanecerá em equilíbrio dinâmico. Nos bordos da área coberta, o perfil de sucção depende das condições climáticas.

Além do efeito impermeabilizante, as construções podem provocar modificações na drenagem superficial, vazamentos nas redes de água e saneamento, irrigação de zonas ajardinadas e aquecimento provocado por fornos e caldeiras, que levam a variações na

umidade do solo.

2.5.3.7. Pressão Vertical

A expansão é menor quanto maior é a pressão vertical sob a qual se produz a inundação, até o ponto em que a grande maioria das argilas expansivas colapsam em vez de expandirem, se a inundação se produz sob uma pressão suficientemente elevada (Delgado, 1986). A aplicação de sobrecargas em um solo expansivo restringe a expansão, que pode ter seu valor esperado reduzido a zero, na presença de água livre.

2.5.3.8. Trajetória das Tensões

A trajetória das tensões é muito importante na deformação das argilas, pois trajetórias diferentes produzem deformações diferentes mesmo que os estados tensionais inicial e final sejam os mesmos nas várias trajetórias. Um carregamento prévio, bem como um aumento do tempo durante a aplicação deste carregamento, pode diminuir a expansão da amostra.

Para amostras com sobrecargas pequenas a expansão vertical é alta. Enquanto que, para altas sobrecargas as partículas podem se orientar, fazendo que a estrutura inicial se torne mais dispersa com a dissipação de tensões e o movimento de partículas, o que provoca uma menor expansão. Desta maneira, pode-se reduzir a capacidade de expansão vertical das argilas expansivas através da aplicação de cargas, ou evitar-se o desenvolvimento de pressões verticais fortes, permitindo-se a ocorrência de pequenas deformações de expansão.

2.6. Contração por Ressecamento

2.6.1. Introdução

O objetivo deste ítem, deve-se ao estudo de contração do solo realizado em laboratório e observado no campo. Não se pretende apresentar uma revisão completa sobre o tema. Neste sentido, recomenda-se os trabalhos publicados por Aguirre (1990) e Marinho

(1994), onde se encontra uma revisão atualizada e aprofundada.

Uma das causas de fissuramento em estrutura de terra é a contração do solo ou a diminuição do seu volume devido à perda de umidade. Daí alguns solos não serem adequados para locais onde se espera grandes variações de umidade.

O comportamento dos solos sob os efeitos da contração por ressecamento depende da forma desta (que está condicionada por parâmetros como permeabilidade do solo, gradiente de ressecamento), e das características da contração (relação entre a perda de umidade e variação de volume em condições homogêneas).

2.6.2. Processo de Ressecamento do Solo

Um dos processos de perda de água do solo, é a evaporação. É importante prever a velocidade, a quantidade de água perdida e sua distribuição durante este processo.

O processo de ressecamento envolve perdas consideráveis de umidade, especialmente em regiões áridas. Fisher (1923) e Pearce et al (1949), citados por Aguirre (1990), considerando o ressecamento de perfis de solos inicialmente úmidos, onde o nível freático não está suficientemente próximo à superfície para participar do processo de evaporação e supondo as condições externas constantes; observam que o processo de ressecamento do solo ocorre em três etapas. Desta forma, quando se mede a perda de água da superfície úmida de uma coluna de solo, em função do tempo, a velocidade de evaporação se mantém quase constante por algum tempo e logo diminui repentinamente.

a) Etapa inicial: velocidade constante

Esta etapa ocorre no início do processo, quando o solo tem umidade suficiente para fornecer água para o local de evaporação a uma velocidade de acordo com a demanda criada. A velocidade de evaporação é controlada mais pelas condições meteorológicas externas, que pelas propriedades do perfil do solo. Em climas quentes, esta etapa de evaporação é breve

e pode durar de poucas horas a alguns dias.

b) Etapa intermediária: velocidade decrescente

A velocidade da evaporação se reduz quando o solo já não pode fornecer água para a superfície com a rapidez suficiente para satisfazer a demanda de vapor. Esta redução é provocada pela resistência à difusão, aumentada pela camada de solo seco que está entre o solo úmido e a atmosfera. A medida que o solo seco aumenta, a velocidade de evaporação diminui. Esta etapa é controlada pelo perfil do solo, pois a velocidade de evaporação está limitada pela velocidade que o perfil do solo, secando-se gradualmente, pode fornecer umidade para a zona de evaporação. O período de duração desta etapa pode ser superior ao da anterior.

c) Etapa residual: velocidade lenta

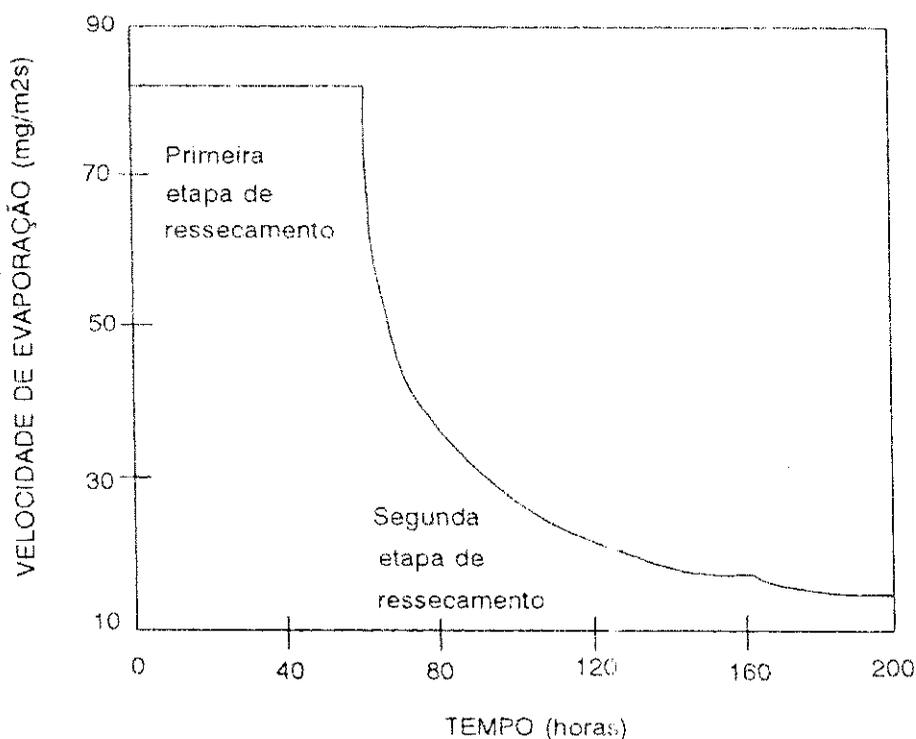


Figura 2.19. Velocidade de Evaporação para Superfície de Solo Descoberta
(Campbell, 1985; adaptada de Aguirre, 1990)

Esta etapa se estabelece eventualmente, e pode persistir a uma velocidade constante por muitos dias, semanas ou meses. Começa, aparentemente, depois que a zona superficial está tão ressecada que o transporte de água líquida através dela cessa efetivamente. A partir daí, a transmissão de água através da camada ressecada ocorre, principalmente, por um processo lento de difusão de vapor, sendo afetada pela difusividade do vapor na zona da superfície ressecada e pelos esforços de adsorção que atuam sobre as superfícies das partículas situadas entre espaços moleculares. É chamada de etapa de difusão de vapor e tem importância no caso das superfícies que se ressecam rapidamente.

A transição da primeira para a segunda etapa é, geralmente, brusca. Enquanto a segunda e a terceira etapas se desenvolvem de uma forma gradual, dificultando distinguir o fim de uma e o início da outra. Alguns autores questionam a necessidade ou a possibilidade da terceira etapa.

2.7. Variáveis de Estado Tensional

A tensão atuante em um solo é caracterizada através das variáveis do estado tensional. O *estado tensional* é composto das solicitações internas e externas, e rege o comportamento mecânico do solo. No caso do solo saturado seu comportamento mecânico, segundo o princípio das tensões efetivas de Terzaghi (1923), é governado pela diferença entre as pressões total e intersticial.

Vários pesquisadores, tentaram encontrar apenas uma variável tensional para descrever o comportamento dos solos não saturados. As principais expressões que modificam a equação de pressões efetivas de Terzaghi, para solos não saturados, estão apresentadas no Quadro 2.2. Entre elas a equação de Bishop (1959), é uma das mais conhecidas:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w) \quad (2.20)$$

onde: σ = tensão total
 u_a = pressão intersticial do ar

u_w = pressão intersticial da água

χ = parâmetro entre 0 e 1, que sofre influência do grau de saturação e da trajetória de tensões do solo.

Uma grande dificuldade na aplicação desta equação está na determinação experimental de χ . Este parâmetro apresenta valores distintos para o caso de variação de volume e resistência ao cisalhamento. Na variação de volume a trajetória de tensões tem influência maior.

Quando se reduz σ' através da diminuição de σ , ocorre expansão, enquanto que uma redução em σ' através da diminuição de sucção pode produzir colapso. Isto mostra que a definição de tensão efetiva de Bishop (1959) tem limitações quando aplicada aos solos não saturados, pois a equação de Bishop determina um comportamento para estes solos que difere do real, principalmente no caso de variações volumétricas, onde os elementos de análise sofrem deformação contínua; enquanto que no caso de resistência ao cisalhamento esses elementos são analisados no estado de ruptura.

Devido à complexidade do parâmetro χ , que é altamente dependente da trajetória de tensões, e portanto, dos ciclos de secagem e umedecimento, vários pesquisadores desenvolveram técnicas de ensaios que avaliam as variações de volume e resistência ao cisalhamento através dos conceitos de *estado* e *parâmetros de estado*.

O conceito de *estado*, refere-se ao conjunto de qualidades que definem o elemento de acordo com as condições físicas que podem existir em um solo, enquanto que *parâmetros de estado* são as variáveis físicas necessárias e suficientes para descrever o estado de um elemento de um solo, independente de sua trajetória prévia (Pooroshasb, 1961; citado por Pousada Presa, 1982).

No caso de argilas normalmente adensadas e areias, vários autores consideram que o estado do solo pode ser caracterizado pelo estado tensional e pelo índice de vazios ou umidade, enquanto que no caso de solos não saturados são necessários, também, o grau de saturação e a estrutura do solo.

As relações estabelecidas entre os parâmetros de estado, próprias de um determinado solo em uma dada condição de equilíbrio, são denominadas de *função de estado*, que podem ser representadas graficamente por um ponto, em um estado tridimensional definido por um sistema de eixos coordenados, representando os parâmetros de estado.

Uma *trajetória de estado* é formada pela sucessão dos pontos correspondentes a uma variação contínua do elemento do solo. Enquanto que, um conjunto de trajetórias de estado correspondendo a uma superfície única, forma uma *superfície de estado*, que representa graficamente as relações entre cada uma das variáveis de estado (grau de saturação e índice de vazios) e o estado tensional de um solo não saturado, submetido à compressão isotrópica.

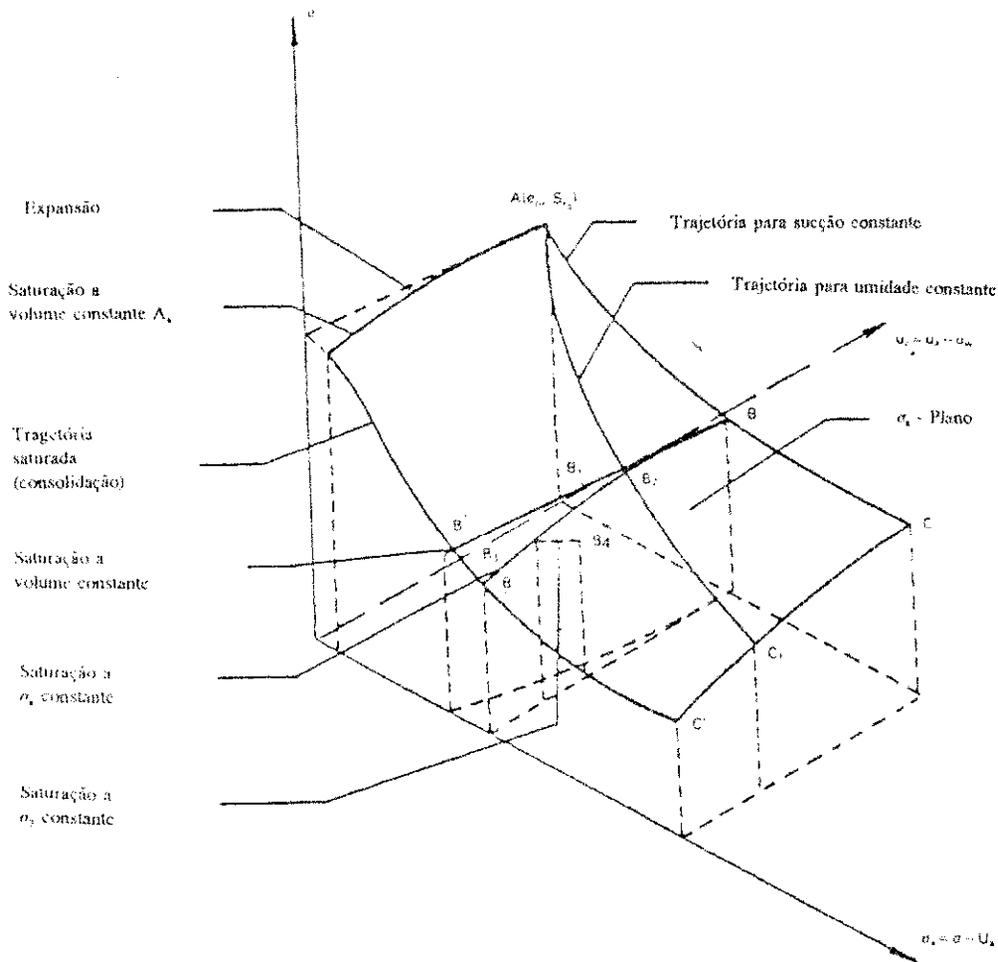


Figura 2.20. Representação Esquemática do Espaço $(\sigma - u_v)$, $(u_v - u_w)$ e (e) , Segundo Matyas & Radhakrishna

Quadro 2.2. Principais Expressões Propostas Para as Tensões Efetivas em Solos não Saturados (adaptado de Jucá, 1990).

$\sigma' = \sigma + p''$	$p'' =$ pressão intersticial da água sob a atmosférica	Donald (1956)
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	$\beta' =$ fator de união, medido como o n^o de uniões sob tensão efetiva	Croney, Coleman Black (1958)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w)$	$\chi =$ parâmetro relacionado c/ grau de saturação $u_a =$ pressão intersticial do ar $u_w =$ pressão intersticial da água	Bishop (1958)
$\sigma' = \sigma a_m + u_a \cdot a_a + u_w + a_w + R - A$	$a_a =$ parte da área total que corresponde ao contato ar-ar $R =$ força de repulsão elétrica $A =$ força de atração elétrica	Lambe (1960)
$\sigma' = \sigma + \phi p''$	$\phi =$ parâmetro entre 0 e 1	Aitchison (1960)
$\sigma' = \sigma + \beta p''$	$\beta =$ fator estatístico do mesmo tipo da área de contato, medido experimentalmente em cada caso	Jenning (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a)$	$\chi_m =$ parâmetro tensão efetiva p/ sucção matricial $h_m =$ sucção matricial $\chi_s =$ parâmetro de tensão efetiva p/ sucção osmótica $h_s =$ sucção osmótica	Richards (1966)
$\sigma' = \sigma + \chi_m p_m'' + \chi_s p_s''$	$p_m'' =$ sucção matricial $p_s'' =$ sucção osmótica	Aitchison (1973)

CAPÍTULO 3

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Condições Locais

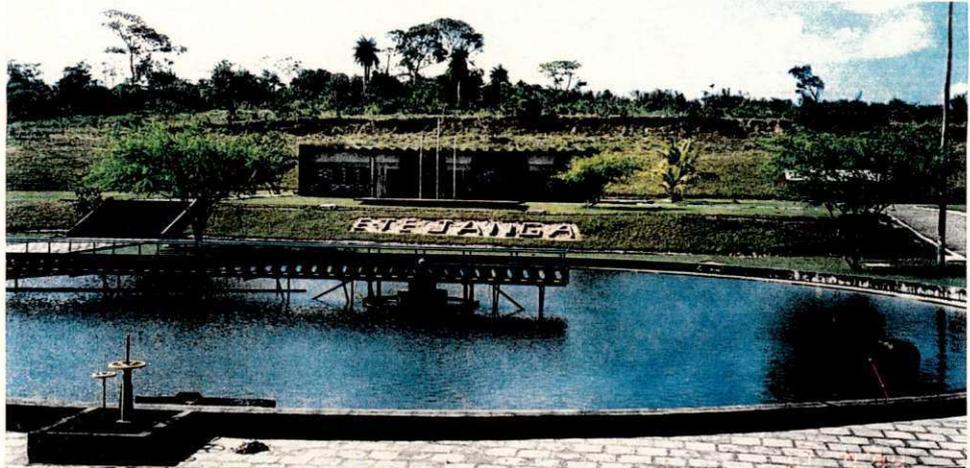
A investigação experimental foi realizada na amostragem obtida na Estação de Tratamento de Esgoto - Janga, da Compesa, localizada no município de Paulista no litoral norte de Pernambuco. A referida área foi escolhida como campo experimental, tendo em vista a grande quantidade de danos observados nas habitações vizinhas, bem como na própria ETE após sua construção. Por outro lado, a existência de placas de recalques instaladas, permitiu o acompanhamento da variação volumétrica do solo ao longo do tempo.

A geologia do local é composta de sedimentos não consolidados e rochas sedimentares sobrejacentes ao embasamento. O calcário da Formação Maria Farinha é, frequentemente nesta área, intercalado com argilito e afloramentos. Os solos desta área são resultantes do intemperismo de rochas sedimentares.

O clima é classificado como quente e úmido, apresentando uma temperatura média variando de 27 °C (fevereiro) a 23 °C (julho) e umidade relativa de cerca de 78 %. O período com maior concentração de chuvas é de fevereiro a julho, com maior incidência em maio e junho. A média mensal de precipitação varia entre 300 mm, na estação chuvosa, e 50 mm na estação seca; enquanto a média anual é por volta de 1750 mm (Gusmão Filho, Jucá & Justino da Silva, 1987).

Entre os vários sistemas de avaliação climática, um dos mais utilizados na geotecnia é o índice de Thornthwaite (TMI), que utiliza dados de precipitação, potencial de evapotranspiração e armazenamento de água pelo solo, para estimar o valor da aridez local. Valores de TMI entre +20 e -20 indicam áreas propensas a ocorrer problemas em relação à variação volumétrica do solo. Na região Nordeste, utiliza-se, com frequência, outros índices de balanço hídrico, entretanto para a área litorânea o índice de Thornthwaite apresenta bons resultados. Neste trabalho, o TMI foi calculado através de um programa computacional que

(a)



(b)



(c)



(d)



Figura 3.2. (a) Campo Experimental, Amostragem: (b,c) Época Chuvosa e (d) Época Seca

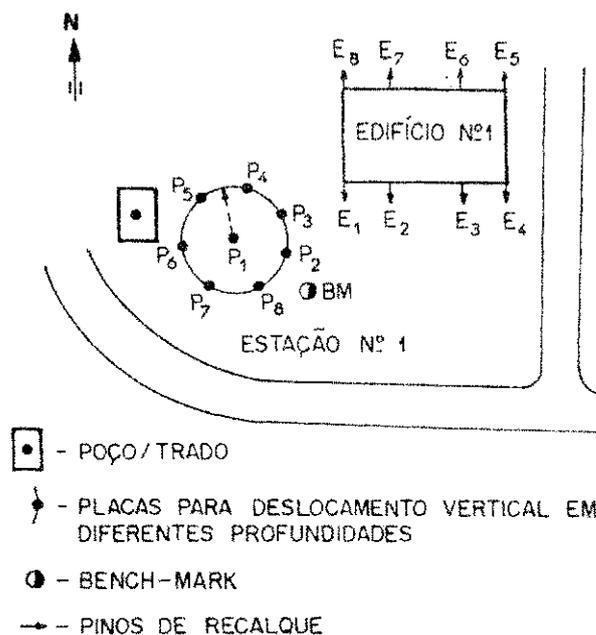


Figura 3.3. Croqui do Campo Experimental

3.2. Caracterização e Perfis Geotécnicos do Solo

3.2.1. Caracterização do Solo

O solo estudado foi uma argila siltosa de cor cinza com traços vermelhos, de alta plasticidade, coletada na profundidade de 1.0 m. No Quadro 3.1 estão os Limites de Atterberg e os valores médios da composição granulométrica do solo, enquanto que a Figura 3.4 apresenta as curvas granulométricas.

Quadro 3.1. Análise Granulométrica e Limites de Atterberg

Argila.....	59 %	G _s	2.68
Silte.....	21 %	LL.....	73 %
Areia Fina.....	19 %	IP.....	38 %
Areia Média.....	1 %	LC.....	19 %

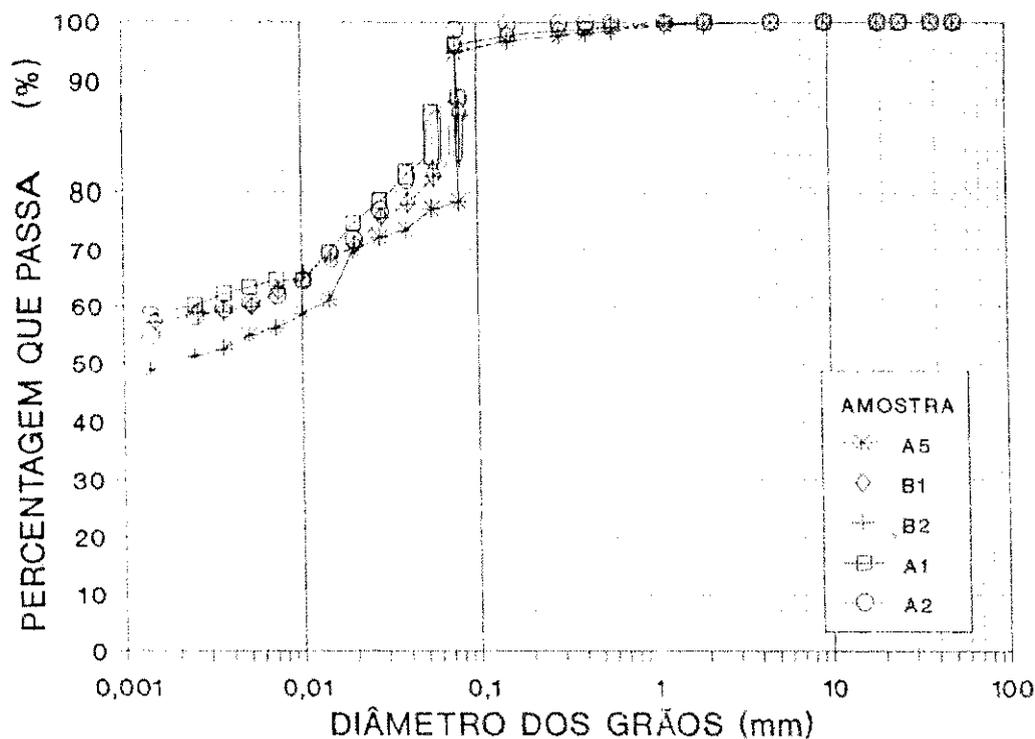


Figura 3.4. Curvas Granulométricas

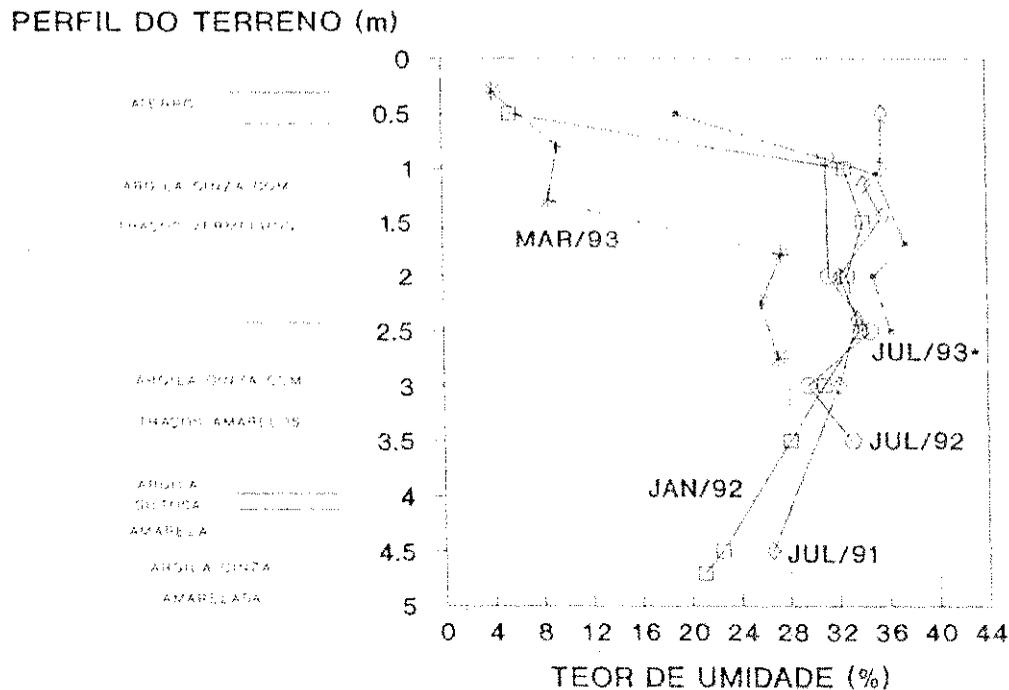
3.2.2. Perfil de Sondagem

O perfil do solo foi obtido através de sondagem a trado, até a profundidade de 5,0 m. Este perfil apresenta uma camada de argila siltosa cinza avermelhada até a profundidade de 2.20 m, seguida de outra camada de argila siltosa, com características similares, cinza amarelada até a profundidade de 3.90 m, e camadas de argila arenosa até 5.0 m. Os resultados da análise granulométrica e dos limites de consistência, mostram uma caracterização similar para as duas camadas de argila siltosa. Todo o solo do perfil é classificado como CH, de acordo com a Classificação Unificada dos Solos. A atividade deste solo varia de 0,75 a 0,90, enquanto o peso específico aparente natural varia entre 18 e 19 kN/m³, para umidades naturais de cerca de 32 %.

3.2.3. Perfil de Umidade

Para o perfil de umidade foram realizadas várias medidas, em épocas distintas. Nas curvas da Figura 3.5 cada ponto representa a média de três determinações de umidade,

naquela profundidade. Este perfil representa uma distribuição típica de umidade de solo sob área descoberta. A camada ativa pode atingir até a profundidade de 3,0 m, aproximadamente.



*JUL/93: retirada da cobertura vegetal da área, antes de realizar as leituras

Figura 3.5. Perfis do Solo e de Umidade

3.2.4. Características Mineralógicas e Físico-Químicas

3.2.4.1. Difração de Raios-X

Para identificação dos argilominerais através da técnica de difração de raios-x, usou-se amostras tratadas de acordo com a metodologia proposta por Jackson (1979), cujos difratogramas apresentam um padrão similar e os mesmos argilominerais para as duas camadas de argila siltosa, com a montmorilonita como o componente de maior percentual da fração argila, enquanto a caulinita aparece em menor proporção (Figura 3.6).

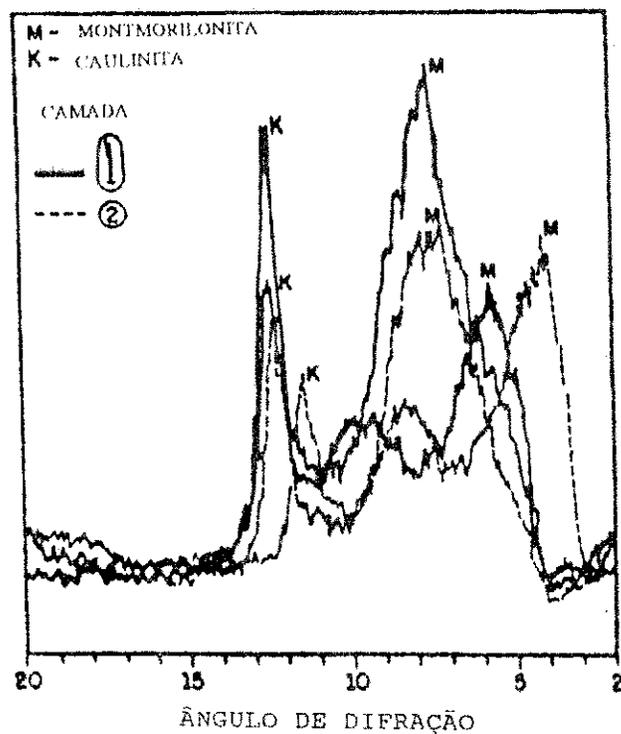


Figura 3.6. Difratoformas

3.2.4.2. Análises Químicas

Quadro 3.2. Análise Química do Solo e Cátions Trocáveis do Argilomineral

Análise Química	(%)	Cátions Trocáveis	(meq/100 g)
PR (Perda ao Rubro)	13.08	Ca ²⁺	0.79
RI (Resíduo Insolúvel)	1.40	Mg ²⁺	1.13
SiO ₂	60.08	Na ⁺	0.32
Fe ₂ O ₃	4.94	K ⁺	0.07
Al ₂ O ₃	18.26	H ⁺	11.37
CaO	0.68	Al ³⁺	4.5
MgO	0.73	CTC	18.18
K ₂ O	0.66	Condutividade Elétrica	0.23
Na ₂ O	0.27	pH	4.55
Matéria Orgânica	0.40	pH por Tetracromático	4.0

Fontes: Laboratório de Análises Minerais - UFPB Campina Grande
Laboratório de Irrigação - UFPB Campina Grande

3.2.4.3. Análise Térmica Diferencial

A análise térmica diferencial foi realizada no ITEP - Instituto Tecnológico de Pernambuco, em equipamento com as seguintes características: DTA-TG mod. Thermoflex, range DTA 50 μV , range TG 20 mg, velocidade de aquecimento 20 $^{\circ}\text{K}/\text{min}$, velocidade do papel 2.5 mm/min. O termograma (Figura 3.7) apresenta pico endotérmico a 80 $^{\circ}\text{C}$, característico de perda de água entre as camadas; pico endotérmico a 520 $^{\circ}\text{C}$, característico de perda de água zeolítica e pico endotérmico a 740 $^{\circ}\text{C}$ da desidratação do $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; pequeno pico endo-exotérmico a 920 $^{\circ}\text{C}$, característico da formação de mulita.

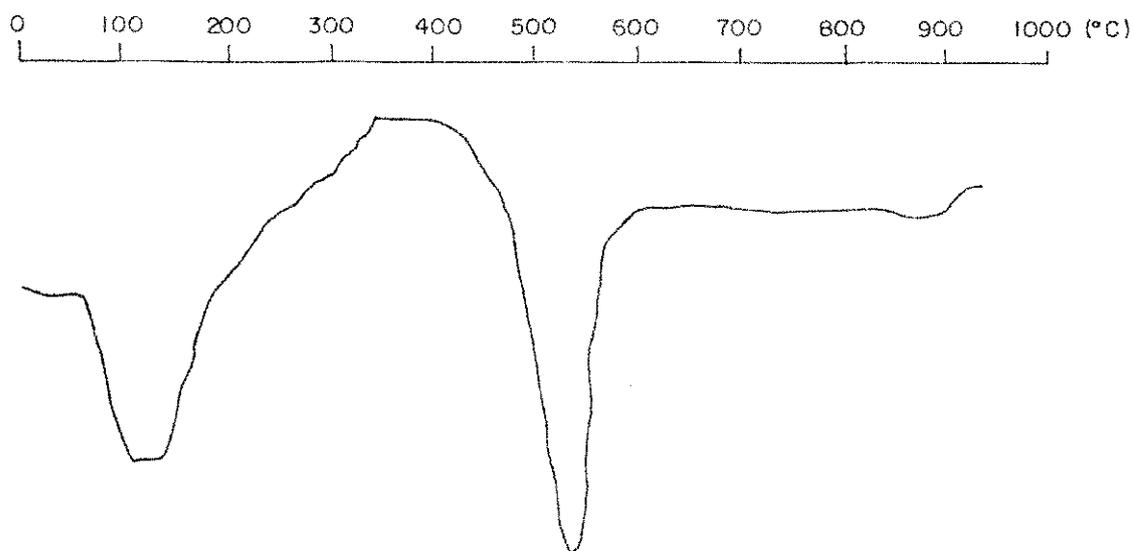


Figura 3.7. Análise Térmica Diferencial (Fonte: ITEP)

3.3. Sucção do Solo

3.3.1. Membrana de Pressão

3.3.1.1. Descrição do Equipamento

O equipamento *Membrana de Pressão* é um método direto de medida da sucção, que utiliza como sistema de drenagem uma membrana semipermeável de celulose que permite a passagem da água e não permite a passagem do ar.

Esta membrana é constituída de celulose, glicerina, água e 0.1 % de enxofre, que pode ser eliminado na lavagem durante a saturação feita através de imersão em água entre 3 a 5 minutos, quando sua espessura aumenta em até 50 %, enquanto sua área tem um aumento anisotrópico, maior no sentido perpendicular à direção de suas fibras. Quanto menor sua espessura, maior o fluxo de água. O raio de seus poros tem em média 24 Å, o que permite a passagem da água e de moléculas de elementos de baixo peso molecular; e embora semipermeável permite um pouco de passagem do ar provocando uma perda de 2 % da pressão em 24 horas. Sua permeabilidade à água, em condições saturadas, é da ordem de 10^{-11} a 10^{-12} m/s; enquanto que o fluxo de vapor de água é de 0,001 cm³/dia; o que provoca um tempo de equilíbrio de umidade muito longo quando não existe um bom contato entre o solo e a membrana (Jucá, 1990).

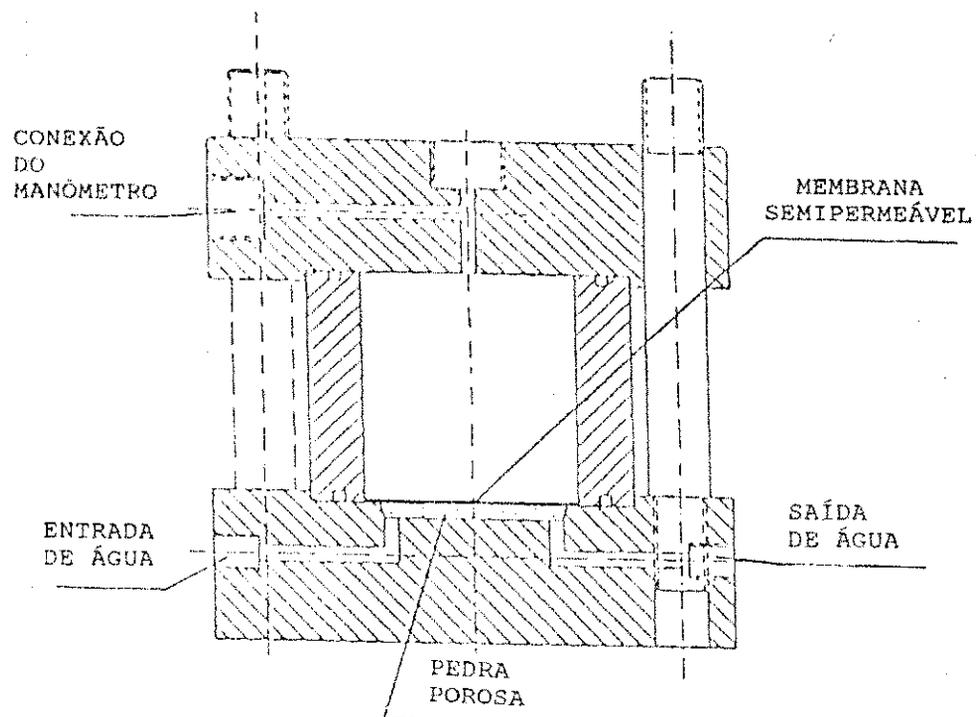


Figura 3.8. Esquema da Célula Membrana de Pressão

A célula é constituída de três peças: corpo cilíndrico e bases inferior e superior, cujos contatos são feitos através de o-rings para permitir uma vedação adequada. A base inferior possui um encaixe, onde é fixada uma pedra porosa de grãos grossos, e duas conexões para ligação com o circuito de alimentação de água. A base superior possui duas

conexões: uma para aplicação da pressão de gás e outra onde é acoplado o manômetro (Figura 3.8). Esta célula utiliza o princípio de translação de eixos de Hilf (1956), pelo qual a fase líquida sofre um aumento de pressão igual ao aplicado à fase gasosa.

3.3.1.2. Descrição dos Ensaios

Para a execução do ensaio, o corpo de prova é colocado sobre a membrana que está situada sobre a pedra porosa de grãos grossos saturada e conectada, pela parte inferior, ao sistema de drenagem que possui água à pressão atmosférica. Aplica-se uma determinada pressão de ar (nitrogênio) pela parte superior da célula, em estágios crescentes. O aumento desta pressão de ar é igual ao aumento da pressão de ar nos poros do solo, produzindo transferência de água entre o solo e o sistema de drenagem, até que a água do solo atinja a pressão atmosférica. Quando é alcançada a condição final de equilíbrio de umidade, a sucção do solo é igual à pressão de ar aplicada. Em geral a componente da sucção medida é a matricial, embora isto seja completamente seguro quando a água do sistema de drenagem tem a mesma composição da água do solo.

A velocidade de drenagem na secagem ou no umedecimento do solo influi nos tempos de equilíbrio e na velocidade das variações da umidade, e depende da *impedância do sistema de drenagem*, que é definida como a dificuldade de intercâmbio entre a água do solo e a do circuito de alimentação do equipamento. Esta impedância depende das características de drenagem do solo (permeabilidade e geometria dos corpos de prova), dos elementos drenantes do equipamento (membrana) e do contato entre o corpo de prova e os elementos drenantes.

Para determinar a *sucção inicial do solo*, que é o valor da sucção para o qual o corpo de prova não sofre variação de umidade, coloca-se em diferentes células um corpo de prova, todos eles moldados nas mesmas condições iniciais. Aplicando-se a seguir, uma pressão de gás diferente para cada célula, com o objetivo de medir a variação de peso sofrida pelo corpo de prova ao atingir o equilíbrio. Usa-se valores de sucção o mais próximo possível ao da sucção real, atuando-se por aproximações sucessivas quando não se conhece sua magnitude.

O corpo de prova submetido à pressão de gás inferior a sua sucção inicial ganhará umidade proporcionalmente à diferença entre a sucção inicial e a pressão aplicada; enquanto que aquele submetido à pressão superior, perderá umidade. Assim, o valor da pressão de gás que não provoque variação de umidade do corpo de prova, corresponde à sucção inicial do solo. Este valor pode ser determinado por interpolação na curva sucção versus variação de umidade.

Para determinar a *variação da umidade com o tempo*, submete-se um corpo de prova, em uma determinada pressão de gás, a várias pesagens, até atingir o equilíbrio, para definir a umidade ao longo do tempo. Após cada pesagem o corpo de prova é colocado de volta na célula e se reaplica a mesma pressão de gás. A frequência das pesagens depende das características de permeabilidade do solo e do sistema de drenagem do equipamento.

Para determinar as correlações sucção-umidade, que definem a *curva característica de sucção do solo*, coloca-se em diferentes células um corpo de prova. Sendo todos os corpos de prova moldados nas mesmas condições iniciais, submetendo-se cada um deles a uma sucção diferente, até que atinjam o equilíbrio, com o objetivo de obter a sua umidade final.

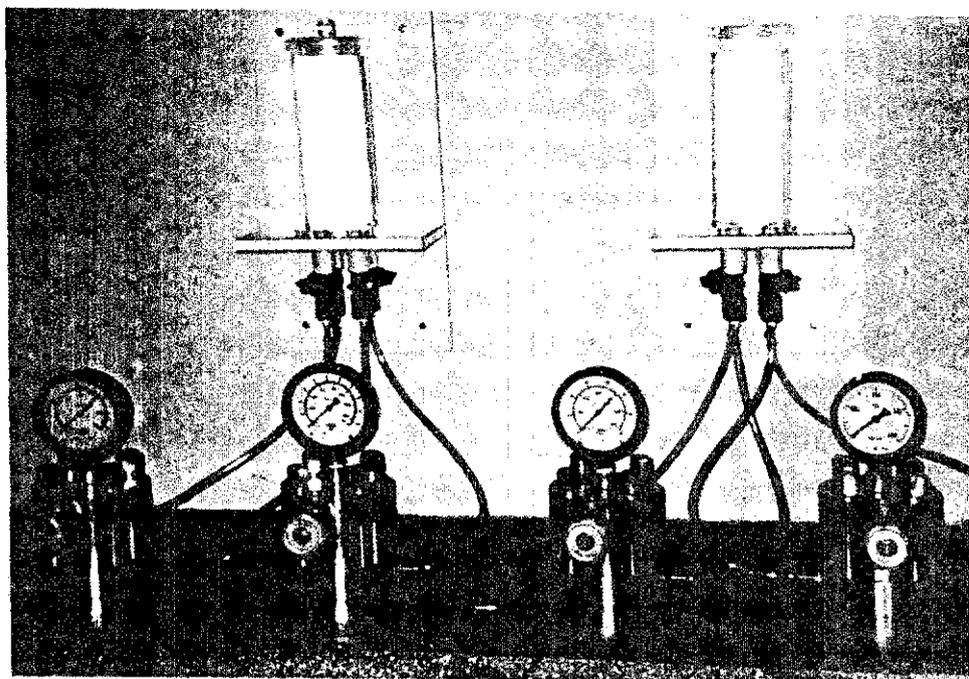


Figura 3.9. Células Membrana de Pressão

3.3.1.3. Execução dos Ensaio

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados a partir de amostra indeformada tipo bloco, por cravação estática de anel de aço com a extremidade biselada (anel de adensamento). Usou-se anéis com 50.5 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Todos os corpos de prova foram moldados nas mesmas condições iniciais.

Na montagem do ensaio, colocou-se a membrana (que anteriormente foi saturada em água destilada por 5 minutos, para então, ser cortada na dimensão da base da célula), sobre um papel filtro saturado, que foi depositado sobre a pedra porosa da base da célula (também saturada), com o objetivo de distribuir melhor, na superfície da membrana, a água que atravessa a pedra porosa. O corpo de prova, contido lateralmente pelo anel de adensamento, foi colocado sobre a membrana.

Após o fechamento da célula, aplicou-se a pressão de ar (com valores diferentes para cada célula). Abrindo-se então, a passagem de água para conectar a pedra porosa ao sistema de drenagem à pressão atmosférica. As amostras foram mantidas nas células por quatro semanas em média, até alcançarem o equilíbrio, quando foram pesadas para determinação da umidade final.

3.3.2. Papel Filtro

3.3.2.1. Descrição dos Materiais e Métodos

O uso de papel filtro como um sensor indireto de medida da sucção do solo, proposto por Gardner (1937), baseia-se no fato de que quando se coloca em contato uma amostra de solo e um material com capacidade de absorção de umidade e apenas o solo está umedecido, a água se deslocará do solo para o papel até que se estabeleça o equilíbrio.

O papel filtro é um material poroso, composto de entrelaçamento de fibras de celulose. E como todo material poroso, seu comportamento quanto à capilaridade depende da

intensidade e forma de seus poros, do material do qual é feito, da limpeza de suas faces e paredes e da natureza do líquido.

Como a água não penetra em celulose cristalina, a capacidade de absorção do papel é controlada pelo arranjo físico das suas fibras. A quantidade de água que o papel filtro pode absorver depende da umidade relativa e temperatura do meio ambiente e do tipo de contato com o solo. O papel filtro absorve até pequenas quantidades de água do solo, alcançando o equilíbrio em pouco tempo.



Figura 3.10. Material para Medida de Sucção com Papel Filtro

Os atributos desejáveis em um papel filtro são:

a) *Quanto ao seu estado:*

Deve estar em bom estado de conservação e em estado adequado para o uso, quer esteja seco ou úmido. Segurando-se o papel filtro, deve-se ter cuidado para não o amassar, rasgar ou dobrar. O grau aceitável de compressão do absorvente está relacionado com alterações nos resultados da relação sucção-umidade do papel.

b) Quanto à uniformidade:

Esta propriedade governa a relação inicial entre sucção e umidade. Para esta uniformidade, sugere-se incluir a porosidade, a distribuição dos poros e a compressibilidade. Teoricamente, pode-se obter as mesmas relações sucção-umidade tanto com um absorvente rígido com tamanho de poros bem graduados, como com um absorvente macio com poros uniformes.

c) Quanto à estabilidade:

Deve ter estabilidade química adequada, ou seja, não mostrar reações ou ser dissolvido através de solutos do solo. Deve, também, não ser alterado por uso de estufa a 110 °C, para permitir uma determinação acurada de sua umidade.

d) Quanto à sensibilidade:

Para que uma pequena variação na sucção produza uma grande mudança na umidade, deve-se usar um absorvente de alta porosidade. Outra forma de se obter esta sensibilidade, é garantir-se que o papel tenha grande absorvência no intervalo de sucção de interesse, o que pode implicar no uso de vários absorventes para cobrir uma grande variação de sucção. A sensibilidade se determina pela relação entre a variação de umidade para uma variação de sucção.

e) Quanto à histerese reversível:

Sendo a histerese, o resultado da instabilidade do material e de prevenção ao seu reuso, é observada na diferença de trajetória da curva sucção-umidade dependendo se está umedecendo ou secando. O efeito de histerese é evitado com o uso do papel sob as mesmas trajetórias de umidade seguidas no caso estudado, e de acordo com a calibração previamente efetuada.

f) Quanto à componente de sucção:

A medida da sucção total ou matricial não depende da natureza ou tipo do absorvente. O tempo necessário para medir a sucção total deve ser muito maior que para a sucção matricial. Quando se mede a sucção total, deve-se considerar, principalmente, os cuidados contra fungos. Enquanto que, quando se mede a sucção matricial, deve-se considerar o grau de contato entre o papel e o solo.

g) Quanto à espessura:

A pouca água absorvida por um papel fino pode ser de difícil pesagem. Quando o papel é grosso, a quantidade de água trocada entre ele e o solo pode alterar a umidade que está sendo medida, além de aumentar o tempo de equilíbrio.

O método de ensaio consiste em colocar um papel filtro com características de retenção conhecidas, junto à amostra de solo em um recipiente hermético. Se o papel é colocado em contato com o solo, o fluxo de água ocorrerá devido às forças capilares e gravitacionais, medindo-se a sucção matricial. Se o papel é separado do solo, apenas as moléculas de água serão transferidas ao papel, através da fase vapor, medindo-se a sucção total. A precisão deste método é considerada regular e está associada ao processo de pesagem do papel e da faixa de variação de umidade e sucção que se trabalha.

3.3.2.2. Calibrações dos Papéis Filtro

Foram utilizados dois tipos de papel filtro: o papel S&S 589 e o papel Whatman 42. Deste último, encontra-se na literatura um vasto estudo sobre sua calibração, algumas das equações estão apresentadas no Quadro 3.3. Embora o papel S&S 589 também apresente uma vasta literatura sobre sua calibração (Quadro 3.4), devido a seu uso em maior escala nesta pesquisa, realizou-se algumas medidas da sua relação sucção-umidade, que estão apresentadas na Figura 3.11, juntamente com as da literatura.

Quadro 3.3. Calibrações do Papel Filtro Whatman 42

Pesquisador	Faixa de umidade	$\text{Log}_{10}(\text{sucção})$ (kPa)
Fawcett & Collis George (1967)	$w_p < 43$ $w_p > 43$	$4.777 - 0.0600 w_p$ $2.271 - 0.0230 w_p$
Hamblin (1981)	-	$5.281 - 0.0822 w_p$
Chandler & Gutierrez (1986)	-	$4.850 - 0.0622 w_p$
Greacen, Walker & Cook (1987)	$w_p < 45.3$ $w_p > 45.3$	$5.327 - 0.0780 w_p$ $2.413 - 0.0135 w_p$
Chandler, Crilly & Montgomery-Smith (1992)	$w_p < 47$ $w_p > 47$	$4.842 - 0.0622 w_p$ $6.050 - 2.48 \log w_p$

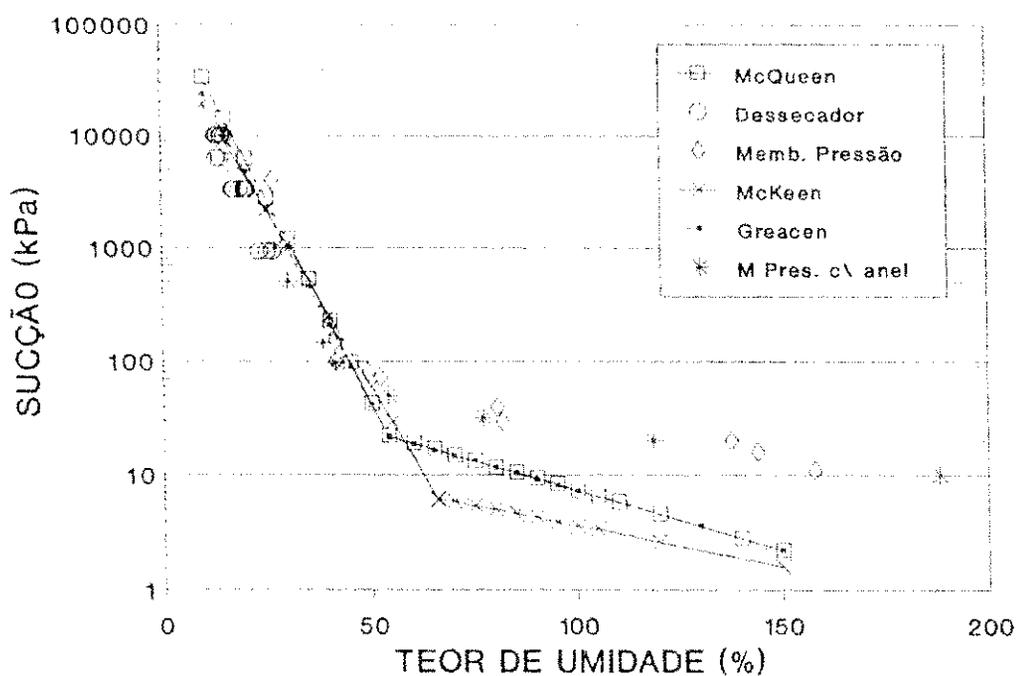


Figura 3.11. Calibrações do Papel Filtro S&S 589

Quadro 3.4. Calibrações do Papel Filtro S&S 589

Pesquisador	Faixa de umidade	Log_{10} (sucção) (kPa)
McQueen & Miller (1968)	$w_p < 54$	$5.246 - 0.0723 w_p$
	$w_p > 54$	$1.895 - 0.0103 w_p$
Al-Khafaf & Hanks (1974)	$w_p < 83$	$5.117 - 0.0337 w_p$
	$w_p > 83$	$1.983 - 0.0090 w_p$
McKeen (1980)	$w_p < 66$	$4.900 - 0.0624 w_p$
	$w_p > 66$	$1.250 - 0.0069 w_p$
Greacen, Walker & Cook (1987)	$w_p < 54$	$5.058 - 0.0688 w_p$
	$w_p > 54$	$1.882 - 0.0102 w_p$

Neste trabalho, realizou-se a calibração do papel S&S 589 em dessecador de vácuo com solução de NaCl e em células de membrana de pressão, dependendo da sucção aplicada. Em cada dessecador, colocou-se os papéis filtro e a solução em concentrações determinadas. Após o tempo para ocorrer o equilíbrio de umidade, determinou-se a umidade dos papéis em estufa a 105°C. Nas células de membrana de pressão, colocou-se um papel em cada célula e se aplicou pressão de ar correspondente à sucção desejada. Após o tempo para ocorrer o equilíbrio de umidade, determinou-se a umidade do papel. Sobre alguns destes papéis, colocou-se um anel de PVC pesando aproximadamente 9,2 g de modo a promover um melhor contato entre o papel e a membrana.

A partir da curva correspondente a esses ensaios (Figura 3.12), obteve-se as seguintes equações, que foram utilizadas para calcular o perfil de sucção:

$$\begin{aligned} \text{para } w_p < 42 \% & \rightarrow \log S = 4.895 - 0.0732 w_p \\ \text{para } w_p > 42 \% & \rightarrow \log S = 2.097 - 0.00642 w_p \end{aligned}$$

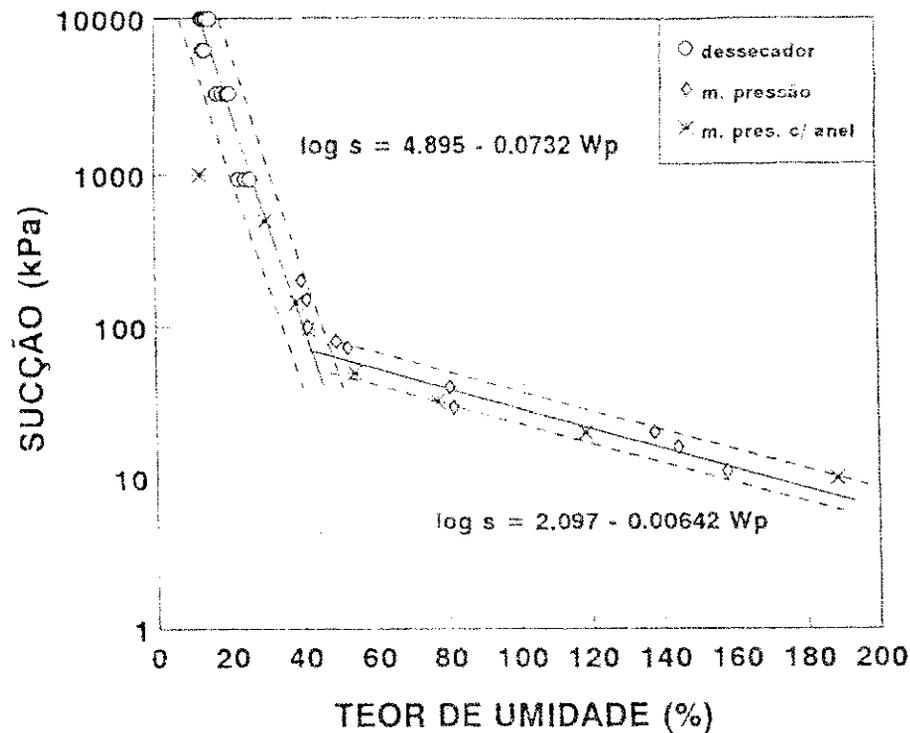


Figura 3.12. Relações da Calibração do Papel Filtro S&S 589

3.3.2.3. Execução dos Ensaios

Para os ensaios com o papel filtro, seguiu-se três procedimentos:

a) Medida de campo da sucção total:

As amostras foram coletadas por trado. Torrões naturais do solo foram colocados em potes plásticos juntamente com o papel filtro, sem que houvesse contato entre o solo e o papel, de forma que a transferência de umidade se deu através da fase vapor. Estes potes foram lacrados e após quatro meses, em média, determinou-se a umidade do papel.

Este método apresenta algumas desvantagens. Como o tempo de equilíbrio é muito longo, o papel sem proteção química apresenta proliferação de fungos, o que conduz a imprecisão nas medidas de umidade. O tempo de equilíbrio pode atingir quatro semanas, o que pode inviabilizar este procedimento para fins práticos de engenharia.

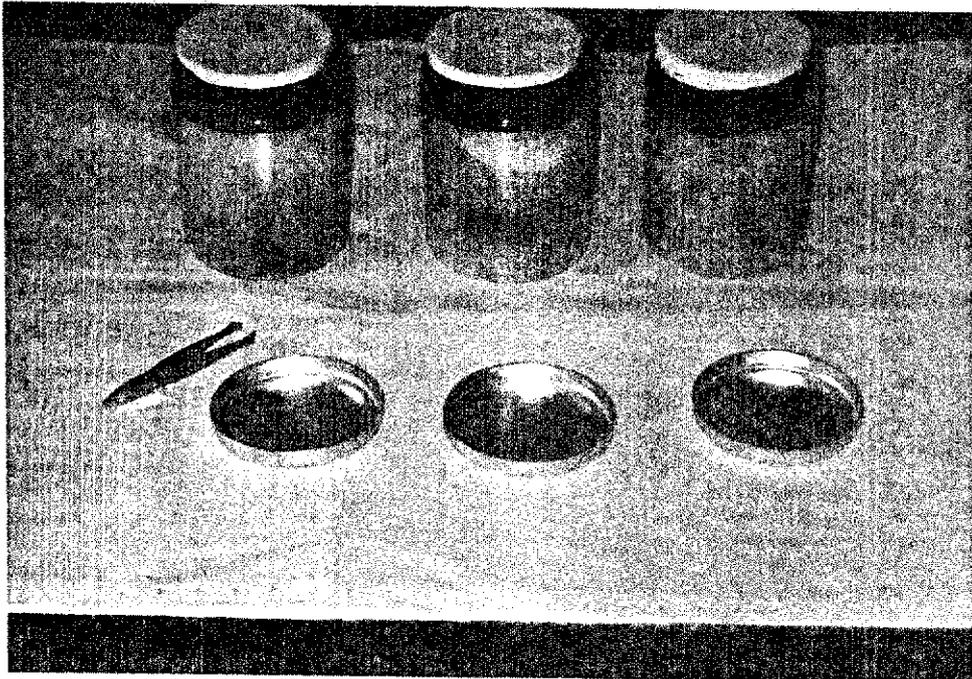


Figura 3.13. Medida da Sucção Total

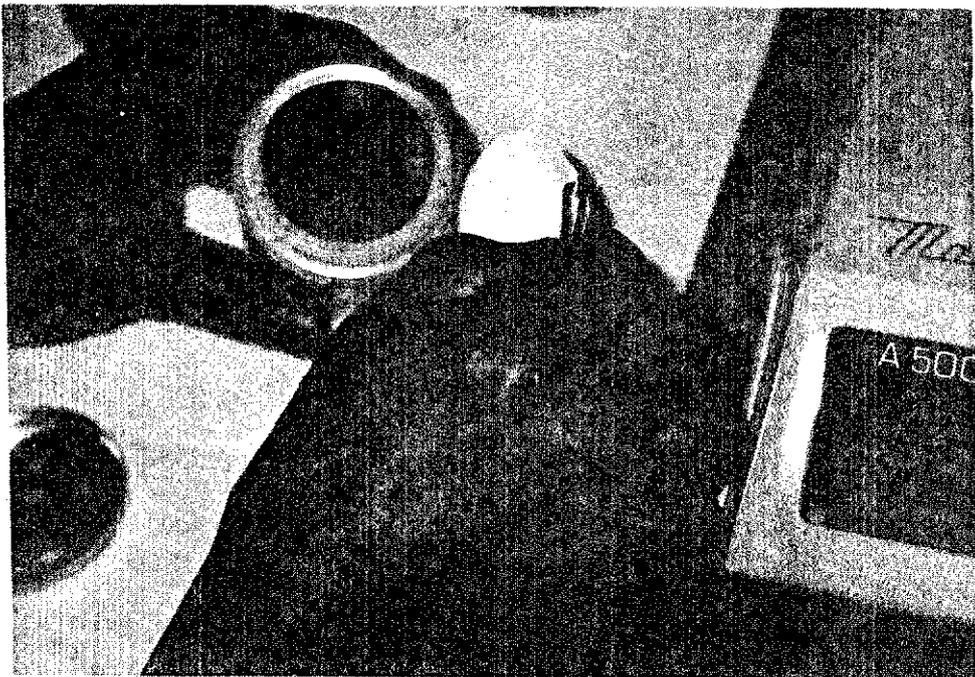


Figura 3.14. Pesagem do Papel Filtro

b) Medida de campo da sucção matricial:

Foram coletados pequenos cubos naturais (12 cm de arestas), nos quais foram colocados papéis filtro em contato com o solo, em uma das faces se colocou o papel S&S 589 e na outra o papel Whatman 42. As amostras foram, então, envolvidas em filme de PVC e em papel alumínio. Após doze dias, em média, determinou-se a umidade do papel filtro. Este tempo de equilíbrio pode ser reduzido para sete dias. A desvantagem deste método se deve ao grau de contato entre o papel e o solo. Caso este contato seja pobre, ou inadequado, não será medida a matricial. Este aspecto é relevante, quando se espera valores significativos para a componente osmótica da sucção.



Figura 3.15. Medida da Sucção Matricial *In Situ*

c) Medida em laboratório da sucção matricial:

Nesta medida, seguiu-se dois procedimentos: usou-se corpos de prova cilíndricos, que após serem ensaiados no equipamento Membrana de Pressão, foram colocados em contato direto com o papel filtro, envolvidos em filme de PVC e em papel alumínio. Após sete dias, em média, determinou-se a umidade do papel. Na Figura 3.16, os pontos próximos à linha representam um excelente contato do papel com o solo, o que não ocorreu nos pontos que estão distantes da linha.

Usou-se também, corpos de prova cúbicos (12 cm de arestas) moldados a partir de amostra indeformada tipo bloco, após permanecerem em dessecador com solução de NaCl por um tempo determinado. Após este tempo, seguiu-se o procedimento anterior. A Figura 3.16 mostra que o dessecador requer um tempo muito longo para o equilíbrio de umidade, pois embora os corpos de prova tenham permanecido neste equipamento de 75 a 97 dias, o equilíbrio não foi alcançado.

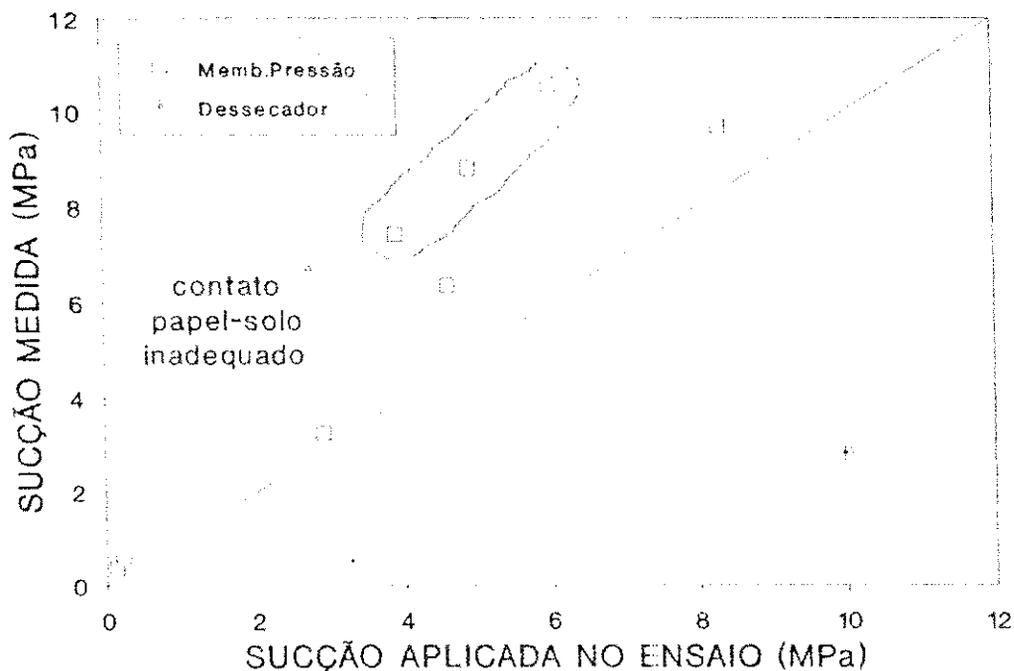


Figura 3.16. Sucção Matricial em Laboratório

3.3.3. Dessecador de Vácuo

3.3.3.1. Descrição do Método

O dessecador de vácuo é um método indireto de medida de sucção, no qual se coloca uma solução de ácido sulfúrico ou de cloreto de sódio em um dessecador, com o objetivo de manter uma determinada umidade relativa em seu interior. O princípio deste método é termodinâmico e se baseia no estabelecimento da condição de equilíbrio entre a amostra de solo e a solução (Figura 3.17).

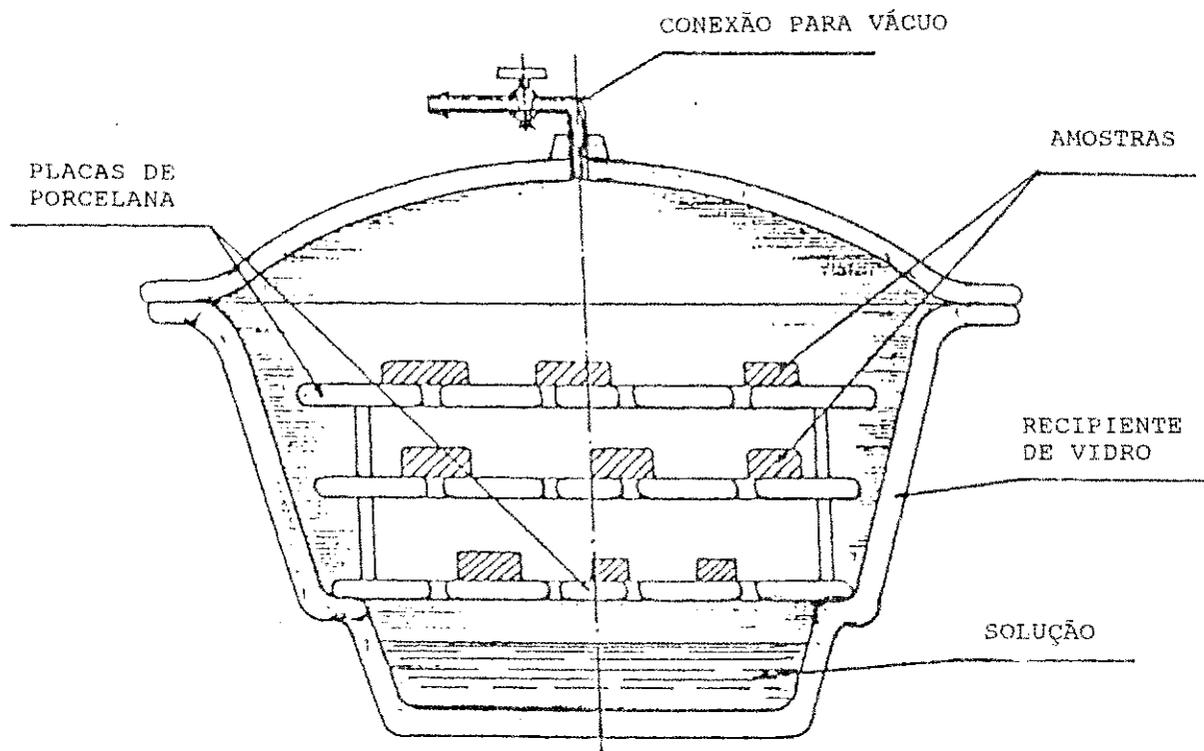


Figura 3.17. Seção Típica do Dessecador de Vácuo

A amostra de solo é colocada no dessecador, que contém a solução em concentração adequada para originar uma umidade relativa no ambiente, que induza o solo a uma determinada sucção total (Figura 3.18). A sucção variará com o tipo e concentração da solução utilizada. Jucá (1990) apresenta tabelas que mostram a relação entre as umidades relativas e as densidades da solução, tanto de ácido sulfúrico (Aitchison & Richards, 1965),

como de cloreto de sódio (Baker et al, 1973). Após a amostra atingir o equilíbrio é determinado seu teor de umidade.

(a)



(b)



Figura 3.18. Moldagem de Corpo de Prova (a) e Ensaio no Dessecador de Vácuo (b)

Para a temperatura de 20 °C, a equação que relaciona a sucção com a umidade relativa é:

$$pF = 6,502 + \log (2 \cdot \log H) \quad (3.1)$$

onde: pF = sucção total (log h em cm)
 $H = p/p_o \times 100$ é a umidade relativa do vapor d'água no solo.

A curva sucção-umidade é determinada fazendo-se o ensaio para várias concentrações da solução. É muito importante controlar a temperatura.

O tempo de equilíbrio de umidade, durante o umedecimento é de 100 a 250 dias, e durante a secagem é de 100 dias (Blight, 1966, citado por Jucá, 1990). Para acelerar o equilíbrio de umidade, pode-se aplicar vácuo no interior do dessecador, como também, utilizar-se dessecador com grandes superfície e volume de solução.

O método do dessecador de vácuo é utilizado como calibração de outros métodos e como controle da umidade inicial dos corpos de prova que serão ensaiados em outros equipamentos, como por exemplo no edômetro convencional. Entretanto, o controle da sucção através do dessecador pode apresentar problemas, pois o equilíbrio de umidade pode não ocorrer de forma uniforme em toda a superfície do corpo de prova, principalmente naqueles de grandes dimensões. Além do tempo de equilíbrio ser muito alto, devido à transferência desta umidade ocorrer pela fase vapor, portanto a velocidades muito pequenas.

3.3.3.2. Execução dos Ensaíos

Colocou-se em cada dessecador quatro corpos de prova e uma solução de NaCl em água destilada, para cada um; por períodos que variaram de 11 a 33 semanas. Após estes períodos, determinou-se a umidade dos corpos de prova.

Para os corpos de prova cilíndricos, o dessecador foi utilizado como controle da umidade inicial das amostras ensaiadas no edômetro convencional; enquanto que os corpos de prova cúbicos, após o período no dessecador foram colocados em contato com o papel filtro e envolvidos em filme plástico, com o objetivo de se determinar a sua sucção.

3.4. Variação Volumétrica do Solo

3.4.1. Ensaio Edométrico com Umidade Controlada

3.4.1.1. Descrição dos Equipamentos

Os ensaios com teor de umidade inicial controlada, foram realizados em células edométricas convencionais e prensas tipo Bishop, de fabricação nacional, com relação de braço de alavanca de 10:1. As variações de altura dos corpos de prova são medidas em extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. Os ensaios foram realizados em corpos de prova com relação diâmetro/altura superior a 2,5 (Lambe, 1951), com drenagem vertical por ambas as faces.

3.4.1.2. Descrição dos Ensaio

Os corpos de prova foram moldados a partir de amostra indeformada do tipo bloco, por cravação estática de anel de ponta biselada (anel de adensamento), com diâmetro de 87,4 mm e altura superior a 25 mm. Em seguida colocou-se os corpos de prova em dessecadores de vácuo com solução de NaCl e água destilada, em diferentes concentrações, por períodos variados, como é mostrado no Quadro 3.5.

Quadro 3.5. Tempo de Equilíbrio dos Dessecadores

SÉRIE (n°)	CONCENTRAÇÃO (g/l)	TEMPO (dias)
01	75,97	231
02	40,91	75
03	116,88	97

Em cada dessecador foram colocados quatro corpos de prova. Após um certo período para equilíbrio de umidade, em cada um destes corpos de prova foram cravados, estaticamen-

te, anel de adensamento com diâmetro de 71.3 mm e altura de 20 mm. O objetivo da remoldagem do corpo de prova em anel de menor dimensão, foi para permitir que as alterações sofridas pelas amostras (contração ou expansão) durante o período no dessecador, não interferissem na condição edométrica ($\epsilon_s=0$) de confinamento lateral.

3.4.1.3. Execução dos Ensaios

Foram realizadas três séries de ensaios. Cada série, composta de quatro corpos de prova que permaneceram no mesmo dessecador, foi ensaiada em células edométricas convencionais, em várias etapas:

a) Primeira etapa: aplicação de sobrecarga

Foram montadas quatro células edométricas, com sobrecarga diferente para cada uma delas. Após a montagem do ensaio, a célula foi vedada com plástico para evitar troca de umidade entre o corpo de prova e o ambiente. Efetuou-se as leituras de variação da altura, até ocorrer a estabilização, nos tempos convencionais do ensaio edométrico (Figuras 3.19 a 3.21).

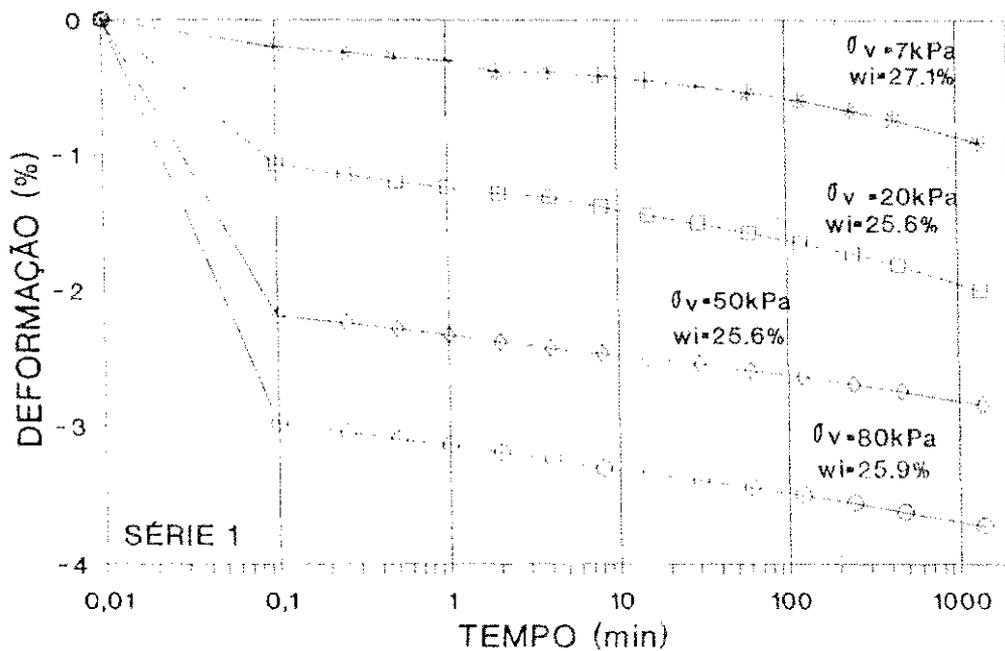


Figura 3.19. Estágio de Sobrecarga (Série 1)

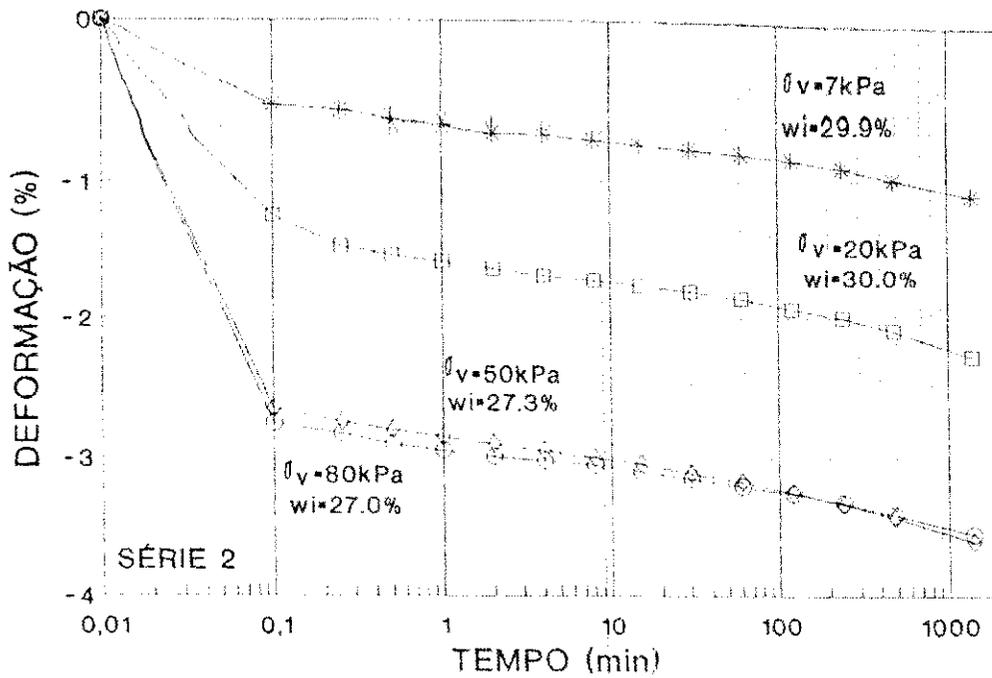


Figura 3.20. Estágio de Sobrecarga (Série 2)

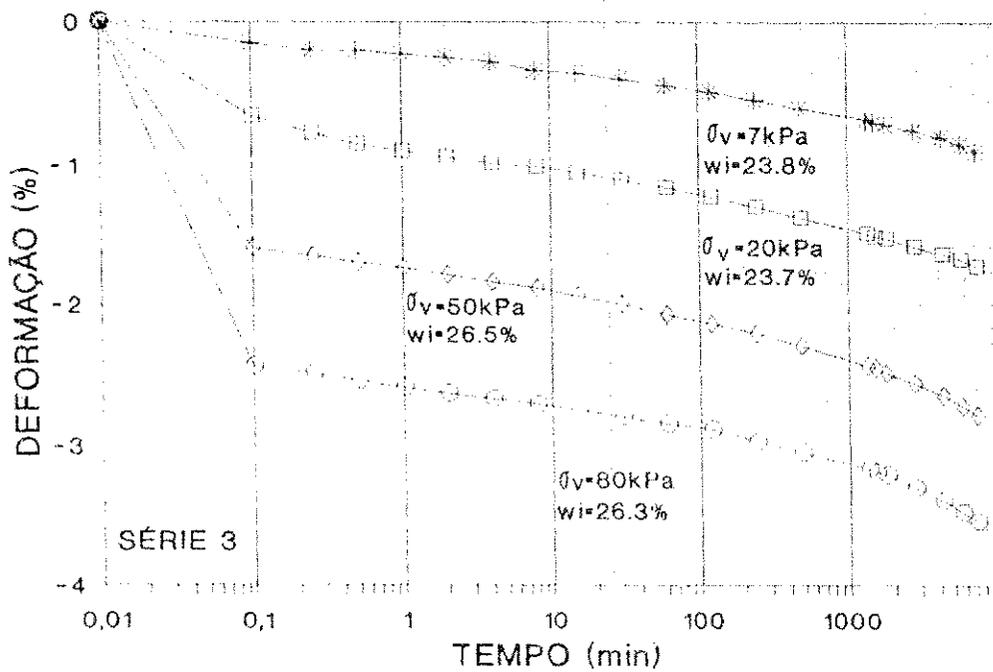


Figura 3.21. Estágio de Sobrecarga (Série 3)

b) Segunda etapa: expansão com sobrecarga

Inundou-se a célula edométrica com água destilada, retirando-se a vedação plástica. Mediu-se a expansão até estabilizar a deformação (Figuras 3.22 a 3.24).

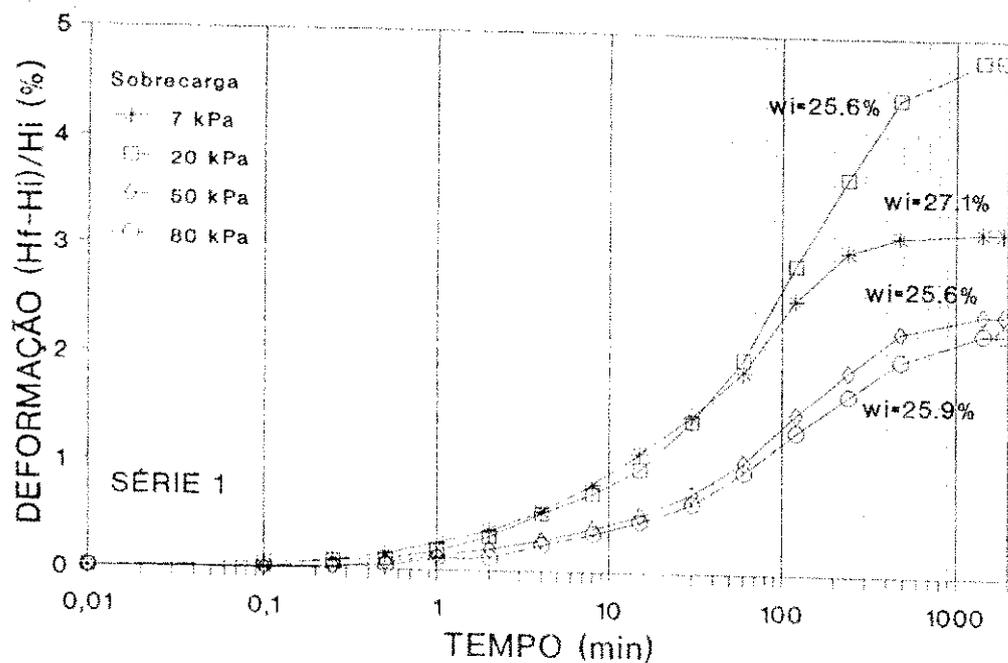


Figura 3.22. Expansão Com Sobrecarga (Série 1)

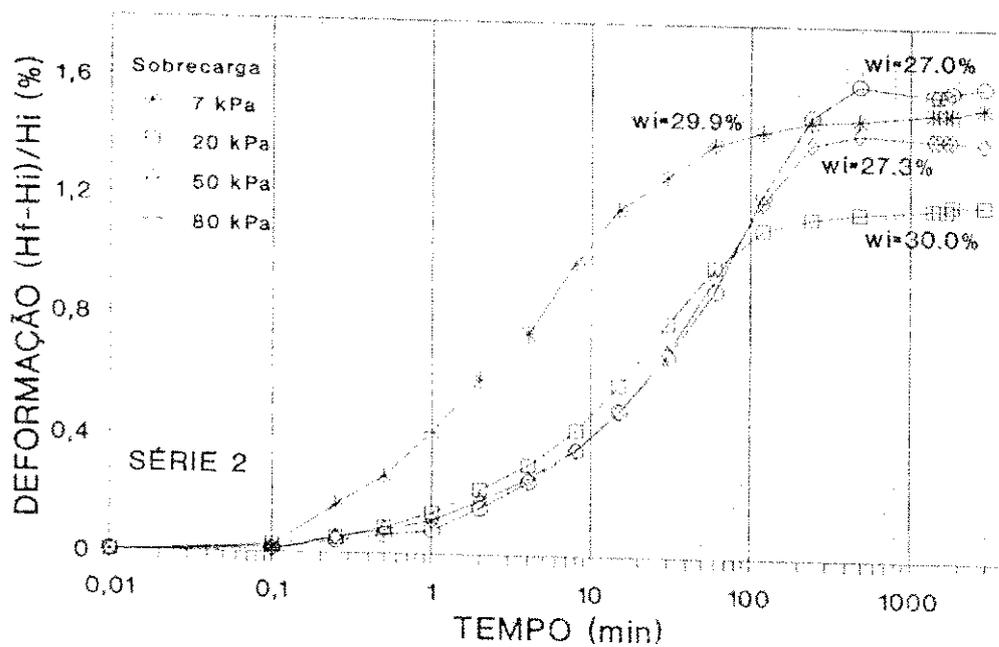


Figura 3.23. Expansão com Sobrecarga (Série 2)

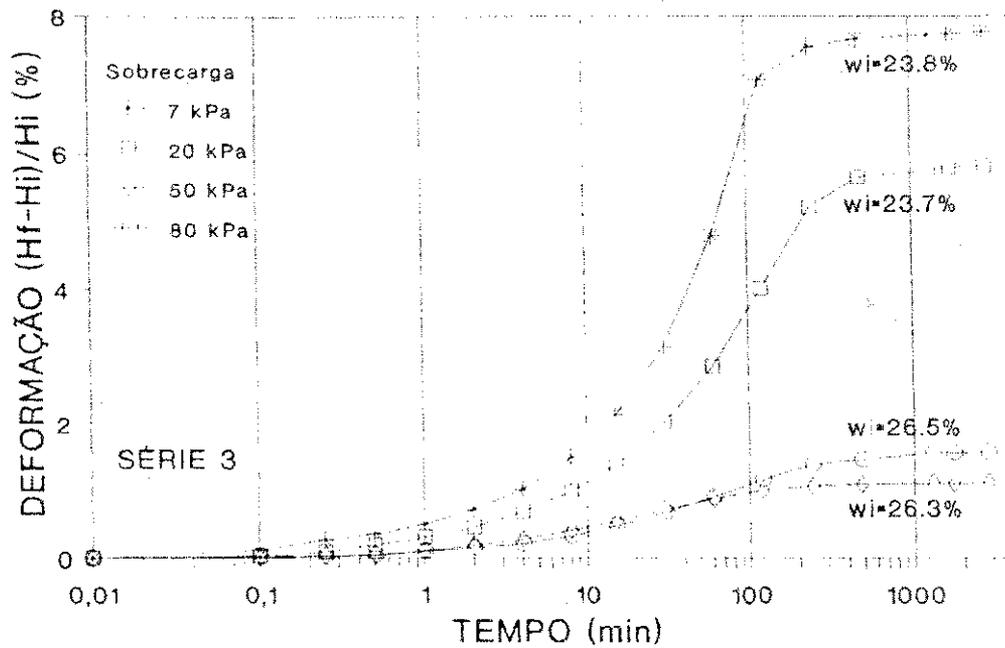


Figura 3.24. Expansão com Sobrecarga (Série 3)

c) Terceira etapa: pressão de expansão

Colocou-se pequenos acréscimos de carga, para o corpo de prova voltar à altura anterior à inundação. Esta carga corresponde à pressão de expansão (Figuras 3.25 a 3.27).

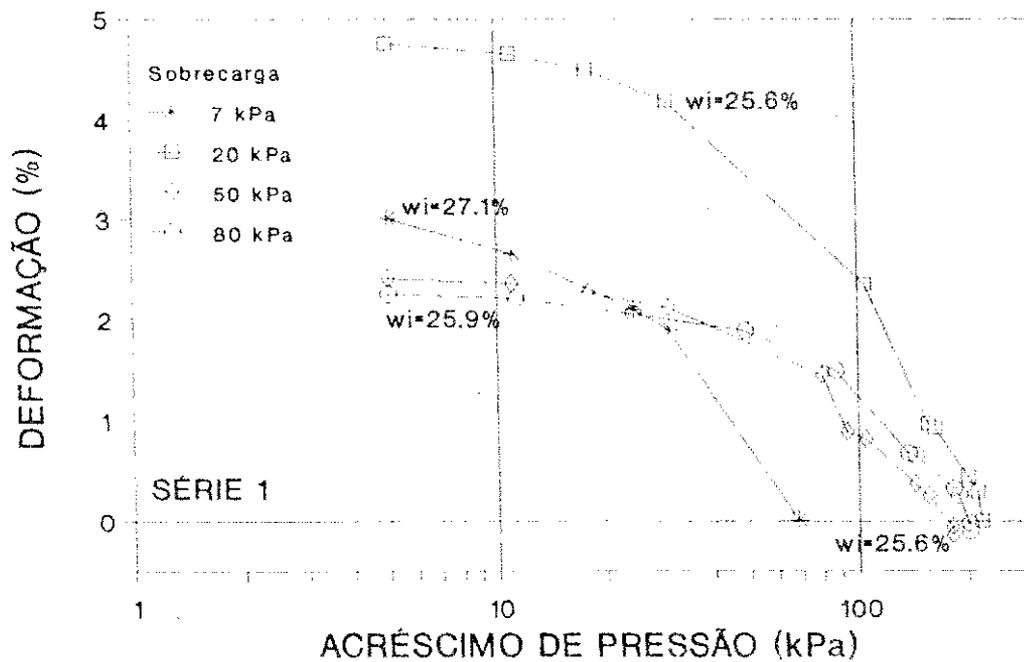


Figura 3.25. Pressão de Expansão (Série 1)

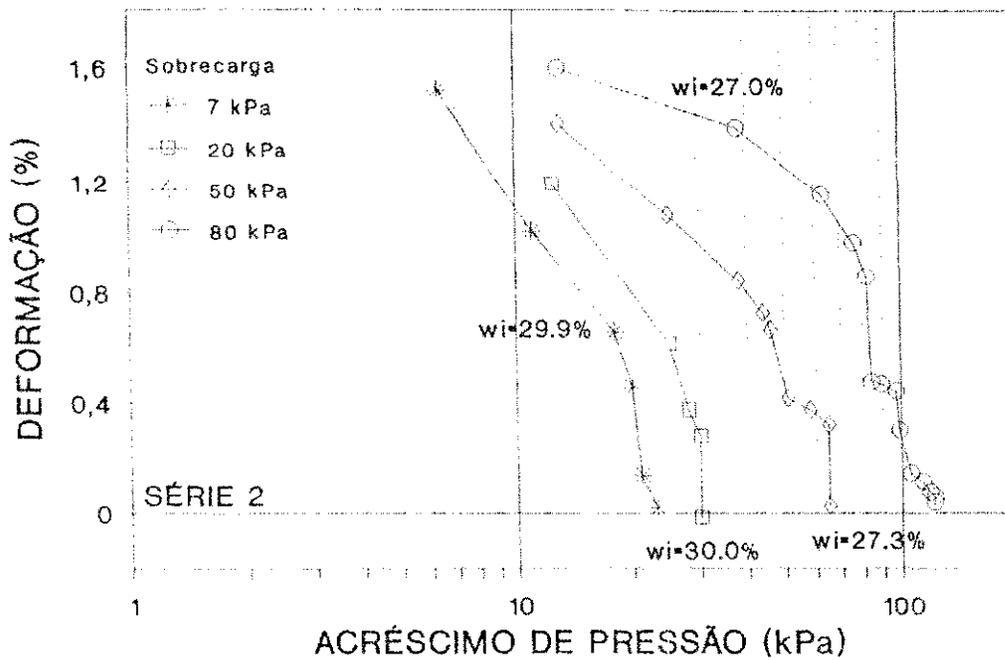


Figura 3.26. Pressão de Expansão (Série 2)

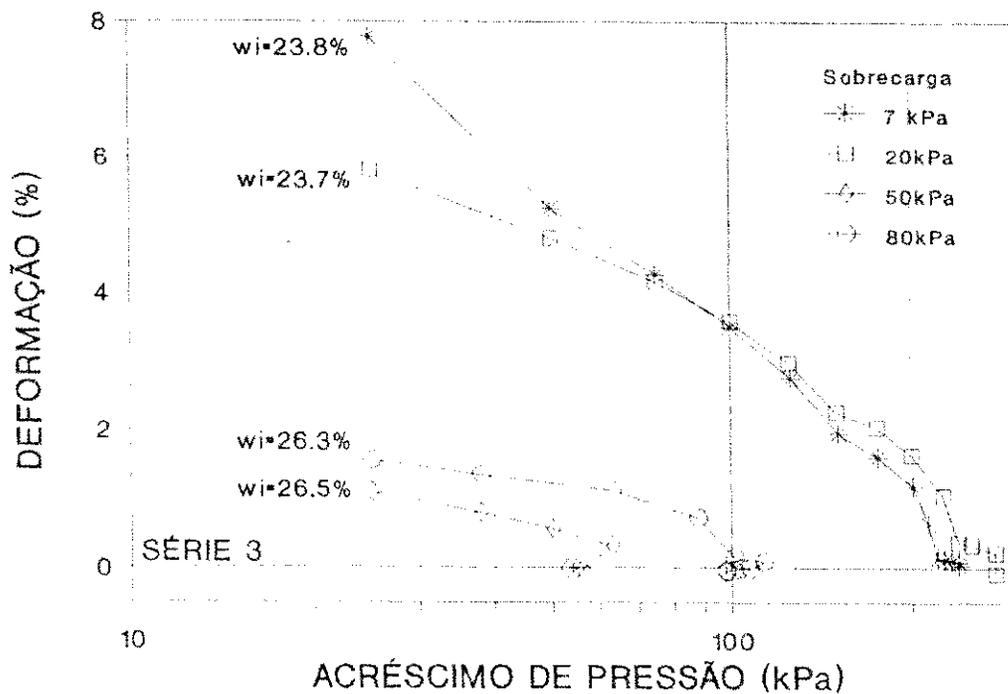


Figura 3.27. Pressão de Expansão (Série 3)

d) Quarta etapa: ensaio edométrico

O ensaio foi realizado, mantendo-se no pendural da prensa a carga correspondente à pressão de expansão, respeitando-se os acréscimos de carga convencionais do ensaio

edométrico (Figuras 3.28 a 3.30).

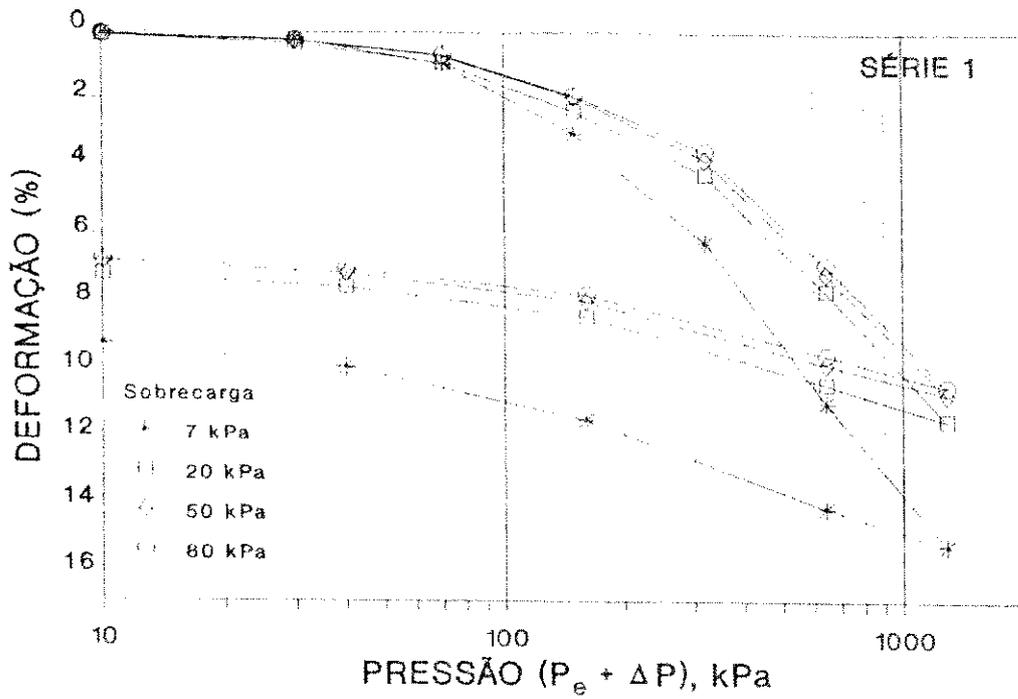


Figura 3.28. Ensaios Edométricos Convencionais (Série 1)

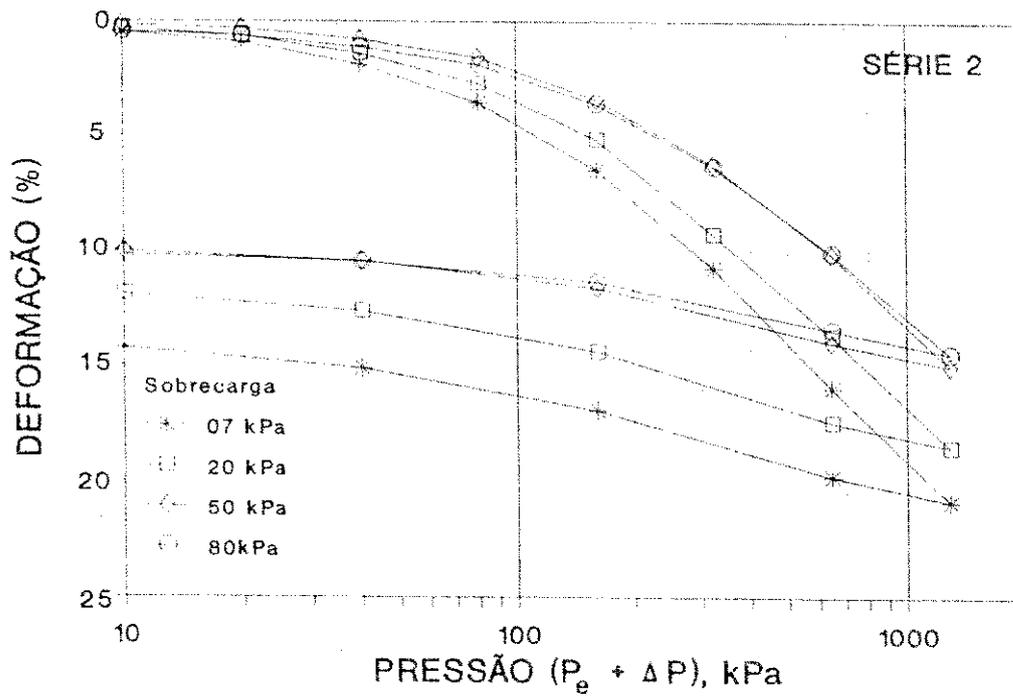


Figura 3.29. Ensaios Edométricos Convencionais (Série 2)

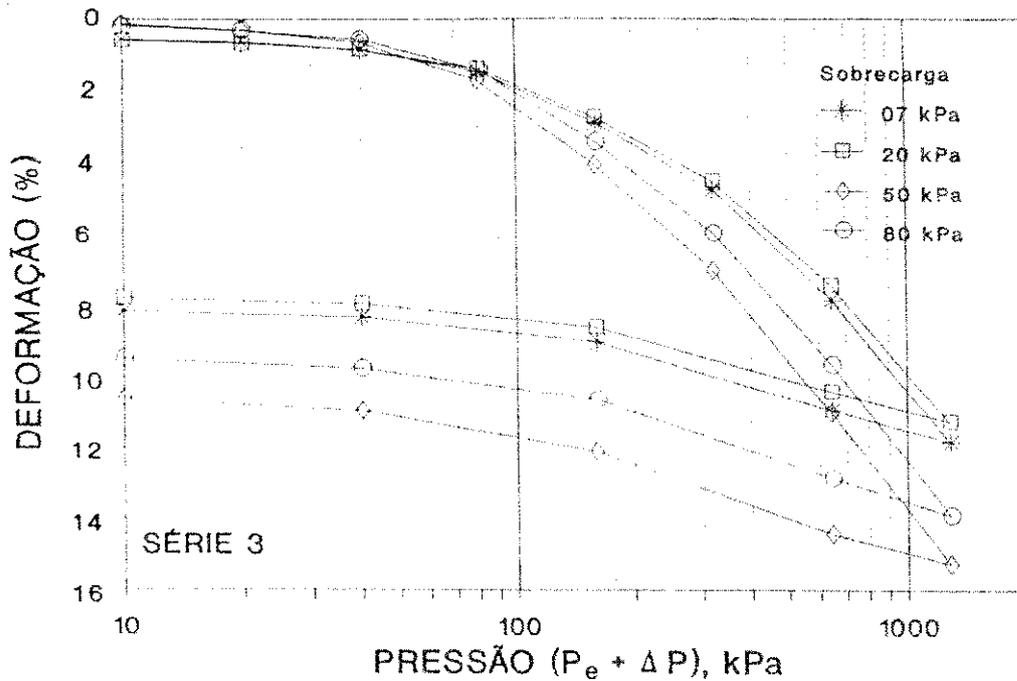


Figura 3.30. Ensaio Edométrico Convencional (série 3)

Quadro 3.6. Dados dos Ensaio Edométrico com Umidade Controlada

SÉRIE n°	σ_v kPa	UMIDADE (%)		ÍNDICE DE VAZIOS				S_i %	γ_b kN/m ³
		w_i	w_f	e_0	e_1	e_2	e_3		
1	7	27.1	30.6	0.918	0.900	0.961	0.900	79.0	17.75
	20	25.6	28.2	0.823	0.787	0.873	0.785	83.2	18.44
	50	25.6	27.9	0.821	0.770	0.813	0.767	83.6	18.48
	80	25.9	28.2	0.786	0.719	0.767	0.717	88.4	18.89
2	7	29.9	30.9	1.049	1.026	1.057	1.027	76.2	16.99
	20	30.0	31.1	1.012	0.966	0.990	0.967	79.4	17.32
	50	27.3	29.6	0.910	0.841	0.867	0.842	80.4	17.86
	80	27.0	29.2	0.866	0.799	0.828	0.800	83.5	18.24
3	7	23.8	28.3	0.818	0.802	0.942	0.803	77.8	18.23
	20	23.7	28.3	0.838	0.807	0.911	0.805	75.7	18.02
	50	26.5	29.0	0.976	0.921	0.942	0.921	72.9	17.15
	80	26.3	29.4	0.912	0.844	0.873	0.843	77.2	17.70

σ_v = Sobrecarga
 S_i = Grau de saturação inicial
 w_i = umidade inicial
 w_f = umidade final
 γ_b = Peso específico aparente úmido

e_0 = e no início do carregamento
 e_1 = e após estabilizar a sobrecarga
 e_2 = e após a expansão
 e_3 = e após Pressão de Expansão
 (início do ensaio edométrico)

Quadro 3.7. Pressões de Expansão, em kPa, Calculadas por Diferentes Métodos

SÉRIE n ^o	σ_v kPa	PRESSÃO DE EXPANSÃO	
		caso 1	caso 2
1	7	68	179
	20	217	225
	50	180	223
	80	200	223
2	7	23	157
	20	30	143
	50	65	200
	80	121	200
3	7	239	215
	20	275	229
	50	53	179
	80	98	187

caso 1 = Ensaio de Pressão de Expansão descrito no item 3.4.1.3.e

caso 2 = Pressão de Pré-Adensamento, no gráfico (e x $\log \sigma_v$)

3.4.2. Expansão com Águas de Diferentes Composições

3.4.2.1. Descrição dos Materiais e Métodos

Para comparar os efeitos, na expansão do solo, das águas de campo e destilada, realizou-se duas séries de ensaios seguindo o mesmo procedimento, de carregamento e inundação, dos ensaios de expansão com sobrecarga. Os ensaios foram realizados em edômetros convencionais, em duas etapas: aplicação de sobrecarga e expansão. Os corpos de prova, com diâmetro de 71.3 mm e altura de 20 mm, foram moldados a partir de amostra indeformada tipo bloco, por cravação estática de anel de aço.

As análises físico-químicas das águas destilada e coletada *in situ*, são apresentadas no Quadro 3.8.

Quadro 3.8. Análises Físico-Químicas das Águas Utilizadas nos Ensaio

	ÁGUA DESTILADA		ÁGUA DE CAMPO	
Alcalinidade Total (°F)	0,60		3,20	
Alcalinidade à Fenolftaleína (°F)	0,00		0,00	
Dureza total (°F)	0,80		7,00	
pH	6,02		6,63	
Resistividade à 25°C (Ohm/cm)	50000,00		5400,00	
Resíduo Seco à 110°C (mg/l)	17,00		142,00	
Matéria Orgânica (mg/l de O ₂ consumido)	-		9,9	
ELEMENTOS	mg/l	meg/l	mg/l	meg/l
Ca	2,40	0,1197	2,40	0,1197
Mg	0,48	0,0394	15,55	1,2783
Na	0,00	-	15,00	0,6525
K	0,00	-	0,50	0,0127
Fe	Não detectado		Não detectado	
Cl	1,50	0,0423	48,00	1,3536
SO ₄	0,00	-	2,20	0,0457
HCO ₃ -OH	7,32	0,1200	39,04	0,6402
CO ₃	0,00	-	0,00	-
NO ₂	Ausência		Ausência	
NO ₃	0,00	-	0,00	-

Fonte: Laboratório de Análises Minerais e Solos - SUDENE

3.4.2.2. Execução dos Ensaio

a) Primeira etapa: aplicação da sobrecarga

Os dois corpos de prova de uma mesma série foram submetidos a uma mesma sobrecarga (7 kPa para a Série 1 e 27 kPa para a Série 2). Na montagem do ensaio, a célula foi vedada com plástico para evitar troca de umidade entre o corpo de prova e o ambiente. Efetuou-se as leituras de variação de altura, até ocorrer a estabilização, nos tempos convencionais do ensaio edométrico. Após a estabilização das leituras, iniciou-se a etapa de expansão com sobrecarga.

b) Segunda etapa: expansão com sobrecarga

Após a estabilização inundou-se as células, retirando-se a vedação plástica. Inundou-se uma célula com água destilada e a outra com água coletada *in situ*. A expansão dos corpos de prova foi medida até a estabilização de deformação (Figuras 3.31 e 3.32).

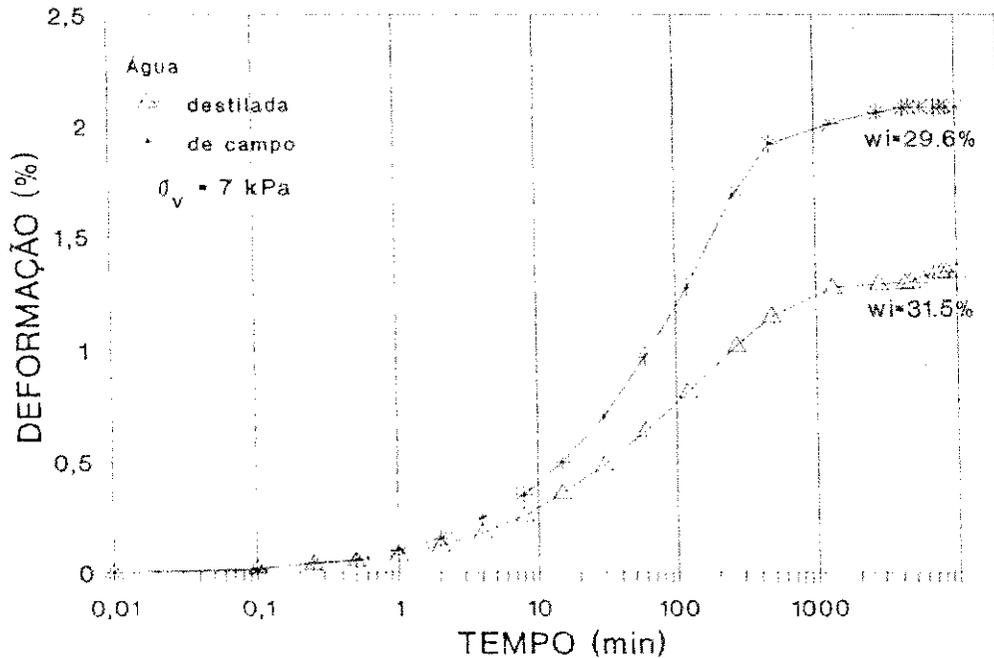


Figura 3.31. Expansão com Sobrecarga, com Águas de Diferentes Composições (7 kPa)

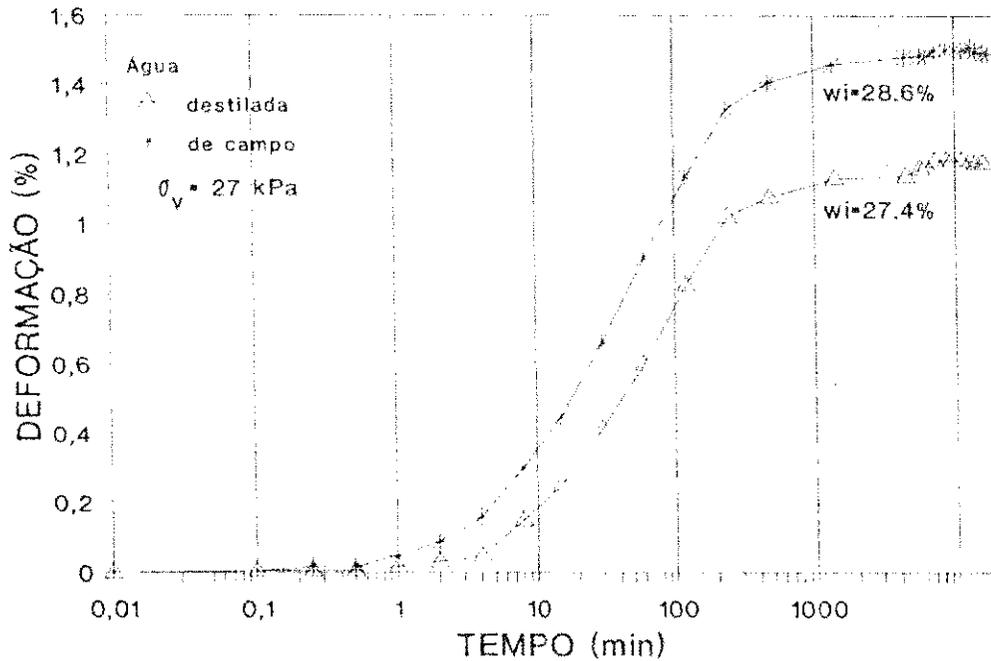


Figura 3.32. Expansão com Sobrecarga, com Águas de Diferentes Composições (27 kPa)

A célula é constituída de três peças: corpo cilíndrico e bases inferior e superior, cujos contatos são feitos através de o-rings para permitir uma vedação adequada. A base inferior possui duas conexões para ligação com o circuito de alimentação de água, e um encaixe onde é fixada uma pedra porosa de grãos grossos saturada, em contato com o sistema de drenagem à pressão atmosférica. Sobre esta pedra é colocada uma membrana semipermeável ou uma pedra porosa de alta resistência à penetração de ar. Nas células utilizadas neste trabalho, utilizou-se membrana semipermeável (referido no ítem 3.3.1.1).

A base superior possui conexões para aplicação da pressão de ar (nitrogênio) e para acoplar o manômetro. Nela está localizado o pistão, que através da placa de carga, transmite para o corpo de prova a carga resultante daquela aplicada no pendural da prensa. O sistema de aplicação de carga é similar ao utilizado no ensaio edométrico convencional (Figuras 3.33 e 3.34).

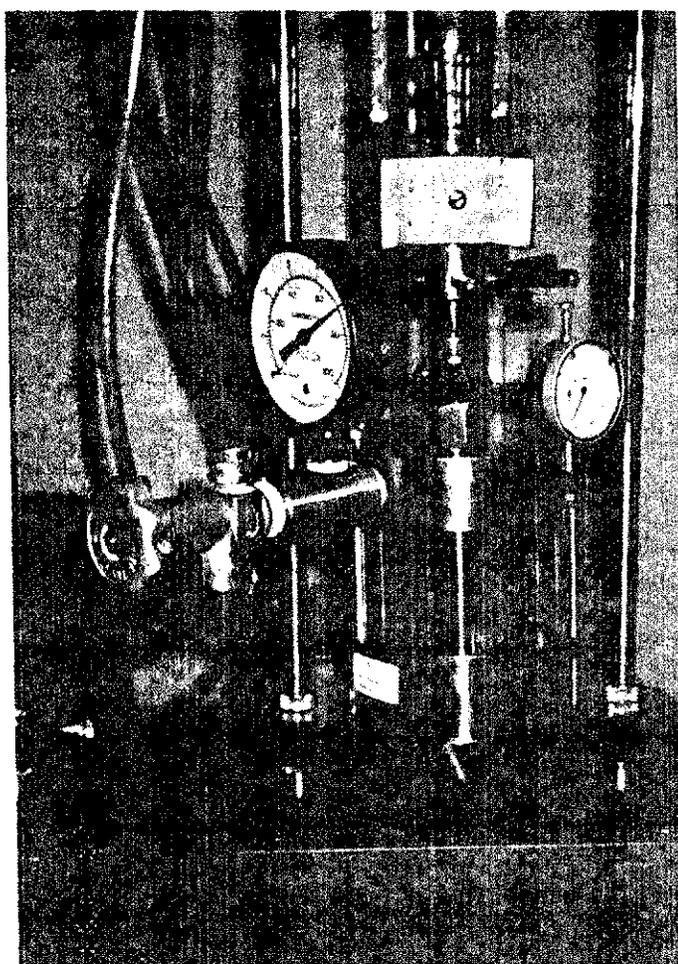


Figura 3.34. Prensas e Edômetros com Sucção Controlada

3.4.3.2. Descrição dos Ensaios

A amostra de solo, confinada lateralmente por um anel, é colocada entre a membrana semipermeável e uma pedra porosa de grãos grossos. Sobre a amostra é colocada a placa de carga, onde se encaixa o pistão. A membrana semipermeável permite o livre acesso da água livre à amostra por sua parte inferior, sem deixar que a pressão de ar se perca através da mesma. Como esta membrana é permeável aos íons dissolvidos na água intersticial, na condição de equilíbrio a componente da sucção que é controlada é a matricial.

3.4.3.3. Execução dos Ensaios

Os corpos de prova de diâmetro de 70 mm e altura de 20 mm, foram moldados nas mesmas condições iniciais, a partir de amostras indeformadas tipo bloco, por cravação estática do anel.

Na montagem do ensaio, colocou-se a membrana, saturada em água destilada, sobre a pedra porosa de grãos grossos da base da célula. O corpo de prova, contido lateralmente pelo anel, foi colocado sobre a membrana e sobre ele uma pedra porosa de grãos grossos, onde se localiza a placa de carga, sobre a qual se apoia o pistão.

Após o fechamento da célula, aplicou-se a pressão de gás (nitrogênio), abrindo-se então, a passagem de água para conectar a pedra porosa da base do sistema de drenagem à pressão atmosférica. A tendência de movimentação do pistão com a pressão de ar, foi combatida através de colocação de carga no pendural da prensa, de modo a equilibrar o sistema. A vedação entre o pistão e a célula é feita com graxa para rolamentos, visando não permitir o vazamento da pressão de ar.

As variações de altura do corpo de prova são medidas em extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. Os ensaios foram realizados para diferentes sobrecargas. Cada corpo de prova foi submetido a uma sobrecarga e a vários estágios de sucção. Cada um dos estágios de sucção foi mantido até ocorrer estabilização da deformação. Os dados dos corpos de prova estão no Quadro 3.9 e os resultados na Figura 3.35.

Quadro 3.9. Dados dos Corpos de Prova

$(\sigma_v - u_a)$ (kPa)	7	20	50	80
Altura inicial (mm)	20	20	20	20
Umidade inicial (%)	29.89	27.68	26.69	29.81
Umidade final (%)	29.59	34.12	31.97	33.48
C_u	0.041	0.039	0.013	0.037

C_u = Declividade da curva índice de vazios versus log da sucção matricial

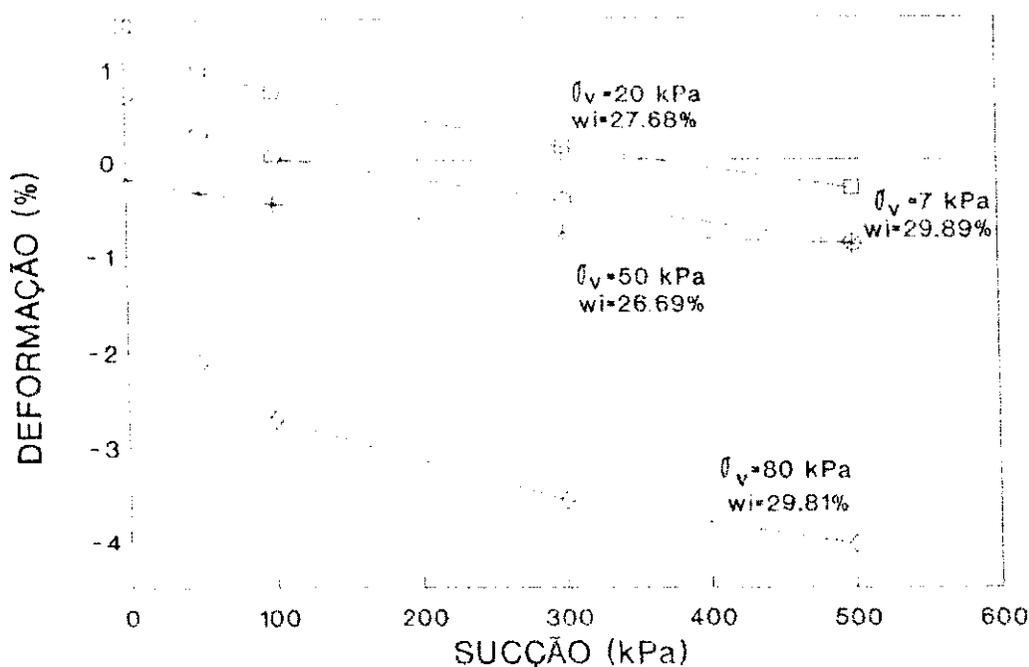


Figura 3.35. Ensaios Edométricos com Sucção Controlada

3.4.4. Contração por Ressecamento

3.4.4.1. Execução dos Ensaios

Os ensaios de contração por ressecamento foram realizados, seguindo-se dois procedimentos complementares. Nos dois casos, os corpos de provas foram moldados por cravação estática de anel de aço com diâmetro de 71.3 mm e altura de 20 mm, em amostra indeformada do tipo bloco. Após a moldagem, os corpos de prova foram retirados do anel de aço e colocados em dessecador contendo água coletada in situ, com o objetivo de se obter

sua saturação. Este processo foi controlado por 234 dias, até apresentarem constância de peso (Figura 3.36) quando, então, foram iniciados os ensaios.

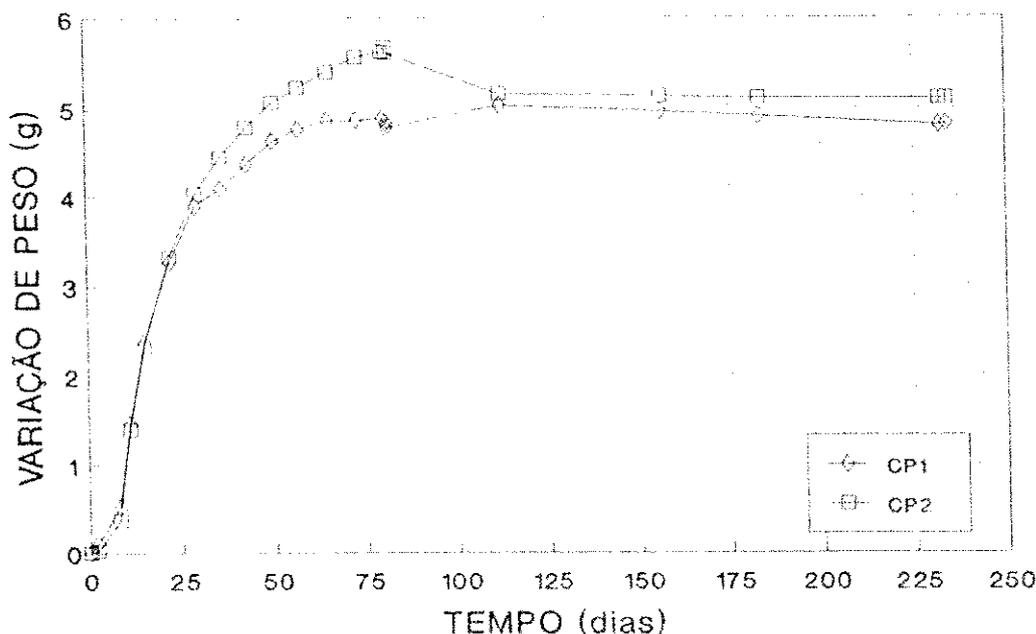


Figura 3.36. Controle da Saturação dos Corpos de Prova

Nos dois procedimentos as sucções determinadas através do papel S&S 589, foram calculadas pelas equações apresentadas no ítem 3.3.2.2. Já as determinações através do papel Whatman 42 foram calculadas pelas equações de Chandler (Chandler 1992). Mediu-se a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente.

a) Procedimento 1

O corpo de prova 1, (CP1), foi submetido a um processo de secagem lenta em ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controladas, registrando-se suas variações de altura e peso ao longo do tempo, até ocorrer a repetição de peso. Para isto, o CP1 foi colocado entre duas pedras porosas, sobre uma base fixa e sobre este conjunto, fixou-se um micrômetro para medir sua deformação longitudinal. A certos intervalos de tempo, realizou-se leituras, para determinar a variação de altura, e pesagem do CP1, para controlar a variação de umidade. Após cada pesagem, ajustou-se o micrômetro reiniciando o ensaio. Durante o desenvolvimento do ensaio, registrou-se o fissuramento do corpo de prova.

O ensaio teve a duração de 27 dias, quando se deu a repetibilidade de peso. Após este período, colocou-se papéis filtro em contato direto com as faces do CPI que foi envolvido com filme plástico, para evitar perdas de umidade. O corpo de prova permaneceu assim durante sete dias, com o objetivo de determinar a sucção final do solo. Na face superior do CPI, utilizou-se papel S&S 589, enquanto que na inferior, o papel Whatman 42. O Quadro 10 apresenta as condições iniciais e finais do corpo de prova.

Quadro 3.10. Dados do Corpo de Prova 1 (CPI)

Dados do CPI	Iniciais	Finais
Umidade (%)	23.40	10.96
Peso (g)	150.97	135.75
Altura (mm)	20.00	18.58
Sucção (kPa)		
S&S 589	1988	22981
Whatman 42	2750	28314

b) Procedimento 2

O ensaio do corpo de prova 2, (CP2), foi realizado em cinco estágios, cada um deles composto de duas fases. Na primeira, colocou-se papéis filtro em contato direto com as faces do CP2 que foi, então, envolvido com filme plástico, para evitar perdas de umidade. Permanecendo assim durante sete dias, com o objetivo de determinar a sucção do solo. Na face superior do CP2, utilizou-se papel S&S 589, enquanto que na inferior, o papel Whatman 42. Após este período, iniciou-se a segunda fase. Retirando-se os papéis, para determinação de sua umidade e submetendo-se o CP2 a um processo de secagem durante quatro horas, ao término das quais foi iniciado novo estágio. Durante a realização desta fase, mediu-se a temperatura ambiente e a umidade do ar. E assim sucessivamente, até a obtenção de cinco medidas de sucção.

O Quadro 3.11. apresenta os dados do corpo de prova 2, enquanto no Quadro 3.12 estão as sucções determinadas em cada estágio, pelo método do papel filtro com contato direto com o solo.

Quadro 3.11. Dados do Corpo de Prova 2 (CP2)

Dados do CP2	Umidade (%)	Peso (g)	Altura (mm)
Inicial	23.35	150.88	20.00
Final	11.61	136.52	(1)

(1) CP2 com fissuras, impossibilitando a medição da altura.

Quadro 3.12. Sucções do Corpo de Prova 2 (CP2)

Estágios	Dias	Sucções (kPa)	
		S&S 589	Whatman 42
1	0	1988	2750
2	7	6427	6542
3	14	11534	15807
4	21	13401	19151
5	28	26122	26853

3.4.5. Variação Volumétrica *In Situ*

3.4.5.1. Instrumentação

As medidas da expansão e contração do solo *in situ* vem sendo realizadas periodicamente, há pelo menos uma década (Gusmão Filho & Justino da Silva, 1991; Jucá et al, 1992). A instrumentação utilizada consta, de placas de recalque em diferentes profundidades (tassômetros) e pinos de recalque instalados no edifício nº 1. O nivelamento é feito utilizando-se um nível de precisão, dotado de placas paralelas, e mira de invar (Figura 3.37).



Figura 3.37. Execução de Leituras de Nivelamento

3.4.5.2. Deslocamentos Verticais

A Figura 3.38 mostra exemplo de valores máximos de expansão e contração acumulados durante as estações chuvosa e seca, respectivamente, medidas no ano de 1991. Quanto ao deslocamento vertical do edifício nº 1, os resultados mostram as mesmas aparência e magnitude obtidas com as placas de recalque. O levantamento máximo acumulado do edifício foi de 15 mm e ocorreu na estação chuvosa (Jucá et al, 1992).

Quadro 3.13. Deslocamentos entre 03 e 07/93

Profundidade (m)	Placa (n ^o)	Deslocamento (mm)
0.25	2	41.00
0.50	3	34.80
0.75	4	23.90
1.00	5	25.40
1.25	6	19.51
1.50	7	18.60

O ano de 1993 foi atípico quanto à precipitação, chegando a apresentar índice de Thornthwaite negativo. O deslocamento ocorrido entre as duas leituras realizadas nos dias 19 de março e 1º de julho de 1993, é mostrado no Quadro 3.13, enquanto a Figura 3.39 apresenta os deslocamentos dos tassômetros, medidos periodicamente no final das estações seca e chuvosa, a partir do ano de 1991.

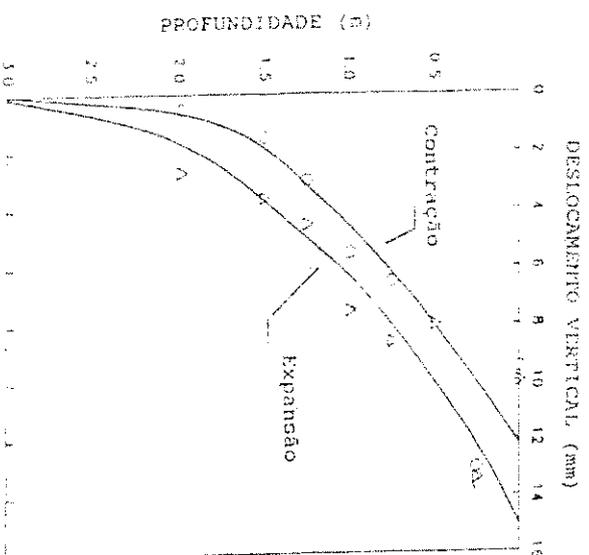


Figura 3.38. Deslocamentos Acumulados em Diferentes Estações (Lucá et al, 1992)

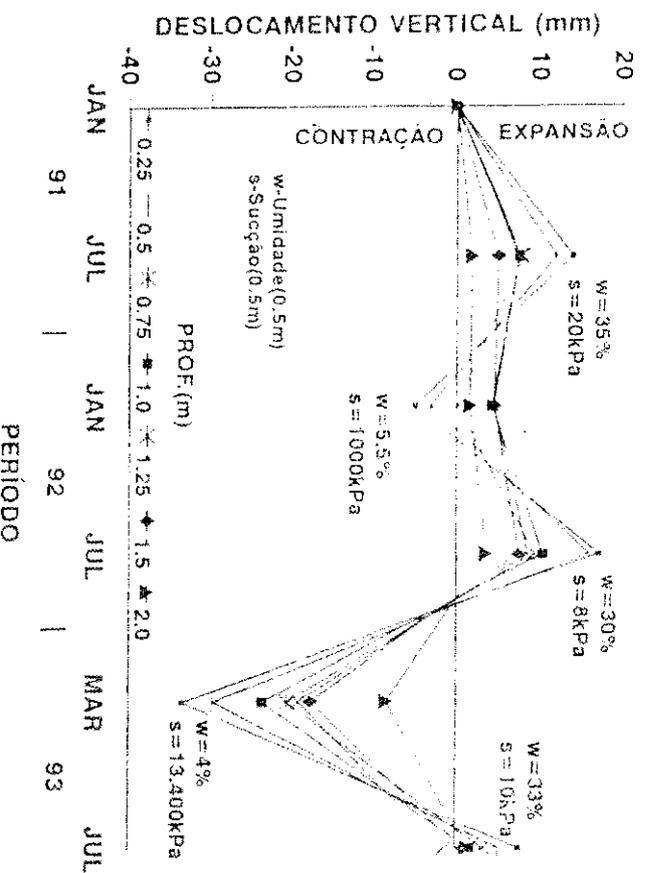


Figura 3.39. Deslocamentos Medidos

CAPÍTULO 4

PREVISÃO DE DESLOCAMENTO VERTICAL DO SOLO

4.1. Introdução

A previsão de movimentos em solos expansivos pode envolver análises e procedimentos complexos, incluindo parâmetros e modelos sofisticados, sobre os quais é apresentada uma revisão por Gens & Alonso (1992). Embora métodos empíricos sejam, também, largamente utilizados.

As previsões apresentadas neste capítulo foram realizadas através de métodos simples, a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios de campo e laboratório, com o objetivo de comparar com as medidas realizadas através da instrumentação instalada no campo experimental.

Inicialmente, no item 4.2, o solo estudado é classificado de acordo com o seu potencial de expansão. Em seguida, são apresentadas as previsões de deslocamento vertical do solo, realizadas através de três procedimentos diferentes.

4.2. Potencial de Expansão

Não existe um procedimento padrão para a classificação de um solo expansivo, dessa forma parâmetros de ensaios para identificação desses solos têm sido combinados por diferentes métodos de classificação, existindo uma prática adotada em cada local onde foi desenvolvido o método.

Vários destes métodos, que são apenas indicativos, são apresentados por Delgado (1986) e Nelson & Miller (1992). O Quadro 4.1 mostra classificações do solo de acordo com alguns destes métodos.

Quadro 4.1. Classificações do Potencial de Expansão do Solo

Método	Parâmetros Requeridos	Dados da Argila Janga	Classificação
Classificação do solo	Classificação Unificada	CH	Potencialmente Expansivo
Altmeyer (1955)	LC	19 %	Não Crítico
Chen (1965)	% < #200 LL	94 % 73 %	Muito Alto
Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)	LL w_{NAT}	73 % 13.8 % 34.3 %	Muito Alto Médio
Snethen et al (1977)	LL IP s_{NAT}	73 % 38 % 0.04-5.9 MPa	Alto
Chen (1988)	IP	38 %	Alto

LC = limite de contração
LL = limite de liquidez
IP = índice de plasticidade

w_{nat} = umidade natural
 s_{nat} = grau de saturação natural

4.3. Deslocamentos Verticais

Entre os vários processos existentes para a previsão de deslocamento do solo, apresenta-se três métodos analíticos que utilizam parâmetros obtidos nos ensaios edométricos convencional e com sucção controlada, comparando-se esses resultados com os obtidos em medidas diretas *in situ*.

4.3.1. Método Baseado nos Ensaio Edométricos

Este método está associado a uma condição de equilíbrio de umidade. Segundo Fredlund (1983), uma equação para a previsão de levantamento foi derivada usando a teoria

do comportamento do solo não saturado. Usando-se os resultados do ensaio edométrico para a previsão do levantamento total, considera-se a trajetória de tensão transferida para o plano de tensão total. A equação para o trecho de descarregamento do ensaio edométrico pode ser escrita como:

$$e_f = e_o - C_s \log \frac{P_f}{P_o} \quad (4.1)$$

onde:

- e_f = índice de vazios final
- e_o = índice de vazios inicial
- C_s = índice de expansão
- P_f = estado de tensão final
- P_o = estado de tensão inicial

O estado de tensão inicial é a soma do peso das terras e da sucção matricial, transferida para o plano de tensão total. O estado de tensão inicial será sempre igual à pressão de expansão corrigida, que corresponde à pressão de pré-adensamento calculada pelo método de Casagrande (Fredlund, 1983).

$$P_o = \sigma_v + (u_s - u_w)_o \quad (4.2)$$

onde:

- σ_v = peso das terras original
- $(u_s - u_w)_o$ = sucção matricial equivalente

O estado de tensão final considera a variação da tensão total e condição final de poro-pressão da água.

$$P_f = \sigma_v \pm \Delta\sigma - u_w_f \quad (4.3)$$

onde: $\Delta\sigma$ = variação na tensão total devido à escavação ou aterro.
 u_w_f = poro-pressão final da água, estimada.

O levantamento em uma camada individual de solo pode ser escrito em termos de variação de índice de vazios:

$$\Delta h_i = h_i \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (4.4)$$

onde: Δh_i = levantamento da camada
 h_i = espessura da camada
 Δe = variação do índice de vazios

O levantamento de uma camada do solo pode ser escrito como:

$$\Delta h_i = h_i \frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P_r}{P_0} \quad (4.5)$$

$$\Delta h_i = h_i \frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{(\sigma_v \pm \Delta \sigma - u_w)}{[\sigma_v + (u_s - u_w)]} \quad (4.6)$$

O levantamento total é o somatório dos levantamentos calculados para cada camada. A Figura 4.1 mostra o levantamento do solo, estimado através da Equação 4.7 (Fredlund, 1983), cujo resultado é apresentado na Figura 4.2, juntamente com o deslocamento medido *in situ*.

$$\Delta h = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{sh}}{(1+e_0)} \log \frac{\sigma'_i}{\sigma'_{sc}} \right]_i \quad (4.7)$$

Onde: h = espessura da camada (mm)
 e_0 = índice de vazios natural
 σ'_i = peso das terras (kPa)
 $\sigma'_{sc} = P_s$ = pressão de pré-adensamento (kPa)
 C_s = índice de expansão

O levantamento é calculado no meio de cada camada. A camada ativa, que atinge 3.0 m de profundidade, está subdividida em camadas com 500 mm de espessura, e o índice de vazios natural é de $e_0 = 1.0$. O índice de expansão (que geralmente está na faixa entre 10 a 20 % do índice de compressão, para um solo particular) e a pressão corrigida, são valores médios obtidos nos gráficos, índice de vazios versus log pressão vertical, dos ensaios edométricos. Como o solo é homogêneo ao longo de toda a camada ativa, a pressão de expansão corrigida é considerada constante até 3.0 m de profundidade.

		PRESSÃO DE EXPANSÃO CORRIGIDA (kPa)		PRESSÃO TOTAL (kPa)
		0	200	
0				
	CAMADA 1	$e_0 = 1.0$		4.75
0.5	-----	$\gamma_s = 19 \text{ kN/m}^3$		
	CAMADA 2	$\sigma_r = \gamma_s h$		14.25
1	-----			
	CAMADA 3			23.75
1.5	-----	AMOSTRA		
	CAMADA 4	INDEFORMADA		33.25
2	-----			
	CAMADA 5	$C_c = 0.036$		42.75
2.5	-----	$\sigma'_{st} = 200 \text{ kPa}$		
	CAMADA 6			52.25
3	-----			

$$\Delta h_1 = 500 \frac{0.036}{1+1} \log \frac{4.75}{200} = 14.62 \text{ mm}$$

$$\Delta h_2 = 500 \frac{0.036}{1+1} \log \frac{14.25}{200} = 10.32 \text{ mm}$$

$$\Delta h_3 = 500 \frac{0.036}{1+1} \log \frac{23.75}{200} = 8.33 \text{ mm}$$

$$\Delta h_4 = 500 \frac{0.036}{1+1} \log \frac{33.25}{200} = 7.01 \text{ mm}$$

$$\Delta h_5 = 500 \frac{0.036}{1+1} \log \frac{42.75}{200} = 6.03 \text{ mm}$$

$$\Delta h_6 = 500 \frac{0.036}{1+1} \log \frac{52.25}{200} = 5.25 \text{ mm}$$

$$\text{Deslocamento total} = 51.56 \text{ mm}$$

Figura 4.1. Previsão Baseada nos Ensaio Edométricos

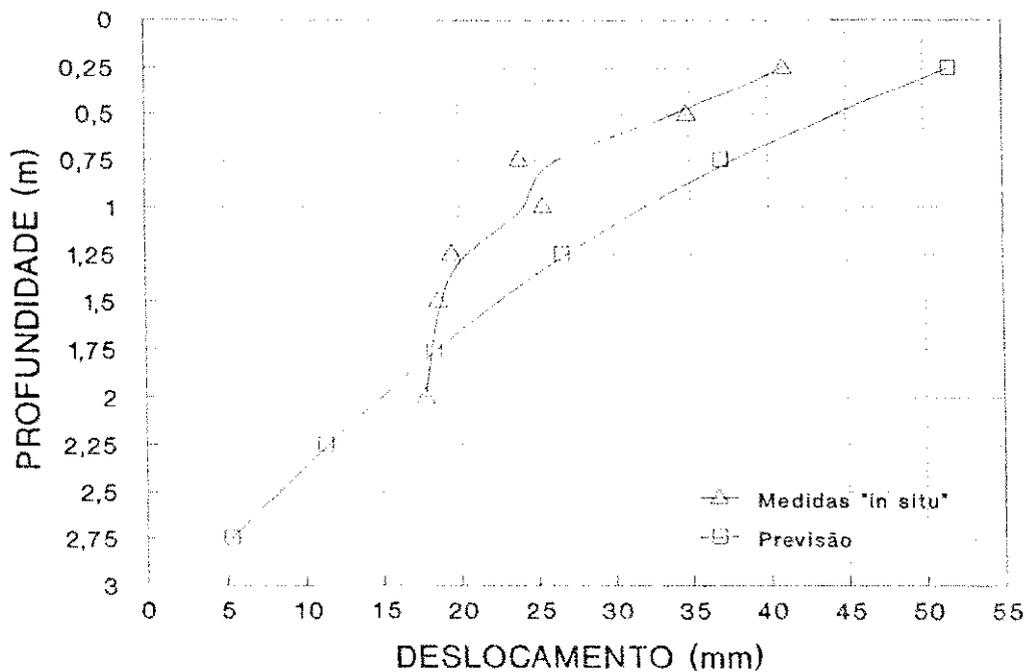


Figura 4.2. Previsão Baseada nos Ensaio Edométricos

4.3.2. Método Baseado nos Ensaio de Sucção do Solo, Proposto por Fredlund (1987)

O primeiro termo da Equação 4.8 representa a parcela do levantamento ou recalque do solo devido a variações na sucção. Se a tensão total não varia, o segundo termo da equação é nulo. As condições de sucção inicial podem ser determinadas por medidas diretas. As condições de sucção final devem também, ser medidas diretamente ou assumidas, sem necessariamente corresponder às condições de 100 % de saturação. Acima do nível d'água, a sucção do solo geralmente será maior que zero e o solo pode, ou não, estar saturado.

Para a previsão dos deslocamentos, a camada ativa é dividida em i camadas, calculando-se o deslocamento de um elemento de solo no meio de cada uma. O deslocamento total é o somatório dos deslocamentos ocorridos em todas as i camadas.

A previsão foi realizada para os mesmos períodos em que foram executadas as medições *in situ*. Para isto, considerou-se a sucção calculada a partir do perfil de umidade do solo, o índice de vazios natural ($e_0 = 1.0$) e o índice de sucção matricial (declividade da

curva índice de vazios versus log sucção matricial, nos ensaios edométricos com sucção controlada) de $C_{m} = 0.04$. Os resultados dos deslocamentos previstos e medidos são apresentados na Figura 4.3, enquanto na Figura 4.4 está o deslocamento estimado do solo.

$$\Delta h = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{(1+e_{0i})} \left[C_{m} \Delta \log (u_a - u_w) + C_{\sigma} \Delta \log (\sigma - u_w) \right] \quad (4.8)$$

- Onde:
- h_i = espessura da camada i (mm)
 - C_{m} = índice de sucção matricial
 - C_{σ} = índice de tensão efetiva
 - σ = tensão total (kPa)
 - u_a = poro-pressão do ar (kPa)
 - u_w = poro-pressão da água (kPa)
 - e_0 = índice devazios natural

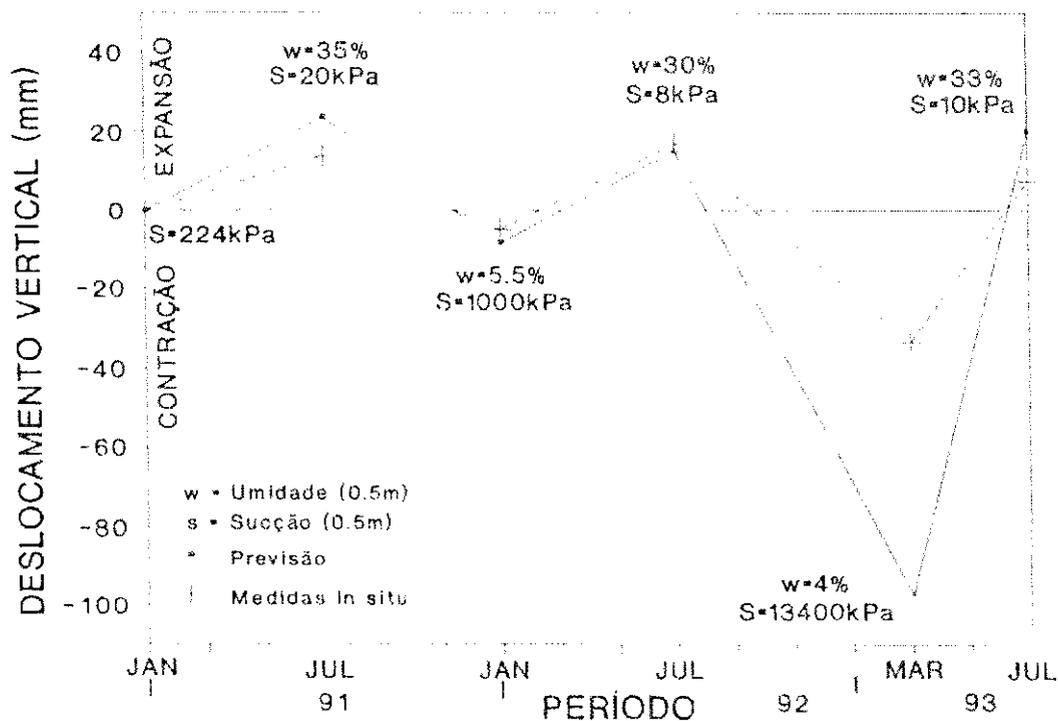


Figura 4.3. Previsão Baseada na Sucção do Solo

PERÍODO: JULHO/91 A JANEIRO/92

		SUCÇÃO (kPa)	
		JULHO/91	JANEIRO/92
0	-----		
0.25	-----		
	CAMADA 1	2.7	1000
0.75	-----		
	CAMADA 2	2.7	9.4
1.25	-----		
	CAMADA 3	2.7	4.0
1.75	-----		
	CAMADA 4	11.0	9.4
2.25	-----		
	CAMADA 5	5.4	5.4
2.75	-----		
3	-----		

$$\Delta h_1 = \frac{500}{1+1} [0.04 (\log 1000 - \log 2.7)] = 25.69 \text{ mm}$$

$$\Delta h_2 = \frac{500}{1+1} [0.04 \log 9.4 - \log 2.7] = 5.4 \text{ mm}$$

$$\Delta h_3 = \frac{500}{1+1} [0.04 (\log 4.0 - \log 2.7)] = 1.7 \text{ mm}$$

$$\Delta h_4 = \frac{500}{1+1} [0.04 (\log 9.4 - \log 11.0)] = -0.68 \text{ mm}$$

$$\Delta h_5 = \frac{500}{1+1} [0.04 (\log 5.4 - \log 5.4)] = 0 \text{ mm}$$

Deslocamento total = 32.11 mm

Figura 4.3. Previsão Baseada na Sucção do Solo

4.3.3. Método de Mitchell (1984)

Como a deformação vertical do solo expansivo é linearmente proporcional à sucção do solo, portanto, o levantamento pode ser expresso como:

$$\Delta h = \sum_{i=1}^n (I_{pt} \cdot \Delta s \cdot h_i) \quad (4.9)$$

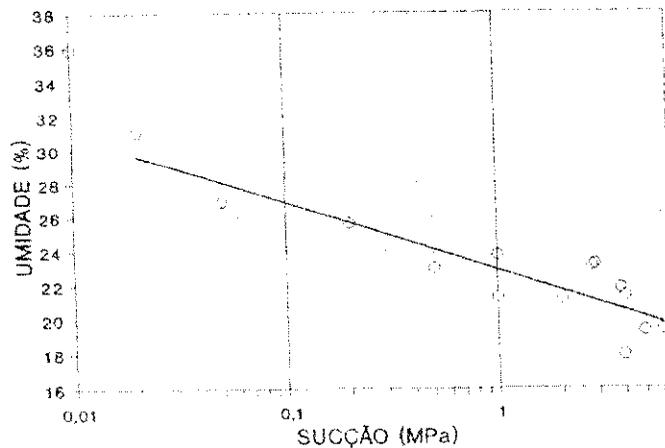
onde: I_{pt} = Índice de Instabilidade
 Δs = variação da sucção (pF)
 h_i = espessura da camada (mm)

O Índice de Instabilidade é obtido através do ensaio de contração livre e da curva característica. Envolve a medida da relação entre deformação vertical e umidade ($\epsilon_v/\Delta w$), e a capacidade sucção-umidade ($C = \Delta w/\log s_f/s_i$) de amostras indeformadas, não confinadas. A capacidade sucção-umidade correspondente à declividade da curva característica do solo. Seu valor expressa também, a capacidade de retenção do solo. O Índice de Instabilidade é calculado como:

$$I_{pt} = \frac{\epsilon_v}{\Delta w} \cdot \frac{\Delta w}{\Delta s} \quad (4.10)$$

$$C = \frac{\Delta w}{\log s_f/s_i} = \frac{26.82-22.88}{\log 1-\log 0.1}$$

$$C = 0.0394$$

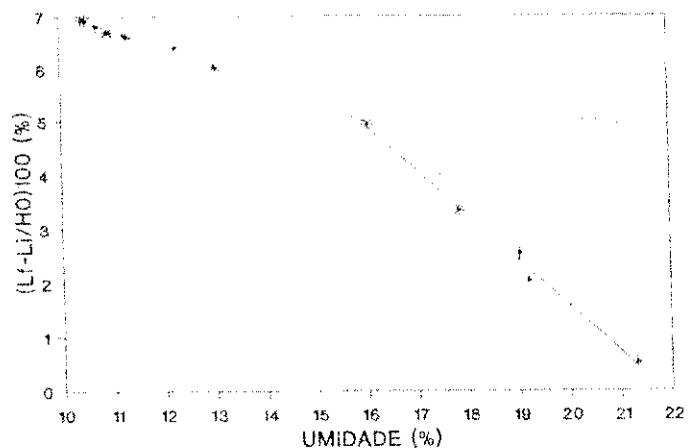


(a) Curva Característica

$$\frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta w} = \frac{4.06 - 1.57}{20 - 17} = 0.83$$

$$I_{pt} = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta w} \cdot \frac{\Delta w}{\Delta s}$$

$$I_{pt} = 0.0327$$



(b) Contração Livre

Figura 4.5. Índice de Instabilidade

Para a previsão de deslocamentos, seguiu-se o mesmo procedimento do ítem anterior, quanto à subdivisão da camada ativa e à sucção. A Figura 4.6 apresenta o deslocamento do solo estimado através da equação 4.9, cujo resultado está na Figura 4.7. Neste método, emprega-se os valores da sucção em pF.

PERÍODO: JULHO/91 A JANEIRO/92

	SUCÇÃO (pF)	
	JULHO/91	JANEIRO/92
0	-----	
0.25	-----	
	CAMADA 1	1.43 4.00
0.75	-----	
	CAMADA 2	1.43 1.97
1.25	-----	
	CAMADA 3	1.43 1.60
1.75	-----	
	CAMADA 4	2.04 1.97
2.25	-----	
	CAMADA 5	2.03 2.27
2.75	-----	
3	-----	

$$I_u = 0.0327$$

$$\Delta h_1 = 0.0327 \times 500 \times (4.00 - 1.43) = 42.0 \text{ mm}$$

$$\Delta h_2 = 0.0327 \times 500 \times (1.97 - 1.43) = 8.8 \text{ mm}$$

$$\Delta h_3 = 0.0327 \times 500 \times (1.60 - 1.43) = 2.8 \text{ mm}$$

$$\Delta h_4 = 0.0327 \times 500 \times (1.97 - 2.04) = -1.1 \text{ mm}$$

$$\Delta h_5 = 0.0327 \times 500 \times (2.27 - 2.03) = 3.9 \text{ mm}$$

$$\text{Deslocamento total} = 56.40 \text{ mm}$$

Figura 4.6. Previsão Baseada no Método de Mitchell

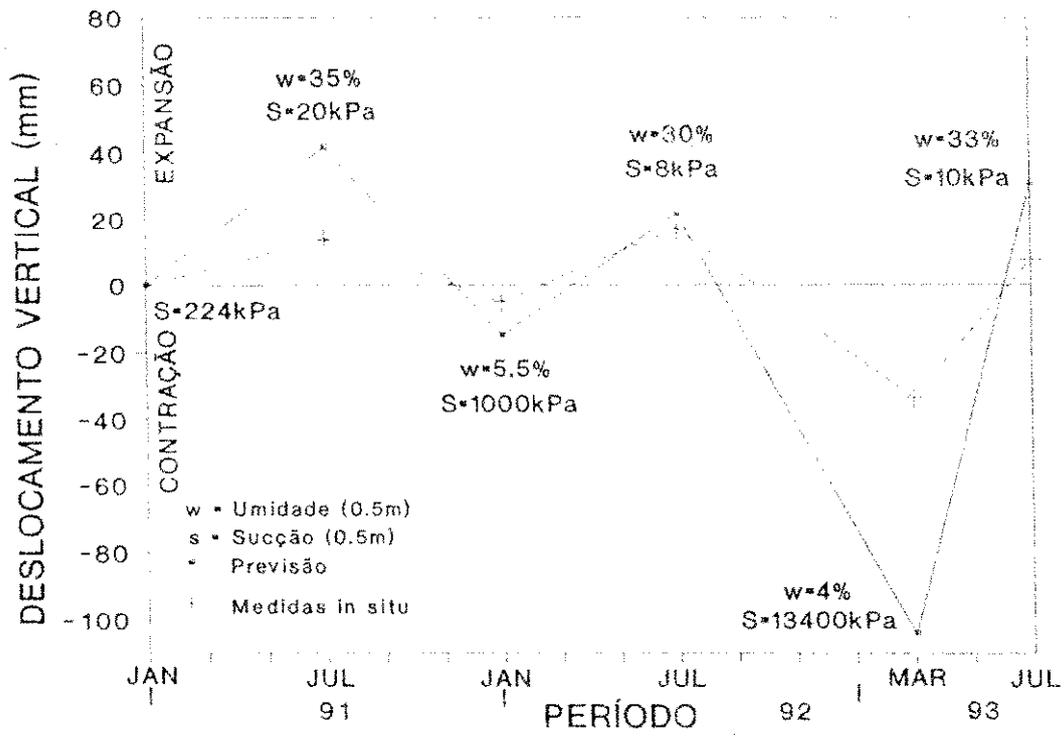


Figura 4.7. Previsão Baseada no Método de Mitchell

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS

5.1. Introdução

Este capítulo apresenta os resultados e as análises dos ensaios de laboratório, realizados em amostras indeformadas do tipo bloco, bem como os resultados dos ensaios de campo. Apresenta-se, também, os resultados das medidas de expansão e contração vertical, realizadas através da instrumentação de campo, e as análises da previsão de deslocamento vertical do solo.

O termo expansão, utilizado neste trabalho, refere-se apenas a expansão que sofre o solo argiloso associado à variação de umidade (ou sucção), considerando os fatores intervenientes no processo, tais como os ambientais, os característicos das propriedades do solo e os tensionais. Outros processos de aumento de volume do solo, provocados por alívio de tensões e mecanismos de cisalhamento ou por reações químicas ou ações térmicas, não foram considerados nas análises apresentadas a seguir.

5.2. Caracterização e Perfis do Solo

A caracterização do solo permite classificá-lo como uma argila siltosa altamente plástica ($IP = 38 \%$), com atividade normal ($A = 0.75$ a 0.90). Na carta de plasticidade, enquadra-se na região de argilas inorgânicas da alta plasticidade. Pela Classificação Unificada dos Solos é definido como solo CH. Seu peso específico aparente natural varia de 18 a 19 kN/m^3 .

Quanto às características mineralógicas e físico-químicas, a fração argila apresenta a montmorilonita como o componente predominante, embora contenha caolinita em menor proporção.

As determinações de cátions trocáveis, pH e matéria orgânica, foram realizadas pelo Laboratório de Irrigação - UFPB (Campina Grande). Estas determinações foram apresentadas anteriormente, no Quadro 3.2. O valor do pH foi de 4.55 e o teor de matéria orgânica determinado foi de 0.4 %.

A presença da caulinita e o fato da concentração de Mg^{2+} (1.13 meq/100g) ser maior que as de Na^+ (0.32 meq/100g) e Ca^{2+} (0.79 meq/100g) contribuem, provavelmente, para um menor potencial de expansão do solo.

Os resultados das análises químicas realizadas pelo Laboratório de Análises Minerais UFPB (Campina Grande), apresentados no Quadro 3.2, permitem determinar a relação sílica/sesquióxidos de $S/R = 4.771$ e a relação sílica/alumina de $S/A = 5.594$, o que caracteriza um solo não laterítico.

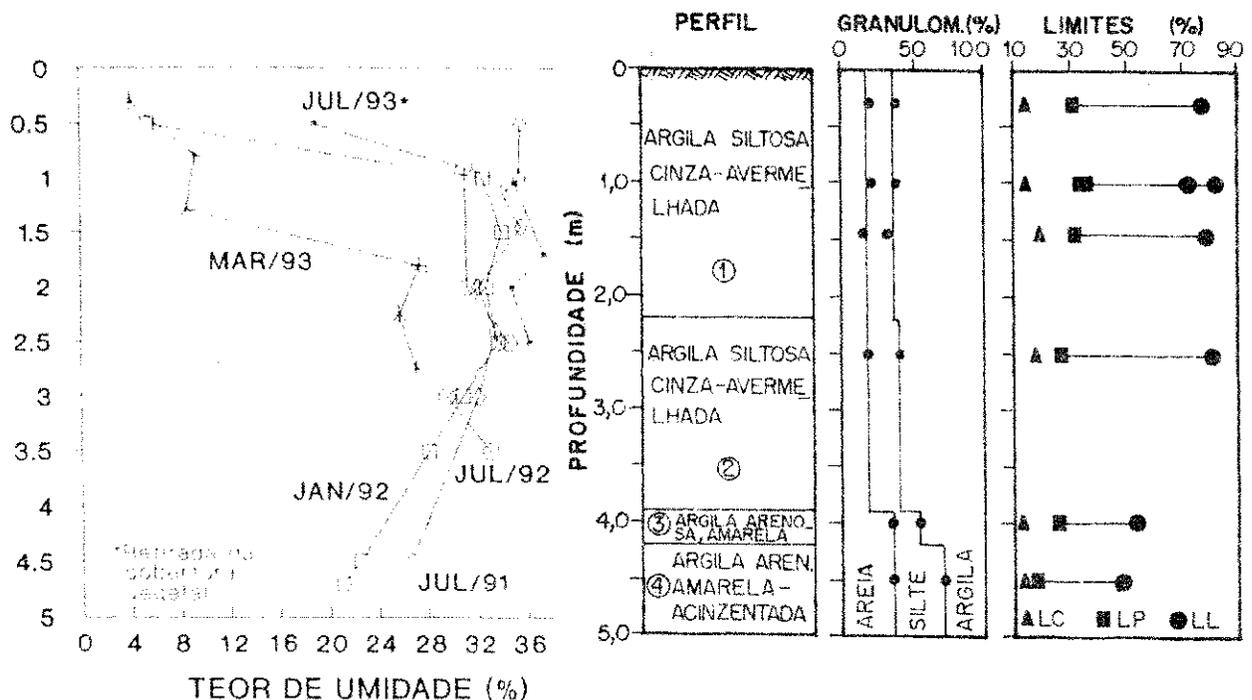


Figura 5.1. Caracterização do Solo e Variação da Umidade

O perfil de umidade demonstra que a camada ativa pode atingir até 3.0 m de profundidade. As maiores espessuras da camada ativa ocorrem quando o índice de Thornthwaite (TMI) apresenta valores negativos, ou seja, quando a precipitação é muito baixa, como ocorreu no ano de 1993. Quando este índice não apresenta valores negativos,

as variações climáticas influenciam significativamente, apenas, até cerca de 1.0 m de profundidade. A Figura 5.1 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização do solo.

5.3. Sucção do Solo

5.3.1. Membrana de Pressão

Os ensaios realizados no equipamento com membrana de pressão permitiram determinar a sucção inicial do solo e sua curva característica de sucção. Foram realizados ensaios para as situações extremas: a sucção inicial para período chuvoso é de cerca de 0.04 MPa, enquanto que para período seco com TMI negativo, é cerca de 5.9 MPa (Figura 5.2).

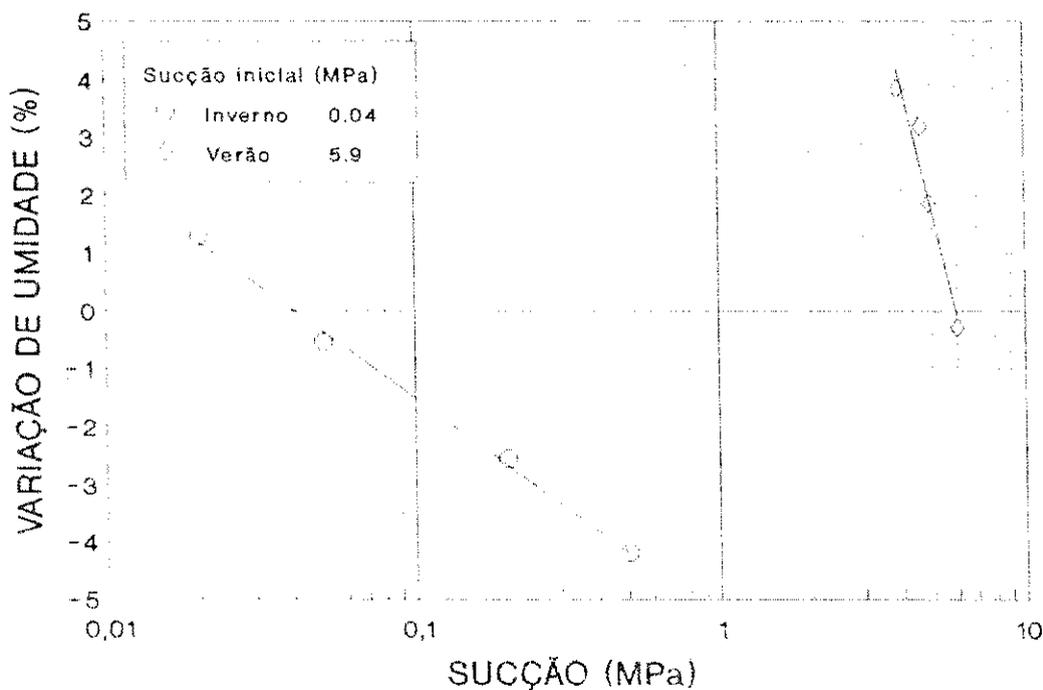


Figura 5.2. Sucção Inicial do Solo

A Figura 5.3 apresenta a curva característica do solo na profundidade de 1.0 m, correspondente a períodos típicos da região, no que respeita a variação de umidade. A capacidade diferencial de umidade (C), expressa a quantidade de água ganha ou perdida pelo solo, devido a uma variação na sucção. Seu valor absoluto cresce com a quantidade de finos e com a plasticidade do solo, sendo maior em argilas que em siltes e areias. O valor de C é obtido através da declividade da curva característica de sucção, em escala semilog. Para a

argila do Janga, foi $C = \Delta w / \log s_r / s_i = 0.0394$ (Figura 5.4). Este valor, de acordo com a literatura específica, está situado entre os de solos arenosos e os de siltosos.

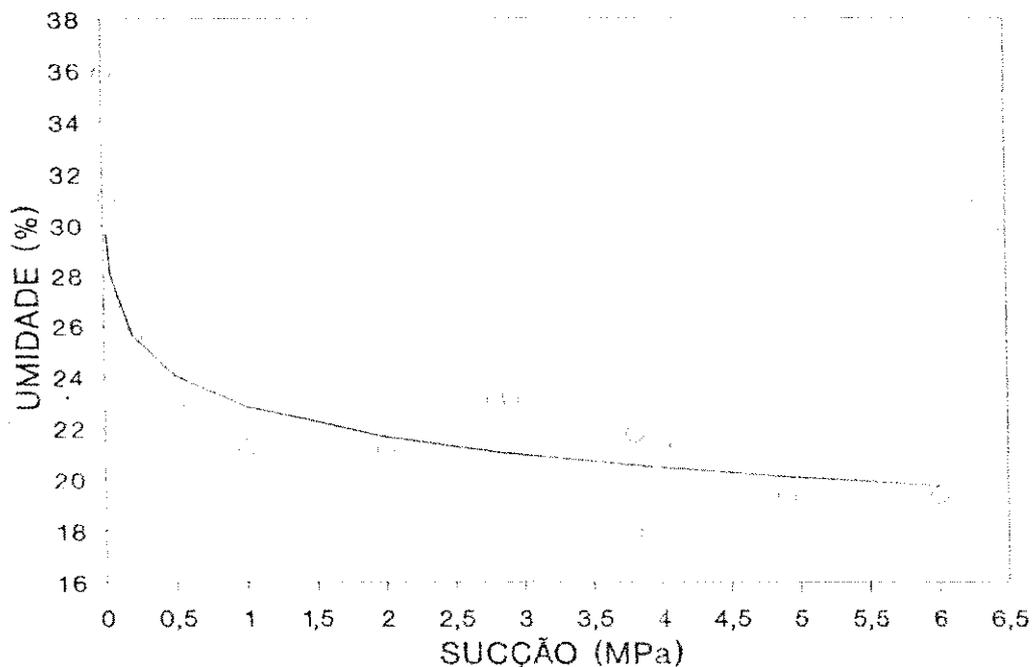


Figura 5.3. Curva Característica

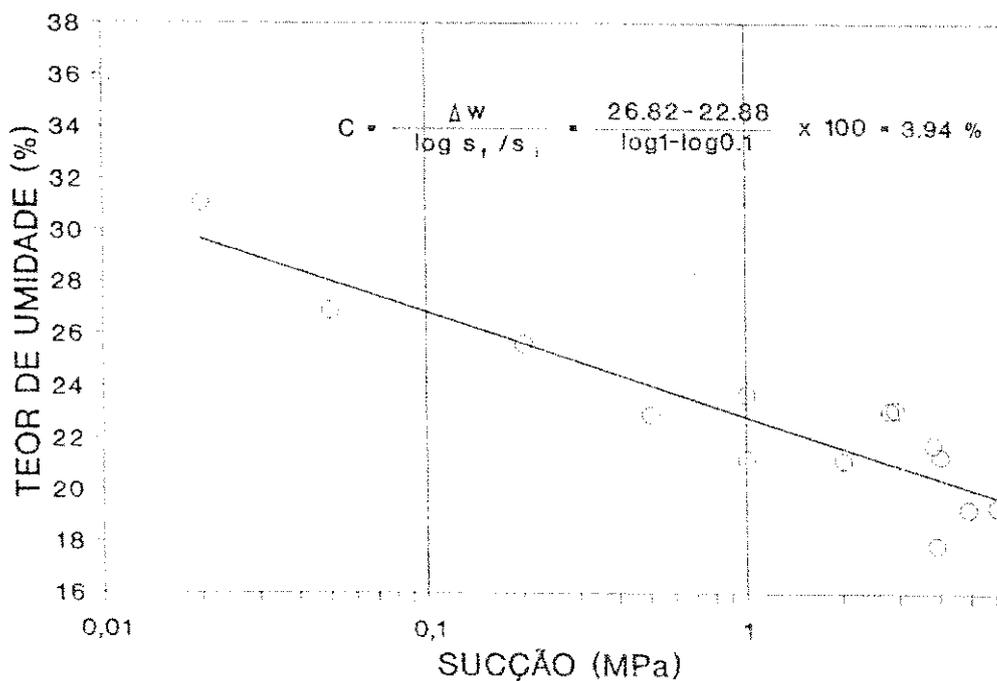


Figura 5.4. Capacidade Diferencial de Umidade

5.3.2. Papel Filtro

O papel filtro é um método simples e eficiente para a determinação do perfil de sucção do solo no campo. Para tanto, é necessário seguir as recomendações para seu uso e pesagem, utilizando balança de precisão.

A medida da sucção com papel filtro foi realizada seguindo-se dois procedimentos:

a) amostra indeformada colocada em pote plástico, sem contato direto com o papel filtro, ocorrendo transferência de umidade pela fase vapor. Neste caso o tempo de equilíbrio é muito longo, inviabilizando o procedimento para fins práticos de engenharia. Pode ocorrer proliferação de fungos, quando o papel não tem proteção química.

b) amostras indeformadas em contato direto com o papel filtro. Foi o procedimento que apresentou melhores resultados e o menor tempo de equilíbrio de umidade. Porém é necessário assegurar um bom contato entre o papel e o solo, pois quando este contato é pobre ou inadequado, pode-se medir um valor intermediário entre a sucção total e a sucção matricial. Este aspecto é relevante quando se espera valores significativos para a componente osmótica da sucção.

Neste trabalho, o procedimento em que o solo tem contato direto com o papel filtro, demonstrou ser o mais eficiente.

Utilizou-se papéis filtro S&S 589 e Whatman 42. Para este último a sucção foi obtida através da equação de calibração de Chandler et al (1992), enquanto a calibração do papel filtro S&S 589, foi feita através de dessecador de vácuo com solução de NaCl e do equipamento membrana de pressão. Neste último caso, os melhores resultados foram obtidos quando se colocou um anel de PVC, de aproximadamente 9.2 g, sobre o papel para promover um contato maior com a membrana. A partir desta calibração, obteve-se as seguintes equações, utilizadas na determinação do perfil de sucção:

$$\begin{aligned} \text{Para:} \quad w_p < 42 \% &\rightarrow \log s = 4.895 - 0.0732 w_p \\ w_p > 42 \% &\rightarrow \log s = 2.097 - 0.00642 w_p \end{aligned}$$

O perfil de sucção foi elaborado através das medidas realizadas no campo, com valores obtidos através das diversas metodologias indicadas no ítem 3.3.2.3 (Figura 5.5).

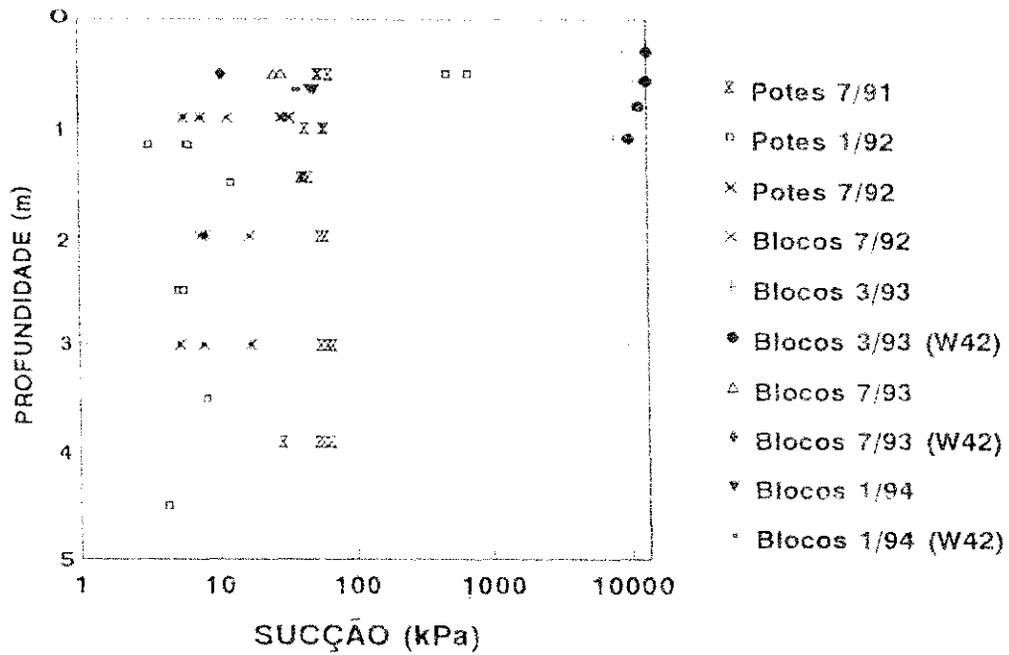


Figura 5.5. Perfil de Sucção do Solo

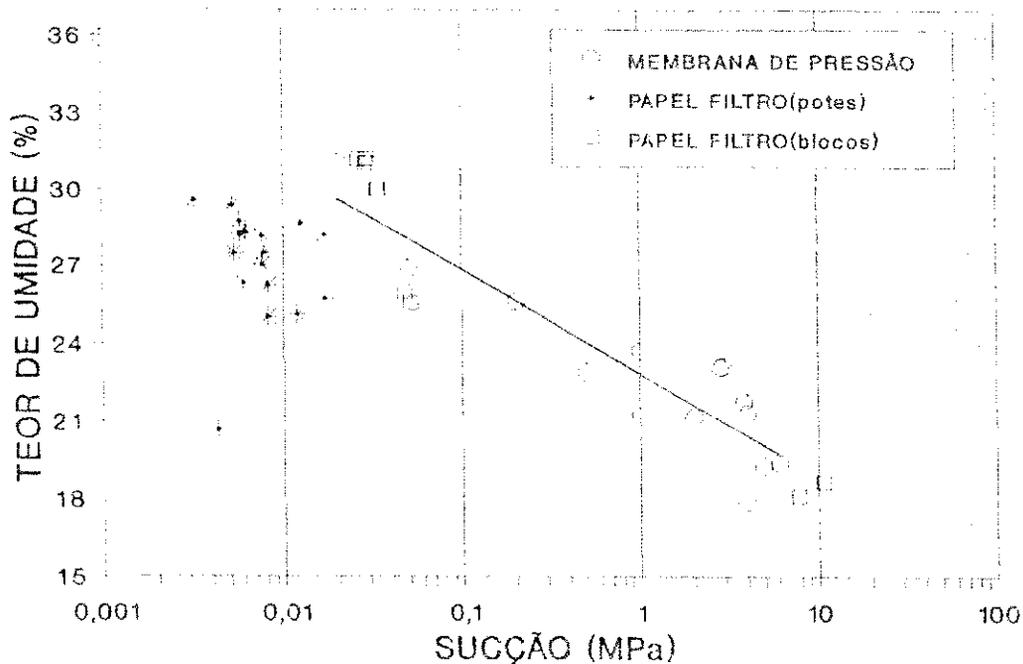


Figura 5.6. Curva Característica por Vários Métodos

A Figura 5.6 apresenta a curva característica com resultados de sucção obtidos através da membrana de pressão e do papel filtro, com e sem contato com o solo. As sucções obtidas através do papel em contato direto com o solo (blocos), apresentou resultados mais coerentes

com os ensaios nas células com membrana de pressão, do que àquelas obtidas sem contato direto com o solo (potes).

5.3.3. Dessecador de Vácuo

Para o dessecador de vácuo, observou-se que além de um longo tempo de equilíbrio, a uniformidade de umidade, no caso de amostras de grandes dimensões, não ocorre. Por isto, esta técnica apresenta dificuldades para o controle da sucção. Sendo, entretanto, muito utilizado para calibração de outros métodos e para controle da umidade das amostras ensaiadas em outros equipamentos. Neste trabalho, o dessecador de vácuo foi utilizado com esse último objetivo.

As diferenças encontradas nas umidades dos corpos de prova equilibrados nos dessecadores, podem ser devido às dimensões dos corpos de prova. Necessitando, portanto, um tempo maior de equilíbrio. A série 1, que permaneceu mais tempo no dessecador (231 dias), apresentou umidades finais mais próximas. Por outro lado, estas diferenças podem ser resultantes, também, da heterogeneidade da amostra indeformada. A Figura 5.7 apresenta a relação entre o tempo de equilíbrio e a variação das umidades dos corpos de prova no dessecador de vácuo.

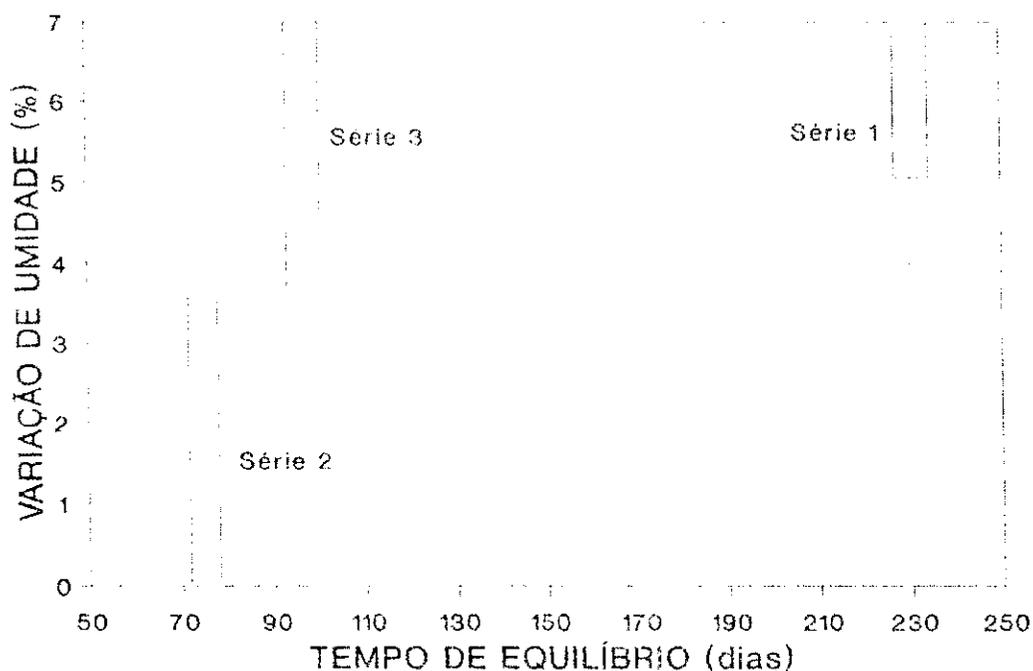


Figura 5.7. Relação Tempo de Equilíbrio-Variação de Umidade

5.4. Variação Volumétrica do Solo

5.4.1. Ensaio Edométrico com Umidade Controlada

A umidade inicial dos ensaios edométricos foi controlada no dessecador de vácuo, com cada série composta de quatro corpos de prova. Os ensaios foram realizados em quatro etapas: sobrecarga, expansão com sobrecarga, pressão de expansão e edométrico convencional. Cada etapa teve início após estabilização da anterior. Cada um dos quatro corpos de prova de uma série foi submetido a uma das seguintes sobrecargas: 7, 20, 50 e 80 kPa. O Quadro 5.1 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos nestes ensaios.

O índice de expansão (C_s), geralmente está na faixa de 10 % a 20 % do índice de contração (C_c), para um solo em particular. A pressão de pré-adensamento (p_a) foi calculada pelo processo gráfico de Casagrande e a pressão de expansão foi obtida por pequenos acréscimos de carga, até o corpo de prova atingir a altura anterior à expansão.

Quadro 5.1. Parâmetros dos Ensaio Edométrico com Umidade Controlada

Série n ^o	σ_v kPa	C_c	C_s	p_a kPa	Pressão Expansão kPa
1	7	0.289	0.05	179	68
	20	0.221	0.04	225	217
	50	0.199	0.03	226	180
	80	0.201	0.03	226	200
2	7	0.343	0.06	157	23
	20	0.293	0.05	143	30
	50	0.275	0.04	200	65
	80	0.253	0.03	200	121
3	7	0.209	0.03	215	239
	20	0.206	0.03	229	275
	50	0.260	0.03	179	53
	80	0.238	0.03	187	98

A Figura 5.8 apresenta o potencial de expansão do solo. Através deste gráfico se pode obter, simultaneamente, expansão livre ($\sigma_v=1$ kPa), expansão com sobrecarga ($\sigma_v \geq 7$

kPa) e a pressão de expansão, ou seja, σ_e , para $\epsilon_e = 0$. Uma das vantagens deste gráfico, é a dispersão dos resultados ficar evidenciada de acordo com o ajuste dos pontos à linearidade da curva obtida. Este fato pode indicar falhas na obtenção das amostras, preparação dos corpos de prova, montagem ou execução dos ensaios.

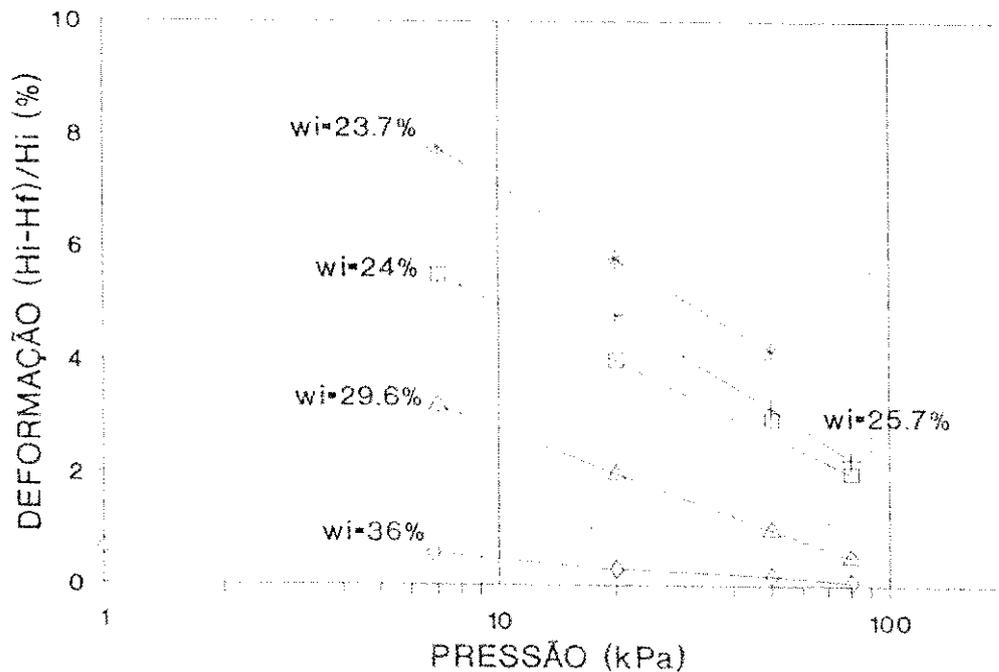


Figura 5.8. Potencial de Expansão

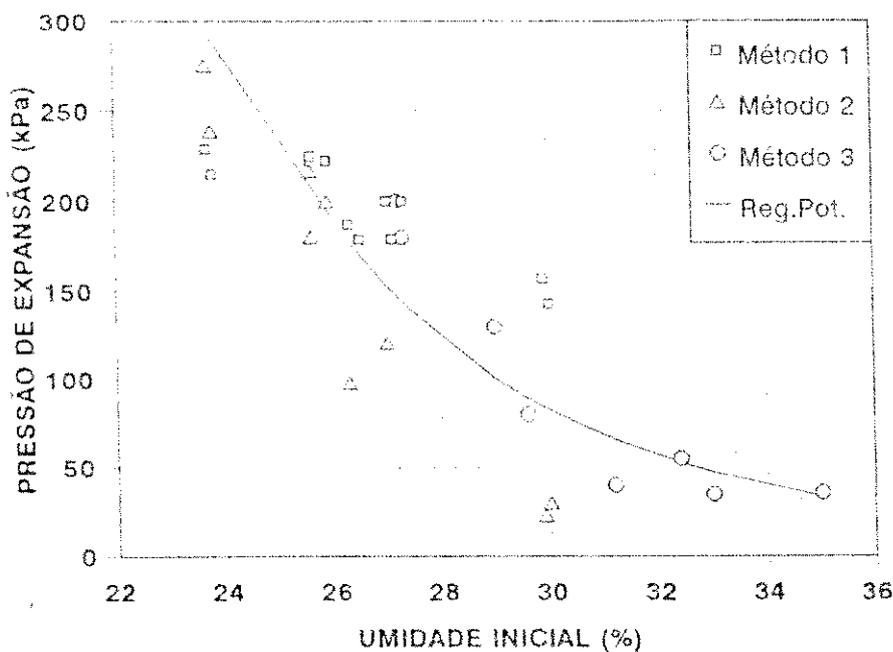


Figura 5.9. Pressão de Expansão

A Figura 5.9 apresenta a relação entre pressão de expansão e o teor de umidade inicial. Os resultados obtidos, indicam um aumento da pressão de expansão para valores mais baixos de umidade inicial do corpo de prova. O que pode ser explicado pelo fato da densidade aparente inicial do solo ser mais alta nos solos submetidos a maiores trajetórias de secagem em laboratório. Os corpos de prova foram moldados, inicialmente, com teor de umidade natural ($w_{nat} = 32\%$) e submetidos a um processo de secagem, em dessecador de vácuo (item 3.4.1.2), até atingir umidades bem inferiores às de campo para, então, serem ensaiados. Esta secagem dos corpos de prova, conduziu a uma contração e, portanto, a maior valor de densidade inicial.

O método 1 corresponde ao ensaio de pressão de expansão descrito anteriormente, com acréscimos de carga até o corpo de prova atingir a altura anterior à inundação. O método 2 corresponde à *pressão de expansão corrigida* definida por Fredlund (1983), que é equivalente à pressão de pré-adensamento obtida pelo processo gráfico de Casagrande. O método 3 corresponde ao valor da pressão obtido com o prolongamento da reta tensão vertical versus expansão, para uma determinada umidade inicial do solo (apresentado na Figura 5.8)

5.4.2. Ensaio Edométrico com Sucção Controlada

Os ensaios foram realizados em edômetros com sucção controlada (Escario & Sáez, 1973), em corpos de prova de 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Cada corpo de prova foi submetido a uma sobrecarga diferente e a vários estágios de sucção seguindo a trajetória de umedecimento. O Quadro 5.2 apresenta o resumo dos ensaios com sucção controlada, cujos gráficos estão na Figura 5.10.

Quadro 5.2. Ensaio Edométrico com Sucção Controlada

$(\sigma_v - u_a)$ (kPa)	7	20	50	80
w_i (%)	29.89	27.68	26.69	29.81
C_u	0.041	0.039	0.013	0.037

C_u = declividade da curva (e x log sucção matricial)

A trajetória seguida em todos os corpos de prova foi de umedecimento, a partir de 500 kPa. O corpo de prova submetido à tensão vertical de 7 kPa apresentou um comportamento atípico em relação aos de 20 e 50 kPa, devido a sua umidade inicial ser muito mais elevada. O valor de C_u foi próximo de 0.04 para todos os corpos de prova, exceto para o de tensão vertical de 50 kPa.

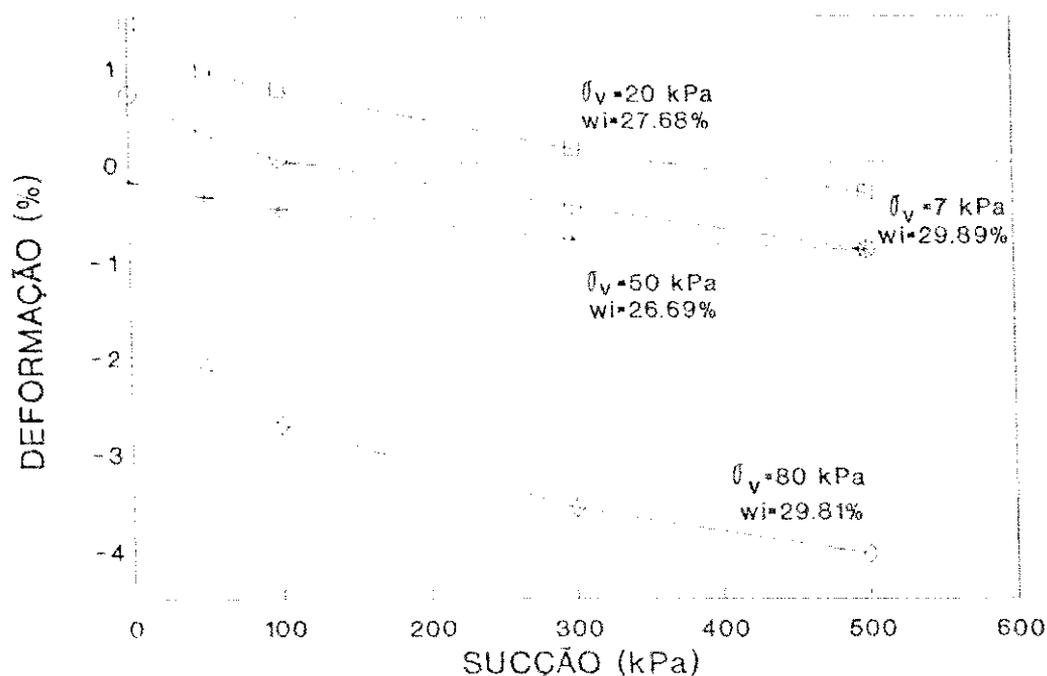


Figura 5.10. Ensaio Edométrico com Sucção Controlada

5.4.3. Contração Livre por Ressecamento

Os ensaios de contração livre por ressecamento foram realizados por dois procedimentos complementares. No primeiro, o corpo de prova foi submetido a um processo de secagem lenta, registrando-se suas variações de altura e peso ao longo do tempo. O ensaio teve duração de 27 dias, quando o peso se manteve constante em leituras sucessivas. No Quadro 5.3 estão apresentados os dados dos corpos de prova.

As condições de umidade e temperatura do ambiente são mostradas na Figura 5.11. A sucção da água do ar, calculada através da equação de Kelvin (Lytton, 1994) apresentada

na equação 2.12, a partir dos dados da Figura 5.11, variou entre $pF=5.92$ ($s=83.8$ MPa) e $pF=5.85$ ($s=71.6$ MPa). Considerando-se a temperatura média de 25 °C e umidade relativa do ar de 55 % e 60 %, respectivamente.

Com cerca de vinte e quatro horas de secagem, o corpo de prova apresentou fissuras. As sucções inicial e final foram medidas pelo método do papel filtro em contato direto com o solo, através de papéis filtro S&S 589 e Whatamn 42.

Quadro 5.3. Dados do Corpo de Prova 1

DADOS	INICIAL	FINAL
Teor de umidade (%)	23.40	10.96
Peso (g)	150.97	135.75
Altura (mm)	20.00	18.58
Sucção (kPa)		
S&S 589	1988	22981
Whatman 42	2750	28314

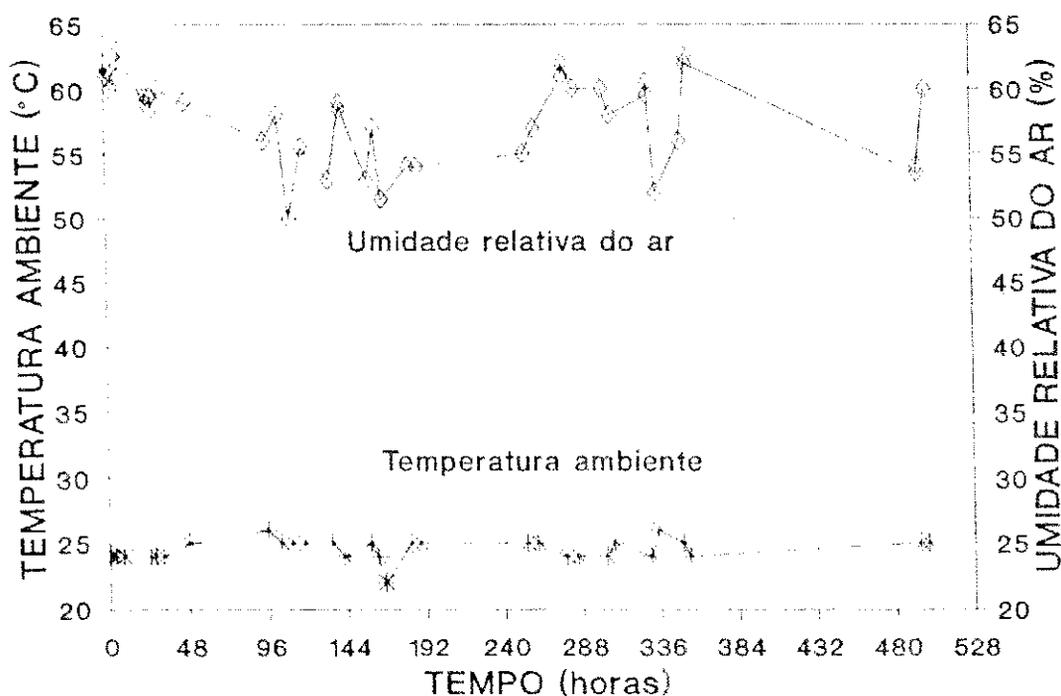


Figura 5.11. Dados do Ambiente (CPI)

As variações de umidade e altura do corpo de prova são apresentadas nas Figuras 5.12 e 5.13, respectivamente. Como se pode observar as duas curvas tem a mesma forma,

apresentando variações praticamente lineares com o tempo até 6 dias, quando se estabilizaram simultaneamente. O teor de umidade final de equilíbrio é de 10.96 %, bastante inferior ao LC, que é 19 %. A deformação vertical do corpo de prova com a variação da umidade está apresentada na Figura 5.14.

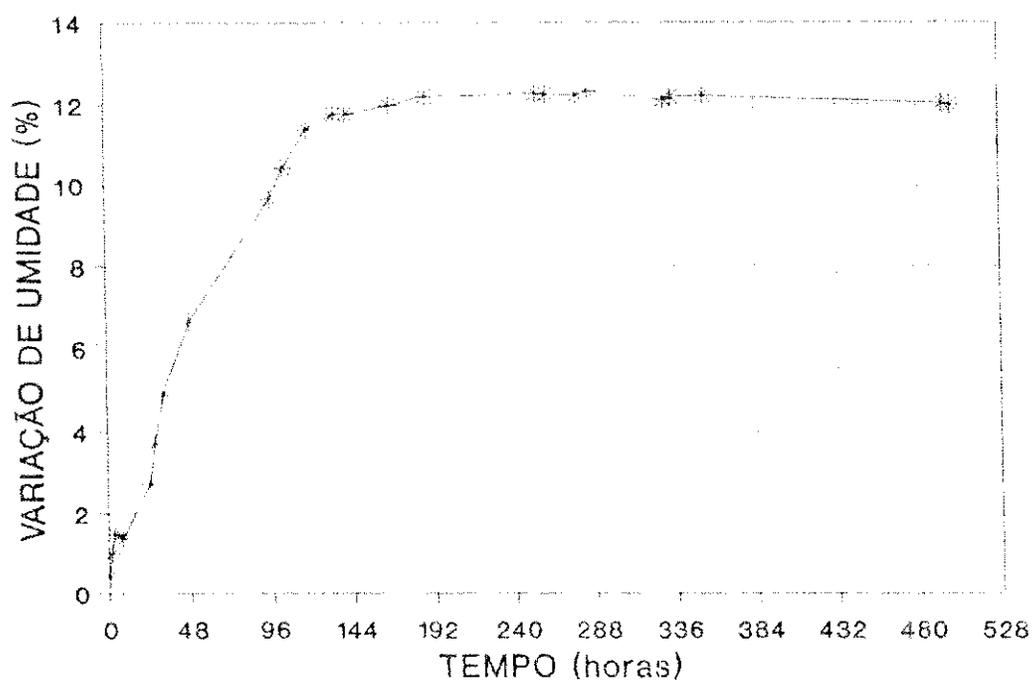
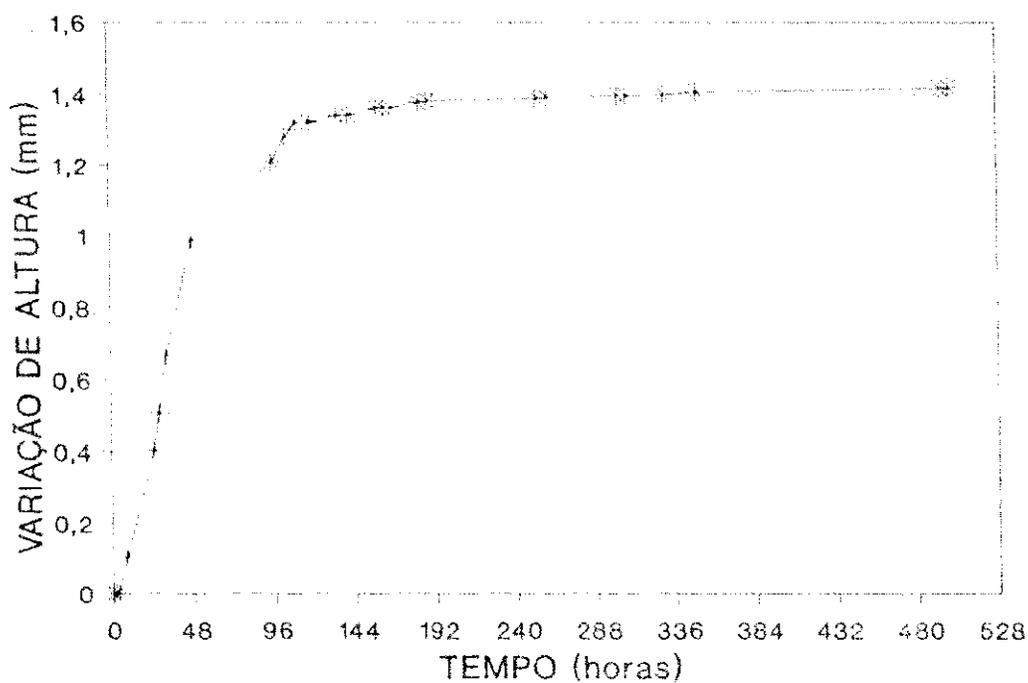


Figura 5.12. Variação de Umidade (CPI)



5.13. Variação de Altura (CPI)

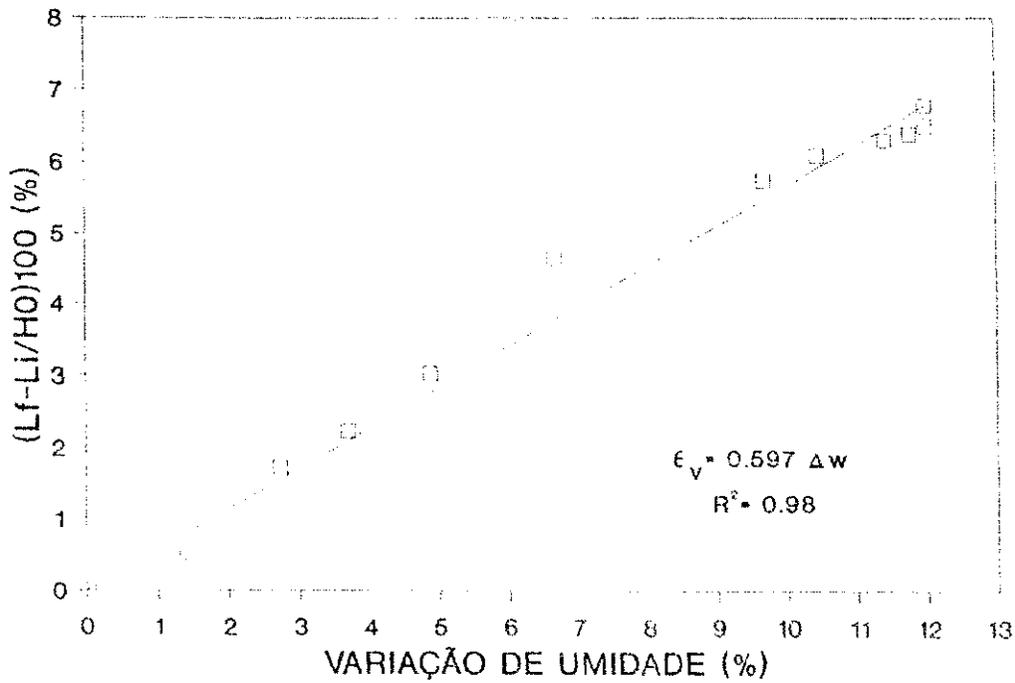


Figura 5.14. Deformação Vertical (CPI)

No segundo procedimento, o ensaio foi realizado em cinco estágios. O corpo de prova foi colocado em contato direto com papel filtro e envolvido com filme plástico, para determinar-se a sucção. Utilizou-se papéis S&S 589 e Whatman 42. Após sete dias, submeteu-se o corpo de prova a um processo de secagem durante quatro horas. Ao término deste período, repetiu-se o procedimento.

Quadro 5.4. Dados do Corpo de Prova 2

TEOR DE UMIDADE (%)		PESO (g)		ALTURA (mm)	
Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
23.35	11.61	150.88	136.52	20	(1)
SUCÇÃO (kPa)					
Dias	0	7	14	21	28
S&S 589	1988	6427	11534	13401	26122
Whatman 42	2750	6542	15807	19151	26853

(1) CP2 com fissuras, impossibilitando a medição da altura.

Após o primeiro período de secagem, o corpo de prova apresentou fissuramento, inviabilizando a medição de seus diâmetro e altura. A Figura 5.15 apresenta as condições de umidade e temperatura do ambiente e o Quadro 5.4. mostra os dados do corpo de prova. As variações de umidade e sucção ao longo do tempo estão na Figura 5.16, enquanto a relação sucção-umidade está na Figura 5.17.

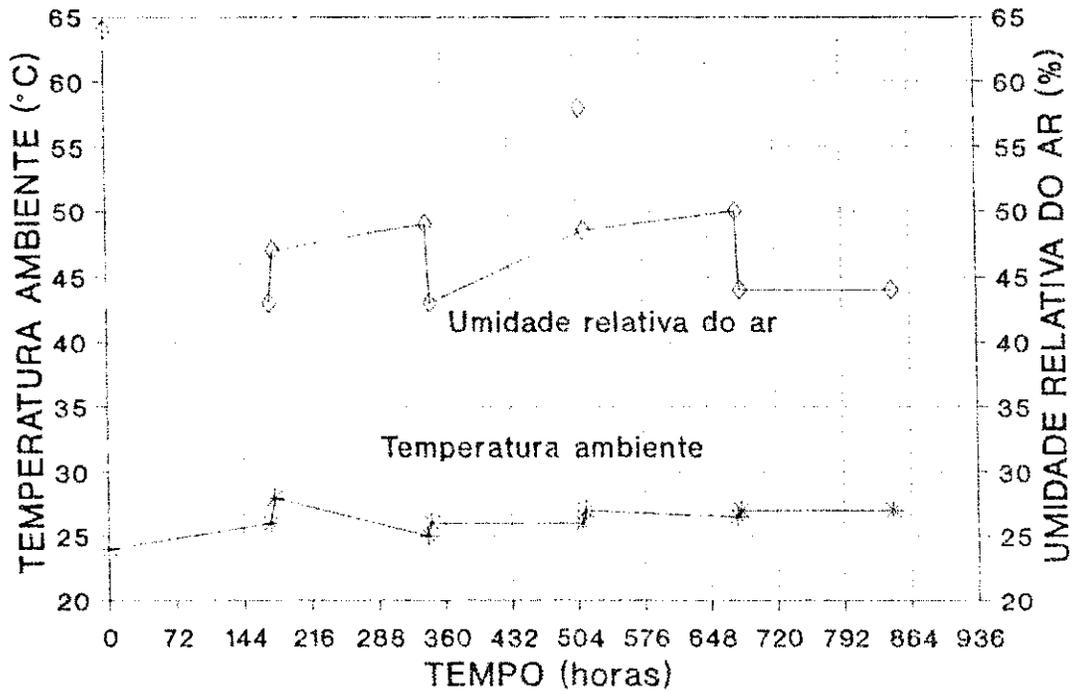


Figura 5.15. Dados do Ambiente (CP2)

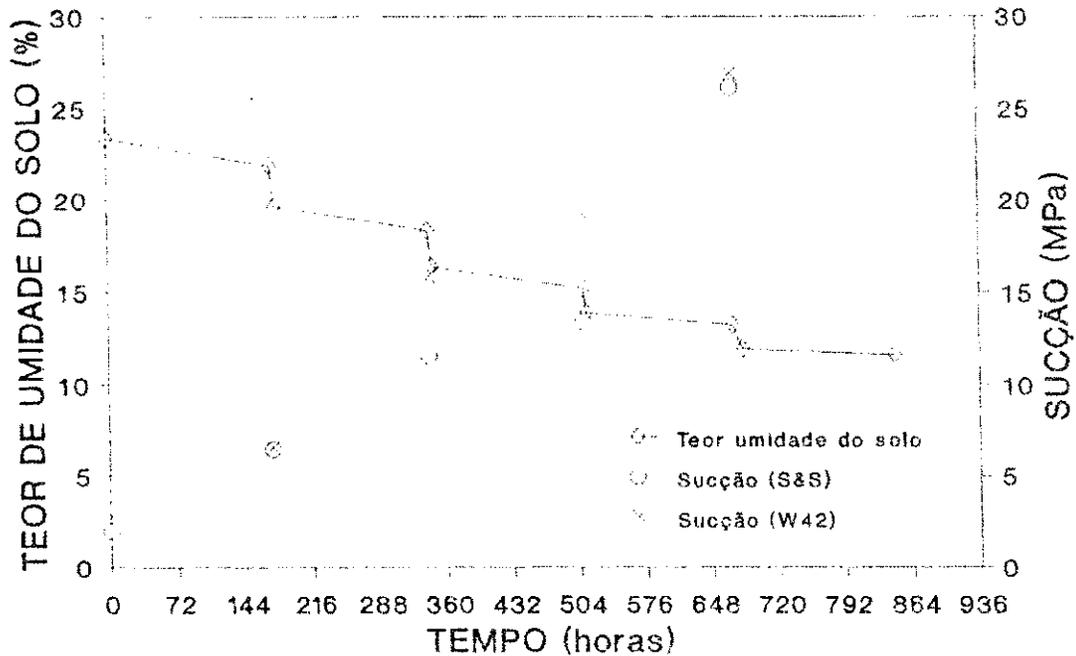


Figura 5.16. Variações de Umidade e Sucção (CP2)

Com os dados obtidos da Figura 5.15, calculou-se a sucção da água do ar através da equação de Kelvin (equação 2.12). Para a temperatura média de 26 °C e umidades do ar de 43 % e 49 %, os valores de sucção variaram entre $pF=6.07$ ($s=118.7$ MPa) e $pF=6.0$ ($s=100$ MPa).

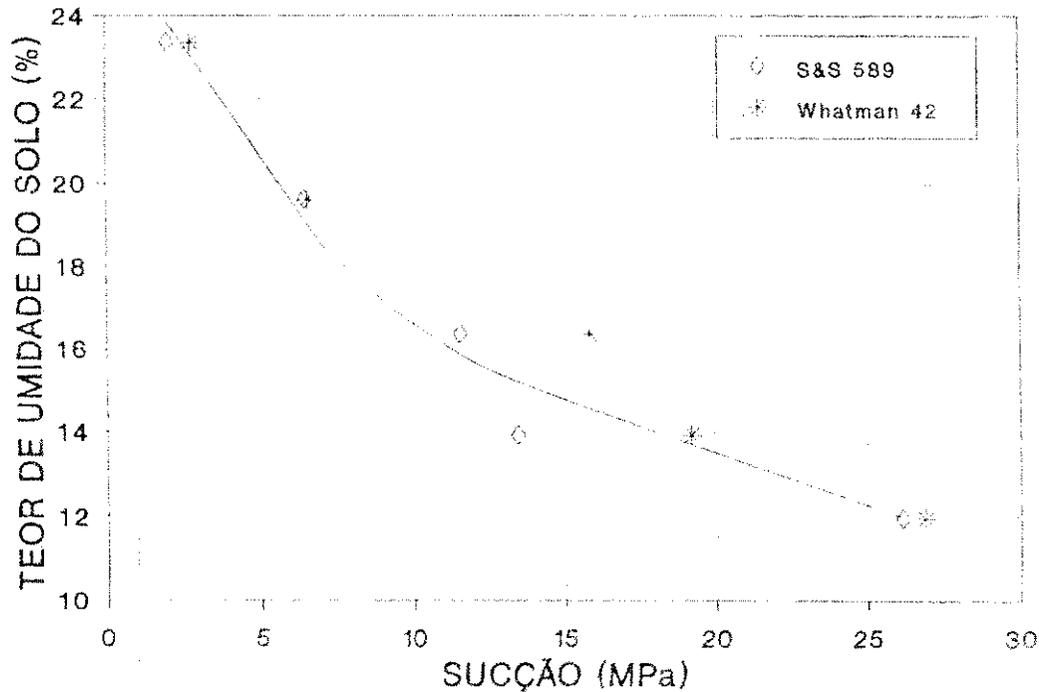


Figura 5.17. Relação Sucção-Umididade (CP2)

5.5. Variação Volumétrica *In Situ*

Os deslocamentos verticais *in situ* foram controlados através de tassômetros instalados a diferentes profundidades. As leituras foram realizadas com nível ótico de precisão com placa plano-paralela, ao final de cada estação climática. A variação volumétrica do solo é influenciada pelas variações climáticas, que atingem profundidade de até 3.0 m. A Figura 5.18 apresenta o perfil de expansão/contração do solo e o balanço hídrico, ao longo do tempo.

Verificou-se que, no período em que o TMI apresentou valores negativos (TMI=-11), ocorreram os maiores valores de contração do solo. Os valores de sucção e teor de umidade que constam no gráfico, foram medidos à profundidade de 0.50 m.

período. Como se pode observar, os resultados obtidos entre o deslocamento vertical e a sucção possuem uma relação mais adequada que os obtidos com a umidade *in situ*.

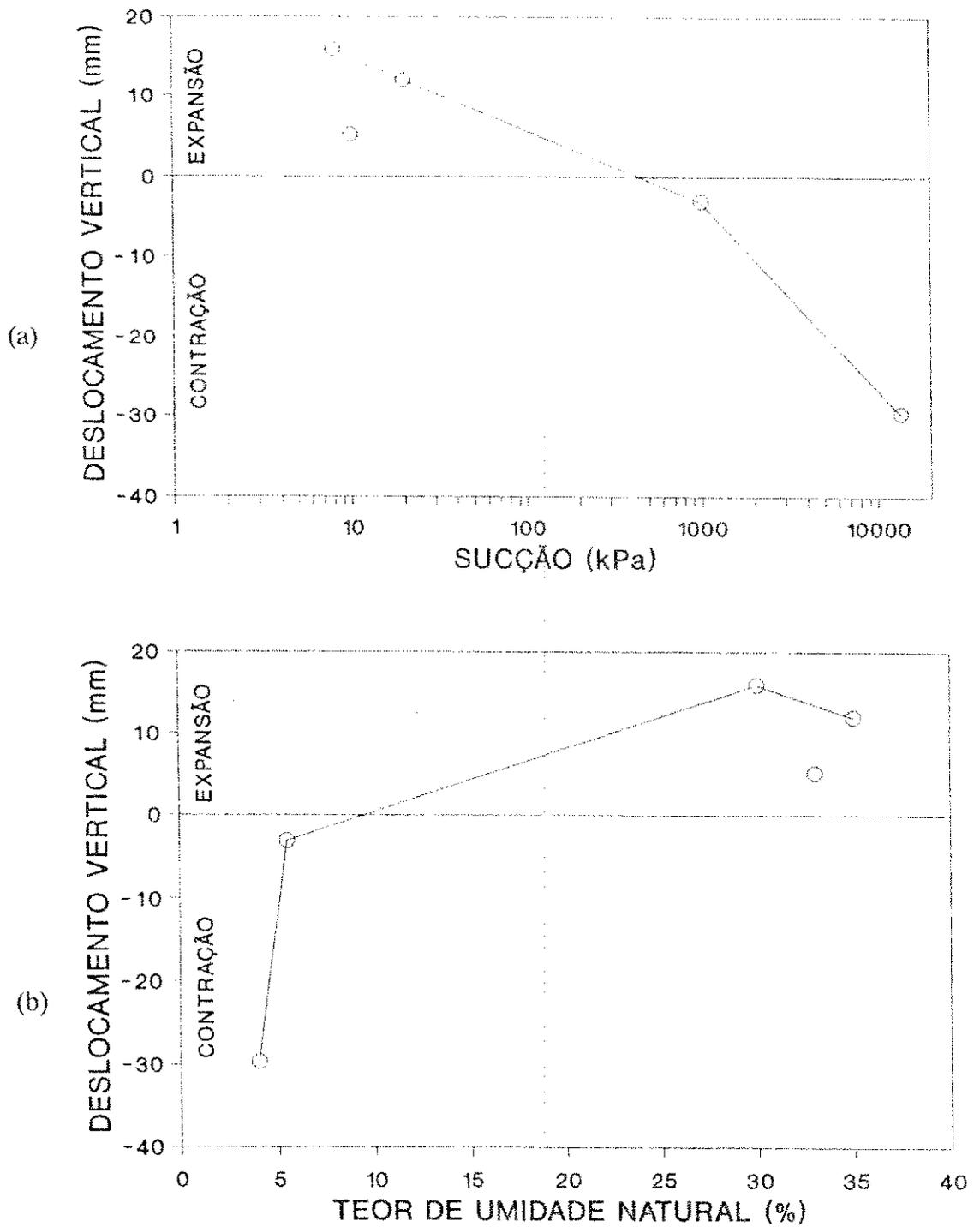


Figura 5.19. Relações Deslocamento Vertical Medido e Sucção (a), e Umidade Natural (b)

5.6. Previsão de Deslocamento Vertical do Solo

5.6.1. Potencial de Expansão

A tentativa de classificar o potencial de expansão do solo por intermédio de métodos existentes na literatura, foi apresentada anteriormente no Quadro 4.1, classificando o potencial de expansão do solo desde não crítico a muito alto. Estes resultados podem ser aceitos apenas como uma indicação do provável comportamento do solo. Isto se deve ao fato dos métodos existentes na literatura serem baseados em parâmetros locais, não permitindo uma aplicação mais geral.

5.6.2. Deslocamento Vertical

A previsão de deslocamento foi realizada através de três métodos analíticos simples, que utilizam parâmetros obtidos nos ensaios edométrico convencional e edométrico com sucção controlada.

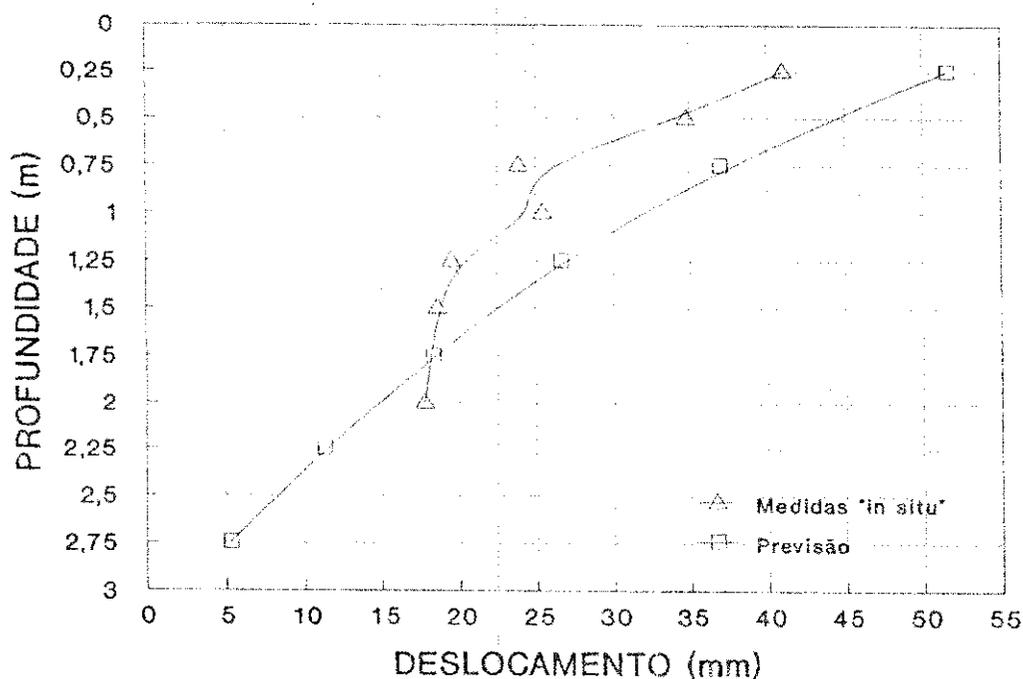


Figura 5.20. Previsão Baseada nos Ensaios Edométricos

Na Figura 5.20 estão o resultado da previsão baseada nos ensaios edométricos e sua comparação com as medidas realizadas *in situ*. Enquanto na Figura 5.21, estão os resultados dos dois métodos que consideram a sucção do solo, juntamente com as medidas *in situ*.

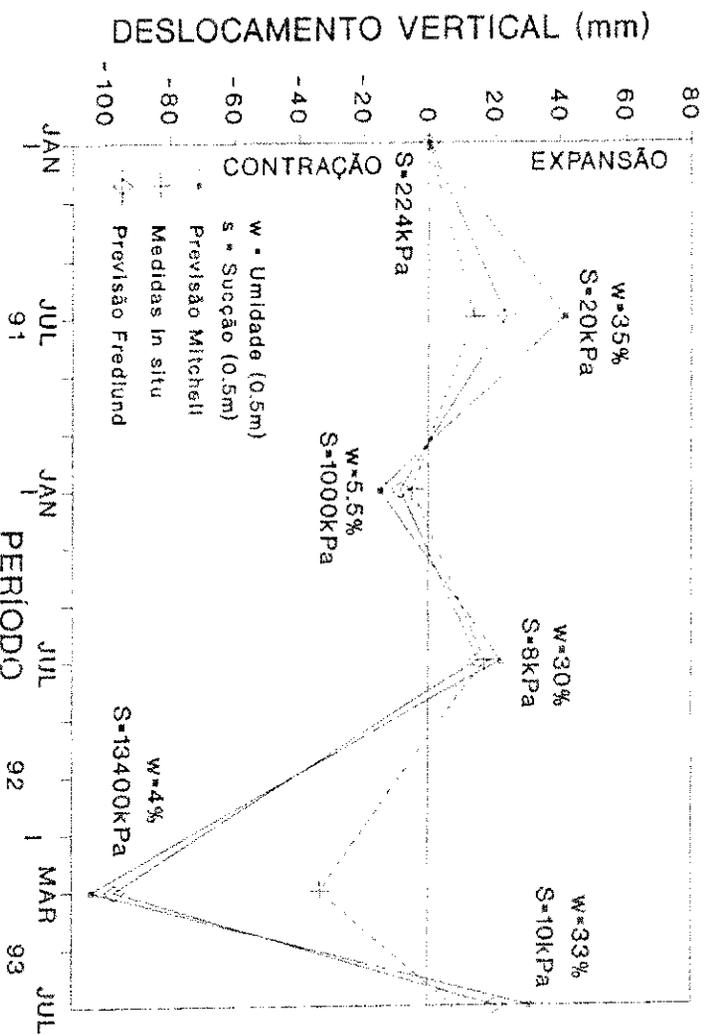


Figura 5.21. Previsões Baseadas na Sucção do Solo

As previsões apresentaram valores bastante superiores aos medidos. No entanto, observa-se uma concordância entre os métodos de Fredlund e Mitchell.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta alguns aspectos considerados relevantes na revisão bibliográfica, as conclusões da investigação experimental e da previsão de deslocamentos do solo, além das recomendações para futuras pesquisas.

6.1. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentada envolve vários aspectos relacionados com os conceitos básicos da mecânica dos solos não saturados, incluindo o estado tensional e a sucção do solo. No que se refere à variação volumétrica dos solos expansivos, destacam-se os seguintes aspectos: i) o papel que desempenha a físico-química do solo nos mecanismos de expansão; ii) a importância da análise acoplada dos fatores intervenientes ambientais, das propriedades do solo e do estado tensional.

6.2. Investigação Experimental

A investigação experimental foi realizada, integralmente, em amostras indeformadas, coletadas em uma estação experimental (ETE/Janga) localizada no Município de Paulista, no litoral norte de Pernambuco. O solo utilizado foi uma argila siltosa altamente plástica, com peso específico aparente natural de cerca de 19 kN/m^3 e teores de umidade naturais variando desde 5 % até 36 %. O perfil de solo se mantém praticamente constante até 4.2 m.

O perfil de umidade, realizado em épocas distintas, mostra que a profundidade da camada ativa é de 3.0 m. Este valor foi confirmado através das medidas de deslocamento vertical com a profundidade. No entanto, quando as variações climáticas são pequenas, este valor se reduz significativamente, podendo atingir até 1.0 m de profundidade.

Quanto à sucção do solo, verificou-se que a sucção inicial varia de cerca de 0.04 MPa, em período úmido, a cerca de 5.9 MPa em período seco. O solo, portanto, comporta-se de maneira diversa nas estações seca e úmida. A capacidade diferencial de umidade ($C = \Delta w / \log s_f/s_i$), apresenta valor de 0.039 para amostra coletada em época chuvosa. Este valor, de acordo com a literatura específica, é similar aos encontrados para solos siltosos.

O uso do papel filtro para determinação da sucção do solo, mostrou ser um método simples, prático e eficiente. Desde que sejam seguidas as recomendações para seu uso. O método em que o papel fica em contato direto com o solo, apresentou melhores resultados.

O dessecador de vácuo demonstrou dificuldades práticas para o controle da sucção e a necessidade de um tempo de equilíbrio muito longo. A utilização de amostras com grandes dimensões e a possível heterogeneidade das amostras indeformadas, provavelmente contribuíram para a dispersão nas umidades finais dos corpos de prova equilibrados em um mesmo dessecador.

Nos ensaios edométricos, etapa de expansão, verifica-se que a umidade inicial do corpo de prova conduz a um aumento na magnitude da expansão. Este efeito também foi observado na pressão de expansão, que aumentou para valores mais baixos de umidade inicial do corpo de prova. Isto pode ser explicado, pelo fato da densidade aparente inicial do solo ser mais alta nos solos submetidos a maiores trajetórias de secagem em laboratório. Ainda no que se refere a determinação da pressão de expansão, o método que se mostrou mais adequado foi o de pressão de expansão corrigida.

A comparação entre a expansão obtida com uso de águas de diferentes composições, destilada e de campo, demonstrou que os defloculantes sódio e potássio, existentes na água de campo, influenciam aumentando a magnitude da expansão. Por outro lado, a influência da sucção osmótica não foi detectada nestes ensaios, sugerindo inclusive, que seu valor seja pouco significativo neste caso.

Nos ensaios com sucção controlada, verificou-se que o teor de umidade inicial pode, em alguns casos, ter maior influência na magnitude da expansão, do que mesmo a sobrecarga

aplicada. Por outro lado, o valor da compressibilidade do solo relacionada com a variação da sucção (C_w) foi praticamente constante, de cerca de 4%. Ou seja, atribuindo-se pouca ou quase nenhuma influência da sobrecarga no seu valor.

No caso da contração livre por ressecamento, observou-se a coerência entre os dados de variação de umidade e variação de altura ao longo do tempo. A deformação sofrida pelo corpo de prova apresentou uma relação linear com a variação de umidade.

Os deslocamentos *in situ* são influenciados pelas variações climáticas, na estação seca ocorre contração do solo, enquanto na estação chuvosa ocorre expansão. Leituras realizadas na instrumentação de campo, durante meses consecutivos de uma mesma estação, não apresentam variações. As variações de leitura só ocorrem entre as estações climáticas.

6.3. Previsão de Deslocamentos Verticais

A classificação do potencial de expansão do solo por métodos existentes na literatura, apresentou grande dispersão entre os vários métodos, variando desde não crítico até muito alto. Isto se deve ao fato dos diversos métodos serem baseados em parâmetros locais, o que inviabiliza uma aplicação mais geral.

As previsões dos deslocamentos verticais pelos métodos de Fredlund e Mitchell, que consideram a sucção do solo, apresentaram valores bastante superiores aos medidos, principalmente nos períodos atípicos quanto à precipitação (TMI negativo). Entretanto, ocorreu uma concordância entre os dois métodos, embora o método de Fredlund tenha apresentado resultados um pouco mais próximos aos medidos *in situ*.

6.4. Recomendações Para Futuras Pesquisas

Com base nos resultados deste trabalho, considera-se oportuno a continuidade do desenvolvimento desta pesquisa, visando um aprimoramento das técnicas utilizadas. Entre os

aspectos abordados, sugere-se um estudo mais detalhado dos seguintes itens:

- i) técnicas do uso do papel filtro, para medidas da sucção total do solo,
- ii) na realização da prospecção e amostragem, inclusão de amostragem shelby, para permitir a determinação do perfil de sucção através de contato direto do papel com o solo, além da realização de ensaios que simulem as variações de sucção *in situ*, ao longo da profundidade,
- iii) influência, na expansão, do uso de águas com diferentes composições,
- iv) influência da mineralogia do solo nos fenômenos de expansão/contração,
- v) realização de ensaios em solos naturais com sucção controlada, com vários ciclos de umedecimento e secagem.

LISTAS DE FIGURAS E DE QUADROS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- 2.1. Unidades elementares e camadas básicas das unidades estruturais laminares dos argilominerais
- 2.2. Unidades estruturais dos argilominerais
- 2.3. Mecanismos de adsorção da água pela superfície argilosa
- 2.4. Modelo de molécula de água
- 2.5. Estrutura esquemática da distribuição de cargas elétricas em uma partícula coloidal negativa
- 2.6. Esquema dos três tipos de interação em solução aquosa de partículas defloculadas de caolinita ou montmorilonita
- 2.7. Sucção matricial
- 2.8. Mecanismo de sucção do solo
- 2.9. Representação dos componentes de sucção
- 2.10. Métodos para a medida da sucção e suas faixas de validade
- 2.11. Relação entre umidade e sucção da água do solo
- 2.12. Efeito da textura na retenção de água no solo
- 2.13. Efeito da estrutura na retenção de água no solo

- 2.14. Variação da sucção em solo compactado
- 2.15. Geometria dos poros
- 2.16. Fenômeno de histerese na curva sucção-umidade
- 2.17. Perfil dinâmico de sucção típico
- 2.18. Ciclos de secagem e umedecimento
- 2.19. Velocidade de evaporação para superfície de solo descoberta
- 2.20. Representação esquemática do espaço $(\sigma-u_d)$, (u_r-u_w) e (e) , segundo Matyas & Radhakrishna

CAPÍTULO 3

- 3.1. Índice de Thornthwaite
- 3.2. Campo experimental e amostragem em épocas chuvosa e seca
- 3.3. Croqui do campo experimental
- 3.4. Curvas granulométricas
- 3.5. Perfis do solo e de umidade
- 3.6. Difrátogramas
- 3.7. Análise térmica

- 3.8. Esquema da célula membrana de pressão
- 3.9. Células membrana de pressão
- 3.10. Material para medida da sucção com papel filtro
- 3.11. Calibrações do papel filtro S&S 589
- 3.12. Relações da calibração do papel filtro S&S 589
- 3.13. Medida da sucção total
- 3.14. Pesagem do papel filtro
- 3.15. Medida da sucção matricial *in situ*
- 3.16. Sucção matricial em laboratório
- 3.17. Seção típica do dessecador de vácuo
- 3.18. Moldagem dos corpos de prova e ensaios no dessecador de vácuo
- 3.19. Edométricos com umidade controlada: estágio de sobrecarga (Série 1)
- 3.20. Edométricos com umidade controlada: estágio de sobrecarga (Série 2)
- 3.21. Edométricos com umidade controlada: estágio de sobrecarga (Série 3)
- 3.22. Edométricos com umidade controlada: expansão com sobrecarga (Série 1)
- 3.23. Edométricos com umidade controlada: expansão com sobrecarga (Série 2)

- 3.24. Edométricos com umidade controlada: expansão com sobrecarga (Série 3)
- 3.25. Edométricos com umidade controlada: pressão de expansão (Série 1)
- 3.26. Edométricos com umidade controlada: pressão de expansão (Série 2)
- 3.27. Edométricos com umidade controlada: pressão de expansão (Série 3)
- 3.28. Edométricos convencionais (Série 1)
- 3.29. Edométricos convencionais (Série 2)
- 3.30. Edométricos convencionais (Série 3)
- 3.31. Expansão com sobrecarga, com água de diferentes composições (7 kPa)
- 3.32. Expansão com sobrecarga, com água de diferentes composições (27 kPa)
- 3.33. Células edométricas com sucção controlada
- 3.34. Prensas e edômetros com sucção controlada
- 3.35. Ensaio Edométrico com sucção controlada
- 3.36. Controle da saturação dos corpos de prova no dessecador
- 3.37. Execução de leituras de nivelamento
- 3.38. Deslocamentos acumulados durante diferentes estações
- 3.39. Deslocamentos medidos

CAPÍTULO 4

- 4.1. Previsão baseada nos ensaios edométricos (cálculos)
- 4.2. Previsão baseada nos ensaios edométricos (gráfico)
- 4.3. Previsão baseada na sucção do solo (gráfico)
- 4.4. Previsão baseada na sucção do solo (cálculos)
- 4.5. Índice de instabilidade
- 4.6. Previsão baseada no método de Mitchell (cálculos)
- 4.7. Previsão baseada no método de Mitchell (gráfico)

CAPÍTULO 5

- 5.1. Caracterização do solo e variação da umidade
- 5.2. Sucção inicial do solo
- 5.3. Curva característica
- 5.4. Capacidade diferencial de umidade
- 5.5. Perfil de sucção do solo
- 5.6. Curva característica por vários métodos
- 5.7. Relação tempo de equilíbrio-variação de umidade

- 5.8. Potencial de Expansão
- 5.9. Pressão de expansão
- 5.10. Edométricos com sucção controlada
- 5.11. Dados do ambiente (CP1)
- 5.12. Variação de umidade (CP1)
- 5.13. Variação de altura (CP1)
- 5.14. Deformação vertical (CP1)
- 5.15. Dados do ambiente (CP2)
- 5.16. Variação de umidade e sucção (CP2)
- 5.17. Relação sucção-umidade (CP2)
- 5.18. Balanço hídrico e perfil de contração/expansão
- 5.19. Relações deslocamento vertical medido e sucção, e umidade natural
- 5.20. Previsão baseada nos ensaios edométricos
- 5.21. Previsões baseadas na sucção do solo

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 2

- 2.1. Técnicas de medidas da sucção do solo
- 2.2. Principais expressões propostas para as tensões efetivas em solos não saturados

CAPÍTULO 3

- 3.1. Análise granulométrica e limites de Atterberg
- 3.2. Análise química e cátions trocáveis
- 3.3. Calibrações do papel filtro Whatman 42
- 3.4. Calibrações do papel filtro S&S 589
- 3.5. Tempo de equilíbrio dos dessecadores
- 3.6. Dados dos ensaios edométricos com sucção controlada
- 3.7. Pressões de expansão por diferentes métodos
- 3.8. Análises físico-químicas das águas utilizadas nos ensaios
- 3.9. Dados dos corpos de prova dos ensaios edométricos com sucção controlada
- 3.10. Ensaio de contração - dados do corpo de prova CP1

3.11. Ensaio de contração - dados do corpo de prova CP2

3.12. Ensaio de contração - sucções do corpo de prova CP2

3.13. Deslocamentos ocorridos entre 03 e 07/93

CAPÍTULO 4

4.1. Classificações do potencial de expansão do solo

CAPÍTULO 5

5.1. Parâmetros dos ensaios edométricos com umidade controlada

5.2. Ensaio edométrico com sucção controlada

5.3. Dados do corpo de prova 1

5.4. Dados do corpo de prova 2

BIBLIOGRAFIA

- AGUIRRE, M. (1990). *Agrietamiento de suelos debido a la disminución de humedad causada por la evaporación*. Tesis Doctoral, E.T.S. Caniños, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- AITCHISON, G.D. & HOLMES, J.W. (1961). *Suction profiles in soils beneath covered and uncovared areas*. 5th IISMFE, Paris, vol.II.
- AITCHISON, G.D. & RICHARDS, B.G. (1965). *A broad-scale study of moisture comditions in paviment subgrades throughout Australia*. Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworths, Sidney, pp.07-21.
- AITCHISON, G.D., RUSSAM, K., RICHARDS, B.G. (1966). *Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soils*. Road Research Laboratory, RRL Report n^o 38, Crowthorne.
- ALONSO, E., GENS, A. & HIGHT, D.W. (1987). *Special problem soils*. Proc. 9th E.C.S.M.F.E., General Report, Session 5, Dublin, pp. 5.1-5.60.
- ALONSO, E.E., LLORET, A., GENS, A. & BATLLE, F. (1989). *La Prediccion del Hinchamiento de Suelos Expansivos*. Ingenieria Civil n^o 71. CEDEX-MOPU, Madrid, pp. 47-54.
- ALONSO, E.E., GENS, A. & JOSA, A. (1992). *A unified model for expansive soil behaviour*. 7th Int. Conf. on Expansive Soil, Dallas, pp. 24-29.
- ALONSO, E. (1993). *Modelling of unsaturated soils*. Unsaturated Soils - recente developments and applications. CEEC Course, Barcelona, june 15-17.
- BAILEY, B. (1992). *Expansive Clay Practices in Dallas and Fort Worth*. 7th Int. Conf. on Expansive Soil, Dallas, pp. 415-419.

- BISHOP, A. W. (1959). *The principle of effective stress*. Tecknisk Ukeblad 106(39) pp. 859-863
- BLIGHT, G. E. (1965a). *A study of effective stresses for volume change, moisture change, moisture equilibria and moisture change in soils*. Beneath Covered Area, a symposium in print. Editor G. D. Aitchison, Australia, Butterworths.
- BLIGHT, G. E. (1965b). *The time-rate of heave of structures on expansive clays*. Moisture Equilibria and Moisture Change in Soil Beneath Covered Areas, a symposium in print. Editor G. D. Aitchison, Australia, Butterworths.
- BLIGHT, G. E. & LYELL, K. A. (1984). *Water table depression under treed areas and swell subsequent to felling*. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, Adelaide, South Australia.
- BLIGHT, G. E. (1987). *Lowering of the groundwater table by deep-rooted vegetation - the geotechnical effects of water table recovery*. 9th European Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Dublin.
- BOWLES, J. E. (1978). *Engineering properties of soils and their measurement*. McGraw-Hill, New York.
- BRADY, K. C. (1988). *Soil suction and the critical state*. Geotechnique vol. 38, n°1, pp. 117-120, Technical Notes.
- CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, C. I. (1986). *The filter paper method of suction measurement*. Geotechnique, vol. 36, n° 2, pp. 265-268.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S. & MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). *A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*. Proceedings of the Institution of Civil Eng., vol. 92, n° 2.
- CHEN, F. H. (1975). *Foundations on expansive soils*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

- CHEN, F. (1992). *Practical approach on heave prediction*. 7th Int. Conf. on Expansive Soil, Dallas, pp. 33-35.
- COLEMAN, J.D. (1959). *An investigation of the pressure membrane method for measuring the suction properties of soil*. Road Res. Lab. Note n^o 3464, Crowthorne, UK.
- COLEMAN, J.D., FARRAR, D.M. & MARSH, A.D. (1964). *The moisture characteristics, composition and structural analysis of a red clay soil from Nyeri, Kenya*. The Institution of Civil Engineers, London.
- CRILLY, M.S., SCHREINER, H.D. & GOURLEY, C.S. (1991). *A simple field suction measurement probe*. Geotechnic in the African Environment, Proc. of the 10th Regional Conf. for Africa on Soil Mechanics and Found. Engineering, pp. 291-298.
- CRILLY, M.S., DRISCOLL, R.M. & CHANDLER, R.J. (1992). *Seasonal ground and water movement observations from an expansive clay site in the UK*. 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, pp. 313-317.
- DELAGE, P. (1989). *Colapso de un terraplén mal compactado*. Simp. sobre el Agua y el Terreno en las Infraestructuras Viarias, Torremolinos, pp. 235-240.
- DELAGE, P. (1993). *Basic concepts*. Unsaturated Soils - recente developments and applications. CEEC Course, Barcelona, June 15-17.
- DELGADO, A. (1986). *Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- DURAN GAMARRA, A.J. (1986). *Study of the effect of contact of the filter paper technique in the measurement of soil suction*. M.Sc. Dissertation, Imperial College, University of London.

- EDIL, T.B., MOTAN, S.E. (1984). *Laboratory evaluation of soil suction components*. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ. vol. 7, n° 4, DEC 1984, pp.173-181.
- EROL, O. (1992). *In situ and laboratory measured suction parameters of prediction of swell*. 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, pp.30-32.
- ESCARIO, V. (1969). *Swelling of soils in contact with water at a negative pressure*. Proc. of the 2th International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soil, Texas, pp. 207-217.
- ESCARIO, V. & SAEZ, J. (1973). *Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction*. 3th Int. Conf. Exp. Soils, Haifa, pp. 195-200.
- ESCARIO, V. (1981). *Ensayos de corte y penetración con succión controlada*. Bol. Inf. Lab. Carretera y Geot., n° 144, pp. 3-13 y Bol. Soc. Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, n° 50, pp. 3-13.
- ESCARIO, V. (1982). *Metodos para determinar el hinchamiento de un suelo con valores de la succión final distintos de cero*. Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, n° 56, Madrid, pp. 3-10 y Bol. Inf. Lab. Carretera y Geot., n° 150, pp. 03-10.
- ESCARIO, V. (1986). *Terraplenes y pedraplenes*. Direc. Gen. de Carret., MOPU, Madrid.
- FERREIRA, H.C. (1994). *Comunicação pessoal*.
- FLEUREAU, J.M., SOEMITRO, R. & TAIBI, S. (1992). *Behavior of an expansive clay related to suction*. 7th Int. Conference on Expansive Soils, Dallas, pp. 173-178.
- FREDLUND, D.G. (1975). *Prediction of heave in unsaturated soils*. Fifth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangalore, pp. 125-129.

- FREDLUND, D.G. (1983). *Predction of ground movements in swelling clays*. 31th Annual Soil Mechanics and Foundation Enginnering Conference, Minneapolis.
- FREDLUND, D.G. (1987a). *The prediction and performance of structures on expansive soils*. Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, Calgary, pp. 51-60.
- FREDLUND, D.G. (1987b). *The stress state for expansive soils*, 6th Int. Conf. on Expansive Soils, New Delhi, pp. 1-9.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993a). *An overview of unsaturated soil behaviour*. In ASCE Unsaturated Soils - Geot. Special Publication, n^o 39, New York, pp. 1-31.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993b). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, New York.
- FRYDMAN, S. (1992). *An effective stress model for swelling of soils*. 7th Intern. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 191-195.
- GARDNER, R. (1937). *A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range*. Soil Sci. n^o 43, pp. 277-283.
- GENS, A. & ALONSO, E.E. (1992). *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*. Canadian Geotechnical Journal, n^o 29, pp. 1013-1032.
- GRIM, R.E. (1962). *Applied clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York.
- GRIM, R.E. (1968). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York.
- GUSMÃO FILHO, J.A., JUCÁ, J.F.T. & JUSTINO DA SILVA, J.M. (1987). *Groundwater effects in moving mechanisms in the hills of Olinda*. 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin, vol. 1, pp. 431-434.

- GUSMÃO FILHO, J.A. & JUSTINO DA SILVA, J.M. (1991). *Field instrumentation as related to an expansive soil*. Proc. IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Viña del Mar, vol. 1, pp. 77-87.
- GUTIERREZ-GUEVARA, C.I. (1985). *Assessment of filter paper technique for the measurement of soil water suction*. M.Sc. Dissertation, Imperial College, London.
- HABIB, S.A. & KARIBE, D. (1992). *One dimensional swell behavior of unsaturated soil*. 7th Int. Conf. on Expansive Soil, Dallas, pp. 222-266.
- HEAD, K.H. (1980). *Manual of laboratory testing*. Vol. 1, Pentech Press Limited, London.
- HILLEL, D. (1971). *Soils and water: physical principles and processes*. Academic Press, New York.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A. (1980). *Cimentaciones en terrenos expansivos o colapsables*. In Geotecnia y Cimientos III - cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia, Editorial Rueda, Madrid, pp. 563-575.
- JUCÁ, J.F.T. (1990a). *Variação de umidade em solos parcialmente saturados com sucção controlada*. IX COBRAMSEF, Salvador, vol. 2.
- JUCÁ, J.F.T. (1990b). *Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Tesis Doctoral, E.T.S. Camiños, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- JUCÁ, J.F.T. & LINS, A.H.P. (1991). *Estudo dos solos não saturados na Universidade Federal de Pernambuco*. 1^o Simpósio Sobre Solos Não Saturados, Brasília.
- JUCÁ, J.F.T., GUSMÃO FILHO, J.A. & JUSTINO DA SILVA, J.M. (1992). *Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil*. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 337-341.

- JUSTO ALPAÑES, J.L. & SAETERSDAL, R. (1982). *Parámetros de proyecto para condiciones especiales del suelo*. Bol. Inf. Lab. Carret. y Geot., n° 152, pp. 13-48, y Bol. Soc. Esp. Mec. Suelos y Cim., n° 58, pp. 13-48.
- KHADDAJ, S., LANCELOT, L. & SHAHROUR, I. (1992). *Experimental study of the swelling behaviour of heavily overconsolidated flandres clays*. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 239-244.
- KUPPER, A.M.G. (1983). *Característica tensão x deformação x resistência de uma amostra de argila vermelha do terciário de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ.
- LANBE, T.W. & WHITMAN, R.V., (1979). *Soil mechanics, SI version*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- LEE, H.C. & WRAY, W.K. (1992). *Evaluation of soils suction instruments*. 7th Int. Conf. on Expansive soils, Dallas, pp. 307-312.
- LLORET, A. (1982). *Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas*. Tesis Doctoral, E.T.S. Camiños, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Barcelona.
- LYTTON, R.L. (1994). *Prediction of movement in expansive clays*. Foundations and Embankments Deformations, ASCE Geotechnical Special Publication, n° 40, vol. 2, pp. 1827-1845.
- MARINHO, F.A.M. (1994). *Shrinkage behaviour of some plastic soils*. Ph.D. Thesis, Imperial College, London.
- McKEEN, R.G. (1992). *A model for predicting expansive soils behavior*. 7th Int. Conf. on Expansive Soil, Dallas, pp. 01-11.
- MEINTJES, H.A. (1992). *Suction-load-strain relations in expansive soil*. 7th Int. Conf. on Exp. Soils, Dallas, pp. 51-54.

- MENESCAL, R.A. (1992). *Modelagem numérica do comportamento tensão- deformação de solos não saturados*. Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-004A/92, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 213 p.
- MITCHELL, J.K. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons, New York.
- MITCHELL, P.W. (1980). *The concepts defining the rate of swell of expansive soils*. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, vol. I, Denver, pp. 106-116.
- MITCHELL, P.W. (1984). *The desing of shallow footings on expansive soils*. Ph.D. Thesis, Civil Eng. Dept., University of Adelaide.
- MITCHELL, P.W. & AVALLE, D.L. (1984). *A technique to predict expansive soil moviments*. 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, pp. 124-130.
- NELSON, J.D. & MILLER, D.J. (1992). *Expansive soils: problems and prectice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- PILE, K.C. (1980). *The relationship between matrix and solute suction, swelling pressure and magnitude of swelling*. Third Aust.- NZ Conference on Geomechanics, Wellington, vol.1, pp. 197-201.
- POUSADA PRESA, E. (1982). *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Tesis Doctoral, E.T.S. de Ing. de Camiños, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- POUSADA PRESA, E. et al. (1988). *Ensaíos de laboratório em solos parcialmente saturados*. Simpósio Sobre Novos Conceitos em Ensaíos de Campo e Laboratório em Geotecnia, COPPE/ABMS. Rio de Janeiro, pp. 251-278.
- RICHARDS, B.G. (1974). *Behaviour of unsaturated soils*. Soil Mecanics - New Horizons, Lee, J.K. ED., pp. 112-157, London, Newness, Butterworths.

- RICHARDS, B.G. (1980). *Measurement of the soil suction in expansive clays*. Inst. Eng. Australia, Civil Eng. Trans., vol. CE 22, n°3, pp. 225-261.
- RICHARDS, B.G., PETER, P. & MARTIN, R. (1984). *The determination of volume change properties in expansive soils*. 5th Int. Conf. on Exp. Soils, Adelaide, pp. 179-186.
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. (1993). *A new instrument for measuring soil moisture suction*. Technical Note, Geotechnique, vol. 43, n° 1.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. & SERRANO, A.A. (1985). *La influencia de la vegetación sobre el hinchamiento y retracción de las arcillas*. Bol. Inf. del Laboratorio de Carretera y Geotecnia, n° 167, pp. 3-10.
- SANTOS, N.B. & MARINHO, F.A.M. (1990). *Características geotécnicas de solos expansivos compactados*. IX COBRAMSEF, Salvador, vol. 2, pp. 163-177.
- SCHREINER, H.D. (1987). *State of the art review on expansive soils*. Report compiled for Transport Road Research Laboratory, Ministry of Transport, Crowthorne.
- SCHREINER, H.D. (1988). *Volume change of compacted highly plastic african clays*. Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.
- SIBLEY, J.W. & WILLIAMS, D.J. (1989). *A procedure for determining volumetric shrinkage of an unsaturated soil*. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. 12, n° 3, Septiembre, pp. 181-187.
- SIBLEY, J.W. & WILLIAMS, D.J. (1990). *A new filter material for measuring soil suction*. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. 13, n° 4, pp. 381-384.
- SOUZA SANTOS, P. (1976). *Tecnologias de argilas*. vol. I. Ed. Edgard Blucher, São Paulo.
- SNETHEN, D.R. & HUANG, G. (1992). *Evaluation of soil suction-heave prediction methods*. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 12-17.

- SRIDHARAN,A., RAO,S.M. & JOSHI,S. (1990). *Classification of expansive soils by sediment volume method*. Geot. Test. Journal, GTJODJ, vol. 13, n° 4, pp. 375-380.
- THOMPSON,R.W. (1992). *Swell testing as a predictor of structural performance*. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 84-88.
- WRAY,W.K. (1984). *The principle of soil suction and its geotechnical engineering applications*. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, Adelaide, pp. 114-118.
- WRAY,W.K. (1992). *Comparison of predicted heave to field measurements*. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 331-336.
- ZEPEDA GARRIDO,J.A., PEREZ REA, M.L. & CORTEZ OCHOA,J. (1992). *Expansive soil properties in the Queretaro Valley*. 7th Int. Conf. Exp. Soils, Dallas, pp. 45-50.