



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

**Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar
de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de
Laboratório e de Campo**

Brunno Henrique Bonder

CAMPINAS, SP

Agosto/2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar
de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de
Laboratório e de Campo

Brunno Henrique Bonder

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Miriam Gonçalves Miguel

Dissertação de Mestrado apresentada
à Comissão de pós-graduação da
Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Estadual de Campinas,
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil, na área de
concentração de Geotecnia.

CAMPINAS, SP

AGOSTO/2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

B64c Bonder, Brunno Henrique
Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de
Campinas obtidas mediante técnicas de laboratório e de
campo / Brunno Henrique Bonder. --Campinas, SP:
[s.n.], 2008.

Orientador: Miriam Gonçalves Miguel.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura.

1. Mecânica do solo. 2. Solos - Umidade. 3. Solos
tropicais. 4. Tensiômetros. 5. Histerese. I. Miguel,
Miriam Gonçalves. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura.
III. Título.

Titulo em Inglês: Soil water characteristic curve of a colluvial soil
determined by techniques laboratory and field

Palavras-chave em Inglês: Unsaturated soils, Soil water characteristic
curve, Filter paper, Tensiometers, Hysteresis

Área de concentração: Geotecnia

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Jair Camacho, Miguel Angel Alfaro Soto, Paulo José
Rocha de Albuquerque

Data da defesa: 29/08/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

**Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar
de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de
Laboratório e de Campo**

BRUNNO HENRIQUE BONDER

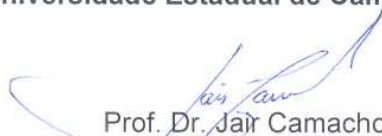
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof.^a. Dr.^a. Miriam Gonçalves Miguel
Presidente e Orientadora/Universidade Estadual de Campinas-SP



Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque
Universidade Estadual de Campinas-SP



Prof. Dr. Jair Camacho
Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira-SP



Prof. Dr. Miguel Angel Alfaro Soto
Universidade Estadual Paulista - Rio Claro-SP

Campinas, 29 de agosto de 2008

Aos meus pais e às minhas irmãs pelo
amor, confiança e incentivo.

AGRADECIMENTOS

À Deus que me deu saúde, força e paz para enfrentar os problemas da vida.

À Prof^ª. Dr^ª. Miriam Gonçalves Miguel, pela orientação dedicada, ensinamentos, paciência, apoio e incentivo, pois foram fundamentais para o término dos trabalhos.

Aos meus pais, Guilherme Bonder Junior e Sidinéia Trovo Ferreira Bonder, pelo amor, confiança e paciência.

Às minhas irmãs Juliana Elisa Bonder e Giovanna Cristina Bonder, pelo apoio, incentivo e carinho.

À minha avó Maria de Lourdes, minhas tias Celina Trovo e Eni Caleggari, pelo carinho, mesmo estando distante.

Ao meu primo Edgar Antonio Damasceno Costa e ao amigo Fabio Atz Guino pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Adriano Souza, da UNESP – Ilha Solteira, que sempre me ajudou e incentivou.

Aos professores do Departamento de Geotecnia e Transporte da UNICAMP, em especial ao Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque, pelos ensinamentos e apoio.

Ao Prof. Dr. Gilson Gitirana Junior, por ter gentilmente cedido e ensinado como utilizar a planilha para a aplicação do seu método.

Aos técnicos do laboratório do Departamento de Geotecnia e Transporte da UNICAMP.

A todos os colegas de pós-graduação, pela amizade e momentos de descontração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à FAPESP e a FAEPEX, pelo apoio financeiro.

“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada, caminhando e semeando, no fim terás o que colher.”
(Cora Coralina)

SUMÁRIO

	Folha
LISTA DE FIGURA.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvii
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Solos Não Saturados.....	5
2.1.1 - Fases do Solo.....	6
2.1.2 - Potencial Total da Água no Solo.....	8
2.1.3 - Sucção.....	12
2.1.4 - Curva de Retenção de Água do Solo.....	15
2.1.4.1 - Principais Equações para Representar a Curva de Retenção.....	19
2.1.4.1.1 - Modelo de Fredlund e Xing (1994).....	20
2.1.4.1.2 - Modelo de Gitirana e Fredlund (2004).....	25
2.1.4.2 - Fatores que Influenciam a Curva de Retenção	27
2.1.5 - Fenômeno da Histerese.....	30

2.2 - Métodos da Medição de Sucção.....	31
2.2.1 - Método do papel Filtro.....	32
2.2.2 - Tensiômetros.....	37
2.2.3 - Placa de Pressão (Técnica da Translação de Eixos).....	41
2.3 - Solos Tropicais Lateíricos.....	43
2.3.1 - Intemperismo.....	44
2.3.2 - Estrutura Cimentada.....	47
 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	 49
3.1 - Local da Pesquisa.....	49
3.2 - Coleta de Amostras de Solo.....	53
3.3 - Ensaio de Caracterização Geotécnica.....	54
3.4 - Ensaio Químico Mineralógico.....	55
3.4.1 - Ensaio de Fluorescência de Raios-X.....	55
3.4.2 - Ensaio de Difração em Raios-X.....	56
3.4.3 - Confecção de Lâminas Delgadas e Impregnadas das Amostras.....	56
3.5 - Ensaio para Medição ou Imposição da Sucção Matricial.....	57
3.5.1 - Método do Papel Filtro.....	57
3.5.2 - Método de Translação de Eixos.....	61
3.6 - Monitoramento da Sucção Matricial em Campo.....	62
3.7 - Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção de Água.....	65
 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	 67
4.1 - Ensaio Geotécnico.....	67
4.2 - Ensaio Químico.....	70
4.2.1 - Ensaio de Fluorescência de Raios-X.....	70
4.2.2 - Ensaio de Difração em Raios-X.....	72
4.3 - Interpretação das Lâminas Delgadas e Impregnadas.....	73
4.4 - Curvas de Retenção de Água.....	81
4.4.1 - Curvas Obtidas pelo Método do Papel Filtro.....	81

4.4.2 - Curvas Obtidas pela Translação Eixos.....	88
4.5 - Monitoramento da Sucção em Campo, por meio de Tensiômetros	92
4.6 - Histerese.....	98
4.7 - Ajuste das Curvas de Retenção de Água.....	104
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

LISTA DE FIGURAS

	Folha
Figura 2.1 - Diagrama de fases (modificado de Fredlund & Rahardjo, 1993).....	7
Figura 2.2 - Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total (Reis, 2004).....	14
Figura 2.3 - Principais feições da curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).....	19
Figura 2.4 - Penetração da interface ar água no interior do solo em função do aumento de sucção (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	19
Figura 2.5 - Determinação Gráfica dos parâmetros utilizados para circular os valores de a, n e m (Fredlund e Xing, 1994).....	23
Figura 2.6 - Influência do parâmetro “a” na curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).....	23
Figura 2.7 - Influência do parâmetro “n” na curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).....	24
Figura 2.8 - Influencia do parâmetro m na curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).....	24
Figura 2.9 – Curvas de Retenção: (a)unimodal e (b) bimodal (Feuerharmel et al, 2007).....	26
Figura 2.10 - Representação esquemática de curvas de retenção para diferentes tipos de solo (Vanapalli, 1994).....	29
Figura 2.11 - Tipos de fluxo de água do solo para o papel filtro (Marinho, 1994).	34
Figura 2.12 - Componentes básicos de um tensiômetro (Marinho, 1997).....	38
Figura 2.13 - Tensiômetro com manômetro de vácuo.....	39

Figura 2.14 - Aparelho de Richards utilizado na técnica de translação de eixos	43
Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental dentro do Campus da UNICAMP	50
Figura 3.2 - Sondagem de simples reconhecimento – SPT (Cavalcante et al, 2006)	50
Figura 3.3 - Sondagem de penetração estática (resistência de ponta) – CPT (Cavalcante et al, 2006)	51
Figura 3.4 - Sondagem de penetração estática (atrito lateral) – CPT (Cavalcante et al, 2006)	52
Figura 4.1 – Curvas Granulométricas obtidas com o uso de defloculante (Miguel et al, 2007)	69
Figura 4.2 – Curvas Granulométricas obtidas sem o uso de defloculante (Miguel et al, 2007)	69
Figura 4.3 - Porcentagens de óxidos predominantes <i>versus</i> profundidade (Miguel et al, 2007)	71
Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de difração em Raio-X em profundidade (Miguel et al, 2007)	73
Figura 4.5 - (profundidade 1,5m)	74
Figura 4.6 - (profundidade 1,5m)	75
Figura 4.7 - (profundidade 2,5m)	75
Figura 4.8 - (profundidade 2,5m)	76
Figura 4.9 - (profundidade 3,5m)	77
Figura 4.10 - (profundidade 4,5m)	77
Figura 4.11 - (profundidade 4,5m)	78

Figura 4.12 - (profundidade 5,5m).....	79
Figura 4.13 - (profundidade 5,5m).....	79
Figura 4.14 - (profundidade 6,5m).....	80
Figura 4.15 - (profundidade 6,5m).....	81
Figura 4.16 - Curvas de Retenção: teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	83
Figura 4.17 - Curvas de Retenção (Profundidade 1,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	84
Figura 4.18 - Curvas de Retenção (Profundidade 2,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	84
Figura 4.19 - Curvas de Retenção (Profundidade 3,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	85
Figura 4.20 - Curvas de Retenção (Profundidade 4,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	85
Figura 4.21 - Curvas de Retenção (Profundidade 5,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	86
Figura 4.22 - Curvas de Retenção (Profundidade 6,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro).....	86
Figura 4.23 - Curvas de Retenção: teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (papel filtro - Secagem).....	87
Figura 4.24 - Curvas de Retenção: teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (translação de eixos).....	89
Figura 4.25 - Curvas de Retenção (Profundidade 1,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (translação de eixos).....	89
Figura 4.26 - Curvas de Retenção (Profundidade 2,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (translação de eixos).....	90

Figura 4.27 - Curvas de Retenção (Profundidade 3,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (translação de eixos).....	90
Figura 4.28 - Curvas de Retenção (Profundidade 4,5m): teor de umidade gravimétrico <i>versus</i> sucção matricial (translação de eixos).....	91
Figura 4.29 - Dados pluviométricos do Campo Experimental.....	92
Figura 4.30 - Sucção matricial ao longo de um ano.....	94
Figura 4.31 - Teor de umidade gravimétrico ao longo de um ano.....	94
Figura 4.32 - Umidade relativa do ar <i>versus</i> sucção matricial.....	95
Figura 4.33 - Perfil de Sucção.....	96
Figura 4.34 - Curvas de retenção obtidas em campo.....	97
Figura 4.35 - Fenômeno da histerese (profundidade 1,5m).....	98
Figura 4.36 - Fenômeno da histerese (profundidade 2,5m).....	99
Figura 4.37 - Fenômeno da histerese (profundidade 3,5m).....	99
Figura 4.38 - Fenômeno da histerese (profundidade 4,5m).....	100
Figura 4.39 - Fenômeno da histerese (profundidade 5,5m).....	100
Figura 4.40 - Fenômeno da histerese (profundidade 6,5m).....	101
Figura 4.41 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 1,5m).....	105
Figura 4.42 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 2,5m).....	106
Figura 4.43 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 3,5m).....	106

Figura 4.44 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 4,5m).....	107
Figura 4.45 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 5,5m).....	107
Figura 4.46 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 6,5m).....	108
Figura 4.47 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 1,5m) (Fredlund e Xing, 1994).....	109
Figura 4.48 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 2,5m) (Fredlund e Xing, 1994).....	110
Figura 4.49 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 3,5m) (Fredlund e Xing, 1994).....	110
Figura 4.50 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 4,5m) (Fredlund e Xing, 1994).....	111
Figura 4.51 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 1,5m).....	113
Figura 4.52 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 2,5m).....	113
Figura 4.53 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 3,5m).....	114
Figura 4.54 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 4,5m).....	114

LISTA DE TABELAS

	Folha
Tabela 2.1 - Principais formulações para representar a curva de retenção.....	20
Tabela 2.2 - Técnicas de Medida de Sucção.....	31
Tabela 2.3 - Correlações para a determinação da sucção matricial com o método do papel filtro (Vilar, 1997 (a)).....	36
Tabela 3.1 - Limites adotados para cada tensiômetro.....	64
Tabela 4.1 - Valores de Índices Físicos das amostras indeformadas (Miguel et al, 2007).....	68
Tabela 4.2 - Valores de Limites de Consistência (Miguel et al, 2006).....	70
Tabela 4.3 - Caracterização dos corpos de prova (UMEDECIMENTO).....	82
Tabela 4.4 - Caracterização dos corpos de prova (SECAGEM).....	82
Tabela 4.5 - Resultados dos modelos de ajuste (Gitirana e Fredlund, 2004), utilizando os dados obtidos com o método do papel filtro.....	108
Tabela 4.6 - Resultados dos modelos de ajuste (Fredlund e Xing, 1994), utilizando os dados obtidos com o método do papel filtro.....	109
Tabela 4.7 - Resultados dos modelos de ajuste (Fredlund e Xing, 1994), utilizando os dados obtidos com o método da translação de eixos.....	111
Tabela 4.8 - Comparação dos parâmetros obtidos com a modelagem de Fredlund e Xing, 1994.....	112
Tabela 4.9 - Resultados dos Modelos de Ajuste (Gitirana e Fredlund, 2004), utilizando dados de ambas as técnicas: papel filtro e translação de eixos.....	115

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

a – parâmetro relacionado à sucção de entrada de ar na equação de Fredlund e Xing (1994) e uma variável de formato das hipérboles no modelo de Gitirana e Fredlund (2004)

e - índice de vazios

g - aceleração gravitacional = $9,81 \text{ m/s}^2$

h_c - altura de coluna de água

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

m - parâmetro relacionado à sucção de entrada de ar na equação de Fredlund e Xing (1994)

M - massa

M_a – Massa de ar

M_m – Massa da membrana contrátil

M_s – Massa de sólidos

M_w – Massa de água

n – Porosidade e parâmetro relacionado à sucção de entrada de ar na equação de Fredlund e Xing (1994)

pF – logaritmo decimal da sucção expressa em centímetros de água ($1pF=0,1mca$)

P_m = Pressão matricial

P_{osm} = Pressão osmótica

S_r - Grau de saturação

u_a – Poro pressão do ar

u_w – Pressão da água

V – Volume

V_a – Volume do ar

V_m – Volume da membrana contráctil

V_s – Volume de sólidos

V_w – Volume de água

w – Teor de umidade gravimétrica

z = distância vertical desde a superfície referência

ΔP = Diferença entre a pressão aplicada ao ar do solo

Alfabeto grego

ϕ - Potencial total da água do solo

ϕ_g - Potencial gravitacional

ϕ_m - Potencial matricial

ϕ_{sm} - Potencial osmótico

ϕ_p - Potencial pneumático

γ_d - Peso específico seco

γ_{natural} – Peso específico natural

$\gamma_{\text{sólidos}}$ - Peso específico dos sólidos

γ_w - Peso específico da água

Θ – Teor de umidade volumétrico

Θ_s – Teor de umidade volumétrico na saturação

Ψ_m – Sucção matricial

Ψ_{osm} – Sucção osmótica

Ψ_r - Valor da sucção correspondente à umidade volumétrica residual

Ψ_t – Sucção total

RESUMO

Como ponto de partida, concentra-se esta pesquisa em determinar as relações de teor de umidade (ou grau de saturação) *versus* o valor da sucção matricial, conhecidas por curvas características de sucção ou curvas de retenção, para o solo da camada superficial do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da UNICAMP. Esta camada é constituída de uma argila silto-arenosa, porosa, em condição não saturada, laterítica, colapsível e coluvionar de espessura em torno de 6,5m; resultante do alto grau de intemperismo. Na determinação das curvas utilizou-se a técnica do papel filtro, complementando a técnica de translação de eixos, já utilizada para o solo, através do Aparelho de Richards. Os procedimentos foram de secagem e de umedecimento das amostras, permitindo o estudo do fenômeno de histerese, à luz da estrutura e da composição químico-mineralógica do solo. Também foi realizado um monitoramento em campo da variação da sucção matricial ao longo de um ano, para confirmar o fenômeno da histerese que ocorre *in situ*. As curvas de retenção de água forneceram valores de pressão de entrada de ar que variam de 1 à 5 kPa, dependendo da técnica utilizada, lembrando o comportamento de areias, e mostraram que o fenômeno da histerese ocorre de maneira mais acentuada, em solos com poros maiores. Confrontaram-se os resultados obtidos com as diferentes técnicas de realização dos ensaios e analisaram-se as diferenças entre elas.

Palavras Chave: Solos não saturados, curva de retenção de água, papel filtro, tensiômetros, histerese, solos tropicais.

ABSTRACT

This research focuses in to determine the relationship of moisture content (or degree of saturation) versus the value of the suction matrix, known as soil water characteristic curve (SWCC), to the soil surface layer of the Field Experimental of Soil Mechanics and Foundation of UNICAMP. This profile consists of colluvial, lateritic, porous, on condition unsaturated and collapsible silty clay, with thickness around 6,5m and present on a clayed silt soil, residual of diabase; resulting from the high degree of weathering. To determine the curves, the techniques of filter paper and axis-translation were used, with a Richards equipment, this already used to the soil. The procedures were wetting and drying of the samples, allowing the study of the phenomenon of *hysteresis*, in the light of the structure and chemical and mineralogical composition of the soil. It was carried out in the field of tracking a variation of suction matrix over a year, to confirm the phenomenon of *hysteresis* that occurs *in situ*. The SWCCs supplied values of enter air ranging from 1 to 5 kPa, depending on the technique used, reminding the behaviour of sand, and showed that the phenomenon of *hysteresis* occurs in a manner more pronounced in soils with pores greater. Compared the achievements of the different techniques for conducting the tests and analyzed the differences between them.

Keywords: unsaturated soils, soil water characteristic, filter paper, tensiometers, *hysteresis*, tropical soils.

1 INTRODUÇÃO

O interesse pelo estudo do comportamento geotécnico de solos não saturados tem crescido nos últimos anos. Apenas no final de década de 40 e durante a década de 50, do século XX, alguns dos principais pesquisadores perceberam que os solos predominantes das regiões tropicais apresentavam características muito diferenciadas daqueles desenvolvidos em regiões de clima temperado e que os preceitos estabelecidos nas décadas anteriores não poderiam ser aplicados “*in totum*”, como até então se pensava (**WOLLE, 2004**).

A mecânica dos solos clássica está sendo ampliada com introdução de novos conceitos, técnicas de ensaios e interpretação de comportamento, especificamente aplicados em diferentes áreas de concentração em Geotecnia.

Os solos tropicais, predominantes no Brasil, são originados de processos intempéricos, físicos e químicos, e pedogenéticos intensos, em função das condições climáticas nessas regiões. A lixiviação é o mecanismo de formação mais atuante nos solos tropicais brasileiros, dando-lhes características peculiares,

como por exemplo, a alta porosidade com diferentes tipos de poros (macro e micro poros). Em alguns casos, quando os solos tropicais possuem textura argilosa, eles apresentam comportamentos mecânicos e hidráulicos típicos de areias, devidos à presença de material cimentante, como óxidos de ferro, originados do processo de laterização.

A mecânica dos solos não saturados possui uma variável de estado de tensão de significativa importância, para o entendimento do comportamento destes solos, tais como resistência, compressibilidade e permeabilidade. Essa variável é chamada de sucção, e pode ser matricial ou total. Muitos autores afirmam que o comportamento mecânico dos solos não saturados é regido pela sucção matricial.

O primeiro passo para avaliar as variações de sucção de um estado tensional de um solo é determinar sua curva de retenção de água, que é uma representação gráfica da relação sucção (matricial ou total) e quantidade de água (teor de umidade gravimétrico, teor de umidade volumétrico ou grau de saturação).

Com base na curva de retenção de água, os parâmetros hidráulicos de solos não saturados, por exemplo, podem ser obtidos por diferentes proposições matemáticas (métodos indiretos). Portanto, a necessidade de definir a curva de retenção é de extrema importância.

A compreensão do fenômeno da *histerese* também é fundamental para entender os fenômenos de transporte de fluidos nos solos, principalmente dos solos tropicais, abundantes na região de Campinas/SP.

O primeiro questionamento sobre a mecânica dos solos não saturados é sobre a consideração da influência da sucção nas propriedades mecânicas e hidráulicas, em problemas geotécnicos onde atuam esses solos, em função da não garantia da mesma.

De fato, a sucção não pode ser garantida, mas se pode saber qual a sua faixa de variação levando em conta o clima onde o projeto geotécnico será realizado. Daí a importância de se fazer um monitoramento em campo da sucção.

O fato de se terem comprovado a origem e o comportamento lateríticos do solo da camada superficial do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CEMSF) da Unicamp, vem reforçar a importância na determinação da curva de retenção de água e nas suas contribuições para o esclarecimento dos comportamentos hidráulico e mecânico desta camada de solo, na condição não saturada.

A finalidade desta pesquisa é determinar as curvas de retenção de água do solo da camada superficial coluvionar, porosa, laterítica e colapsível do CEMSF, típico de 14% da região de Campinas-SP, ao longo da profundidade, por meio da técnica do papel filtro em laboratório, e acompanhar a variação da sucção e da umidade gravimétrica deste solo, em campo, por meio de tensiômetros instalados em diferentes profundidades. Busca-se com isso, melhor entender o comportamento deste solo tropical não saturado e verificar como ele se comporta em campo, se possui sucções que podem ser consideradas, mesmo em tempos de chuvas intensas. Para o entendimento de como funciona o transporte de fluídos neste perfil de solo, de como se processa a sua compressibilidade, de como a sucção influencia a sua resistência, é necessário determinar as curvas de retenção de água ao longo da profundidade e analisar o fenômeno da *histerese*.

Além disso, pretende-se analisar essas curvas à luz da estrutura e da composição químico-mineralógica dessa camada coluvionar, considerando seus processos de formação, por meio da interpretação de ensaios de Fluorescência e Difração em Raios X e de Lâminas Delgadas e Impregnadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos Não Saturados

Os solos são encontrados na natureza como uma mistura de várias fases. Uma mistura de partículas sólidas e ar constituem o solo seco, enquanto uma mistura de partículas sólidas e água constituem um solo saturado. Entre estes dois extremos têm-se os solos não saturados, os quais se constituem de partículas sólidas, água e ar em percentagens volumétricas diferentes.

As teorias tradicionais de mecânica dos solos foram desenvolvidas admitindo que o solo encontra-se na condição saturada. Mas, na prática, esta condição de saturação não é encontrada sempre. Quando as teorias tradicionais da mecânica dos solos são aplicadas para solos não saturados, o engenheiro geotécnico geralmente encontra dificuldades para encontrar uma solução

satisfatória nos problemas práticos de engenharia (**LEE e WRAY, 1995**). Por este motivo o estudo de solos não saturados tem sido objetivo de muitas pesquisas.

2.1.1 Fases do Solo

O solo é comumente referido como um sistema de três fases: fase sólida, fase líquida e fase gasosa. Recentemente, uma quarta fase foi incluída, a fase de interação ar-água, também chamada de membrana contráctil (**FREDLUND e RAHARDJO, 1993**).

A massa e o volume de cada fase podem ser esquematicamente representados pelo diagrama de fases. A Figura 2.1 (a) mostra um diagrama simplificado de três fases, no qual se pode observar que a membrana contráctil faz parte da fase água. A Figura 2.1 (b) mostra um diagrama mais completo de quatro fases.

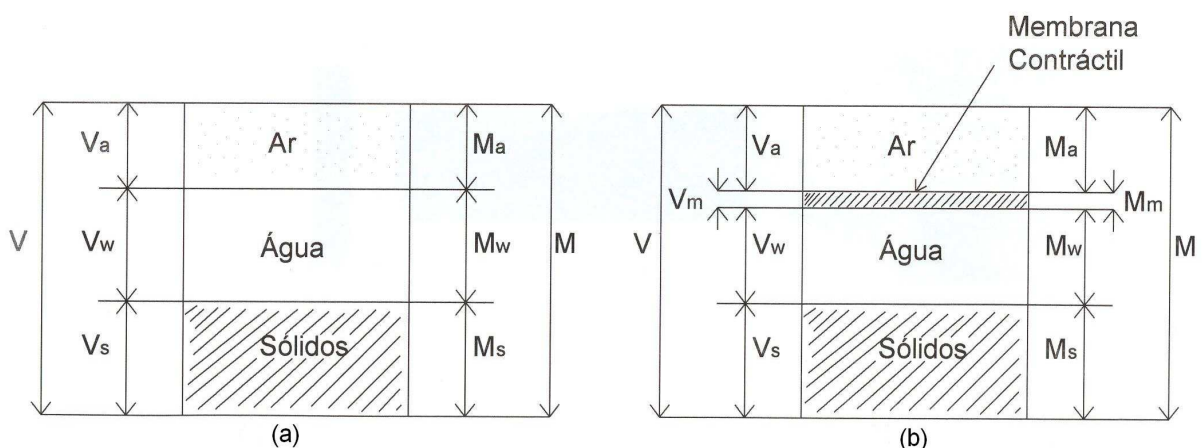


Figura 2.1- Diagrama de fases (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

- **Fase Sólida**

A fase sólida do solo é representada pelas partículas de minerais, podendo apresentar características altamente variáveis como tamanho, forma, textura, composição mineralógica, configuração cristalográfica, etc.

As características e propriedades das partículas sólidas, quanto à forma e tamanho, são determinantes no comportamento do solo. Dentro da faixa de pressões normalmente aplicadas nos solos, sob o ponto de vista da engenharia civil, as partículas sólidas são consideradas incompressíveis.

- **Fase Líquida**

A fase líquida é composta fundamentalmente de água, sais e ar dissolvido. A água dos poros tem sido classificada em três tipos: água gravitacional, água capilar e água adsorvida. A água gravitacional é a água que está livre para se mover por entre os poros, sob a ação da gravidade. A água capilar é aquela que permanece no solo devido às forças de capilaridade, desenvolvidas no contato água - partículas sólidas, e se movimenta dentro da massa de solo por ação destas forças. O fenômeno de capilaridade só existe quando o solo encontra-se na condição não saturada. A água adsorvida é aquela que se adere à superfície da partícula, através de mecanismos de adsorção, devido à existência de cargas elétricas negativas nesta superfície. Essa água faz parte da fase sólida e não pode ser separada por forças hidrodinâmicas. Sob o ponto de vista da hidrodinâmica, a água gravitacional e a água capilar formam a água livre (JUCÁ, 1990).

- **Fase Gasosa**

A fase gasosa, constituída por ar livre e água em forma de vapor, está presente no espaço poroso não ocupado pela água, quando o solo se encontra na condição seca ou não saturada.

- **Interface Ar-água**

A interface ar-água também conhecida como membrana contráctil, é composta por uma película de propriedades diferentes da água e do ar que a compõem. No entanto, as relações massa-volume consideram o solo como um sistema trifásico, fazendo com que o volume da membrana contráctil seja desprezado e seu peso incorporado ao peso da água (**FREDLUND e RAHARDJO, 1993**).

2.1.2 Potencial Total da Água no Solo

O potencial total da água no solo é definido como o trabalho realizado para levar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água pura, desde um ponto situado a uma altura conhecida, sob condição atmosférica, até um determinado ponto da água do solo (**JUCÁ, 1990**).

CRONEY (1952), CRONEY e COLEMAN (1953) e CRONEY et al. (1958) mostraram a importância do potencial da água do solo para se entender a distribuição de teores de umidade e o fluxo da água nos solos, para fins de Engenharia Civil. Croney e Coleman (1953) observaram, também, que o potencial da água do solo exercia fundamental influência no comportamento mecânico dos solos não saturados.

Os componentes do potencial total da água no solo são: o potencial osmótico, o potencial matricial, o potencial gravitacional e o potencial pneumático. Outros componentes podem ser incluídos, como o potencial de consolidação ou o

potencial térmico, porém eles podem ser descartados por terem importância menor no comportamento geotécnico de solos não saturados (**REIS, 2004**).

Para se avaliar o potencial da água do solo, podem se adotar quantidades unitárias de volume, massa ou peso. Em volume, o potencial é expresso em Joule por metro cúbico (J/m^3), ou em dimensões de pressão como Newton por metro quadrado (N/m^2) ou Pascais (Pa). Em unidade de massa, usa-se J/kg, e por unidade de peso, tem-se uma coluna em metros. Assim, um potencial por unidade de peso de h metros é equivalente a $g.h$ J/kg por unidade de massa ou a $p.g.h$ Pa. por unidade de volume (**MARSHALL & HOLMES, 1981**). O potencial total da água no solo pode ser expresso como:

$$\phi = \phi_{osm} + \phi_m + \phi_g + \phi_p \quad (2.01)$$

Onde,

ϕ_{osm} = Potencial osmótico

ϕ_m = Potencial matricial

ϕ_g = Potencial gravitacional

ϕ_p = Potencial pneumático

- **Potencial Osmótico**

O potencial osmótico surge em função da diferença de composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. Esta diferença de composição só causará movimento de água pura quando o sistema estiver “separado” por uma membrana semipermeável. Membrana semipermeável é aquela que só permite passagem de solvente (no caso a água pura), não deixando passar o soluto. Como no solo, de uma maneira geral, não

existem membranas semipermeáveis, qualquer diferença de potencial osmótico que se estabeleça provoca um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível de água (**REICHARDT, 1988**).

O potencial osmótico ocorre devido às águas nos poros possuírem sais em dissolução e exercerem uma sucção osmótica para levar a água do solo do estado original ao estado padrão (água pura). Esse potencial pode ser expresso como:

$$\phi_{osm} = -\frac{g}{\gamma_w}(-P_{osm}) \quad (2.02)$$

Onde:

P_{osm} = Pressão osmótica

γ_w = peso específico da água

g = aceleração gravitacional = $9,81 \text{ m/s}^2$

- **Potencial Matricial**

O potencial matricial da água do solo é um potencial de pressão e resulta do efeito combinado da ação de forças capilares e de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas minerais (matriz) que compõem o solo (**HILLEL, 1971 e BAVER et al, 1972**).

Para se tirar a água do solo retida por estas forças capilares e de adsorção, é preciso fornecer energia ao sistema. Dessa forma, o potencial matricial é negativo; pois há necessidade de se realizar trabalho sobre o sistema, para levar a água do solo do seu estado original ao estado padrão (**RÖHN, 1993**).

A correspondente sucção matricial, S , é definida como o módulo do potencial matricial (**MARSHALL e HOLMES, 1981**).

FREDLUND (1979), EDIL e MOTAN (1984) e ALONSO et al (1987) admitem que o potencial matricial seja o mais importante e suficiente parâmetro para o estudo dos solos não saturados.

Conforme **REICHARDT (1985)**, quando o solo se encontra na condição saturada, a componente matricial é nula. À medida que o solo vai se tornando não saturado, o efeito de capilaridade começa a atuar e o potencial mátrico torna-se negativo. Para altos valores de umidade, a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial mátrico. Nestas condições, o arranjo poroso, determinado pela estrutura, textura e composição de partículas, é de enorme importância. Para baixos valores de umidade, o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância e a adsorção passa a governar os valores de potencial mátrico. Esse potencial pode ser expresso pela equação:

$$\phi_m = -\frac{g}{\gamma_w}(-P_m) \quad (2.03)$$

Onde:

P_m = Pressão matricial

- **Potencial Gravitacional**

O potencial gravitacional equivale à energia potencial do campo gravitacional, que é medido a partir de um referencial de posição.

$$\phi_g = g.z \quad (2.04)$$

Onde:

z = distância vertical desde a superfície referencial

- **Potencial Pneumático**

O potencial pneumático ou potencial de pressão é medido em relação à condição padrão, tomada como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, admite-se que o potencial de pressão seja igual a zero.

Segundo **SOTO (2004)**, o potencial pneumático origina-se de pressões externas de gás diferentes da pressão atmosférica e tem especial importância quando se consideram os ensaios de placa de pressão ou a técnica de translação de eixos. Este potencial pode ser representado por:

$$\phi_p = \frac{g}{\gamma_w} \Delta P \quad (2.05)$$

Onde:

ΔP = Diferença entre a pressão aplicada ao ar do solo

2.1.3 Sucção

Sucção do solo é quantidade de energia que representa a capacidade do solo de reter água. Quando a água livre migra dentro do solo, ela será retida ou adsorvida por este. Para liberar a água adsorvida, uma energia externa tem que ser aplicada para contrapor-se a força de retenção da água. A energia aplicada por unidade de volume é conhecida como sucção do solo (**LEE e WRAY, 1995**).

A sucção total é igual ao potencial total quando desprezados os potenciais pneumático e gravitacional (**JUCÁ, 1990**).

A sucção total (Ψ_t) é definida como a pressão manométrica negativa, em relação à pressão externa de gás sobre a água do solo, que deverá ser aplicada a um reservatório de água pura (à mesma cota e temperatura) de sorte que se mantenham em equilíbrio, através de uma membrana semipermeável, a água do solo e a água do reservatório, conforme visto em **REIS (2004)**. A Figura 2.2 ilustra os conceitos da sucção matricial, osmótica e total.

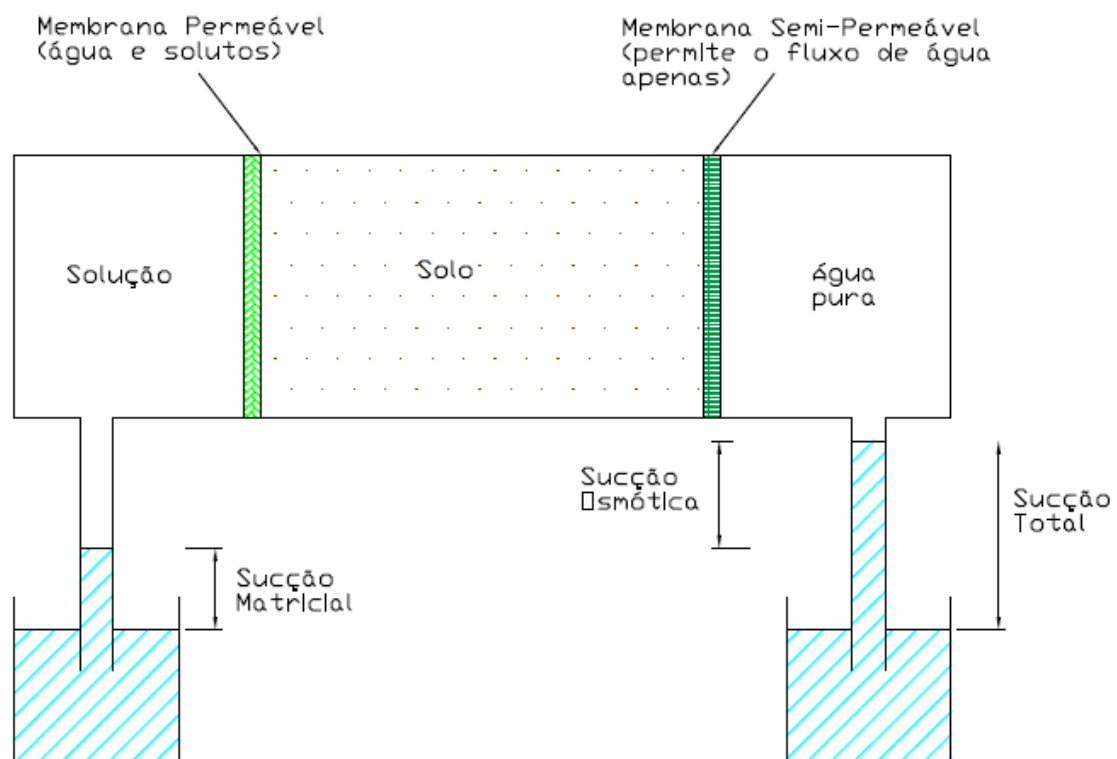


Figura 2.2 – Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total (Reis, 2004)

- **Sucção Matricial**

Segundo **SOTO (2004)**, a sucção matricial (Ψ_m) é igual à sucção total quando a água do solo é igual à água padrão (água pura ou solução com mesma composição da água do solo), restando apenas o efeito da matriz do solo, capilaridade e adsorção.

Os efeitos matriciais são decorrentes de pressões geradas pelo menisco capilar e da adsorção da água por forças exercidas pelas superfícies das partículas. Estas são quantificadas em forma global devido à dificuldade de discriminá-las.

A sucção mátrica também pode ser definida como a diferença entre a pressão do ar (u_a) e a pressão da água (u_w) presente nos poros dos solos, como mostra a equação 2.06.

$$\Psi_m = u_a - u_w \quad (2.06)$$

Supondo-se que os vazios do solo estejam em contato com a pressão atmosférica (considerada igual a zero, para efeito de referência), a pressão do ar terá mesmo valor que o da pressão atmosférica. Sendo assim, a sucção matricial será representada pela pressão negativa na água dos poros.

- **Sucção osmótica**

A sucção osmótica (Ψ_{osm}) é derivada das forças osmóticas associadas à composição da água do solo, a qual por sua vez é influenciada pela capacidade das partículas do solo de reter os íons trocáveis, que alteram a composição da água. O valor da sucção osmótica irá depender da composição do líquido externo ao solo, pois a alteração de soluto implica em mudança de pressão. Esta sucção

será máxima se a água do soluto for pura, e será nula se esta for de mesma composição química da água intersticial.

A importância da sucção osmótica na Mecânica dos Solos parece estar mais relacionada aos solos dispersivos ou expansivos, embora se admita que o valor da sucção total corresponda quase integralmente ao valor da sucção matricial (**FREDLUND e RAHARDJO, 1993**).

Atualmente, existem duas correntes básicas a respeito dos fatores que governam o comportamento dos solos não saturados. Autores como **EDIL e MOTAN (1984)**, **EDIL et al (1984)** e **ALONSO et al (1987)** assumem que o comportamento dos solos não saturados é regido apenas pela sucção matricial.

Segundo **TEIXEIRA e VILAR (1997)**, a sucção matricial precisa ser conhecida ou controlada, pois desempenha papel fundamental no comportamento do solo, visto que a deformabilidade e a resistência ao cisalhamento variam diretamente com essa sucção.

Por outro lado, **RICHARDS et al (1986)** discordam da afirmação anterior, admitindo que este comportamento seja governado pela sucção total, entendida como o somatório da sucção matricial e da sucção osmótica.

2.1.4 Curva de Retenção de Água do Solo

De acordo com **SOTO (2004)**, a relação entre o teor de umidade e a sucção do solo é uma característica do solo não saturado. Esta relação pode ser

representada graficamente e descreve uma trajetória diferente em função da secagem ou umedecimento do solo.

Devido às trajetórias de variações do teor de umidade serem diferentes, as curvas obtidas pelo processo de secagem ou umedecimento não coincidem, dando origem ao fenômeno denominado de *histerese* da curva característica de sucção (curva de retenção de água).

A curva de retenção é a relação entre a quantidade de água e a sucção do solo. A quantidade de água pode ser representada pela umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ) ou pelo grau de saturação (S_r). O valor de S_r , θ e w estão relacionados entre si através das seguintes correlações:

$$\theta = \frac{S_r \cdot e}{1 + e} = S_r \cdot n \quad (2.07)$$

$$\theta = \frac{\gamma_d \cdot w}{\gamma_w} \quad (2.08)$$

Onde,

e = índice de vazios

γ_d = peso específico seco

γ_w = peso específico da água

n = porosidade

Para pequenos intervalos de sucção, a quantidade de água presente nos poros do solo pode ser representada em escala linear. Para a representação de toda a curva de retenção, devido aos elevados valores de sucção, utiliza-se um gráfico semilog. As curvas de retenção são geralmente plotadas na escala semilog usando na ordenada o valor do grau de saturação. Este tipo de representação é mais facilmente compreendido pelos engenheiros geotécnicos (**VANAPALLI**,

1994). Em algumas situações, como em problemas de análise de fluxo, utiliza-se a umidade volumétrica.

FREDLUND e XING (1994) sugerem um procedimento gráfico para a determinação da sucção, correspondente à entrada de ar e ao valor de umidade volumétrica residual. A entrada de ar é definida como a intercessão entre a reta horizontal, correspondente ao estado saturado, com a reta tangente que passa pelo ponto de inflexão da curva. A intercessão desta última reta com a reta tangente à curva que passa pelo valor de sucção de 10^6 kPa define o valor de umidade volumétrica residual. Estes procedimentos estão ilustrados na Figura 2.3, sendo válidos para a curva plotada na escala semilog. Não existe um consenso sobre o valor da sucção residual. Alguns pesquisadores, principalmente na Agronomia, adotam o valor de 1500 kPa que corresponde à sucção do ponto de murcha das plantas.

Ao longo da curva de retenção, partindo da condição saturada, à medida que a sucção aumenta, pode-se identificar a sucção de entrada de ar e a sucção residual. A Figura 2.4 apresenta esquematicamente a entrada do menisco de água no interior do solo para diferentes valores de sucção. Quando o solo está saturado, a interface ar-água é representada pela linha 1. Com o aumento da sucção, se atinge o início da entrada de ar e a interface ar-água penetra no solo. A partir deste momento, os meniscos formados pela interface ar-água passam a apresentar raios menores com o aumento da sucção, conforme ilustrado na Figura 2.4 pelas linhas 2, 3, 4 e 5.

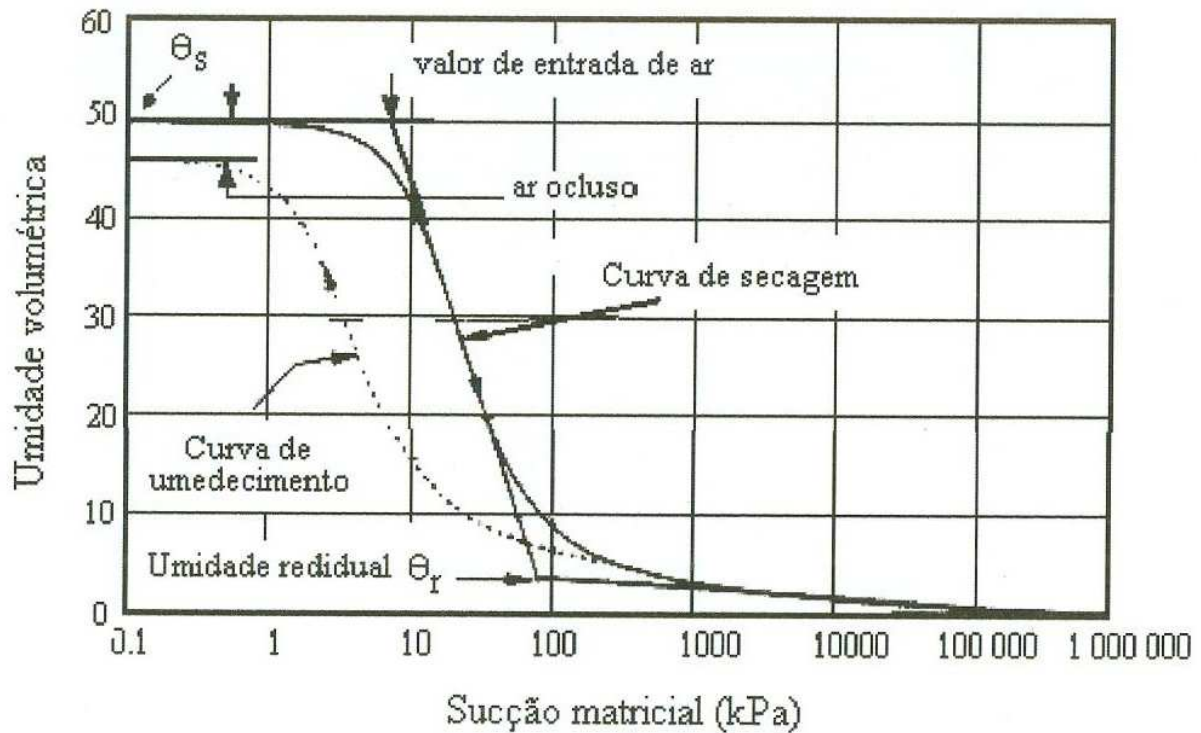


Figura 2.3 – Principais feições da curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).

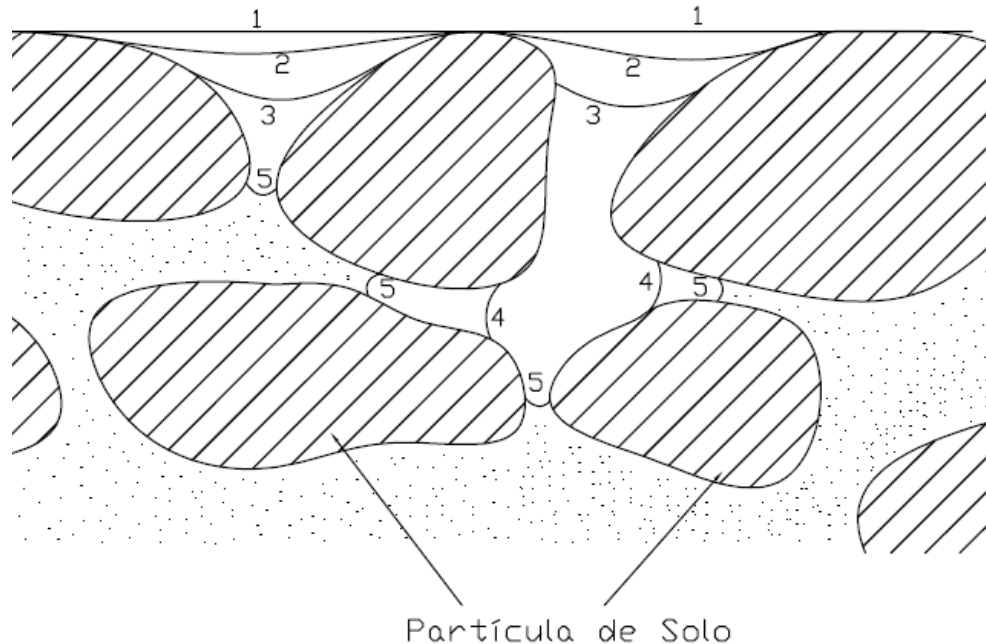


Figura 2.4 – Penetração da interface ar-água no interior do solo em função do aumento de sucção (Fredlund e Rahardjo, 1993).

CRONEY e COLLEMAN (1961), ao obterem as curvas de retenção de solos argilosos, constataram que para umidades próximas a zero os valores da sucção são da ordem 10^6 kPa. Sucções desta ordem de grandeza foram obtidas com a utilização de solução de ácido sulfúrico em dessecadores. Nestes ensaios, as amostras são colocadas no interior do dessecador ficando expostas à umidade relativa do ar, que é função da solução utilizada. Quanto menor a umidade relativa, maior será o valor da sucção imposta ao corpo-de-prova. Algumas evidências experimentais, entre elas, os resultados obtidos por **CRONEY e COLLEMAN (1961)**, permitem concluir que o valor de 10^6 kPa é a máxima ordem de grandeza para a sucção de meios porosos (**FREDLUND e XING, 1994**).

2.1.4.1 Principais Equações para Representar a Curva de Retenção

Os valores experimentais da curva de retenção podem ser representados por equações matemáticas. Na Tabela 2.1 estão apresentados alguns trabalhos (autores) mais utilizados, no que diz respeito à modelagem das curvas de retenção de água. **GERSCOVICH e SAYÃO (2002)** estudaram as curvas de retenção de 11 solos do Brasil, incluindo solo residual, sedimentar e coluvionar, verificando que as equações propostas por **van GENUNCHTEM (1990)** e **FREDLUND e XING (1994)** apresentam uma boa estimativa dos valores experimentais.

Tabela 2.1 – Principais formulações para representar a curva de retenção

AUTORES	ANO
Brooks e Corey	1966
van Genunchtem	1980
Fredlund e Xing	1994
Gitirana e Fredlund	2004

2.1.4.1.1 Modelo de Fredlund e Xing (1994)

A equação proposta por **FREDLUND e XING (1994)** é baseada nas seguintes hipóteses:

- A curva de retenção depende da distribuição de poros.
- Os meniscos formados possuem formato esférico, que se justifica assumindo que os poros apresentam seção circular e os canais que interligam os mesmos são cilíndricos e dispostos de forma aleatória.

FREDLUND e XING (1994) propuseram a seguinte relação entre a umidade volumétrica e a sucção:

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (2.09)$$

Onde:

θ_s = teor de umidade volumétrico na saturação

a, m, n = parâmetros de ajuste da curva

O valor da umidade volumétrica normalizada (θ), dada pela relação entre a umidade volumétrica e a umidade volumétrica na saturação, é igual ao grau de saturação e a equação 2.09 pode ser representada por:

$$Sr = \frac{1}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (2.10)$$

FREDLUND e XING (1994) acrescentaram o termo $C(\Psi)$ que multiplicado pela equação 2.10 faz com que a curva de retenção apresente, para valores de grau de saturação próximos de zero, sucção de 10^6 kPa. Este termo é dado por:

$$C(\psi) = 1 - \left[\frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln[1 + (1000000 / \psi_r)]} \right] \quad (2.11)$$

Onde:

Ψ_r = Valor da sucção correspondente à umidade volumétrica residual

Os valores de a, m e n podem ser obtidos graficamente. Quando se utiliza, para representar a curva de retenção, a equação 2.11, multiplicada pela equação 2.10, estes parâmetros podem ser estimados pelas seguintes expressões:

$$a = \psi_i \quad (2.12)$$

$$m = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad (2.13)$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3,72.Sr^* \quad (2.14)$$

$$Sr^* = \frac{Sr}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1,31^m (\psi_i + \psi_r) \ln [1 + (1000000 / \psi_r)]} \quad (2.15)$$

$$Sr = \frac{\theta_i}{\ln(\psi_p / \psi_i)} \quad (2.16)$$

Os valores de Ψ_i , θ_i , θ_s , Ψ_r , e Ψ_p , são obtidos graficamente como indicado na Figura 2.5. O ponto de inflexão da curva de retenção corresponde às coordenadas de Ψ_i e θ_i . Passando-se uma tangente pelo ponto de inflexão, a reta intercepta o eixo das abscissas no valor de sucção correspondente a Ψ_p . As coordenadas de (Ψ_r, θ_r) representam o ponto onde a curva de retenção passa a decrescer linearmente até 10^6 kPa. O procedimento gráfico para se encontrar os parâmetros a , n e m fornece apenas valores aproximados. Um melhor ajuste aos pontos experimentais pode ser obtido ao se utilizar programas computacionais, aplicando-se o método dos mínimos quadrados (**FREDLUND e XING, 1994**).

Os parâmetros a , n e m estão relacionados ao formato da curva de retenção. Observa-se na Figura 2.6 que com o aumento do valor do parâmetro a , a curva se desloca para a direita, alterando assim o valor da sucção de entrada de ar. O valor do parâmetro n faz com que a curva de retenção gire em torno do ponto de inflexão, conforme ilustrado na Figura 2.7. À medida que o valor de n aumenta, a curva gira no sentido horário. O aumento do valor de m faz com que,

para valores elevados de sucção, a curva de retenção se aproxime do eixo das abscissas, conforme apresentado na Figura 2.8.

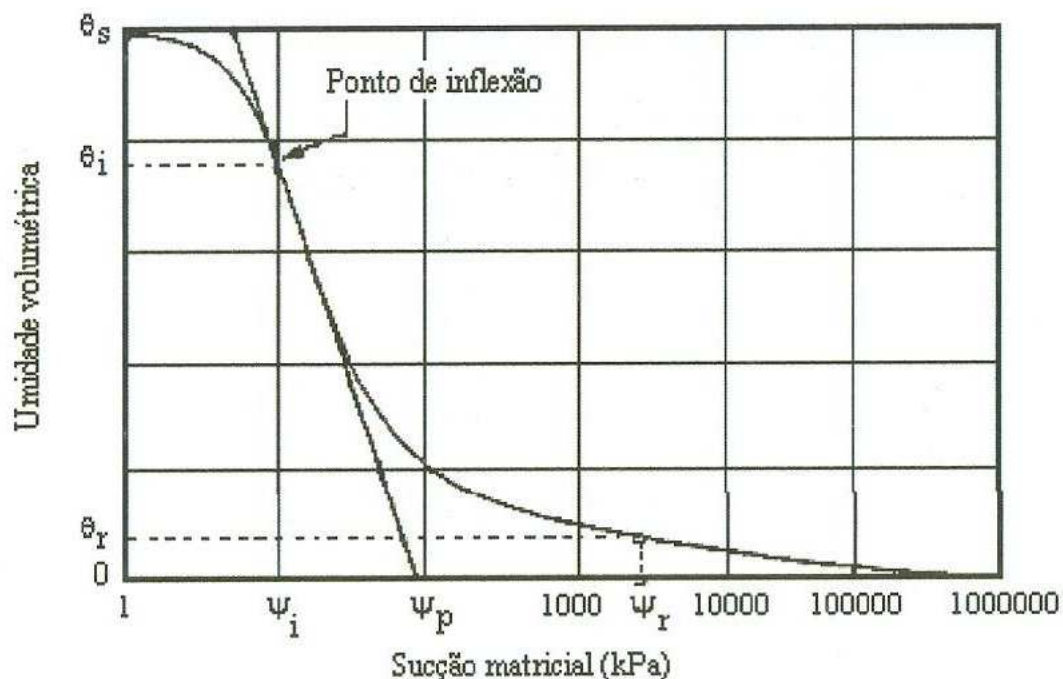


Figura 2.5 - Determinação Gráfica dos parâmetros utilizados para circular os valores de a , n e m (Fredlund e Xing, 1994).

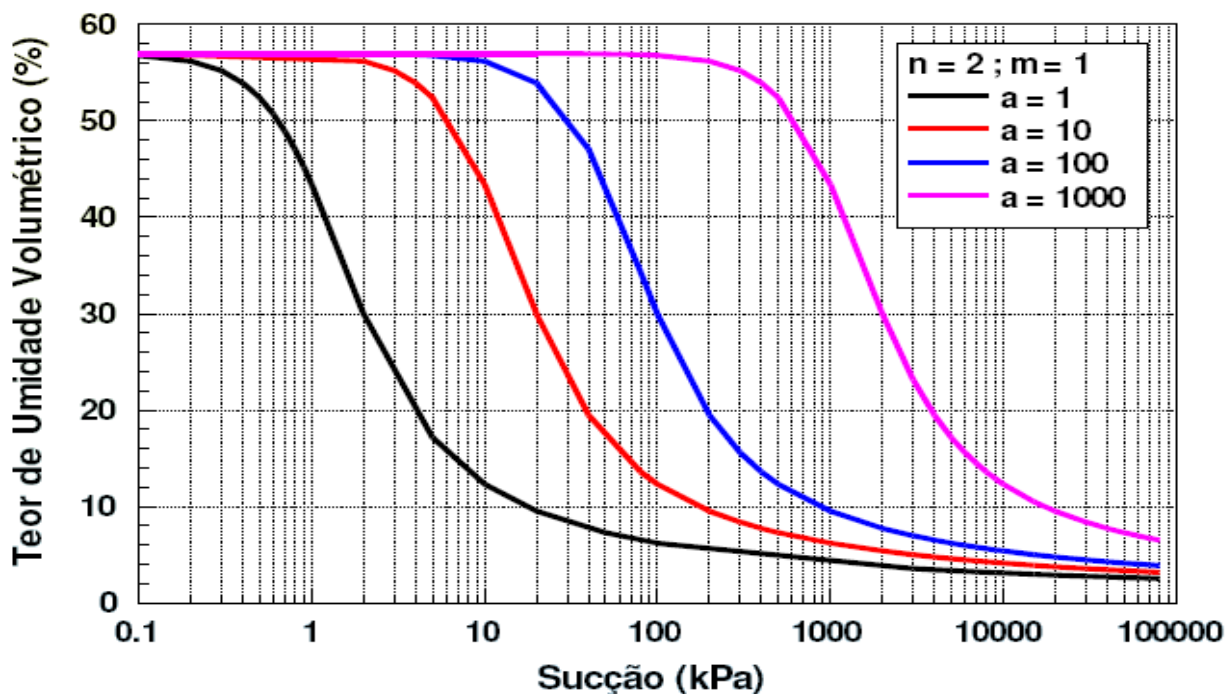


Figura 2.6 – Influência do parâmetro “a” na curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).

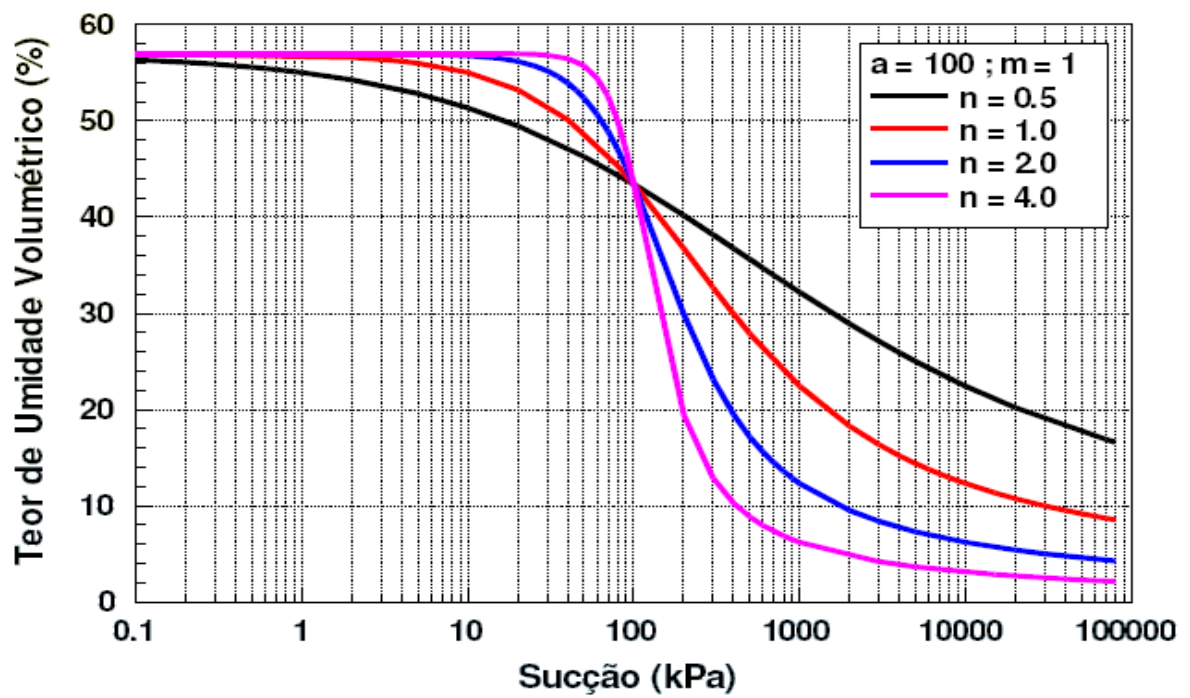


Figura 2.7 - Influência do parâmetro “n” na curva de retenção (Fredlund e Xing,1994).

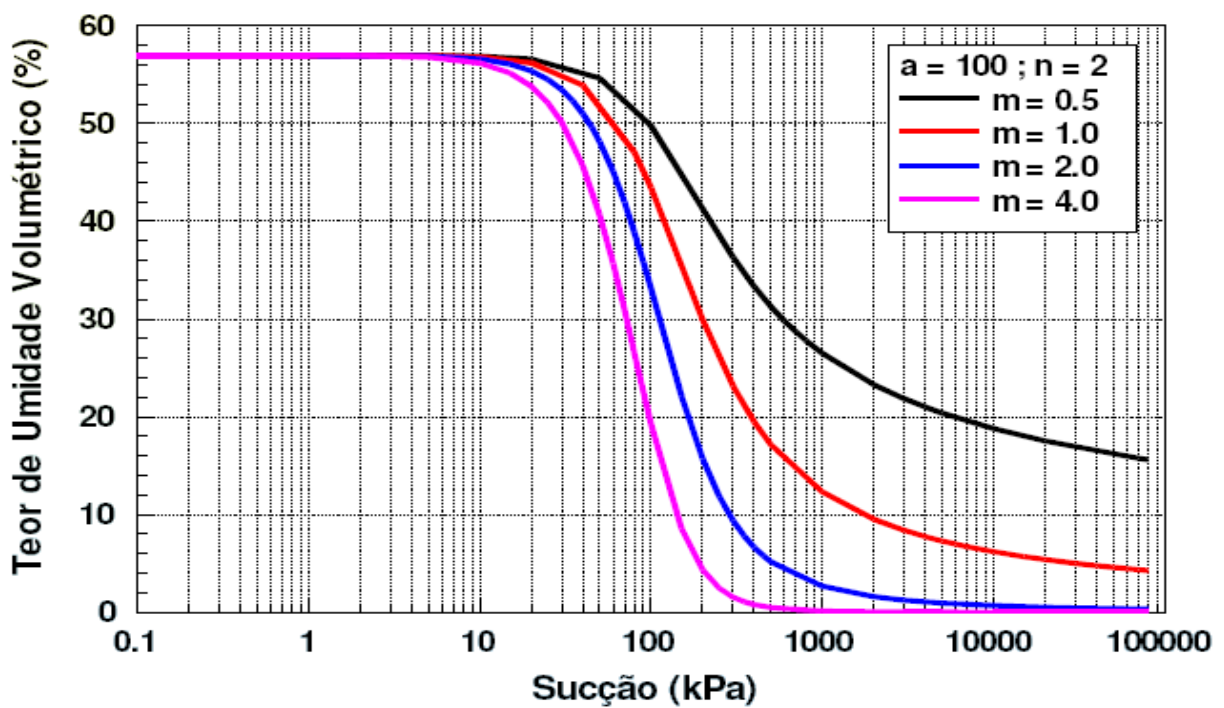


Figura 2.8 – Influencia do parâmetro m na curva de retenção (Fredlund e Xing,1994).

2.1.4.1.2 Modelo de Gitirana e Fredlund (2004)

Recentemente, estudos foram publicados indicando que o formato da curva da Figura 2.9 (a), pode não representar o comportamento de dessaturação de muitos solos de origem residual e sedimentar, encontrados em regiões de clima tropical e subtropical (**FEUERHARMEL et al, 2007**).

Estes solos frequentemente apresentam macroestrutura e microestrutura bem definida, sendo compostos por partículas de argila agregadas de tal forma que se assemelham, em tamanho, a grãos de silte ou areia. As curvas de retenção destes solos sugerem uma distribuição bimodal de poros. Uma curva de retenção de água bimodal é apresentada na Figura 2.9 (b).

A distribuição bimodal dos poros é frequentemente relacionada com a boa ou má graduação da curva granulométrica do material, mas também pode estar relacionada com algumas estruturas de solos (**CAMAPUM DE CARVALHO et al, 2002**).

GITIRANA e FREDLUND (2004) propuseram uma equação que representa estas curvas bimodais. Esta proposta é definida por dois valores de entrada de ar e dois pontos residuais, dando um total de quatro pontos de inflexão da curva. Um parâmetro “a” é usado para definir o formato de transição das flexões das curvas. Esta expressão é representada por:

$$Sr = \frac{Sr_1 - Sr_2}{1 + \left(\psi / \sqrt{\psi_{b1} * \psi_{res1}} \right)^{d1}} + \frac{Sr_2 - Sr_3}{1 + \left(\psi / \sqrt{\psi_{b2} * \psi_{res1}} \right)^{d2}} + \frac{Sr_3 - Sr_4}{1 + \left(\psi / \sqrt{\psi_{b2} * \psi_{res2}} \right)^{d3}} + Sr_4 \quad (2.17)$$

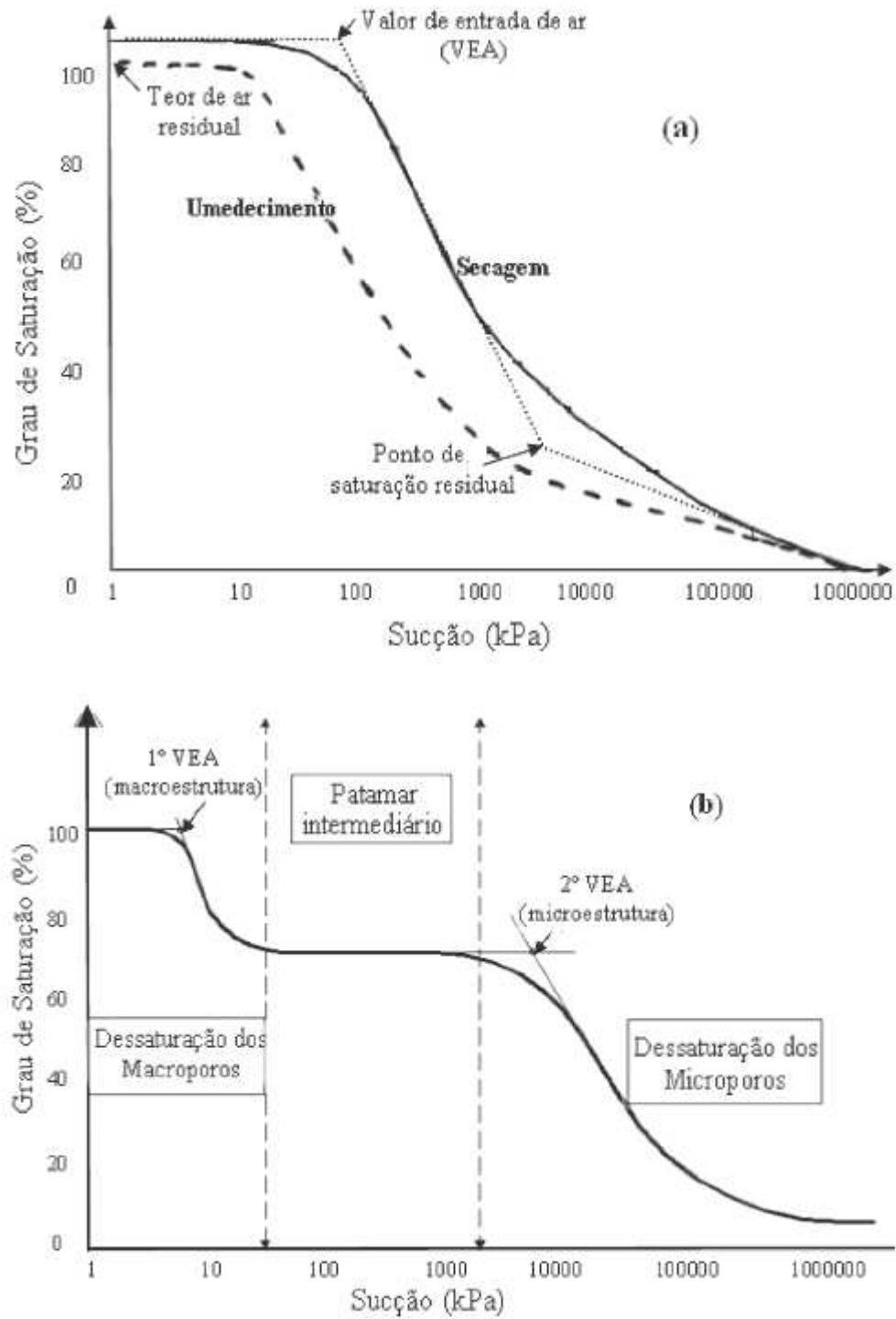


Figura 2.9 – Curvas de Retenção: (a) unimodal e (b) bimodal (Feuerharmel et al, 2007).

Ou seja, oito parâmetros são identificados para representar uma curva bimodal. São eles:

$-\psi_{b1}$ = sucção de entrada de ar no 1º trecho (macroporos)

$-\psi_{res1}$ = sucção residual do 1º trecho (macroporos)

$-S_{res1}$ = grau de saturação residual do 1º trecho (macroporos)

$-\psi_{b2}$ = sucção de entrada de ar no 2º trecho (microporos)

$-S_{b2}$ = grau de saturação na entrada de ar do 2º trecho (microporos)

$-\psi_{res2}$ = sucção residual do 2º trecho (microporos)

$-S_{res2}$ = grau de saturação residual do 2º trecho (microporos)

$-a$ = variável de formato das hipérboles

2.1.4.2 Fatores que Influenciam a Curva de Retenção

Segundo **RÖHM (1993)**, os principais fatores que interferem na forma da curva característica dos solos são a distribuição granulométrica, a distribuição dos poros, a estrutura e a mineralogia das partículas.

Nos solos arenosos, devido ao fato dos poros serem relativamente grandes, a uma dada sucção, muitos poros se esvaziam e poucos poros ainda podem reter água. Nos solos argilosos, devido ao fato de possuírem uma melhor

distribuição dos poros, a cada sucção matricial apenas uma parcela dos poros drena, permanecendo ainda certa quantidade cheia de água **(REIS, 2004)**.

O tipo de solo influencia o valor de entrada de ar e a inclinação da curva de retenção. Esta inclinação refere-se ao trecho entre a sucção de entrada de ar e a sucção residual, definida por **MARINHO (1994)**, como capacidade de sucção. As areias apresentam pequena capacidade de retenção de água, devido aos grandes poros interconectados presentes em sua estrutura. Desta forma, a entrada de ar ocorre para pequenos valores de sucção. Estes solos apresentam em geral pequena variação de diâmetro de poro, dessaturando rapidamente após atingirem a sucção de entrada de ar.

Os solos argilosos apresentam em geral, em relação aos solos arenosos, uma maior capacidade de retenção de água. Quanto maior a plasticidade das argilas, maiores serão os valores de entrada de ar e de sucção residual **(FREDLUND, 1998)**. Os solos argilosos dessaturam de forma mais lenta, indicando que apresentam poros com diferentes diâmetros. Os solos siltsos apresentam comportamento intermediário entre os arenosos e os argilosos. As variações da sucção de entrada de ar e a inclinação da curva de retenção para diferentes tipos de solo estão esquematicamente apresentadas na Figura 2.10 **(OLIVEIRA, 2004)**.

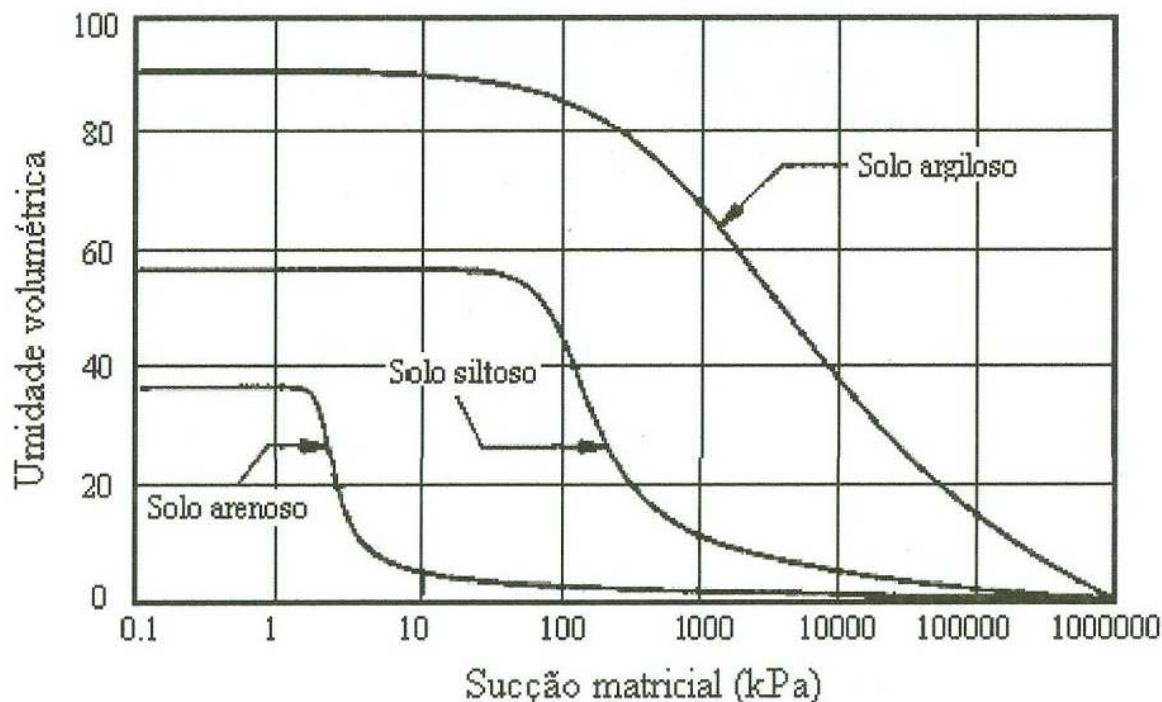


Figura 2.10 – Representação esquemática de curvas de retenção para diferentes tipos de solo (Vanapalli, 1994).

A curva de retenção não é única para um mesmo corpo-de-prova, podendo ser diferente quando obtida por processo de secagem ou umedecimento. A variação da estrutura do corpo-de-prova durante a secagem e a formação de ar ocluso durante o umedecimento são os dois principais fatores que interferem neste fenômeno.

Os solos de estruturas compressíveis, quando submetidos à secagem, apresentam aumento de densidade até que o limite de contração seja alcançado (CRONEY, 1952).

Mesmo para solos incompressíveis, o ciclo de secagem e umedecimento pode não coincidir com o valor de sucção igual a zero. Este fato deve-se à maneira como a água é retida da estrutura do solo durante a secagem e umedecimento. Durante a secagem, a sucção é mantida na entrada do poro

maior, estando o interior do poro maior preenchido com água. A mesma sucção mantida no processo de umedecimento está associada ao poro menor, ficando o interior do poro menor preenchido com ar. Portanto a capacidade de retenção de água está associada à entrada do poro e não ao interior do mesmo (**DINEEN e RIDLEY, 1999**).

2.1.5 Fenômeno da *histerese*

Devido às trajetórias de variações do teor de umidade serem diferentes, as curvas obtidas pelo processo de secagem ou umedecimento não coincidem, dando origem ao fenômeno denominado de *histerese* da curva característica de sucção.

A *histerese* provocada pelos processos de secagem e umedecimento pode ser atribuída à não uniformidade dos vazios, às bolhas de ar capturadas pelos vazios do solo durante o umedecimento e à alteração na estrutura decorrente da contração ou expansão do solo (**CALLE, 2000**).

Segundo **ROJAS (2002)**, o valor real da sucção depende não somente do grau de saturação, mas também do estado inicial do solo e de todo histórico de secagem e umedecimento até aquele momento.

O fenômeno de *histerese* da curva característica, segundo **HILLEL (1971)**, pode ser atribuído a diversas causas:

- a) A desuniformidade geométrica de cada poro (que são em geral vazios de formas irregulares interconectados por passagem menores) gerando o efeito *ink bottle*;
- b) Ao ângulo de contato, que é maior quando ocorre umedecimento do solo e menor na fase de secagem, gerando raios de curvatura diferentes em uma ou em outra situação, tal fato decorre da existência de impurezas adsorvidas as superfícies secas das partículas tomando-as mais ásperas;
- c) Bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante a fase de umedecimento;
- d) E alteração na estrutura do solo, decorrentes da expansão ou contração, associadas aos ciclos de secagem e umedecimento.

2.2 Métodos da Medição de Sucção

Existem diversos métodos para determinação da sucção do solo, tanto em campo, como em laboratório. A Tabela 2.2 apresenta um resumo de algumas técnicas de medidas de sucção. Uma revisão mais detalhada dos diversos métodos pode ser encontrada em **CAMPOS (1994)**, **MARINHO (1997)**, **VIEIRA (1999)** e **SOTO (2004)**.

Segundo **SOTO (2004)**, as medidas de sucção, tanto em laboratório como em campo, esbarram numa série de dificuldades experimentais e, comumente, deve-se recorrer a diferentes métodos com o intuito de conhecer-se a sucção dentro de uma faixa ampla, que seja suficiente para utilização prática.

Tabela 2.2 – Técnicas de Medida de Sucção

Técnica	Tipo de Sucção Medida	Faixa de Medida (kPa)
Tensiômetro	Matricial	0 - 90
Translação de Eixos	Matricial	0 - 1500
Psicrômetro	Total e Osmótica	100 - 8000
Condutividade Elétrica	Matricial e Osmótica	20 - 1500
Condutividade Térmica	Matricial	0 - 400
Papel Filtro	Matricial e Total	0 - 29000

2.2.1 Método do Papel Filtro

A técnica do papel filtro tem sido bastante utilizada para obtenção da curva de retenção por ser um método de fácil aplicação, de baixo custo e por cobrir uma faixa de sucção relativamente ampla. Segundo **FEUERHARMEL et al (2004)**, a desvantagem desta técnica é a necessidade de extremo cuidado na sua execução. Conforme **SWARBRICK (1995)**, a grande vantagem deste método é que o papel filtro é adaptado ao valor da sucção do solo, ao invés do solo se adaptar ao valor da sucção aplicada.

O uso do papel filtro como material absorvente deu mais credibilidade ao método, visto que o processo industrial envolvido na produção do mesmo garante que as características de absorção de cada papel filtro sejam as mesmas, independentes da caixa ou lote usado (**FAWCETT e COLLIS-GEORGE, 1967 citado em MARINHO, 1997**).

Porém, alguns pesquisadores, como **OLIVEIRA (2004)**, verificaram que a proposta feita por **CHANDLER et al (1992)** não se aplicava em alguns poucos lotes. Recomenda-se sempre verificar se a proposta feita por **CHANDLER et al (1992)** é válida para o lote com o qual se está trabalhando, caso não seja, é aconselhado que se faça uma nova calibração.

A realização do ensaio consiste em colocar um papel filtro de características de retenção conhecidas num ambiente hermético junto com uma amostra de solo. Dado o contato do papel, que é capaz de reter a umidade, com o solo, ocorre a migração de água até estabelecer-se o equilíbrio de potencial, obtendo assim a sucção matricial (**GARDNER, 1937**). Caso a água do solo não esteja em contato direto com o papel filtro, pode-se obter a sucção total, após o equilíbrio de potencial.

Este tempo de equilíbrio vem sendo estudado por vários autores. **FEUERHARMEL et al (2004)** sugerem o tempo de equalização de sete dias para valores de sucção acima de 10000 kPa e de quatro dias para valores menores que 10000 kPa. **MARINHO (1997)** salienta que o tempo de equalização está relacionado com o tipo e nível de sucção. Esse mesmo autor sugere o tempo de sete dias, quando se está medindo a sucção matricial, independentemente do nível de sucção. Segundo a norma americana **ASTM D 5298-03**, o tempo mínimo de equalização entre o papel filtro e o solo é de sete dias. O tempo de equilíbrio é um fator muito importante para a obtenção do correto valor da sucção.

O procedimento do método é bastante simples, entretanto requer bastante cuidado na determinação do teor de umidade do papel filtro. Segundo **CHANDLER e GUTIERREZ (1986)**, o tempo de pesagem do papel filtro deve ser de aproximadamente 30s, para evitar que o mesmo ganhe ou perca umidade para a atmosfera. Segundo **MARINHO (1994)**, o tempo de transferência do papel filtro para uma cápsula fechada ou um saco plástico auto-selante deve ser no máximo 5 segundos.

Os tipos de papéis mais usados são Scheleicher & Shuell N°589 e o Whatmam N°42 e devem ser utilizados diretamente da caixa (seco ao ar).

O papel filtro pode ser usado para determinar a sucção matricial através do fluxo capilar, com um contato direto sobre o solo, sem que a água perca continuidade, implicando interação entre o papel filtro e a água dos poros (**SOTO, 2004**).

Quando o papel filtro não estiver em contato direto com a água do solo, o ar, que fica entre o papel filtro e o solo, atua como uma membrana semipermeável para os sais, permitindo apenas o fluxo de vapor d'água, portanto, a sucção medida será a sucção total.

Discute-se muito a dificuldade de se garantir um bom contato entre o papel e o solo, quando se quer medir sucção matricial. Contudo, algumas pesquisas mostram que o grau de contato tem pouca influencia desde que o tempo de equilíbrio adequado seja utilizado **MARINHO (1994)**.

A Figura 2.11 mostra os fluxos de vapor e capilar.

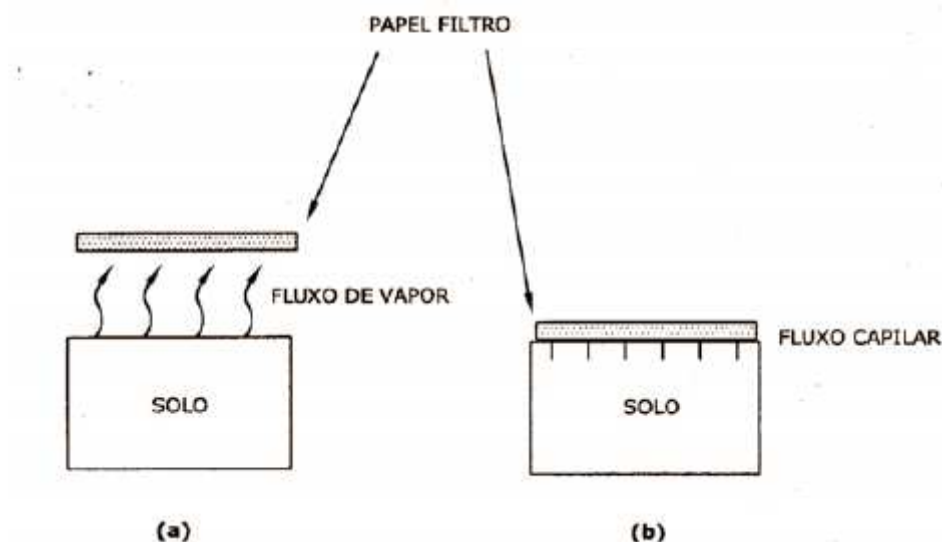


Figura 2.11 – Tipos de fluxo de água do solo para o papel filtro (Marinho, 1994).

Segundo **MARINHO (1997)**, existem alguns casos em que o papel filtro é atacado por fungos durante o processo de equilíbrio. Os fungos provocam uma degeneração do papel, reduzindo a massa e alterando as características de absorção. Embora alguns pesquisadores tenham percebido que não é necessário o tratamento quando o tempo é de no máximo quinze dias, **FERREIRA (1998)** percebeu o desenvolvimento de grande quantidade de fungos em solos colapsíveis do semi-árido brasileiro.

Para evitar este tipo de problema, **MARINHO (1997)** recomenda que se façam duas medições por corpo-de-prova e os papéis filtro não podem se sobrepor.

Segundo **MARINHO (1994)**, para o papel filtro Whatman N°42, a umidade inicial no estado seco ao ar é de aproximadamente 6%. Isto permite medições de sucção matricial de 0 – 29000 kPa, sendo esta a máxima sucção matricial que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo. Por outro lado, **NELSON e MILLER (1992)** dizem que é possível fazer leituras de sucção numa faixa de 0,1 a 150000 kPa.

MARINHO (1997) salienta que a capacidade de absorção de água do papel filtro Whatman N°42 é de aproximadamente 175%. Isto significa que esse papel tem capacidade de reter água equivalente a sucções muito baixas.

A curva de calibração do papel filtro nada mais é do que uma curva característica do material. Os métodos de geração de sucção são os mesmos que os utilizados na determinação da relação umidade/sucção de um solo. A diferença recai apenas na precisão com que se necessita pesar o papel (**MARINHO, 1997**).

Os materiais necessários para a utilização do papel são: balança analítica com precisão de 0,0001g, cápsulas ou sacos plásticos selantes, pinça, tesoura e estufa.

Na Tabela 2.3, são mostradas algumas correlações usadas para a determinação da sucção em função do teor de umidade do papel.

Tabela 2.3 – Correlações para a determinação da sucção matricial com o método do papel filtro (Vilar, 1997 (a)).

Autor	Tipo de Papel	Correlação	Observação
Fawcett e Collis-George (1967)	Whatmam N°42	$pF = 5,777 - 0.060 w_p$	pF entre 2,6 e 4,5
McQueen Miller (1968)	Scheleicher & Shuell N°589	$pF = 6,246 - 0.07230 w_p$	pF entre 2,3 e 5,9
Hamblin (1981)	Whatmam N°42	$pF = 6,281 - 0.0822 w_p$	pF entre 2,9 e 4,8 w_p entre 17% e 47% sucção matricial entre 80 a 600kPa $w_p \geq 47\%$ $w_p < 47\%$ S em kPa $w_p > 54\%$ $w_p < 54\%$ $pF > 2,1$ Sucção matricial > 50kPa
Chandler e Gutierrez (1986)	Whatmam N°42	$pF = 5,85 - 0.062 w_p$	
Chandler et al (1992)	Whatmam N°42	$S = 10^{6,05 - 2,48 \cdot \log w_p}$ $S = 10^{4,84 - 0,622 w_p}$	
ASTM D 5298	Whatmam N°42	$pF = 6,327 - 0.0779 w_p$ $pF = 3,412 - 0.0135 w_p$	

Algumas das vantagens deste método são: a possibilidade de medir sucção em uma ampla faixa de sucção (0-150000) (**NELSON e MILLER, 1992**), a versatilidade, a economia e uma precisão similar ou até melhor do que outros métodos convencionais (**Mc. QUEEN e MILLER, 1968**). O procedimento do ensaio é simples e permite medir a sucção osmótica pela diferença da sucção total com a matricial.

Dentre algumas desvantagens pode-se destacar: não é possível fazer medições contínuas, tempo para obtenção da curva é longo, pois cada ponto da curva leva cerca de 7 dias, e requer manuseio delicado com o papel.

2.2.2 Tensiômetros

Os tensiômetros são bastante utilizados na agricultura onde a sucção máxima de interesse é normalmente 1atm, com algumas exceções. Na engenharia, os valores de sucção relevantes em análises de projetos atingem valores mais elevados.

A limitação do valor máximo de sucção que se pode medir com um tensiômetro é devida à ocorrência de um fenômeno chamado de cavitação. A cavitação nos tensiômetros não é um fenômeno de responsabilidade exclusiva da água. A água em si pode sustentar esforços de tração de centenas de megapascal **(MARINHO, 1997)**.

A presença de ar no sistema causa uma resposta lenta do instrumento em relação às mudanças na pressão de água do solo, isso acontece por causa da expansão e da contração do ar com a mudança de pressão **(CASSEL e KLUTE, 1986)**.

A Figura 2.12 mostra os componentes básicos de um tensiômetro convencional, indicando o sentido do fluxo da água quando o solo possui sucção.

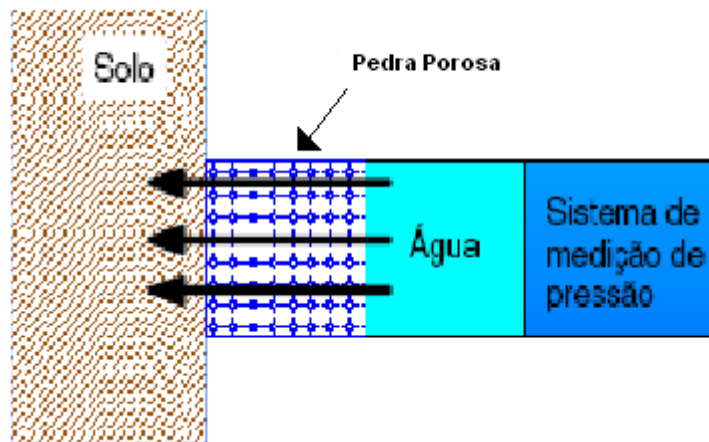


Figura 2.12 – Componentes básicos de um tensiômetro (Marinho, 1997).

O elemento poroso é geralmente de material cerâmico (pedra porosa). Este elemento é a interface entre o solo e a água do sistema de medição. A pedra porosa mantém a continuidade hidráulica entre o solo e o sistema de medição.

A pressão da água do tensiômetro, induzida pela sucção do solo, pode ser medida por sensores apropriados. São utilizados 3 tipos de sensores de pressão :

- a) Manômetro de mercúrio
- b) Manômetro de vácuo
- c) Transdutor elétrico de pressão

Conforme **STANNARD (1992)**, os manômetros de vácuo indicam sucção entre zero e 1atm. Os mesmos são posicionados um pouco abaixo do final do tubo do tensiômetro, sendo o espaço superior reservado para a captação de ar.

Os tensiômetros que utilizam manômetros de vácuo possuem fácil manutenção, porém não é grande a acurácia destes equipamentos (Figura 2.13).

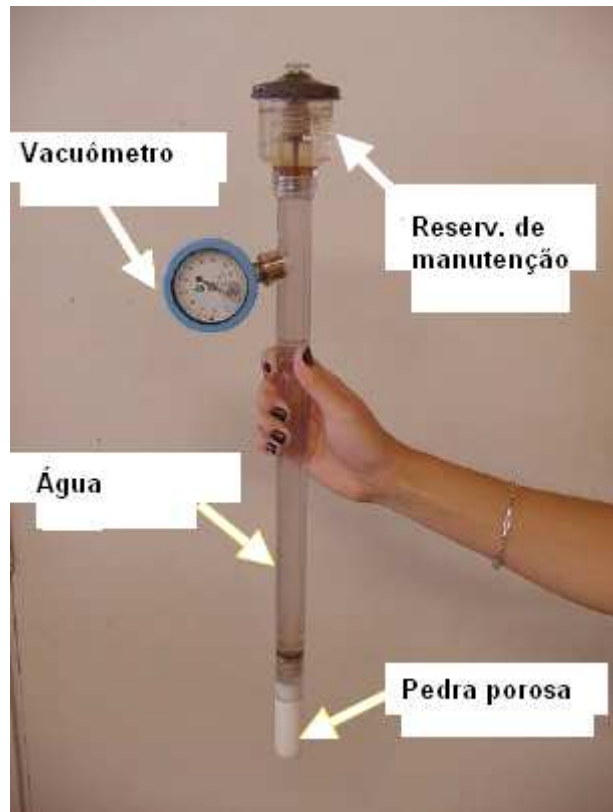


Figura 2.13 – Tensiômetro com manômetro de vácuo.

Segundo **VIEIRA (1999)**, a eliminação dos núcleos de cavitação exige uma técnica especial que a maioria dos tensiômetros comercializados não pode suportar. Minimiza-se o problema usando-se água deaerada e destilada, quando for feita a saturação dos tensiômetros.

CASSEL e KLUTE (1986) listam alguns motivos pelos quais os tensiômetros não funcionam adequadamente:

- a) Inadequada montagem do tensiômetro;
- b) Não realização de testes antes da sua instalação;
- c) Inadequada instalação do tensiômetro;
- d) Manutenção imprópria do tensiômetro;

- e) Local impróprio para armazenamento do tensiômetro após o mesmo ser removido do solo.

Alguns procedimentos devem ser realizados com cuidado durante a saturação e calibração do tensiômetro, segundo **MARINHO (1997)**.

A saturação do elemento poroso pode ser feita por simples imersão, quando a pedra porosa utilizada é de até 1 bar de entrada de ar.

A pedra porosa deve ser limpa quando se verificar que os poros estão obstruídos. Deve-se utilizar uma lixa fina, limpando a superfície com uma solução morna de HCl (uma parte de HCl para três partes de água).

Cuidados no momento de saturação do tensiômetro, pois pode haver bolhas de ar que ficam junto das paredes do tubo. Maiores detalhes de como evitar estas bolhas podem ser vistos em **STANNARD (1992)**.

O contato da pedra porosa com o solo deve ser tal que permita uma ótima interação com a água intersticial. Para isto, deve-se instalar a pedra porosa imersa em uma lama de solo (mesmo solo de onde será instalado o tensiômetro).

Nas leituras realizadas nos manômetros, deve-se levar em conta a coluna de água representada pela distância entre a pedra porosa e o sistema de leitura. A expressão 2.17 mostra como é feita a correção em função do comprimento do tensiômetro.

$$\psi(kPa) = \text{Leitura}(kPa) - (h_c \cdot \gamma_w) \quad (2.17)$$

Onde:

h_c = altura de coluna de água (m)

γ_w = peso específico da água (kN/m^3)

Dentre as vantagens dos tensiômetros pode-se destacar:

- a) Leituras diretas
- b) Permite fazer leituras contínuas quando associado com transdutores de pressão
- c) Baixo custo
- d) Utilização em campo

E as desvantagens são:

- a) Uso limitado a sucções de até 100 kPa
- b) Necessita bom contato entre a água do tensiômetro e a água do solo (se o solo varia de volume o contato com o solo pode ser perdido)
- c) Necessita manutenção permanente devido à difusão de ar para dentro do tensiômetro.

2.2.3 Placa de Pressão (Técnica de Translação de Eixos)

A técnica de translação de eixos foi desenvolvida com o objetivo de se evitar que a água do sistema de medição e a água intersticial trabalhem com valores de pressão abaixo do da atmosfera (**HILF, 1956 citado em MARINHO, 1997**). Em outras palavras, altera-se o referencial da pressão da água da condição atmosférica, onde a pressão atmosférica é aumentada. Admitindo-se que isto produz igual aumento na pressão da água (u_w), permanece a diferença ($u_a - u_w$), ou seja, a sucção é mantida e a pressão na água é aumentada, levando-a até valores mensuráveis (**VILAR, 1997 (b)**).

Em princípio, a técnica da translação de eixos pode ser usada tanto acoplada a outros equipamentos para medição de outras propriedades (resistência, compressibilidade, etc), controlando as sucções durante estes ensaios, quanto para impor sucção em amostras de solo.

Para este método, são necessárias placas porosas especiais que permitem o fluxo de água, porém não o de ar. A sucção máxima a ser aplicada depende da pressão de entrada de ar nas placas porosas, que podem até atingir a 1500 kPa (**SOTO, 2004**).

Não é recomendável para medições de sucções abaixo de 10 kPa (**LIBARDI, 1995**). A permeabilidade do ar é praticamente nula num solo não saturado com altos valores de grau de saturação (**BOCKING e FREDLUND, 1980**), além de necessitar de equipamentos relativamente caros.

Maiores informações sobre as limitações da técnica da translação e eixos podem ser vista em **BOCKING e FREDLUND (1980)**.

A Figura 2.14 mostra o aparelho de Richards, utilizado na técnica de translação de eixos.



Figura 2.14 – Aparelho de Richards utilizado na técnica de translação de eixos.

2.3 Solos Tropicais Lateríticos

De particular interesse para o Brasil é a identificação dos solos lateríticos, típicos da evolução de solos em clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas e em locais com boas condições drenagem. Esses solos têm sua fração argila constituída predominantemente de minérios cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, donde sua peculiar coloração avermelhada. Estes sais se encontram, geralmente, recobrendo agregados de partículas argilosas.

Segundo **MIGUEL et al (2007)**, a formação dos solos lateríticos se dá pela atuação dos processos de alteração pedológica que atuam após, ou

conjuntamente, com os mecanismos de desagregação e decomposição provocados pelos intemperismos físicos e químicos, com a atuação mais intensa dos químicos. O processo de laterização se caracteriza pela intensa migração de partículas sob a ação de infiltrações e evaporação, dando origem a um horizonte superficial poroso, permanecendo quase exclusivamente os minerais mais estáveis (quartzo, magnetita, ilmelita e caulinita).

2.3.1 Intemperismo

O intemperismo é um processo que modifica a estrutura e as propriedades do solo, independente de sua história de tensões. A gênese dos solos residuais apresenta desta forma, um problema particular em relacionar a estrutura do solo e sua história de tensões, pois ambos mudam continuamente **(REIS, 2004)**.

Os solos estão sujeitos a três tipos de intemperismo: o intemperismo físico, o intemperismo químico e o intemperismo biológico, podendo estar sujeitos a combinações de efeitos dos três tipos ao mesmo tempo.

O intemperismo físico atua no sentido de alterar o tamanho das partículas, quebrando o material de origem, sem variação significativa na composição. São processos físicos, por exemplo, alívio de tensões pela erosão, deformação por variação de temperatura e congelamento, e pressões de cristalização de sais depositados em fraturas, os responsáveis pelo intemperismo mecânico, que tem como conseqüências modificações nas dimensões dos indivíduos mineralógicos das rochas e na área e no volume por eles ocupado **(REIS, 2004)**.

O intemperismo químico é um processo caracterizado pela ocorrência de reações químicas entre os minerais constituintes da rocha e soluções aquosas de diferentes composições, que modificam os minerais originais das rochas transformando suas características químicas e físicas.

Segundo **MITCHELL (1976)** processos químicos, principalmente hidrólise e oxidação, alteram os minerais da rocha original para formar argilo-minerais mais estáveis.

Conforme **REIS (2004)**, o intemperismo biológico inclui ambos, ação física (por exemplo, fendilhamento pela penetração da raiz) e ação química, por exemplos, oxidação bacteriológica, redução de ferro e compostos sulfúricos, conforme sugerido por **PINGS (1968)**. Os processos biológicos resultantes da ação dos seres vivos, animais ou plantas, tanto podem ser de natureza física ou química, pois podem não só provocar a desagregação, mas também modificações nas composições mineralógica e química das rochas.

A análise da geoquímica do intemperismo (meteorização), em climas quentes e de alta pluviosidade, segundo **GUIMARÃES (1996)**, conduz às seguintes conclusões:

- a) O clima quente e de alta pluviosidade faz com que os silicatos das rochas, como uma consequência da grande quantidade de água das chuvas abundantes, que as atravessam, e da temperatura elevada, sofram uma hidrólise acentuada, e o resultado será a libertação dos íons das estruturas dos silicatos (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , etc).
- b) Os íons libertados têm destinos diferentes.
- c) Os íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} são eliminados do complexo de meteorização, pelas águas das chuvas que o atravessam.

- d) O íon Si^{4+} pode ser eliminado do complexo de meteorização ou ser, parcialmente, retido.
- e) Os íons Al^{3+} e Fe^{2+} permanecem, em grande parte, dentro do complexo de meteorização, originando neoformações, como a gibbsita, a hematita e a goethita. O Si^{4+} , que não for eliminado, associa-se ao Al^{3+} para originar a caulinita.
- d) A gênese dos minerais indicados depende da intensidade da lixiviação, ligada à maior, ou à menor facilidade, com que ocorre a drenagem da água do complexo de meteorização, ou dos perfis dos solos, que lhe estão associados.

Segundo **REIS (2004)**, nos meios bem drenados os íons Si^{4+} dissolvidos são eliminados do complexo de intemperismo e as soluções com os produtos, derivados da hidrólise dos silicatos, formam a gibbsita e a goethita, sobretudo quando a rocha é pobre em íons Si^{4+} . Esta é a descrição de um processo pedogenético, que se designa por ferratização e, muitas vezes, designado por “latolização” ou meteorização “laterítica”.

Os grãos minerais que constituem os solos residuais são os principais materiais que dão origem aos solos transportados. Os solos coluvionares de grande espessura e extensão, originados de recuo de encostas, possuem características de isotropia e homogeneidade mineralógica e granulométrica (**VAZ, 1996**). Esse recuo ocorre devido à ação da erosão que age sobre uma encosta íngreme, deixando o solo da parte superior da encosta, depositado na parte inferior, atrás da frente de recuo, sempre deixando a presença de morros-testemunho. No entanto, a presença de feições superimpostas e a diferenciação pedológica podem afetar a sua isotropia. Além disso, esses solos podem sofrer processos pedogenéticos, após terem sido formados pelo intemperismo, como por exemplo, a laterização (**MIGUEL et al, 2007**).

2.3.2 Estrutura Cimentada

A estrutura de um solo residual é em grande parte o resultado do processo de intemperismo pelo qual o solo é formado. A estrutura freqüentemente envolve uma ampla faixa de tamanho de poros, alguns sendo tão grandes que normalmente seriam associados com o tamanho dos grãos do solo (**REIS, 2004**).

Segundo **NEWILL (1961)** e **WALLACE (1973)**, em solos com moderados graus de intemperismo, alguma cimentação pode ser herdada da rocha mãe, mas em solos residuais completamente intemperizados, ela é mais comum de ser devida aos efeitos de cristalização, à alteração mineral e à precipitação de material cimentante durante o intemperismo.

Segundo **VAUGHAN (1988)**, as possíveis causas de vínculo entre partículas são:

- a) Cimentação através da deposição de carbonatos, hidróxidos, matéria orgânica, etc;
- b) Solução e re-precipitação de agentes cimentantes, tais como silicatos;
- c) Crescimento desta união durante a alteração química dos materiais.

Segundo **VAUGHAN (1985)**, a presença de cimentação pode revelar ao solo as seguintes características:

- a) A presença do intercepto de coesão, c' , (e alguma resistência não drenada não confinada) em solos residuais saturados;
- b) A presença de uma “pressão aparente de pré-adensamento” (**VARGAS, 1953**) não relacionada com a história de tensões ou densidade;

- c) Resposta rígida a baixas tensões confinantes e comportamento mais plástico, a maiores tensões, caracterizando uma superfície de plastificação.

VAUGHAN (1985) relata que os solos residuais lateríticos e saprolíticos em particular apresentam um comportamento determinado, principalmente, pela estrutura formada pelo processo de intemperismo. Apesar de estes solos serem de natureza bastante diversa, eles apresentam algumas características similares, dentre as quais, alta permeabilidade, uma envoltória de resistência apresentando um significativo intercepto de coesão e uma tensão de escoamento (ou cedência) separando um comportamento mais rígido de um mais compressível.

Segundo **REIS (2004)**, existe praticamente um consenso na afirmação de que a existência de um alto valor de intercepto de coesão e da pressão de pré-adensamento virtual é devida à gênese destes solos, aliada à sua condição não saturada, ou seja, devida às ligações existentes entre as partículas, geradas durante o processo de intemperismo e fortalecidas pela sucção matricial.

LEROUÉIL & VAUGHAN (1990) apresentam um resumo dos principais fatores afetando a forma da superfície de escoamento inicial de solos naturais. Para alguns solos, o efeito estrutura é tão importante na determinação do comportamento do solo quanto o seu índice de vazios inicial e a sua história de tensões.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local da Pesquisa

A pesquisa foi realizada no Campo Experimental de Mecânica de Solos e Fundações (CESMF) da Unicamp (Campus Campinas), localizado na FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola (Figura 3.1).

No local em questão, foram realizados diversos ensaios de campo como: sondagens dos tipos SPT-T (*Standard Penetration Test with Torque Measurements*), CPT (*Cone Penetration Test*), DMT (*Dilatômetro de Marchetti*) e outros. Os detalhes de caracterização deste perfil podem ser vistos em **GIACHETTI (1991)**, **CAVALCANTE et al (2006)**. Alguns resultados destes ensaios estão apresentados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4.

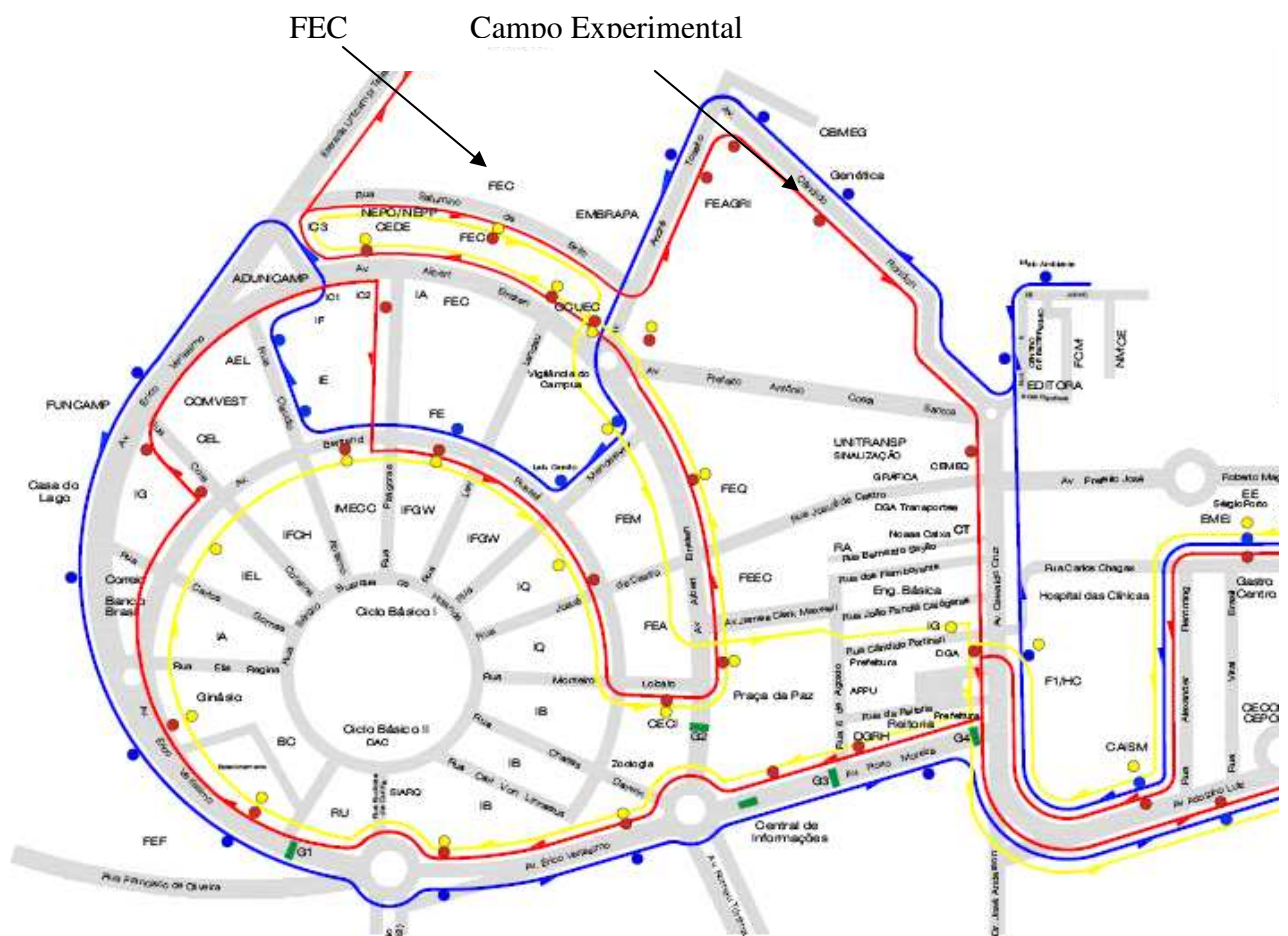


Figura 3.1 – Localização do Campo Experimental dentro do Campus da UNICAMP.

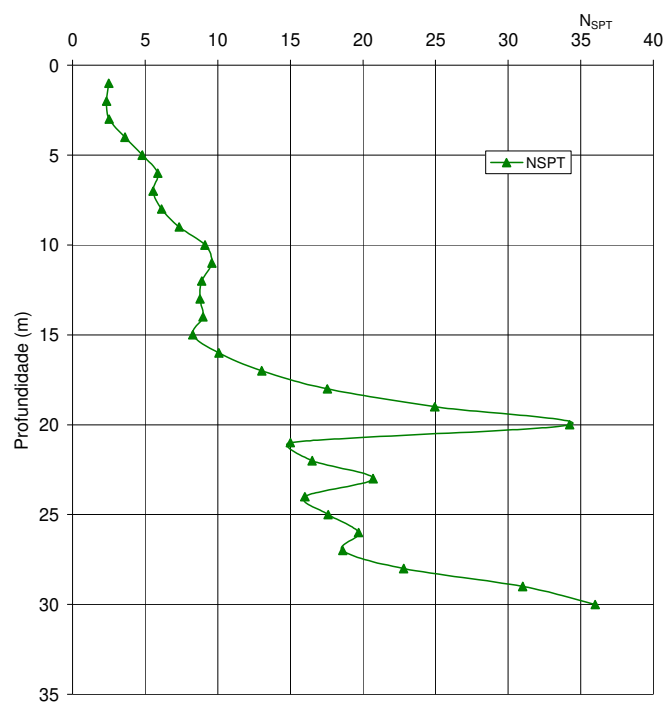


Figura 3.2 – Sondagem de simples reconhecimento – SPT (Cavalcante et al, 2006).

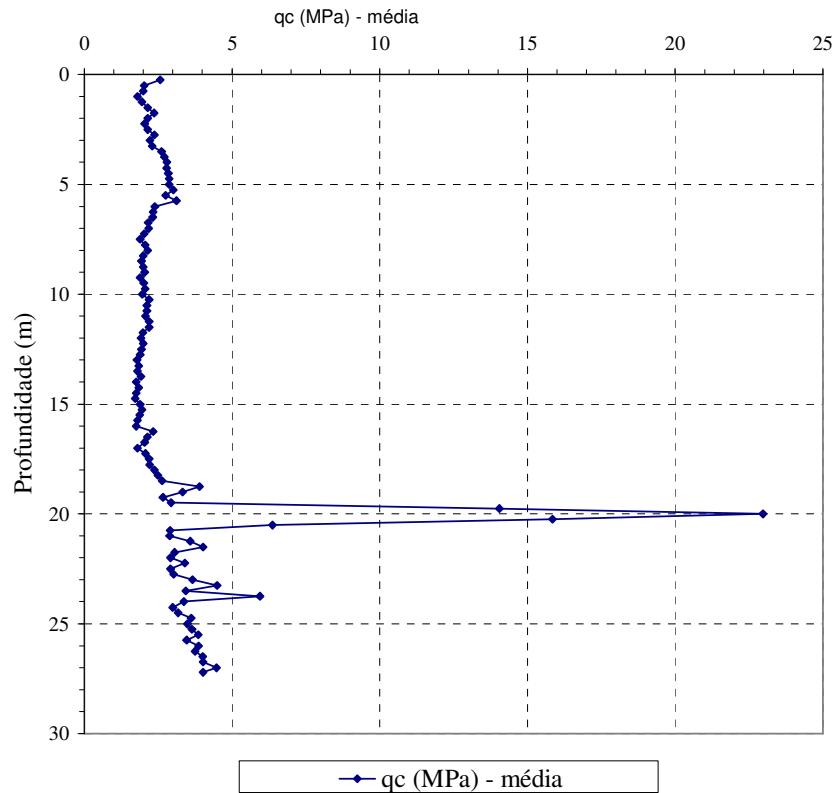


Figura 3.3 – Sondagem de penetração estática (resistência de ponta) - CPT (Cavalcante et al, 2006)

Segundo **ALBUQUERQUE et al (2001)**, o subsolo da região é formado por Migmatitos básicos, ocorrendo rochas intrusivas básicas da Serra Geral (Diabásio). Perfazem 98 km² da região de Campinas, ocupando 14% da área total.

O perfil de solo do Campo Experimental, até 6,5 m de profundidade, apresenta uma camada de argila silto-arenosa, porosa, de origem coluvionar, composta, predominantemente, por argilo-minerais do tipo caulinita, quartzo e óxidos de ferro (hematita), provavelmente servindo como cimentação entre os grãos de argila e de areia (**MIGUEL et al, 2007**).

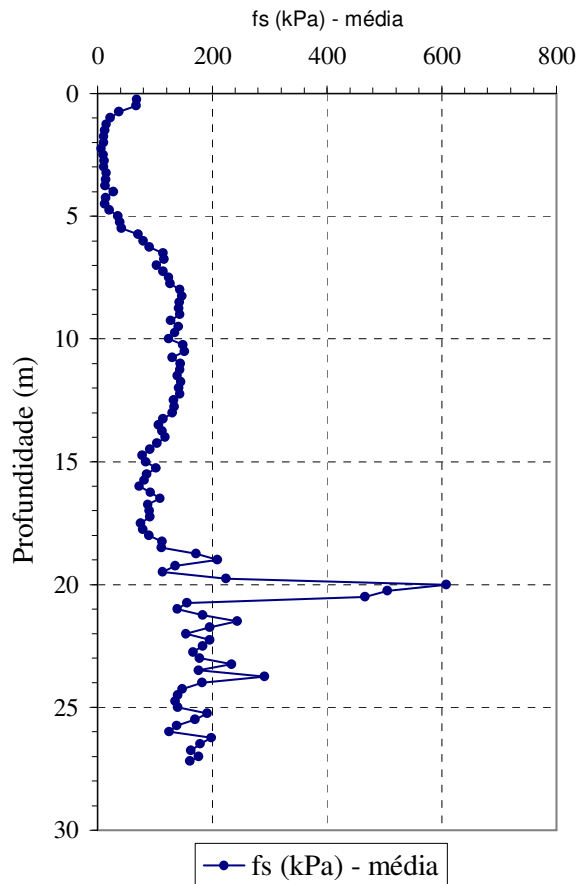


Figura 3.4 – Sondagem de penetração estática (atrito lateral) – CPT (Cavalcante et al, 2006)

Até 6,5 m de profundidade, o perfil de solo, referente à camada superficial coluvionar, não apresenta anisotropia com relação à permeabilidade, visto que os valores de condutividade hidráulica vertical e horizontal são bastante próximos e típicos de areias finas, como visto em **MIGUEL et al (2007)**, constatando a estrutura macroporosa desse solo oriunda dos processos de laterização ocorridos.

O material subjacente à profundidade de 6,5 m até 7,0 m se refere a uma camada de silte arenoso, residual de Diabásio, que sofreu laterização intensa, porém não possui plasticidade, composto basicamente por gibbsita e por óxidos de ferro do tipo goethita, além de quartzo.

O solo da camada subjacente de silte argilo-arenoso, não laterítico, até 20 m de profundidade, possui características herdadas da rocha de origem. O nível d'água se apresenta a 17,0 m.

3.2 Coleta de Amostras de Solo

As amostras de solo utilizadas nesse trabalho foram do tipo indeformadas, oriundas da camada superficial coluvionar e laterítica do perfil do CEMSF.

Nesse local, blocos de solo indeformado, de dimensões próximas a $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$, foram retirados nas profundidades de 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m, 4,5 m, 5,5 m e 6,5 m, por meio de escavação de um poço de inspeção com diâmetro de um metro, seguindo as recomendações da NBR 9604/1986.

Os blocos foram retirados das paredes laterais do poço, devidamente parafinados e etiquetados, para manter o teor de umidade e a estrutura de campo, e mantidos em câmara úmida dentro do Laboratório de Mecânica dos Solos, Pavimentação e Topografia da Faculdade de Engenharia Civil (FEC) da Unicamp.

Além dos blocos, foram retiradas amostras deformadas de solo da base do poço, nas profundidades de 1,5 m, 2,5 m, 3,0 m, 3,6 m, 4,3 m, 5,0 m, 5,5 m, 6,0 m, 6,8 m e 7,0 m. Essas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetadas, e reservadas no mesmo laboratório supracitado.

3.3 Ensaios de Caracterização Geotécnica

De modo a representar a condição de umidade natural de campo, foram determinados os teores de umidade das amostras pelo método da estufa, tão logo que as mesmas foram retiradas do poço.

Ensaios de massa específica dos sólidos foram realizados nas amostras deformadas das profundidades de 1,5 m, 2,5 m, 3,0 m, 4,3 m, 5,0 m, 6,0 m, 6,8 m e 7,0 m, de acordo com as recomendações da NBR 6508/1984, e foram apresentados por **MIGUEL et al. (2007)**, assim como os demais ensaios abaixo descritos.

Ensaios de granulometria conjunta também foram realizados nas amostras deformadas das profundidades de 1,5 m, 2,5 m, 3,0 m, 4,3 m, 5,0 m, 6,0 m, 6,8 m e 7,0 m, seguindo as recomendações da NBR 7181/1984, porém, com e sem a utilização de defloculante Hexametáfosfato de Sódio.

Os dois procedimentos adotados tiveram o objetivo de analisar a estrutura microagregada típica dos solos tropicais lateríticos argilosos, que os fazem possuir textura de siltes e de areias finas.

Ensaios de Limites de Liquidez e de Plasticidade também seguiram os procedimentos das NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, respectivamente, e foram realizados para as amostras de profundidades de 1,5 m, 2,5 m, 3,0 m, 4,3 m, 5,0m, 6,0 m, 6,8 m e 7,0 m.

3.4 Ensaios Químicos Mineralógicos

3.4.1 Ensaios de Fluorescência de Raios-X

Os ensaios de Fluorescência de Raios X foram realizados em amostras deformadas, nas profundidades de 1,5m, 2,5m, 3,0m, 4,3m 5,0m, 6,0m, 6,8m e 7,0m, utilizando o equipamento: Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X de Energia dispersiva Shimadzu EDX 700.

As amostras foram pesadas (300 mg, triplicata), em celas de fluorescências convencionais, com o fundo contendo um filme de Mylar® (politerftalato) de 2,5 µm de espessura. Assim preparadas, elas foram irradiadas, também em triplicata, nas seguintes condições: Tubo de raios-X- Voltagem aplicada: 15kV, corrente aplicada: 200 µA, tempo de irradiação: 200s, atmosfera de irradiação: vácuo (30 Pa)

Utilizaram-se os padrões certificados para calibração, a saber: NIST-SRM 1646a, NIST-SRM 2709, NIST-SRM 2710, NIST-SRM 2711. A calibração multivariada foi feita por quimiometria (*PLS_Partial Least Square Regression*), criando modelos por meio da utilização do Programa: The Unscrambler, versão 9.2, da CAMO. Assim, foram tiradas as médias dos espectros das amostras e seus valores de concentração foram obtidos através dos modelos descritos acima.

3.4.2 Ensaios de Difração em Raios-X

Os ensaios de difração de raios-X foram realizados com o feixe de raios-X incidindo sobre as amostras na forma de pó (considerando que a distribuição dos cristalitos é aleatória), provenientes das profundidades de 1,5m, 2,5m, 3,0m, 4,3m, 5,0m, 6,0m, 6,5m e 7,0m. Em teoria, um feixe será difratado pelos cristalitos, que estão orientados de forma a difratar o feixe incidente. O feixe incidente forma um ângulo θ com os planos atômicos difratantes e 2θ com o detector (satisfazendo a lei de Bragg). O registro das intensidades difratadas, coletadas pelo detector, corresponde a um difratograma de raios-X da amostra e representa uma “impressão digital” dela. A análise dos difratogramas obtidos com condições adequadas, através do método desenvolvido por Hugo Rietveld, forneceu informações estruturais das amostras de solo ensaiadas.

3.4.3 Confeccção de Lâminas Delgadas e Impregnadas das Amostras.

Lâminas delgadas e impregnadas foram confeccionadas através de amostras indeformadas coletadas nas profundidades de 1,5m, 2,5m, 3,5m, 4,5m, 5,5m e 6,5m e de pequenos fragmentos indeformados da amostra coletada a 7,0m. Foram confeccionadas lâminas do plano horizontal das amostras, paralelo à superfície do perfil, e do plano perpendicular à superfície do mesmo. As lâminas foram impregnadas com resina acrílica em pequenas quantidades (impregnação por capilaridade), utilizando-se dessecador a vácuo, e depois com azul de metileno com a finalidade de obtenção da distribuição dos poros. Após o

endurecimento das amostras, elas foram fatiadas para confecção das lâminas delgadas. A interpretação dessas lâminas foi realizada por meio de um microscópio petrográfico com objetivas de aumento 2,5 X, 10,0X, 25,0X, 40,0X e 50,0X, associadas com os dados de Difração de Raios X e de Fluorescência de Raios X.

3.5 Ensaios para Medição ou Imposição da Sucção Matricial

3.5.1 Método do Papel Filtro

Para a determinação da curva de retenção de água foram confeccionados vários corpos-de-prova, a partir das amostras indeformadas. Estes corpos-de-prova foram moldados em anéis metálicos de 2,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro, por meio das amostras coletada nas profundidades de 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m, 4,5 m, 5,5 m e 6,5 m.

Na técnica do papel filtro, foram utilizados dois corpos-de-prova por profundidade.

As curvas de retenção de água foram obtidas pelos processos de umedecimento e secagem (drenagem). Para o processo de secagem, os corpos-de-prova foram inicialmente saturados.

Para saturar os corpos-de-prova por capilaridade, os mesmos foram colocados sobre uma pedra porosa, previamente saturada com água destilada,

durante um período de 48 horas. O conjunto (pedra porosa e corpo-de-prova) foi colocado em uma bandeja com água destilada. A lâmina d'água da bandeja atingia metade da altura da pedra porosa, para que a mesma se mantivesse saturada e as amostras pudessem saturar-se por capilaridade. Entre o corpo-de-prova e a pedra porosa, havia uma folha de papel filtro para que não ocorresse perda do material.

Para o processo de umedecimento, os corpos-de-prova foram levados à estufa por 24 horas, para começar os ensaios a partir de uma condição muito baixa de umidade, entre zero e 1%.

MARINHO (1994) propõe realizar os processos de secagem e umedecimento a partir da umidade natural de campo, mas, nessa pesquisa, preferiu-se começar pelas extremas condições de umidade para observar o fenômeno da *histerese*.

O ensaio foi realizado em uma sala com temperatura controlada em temperatura de 20° C. Os papéis filtro utilizados foram da marca Whatman Nº 42, retirados da caixa e colocados imediatamente em contato com os corpos-de-prova. Os corpos-de-prova receberam filme plástico de PVC na parte inferior do anel metálico, presos nas laterais dos anéis, para evitar a perda de material durante o manuseio dos corpos-de-prova. Depois disso, cada conjunto (corpo-de-prova e papel filtro) foi protegido por papel alumínio, como sugerido por **FEUERHARMEL et al. (2004)**, e uma sobrecarga (tampa de cápsula de alumínio) foi colocada para garantir que houvesse um total contato entre o papel e o solo. Todo esse conjunto foi protegido novamente, mas agora com o filme plástico de PVC, e colocado dentro de um saco plástico fechado que, por sua vez, foi colocado dentro de uma caixa plástica também fechada, para garantir que a variação de umidade do ar não interferisse no equilíbrio do papel filtro com o solo. Todo esse procedimento foi feito o mais rápido possível, para evitar que o papel filtro ficasse em equilíbrio com o ar, isto é, com a umidade relativa do ar.

Os corpos-de-prova foram deixados na caixa plástica por sete dias, para que o tempo de equilíbrio, entre o papel filtro e o solo, fosse atingido. Passados sete dias, os corpos-de-prova foram retirados da caixa e do saco plásticos, seguindo as etapas: retirava-se a proteção de filme plástico de PVC e de alumínio, juntamente com o sobrecarga, e, depois, o papel filtro do contato com o solo. Na sequência, o papel era colocado dentro de uma cápsula de alumínio, com peso conhecido, para ser pesado em uma balança com resolução de 0,1mg. Este procedimento, desde a retirada das camadas de proteções até a colocação do papel filtro na cápsula, foi realizado num tempo em torno de 6 segundos, para evitar que o papel filtro perdesse ou ganhasse água.

Como a cápsula era bem mais pesada do que o papel filtro, foi feita uma pesagem do papel filtro sem a cápsula e depois com a cápsula, para verificar se havia alguma diferença devido ao peso da cápsula ser bem maior. Verificou-se que cápsula não induzia a erros, e fornecia valores iguais aos do papel filtro pesado diretamente (sem a cápsula).

Pesado o conjunto cápsula e papel filtro, o papel filtro era levado à estufa por 24 horas. **FEUERHARMEL et al. (2004)** recomendam que o papel filtro deva permanecer por um período de 48 horas na estufa a 60° C. Como a temperatura da estufa do laboratório fornecia uma temperatura maior, 120° C, o papel filtro foi deixado por apenas 24 horas, embora outros autores sugiram um tempo bem menor para secagem, como **SOTO (2004)**.

Para determinar outros valores de teores de umidade de equilíbrio pelo processo de umedecimento da amostra, adicionava-se, uniformemente, certa quantidade de água destilada sobre a superfície superior do corpo-de-prova, com o auxílio de um conta-gotas, e esperavam-se duas horas para que a água infiltrasse no corpo-de-prova (equilíbrio) e não ficasse acumulada sobre a parte superior do mesmo. Depois disso, repetia-se o processo acima descrito.

No processo de secagem, ou drenagem, o corpo-de-prova esteve secando em frente a uma janela, para que, com o calor do sol, a água contida no solo seja evaporada. Quando atingidos a massa e o teor de umidade esperados, o processo de colocação do papel filtro era repetido. A partir de certa umidade, não se conseguiu mais perder água por evaporação, com a amostra ao ar, por isto levaram-se as amostras por alguns minutos a estufa para que conseguissem perder mais água.

Após a secagem do papel filtro, este era novamente pesado, sempre atentando para as variações de umidade, e os corpos-de-prova também, para estimar o teor de umidade gravimétrico.

Em todas as fases do ensaio, o manuseio do papel filtro foi feito com uma pinça metálica, para evitar a alteração das características do papel.

Calcularam-se os teores de umidade de equilíbrio do papel filtro e do solo, no qual, cada umidade gravimétrica corresponde uma sucção matricial estimada a partir do teor de umidade do papel filtro, utilizando as curvas de calibração para o papel Whatman N^o 42, obtidas por **CHANDLER et al. (1992)**. Esses valores de sucção e de teor de umidade correspondem a um ponto da curva de retenção de água.

Foi feita uma verificação do papel filtro para certificar-se que a curva de calibração obtida por **CHANDLER et al. (1992)** era válido para o lote de papel filtro utilizado nos ensaios.

Utilizou-se a técnica de translação de eixos para fazer esta verificação. A placa porosa foi saturada e colocada no aparelho de Richards, tirou-se o excesso de água que restava em cima na placa para não interferir nos resultados, pois poderia fornecer mais água ao papel filtro. Colocou-se o papel sob a placa porosa e aplicou-se uma pressão de 200 kPa. Após uma semana retirou-se o papel do

aparelho e foi determinado o teor de umidade do papel. O papel foi deixado uma semana no aparelho para que ele entrasse em equilíbrio com a sucção imposta. Com a umidade do papel, foi utilizada a expressão das curvas de **CHANDLER et al. (1992)**, para verificar qual a sucção correspondente. Obteve-se um valor de teor de umidade, que correspondia a sucção imposta (200 kPa).

3.5.2 Método de Translação de Eixos

Esses ensaios foram apresentados por **MIGUEL (2007)**, nos quais seis corpos-de-prova de solo indeformado, para cada uma das profundidades de 1,5m, 2,5m, 3,5m e 4,5m, foram levados para o Aparelho de Richards e colocados sobre uma pedra porosa de baixa pressão de entrada de ar (para sucções entre zero e 100 kPa) e sobre uma pedra porosa de alta pressão (para sucções entre 100 kPa e 1000 kPa). Estas pedras porosas se encontravam saturadas.

Metade dos corpos-de-prova (12) foi saturada e submetida a sucessivas pressões de ar, assumidas como valores de sucção matricial gradualmente maiores, configurando um procedimento de secagem. A outra metade (12), seca em estufa, foi submetida a sucessivas pressões de ar, gradualmente menores, configurando um procedimento de umedecimento.

Os corpos-de-prova, assim que moldados em anéis, alguns deles saturados, outros secos em estufa, foram pesados e suas partes inferiores foram vedadas por pano tipo filtro, preso com borracha nas paredes externas dos anéis, a fim de evitar perda de solo durante o manuseio.

Os estágios de sucção aplicados para o procedimento de secagem foram: 0kPa, 1kPa, 2kPa, 5kPa, 8kPa, 10kPa, 20kPa, 30kPa, 40kPa, 60kPa, 80kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa, 500kPa, 800kPa e 1000kPa. Já para o procedimento de umedecimento, os estágios de sucção foram: 450kPa, 400kPa, 300kPa, 250kPa, 150kPa, 100kPa, 80kPa, 70kPa, 40kPa, 30kPa, 20kPa, 10kPa, 6kPa, 4kPa e 0kPa.

Os corpos-de-prova foram pesados em intervalos de tempos, até que não sofressem mais variação de massa. Assim, o sistema (solo - pedra porosa) pôde ser considerado em equilíbrio e a pressão elevada ou diminuída, passando para o seguinte estágio de sucção matricial.

No final do ensaio, os corpos-de-prova foram para a estufa ou foram saturados, determinando-se o teor umidade para cada estágio de pressão (sucção matricial), que permitiu obter o par: sucção matricial e teor de umidade gravimétrico, para a construção das Curvas de Retenção de água.

Para certificar-se que a pedra porosa estava sempre saturada, a pedra que estava dentro do Aparelho de Richards era trocada por outra previamente saturada.

3.6 Monitoramento da Sucção Matricial em Campo

O monitoramento da sucção matricial em campo foi feito utilizando seis tensiômetros, dois de comprimento de 0,6 m, dois de 1,2 m, um de 2 m e um de 3 m, instalados dentro de uma trincheira de 1 metro de profundidade e dispostos a

1 metro de distância um do outro. Assim, as profundidades de análise foram: 1,6m, 2,2m, 3m e 4m.

Foi escavada esta trincheira de um metro de profundidade, devido o primeiro metro da camada ser um aterro e para que os tensiômetros ficassem apoiados em cotas próximas à dos blocos de amostras indeformadas.

Os tensiômetros foram calibrados em laboratório, com o máximo cuidado para que se obtivessem saturações sem o surgimento de ar (bolhas) dentro dos tensiômetros, principalmente, nas paredes internas dos mesmos. Isto foi feito, utilizando água sob alta temperatura, em torno de 50° C, e com a aplicação de vácuo.

Os tensiômetros foram instalados no CEMSF por meio de um pré-furo. Antes da instalação foi feita uma pasta com o solo retirado do local (solo com água, formando praticamente uma lama) e colocada em contato com a pedra porosa. Frequentemente os tensiômetros eram calibrados, colocando mais água deaerada em seu interior e tentando, ao máximo, retirar o ar de dentro deles, utilizando uma seringa.

Os tensiômetros utilizados são os convencionais, que possuem uma limitação na capacidade de leitura, pois eles só conseguem medir sucções abaixo de 100 kPa. Este valor pode ser ainda mais baixo, devido à altitude do local, do equipamento e do comprimento do tensiômetro, como foi colocado em **VIEIRA (1999)**. A Tabela 3.1 apresenta os valores limites dos tensiômetros adotados nesse trabalho em função da influência desses fatores.

Tabela 3.1 - Limites adotados para cada tensiômetro

Tensiômetros (-)	Comprimento (m)	Limites de Valores de Sucção Adotados (kPa)
T1	0,6	76,7
T2	0,6	76,7
T3	1,2	72,0
T4	1,2	72,0
T5	2,0	70,0
T6	3,0	68,0

O período de monitoramento da sucção matricial, juntamente com a obtenção dos dados climáticos (umidade do ar e pluviosidade), foi de março de 2006 à março de 2007. No mês de novembro, os tensiômetros foram retirados do CEMSF e levados para o laboratório para serem calibrados e saturados novamente, pois eles haviam sofrido cavitação devido aos baixos teores de umidade de campo, típicos desse período de estiagem e, conseqüentemente, altos valores de sucção matricial.

Passadas algumas semanas, eles foram reinstalados e demonstraram estar sem problemas. As umidades gravimétricas foram obtidas por meio da retirada de amostras deformadas do solo em pontos distantes, aproximadamente, 0,5 m dos tensiômetros, e em profundidades iguais às cotas de apoio dos tensiômetros (1,6 m, 2,2 m, 3,0 m e 4,0 m), semanalmente. As amostras foram coletadas com o auxílio de um trado e colocadas em cápsulas que foram pesadas e levadas à estufa, em laboratório.

Os dados climáticos foram obtidos pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) da Unicamp, situado cerca de 70 m do CEMSF, podendo assim considerar que esses dados são bastante confiáveis.

3.7 Modelos de Ajustes das Curvas de Retenção de Água

Para utilizar o modelo de **FREDLUND e XING (1994)**, a curva de retenção foi dividida em duas, visto que este modelo é utilizado para curvas com distribuição de poros unimodal. A primeira curva foi determinada para sucções que variavam de zero a 1000kPa, e a segunda curva para sucções de 1000 a 1000000kPa. Para obter os parâmetros do modelo, foi utilizada uma planilha de Excel, onde os valores dos parâmetros eram obtidos por tentativa. Os valores dos parâmetros eram alterados até encontrar uma curva que se aproximasse da obtida experimentalmente.

No modelo de **GITIRANA e FREDLUND (2004)** foi utilizada uma planilha de Excel, gentilmente fornecida pelo Prof. Dr. Gitirana, da Universidade Federal de Goiás. Para determinar este ajuste é preciso ter em mãos a curva obtida experimentalmente, pois é necessário fornecer alguns parâmetros para a planilha ajustar e encontrar o melhor valor de “a”. Os parâmetros que devem ser obtidos graficamente são: ψ_{b1} = sucção de entrada de ar no 1º trecho (macroporos); ψ_{res1} = sucção residual do 1º trecho (macroporos); S_{res1} = grau de saturação residual do 1º trecho (macroporos); ψ_{b2} = sucção de entrada de ar no 2º trecho (microporos); S_{b2} = grau de saturação na entrada de ar do 2º trecho (microporos); ψ_{res2} = sucção residual do 2º trecho (microporos); S_{res2} = grau de saturação residual do 2º trecho (microporos).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Ensaios Geotécnicos

Os resultados dos ensaios geotécnicos do solo da camada superficial, coluvionar do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CESMF) foram apresentados e analisados por **MIGUEL et al (2007)**.

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos principais índices físicos das amostras indeformadas ensaiadas, como Peso Específico Natural (γ_{natural}), Peso Específico dos Sólidos ($\gamma_{\text{sólidos}}$), Teor de Umidade Natural ou de Campo (ω_{campo}), Índice de Vazios (e), Porosidade (n) e Grau de Saturação (S_r). Observando esses valores, vê-se que as amostras possuem elevados índices de vazios e baixos graus de saturação, típicos de solos tropicais lateríticos. Os valores de Peso Específico dos Sólidos das amostras são relativamente altos, indicando a

presença de óxidos de ferro, os prováveis agentes cimentantes, oriundos dos processos hidrólise, que caracterizam os solos lateríticos.

Tabela 4.1- Valores de Índices Físicos das amostras indeformadas (Miguel et al, 2007).

Prof. (m)	γ_{natural} (kN/m ³)	$\gamma_{\text{sólidos}}$ (kN/m ³)	ω_{campo} (%)	e (-)	n (%)	S _r (%)
1,5	11,8	29,89	24,2	2,14	68,2	33,7
2,5	13,71	30,42	23,7	1,74	62,4	44,3
3,5	13,96	30,64	22,3	1,68	62,7	40,7
4,5	14,38	30,79	27,2	1,72	63,3	48,6
5,5	14,11	30,78	22,2	1,66	62,4	41,1
6,5	14,68	30,62	22,4	1,55	60,8	44,2

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram as curvas granulométricas das amostras de solo ensaiadas com e sem defloculante, respectivamente. As curvas granulométricas das Figuras 4.1 e 4.2, analisadas conjuntamente, indicam, para as amostras das profundidades de 1,5m a 6,0m, a presença de uma estrutura com microagregações de partículas finas, formando grumos (ou flocos). As partículas finas se agregam em função das atrações físico-químicas e da cimentação presente no perfil do solo, fruto dos processos de lixiviação sofridos. Na Figura 4.1, nota-se a presença das frações argila em maior expressividade devido à ação do defloculante que desagrega os grumos (flocos), constituídos de partículas finas aglomeradas. Na Figura 4.2, essas partículas de argila se mostram agregadas, pois não há a ação do defloculante, e, dessa maneira, se expressam como partículas de silte e areia fina, conforme visto em **MIGUEL et al (2007)**.

Analisando as mesmas curvas granulométricas, mas para a profundidade de 7,0m, percebe-se que a estrutura microagregada não se apresenta e a ação do defloculante torna-se indiferente, isto é, as partículas finas de argila não estão agregadas, formando grumos. A amostra da profundidade de 6,8m apresenta sua curva granulométrica sob ação do defloculante (Fig. 4.1) como transição entre as amostras com estrutura agregada (1,5m a 6,0m) e a amostra sem estrutura agregada (7,0 m). A fração argila diminui em contrapartida à fração arenosa.

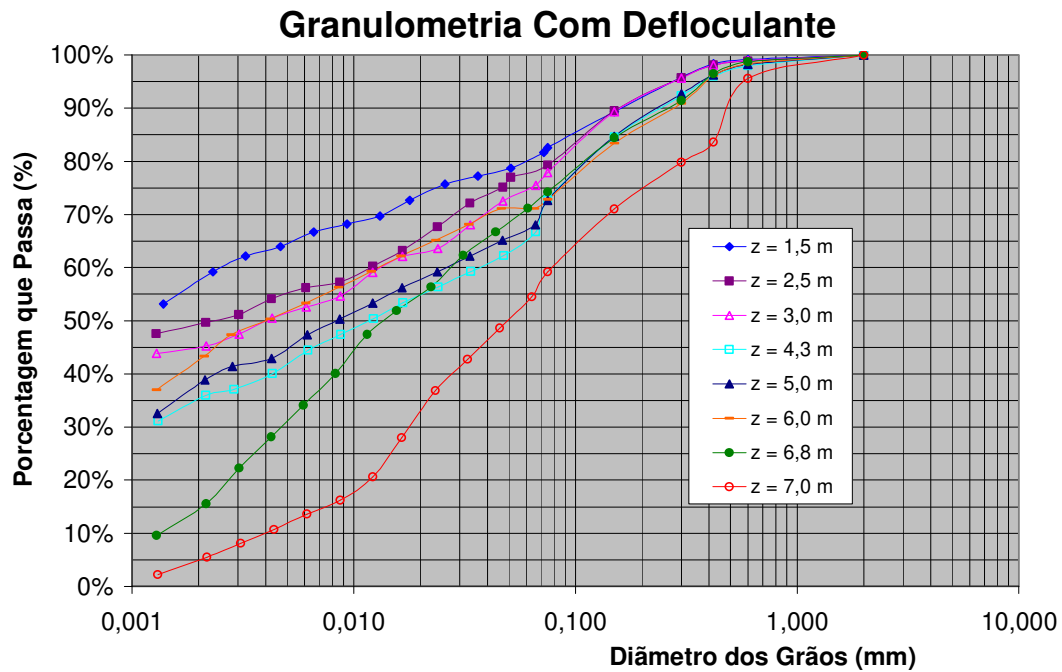


Figura 4.1 – Curvas Granulométricas obtidas com o uso de defloculante (Miguel et al, 2007).

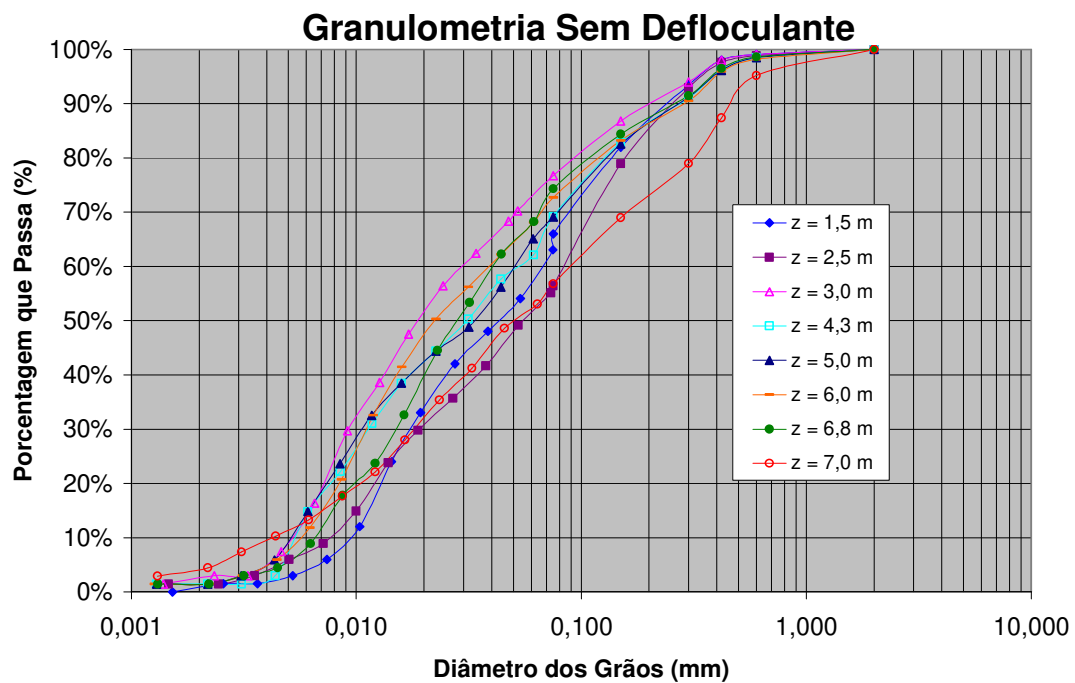


Figura 4.2 – Curvas Granulométricas obtidas sem o uso de defloculante (Miguel et al ,2007).

As classificações granulométricas sob ação do defloculante indicam, para o perfil de solo, texturas de argilas silto-arenosas até a profundidade de 6,0 m, concordando com **ALBUQUERQUE et al (2001)** e **GIACHETTI (1991)**, e siltes areno-argilosos a siltes arenosos quando se avança de 6,8m a 7,0m. No caso das curvas granulométricas obtidas sem defloculante, verifica-se que o perfil se constitui de siltes arenosos em toda a sua extensão, indicando essa textura em campo.

Os valores obtidos dos Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Índices de Plasticidade (IP), em função da profundidade de coleta das amostras, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 4.2 - Valores de Limites de Consistência (Miguel et al, 2006)

Profundidade (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1,5	48	37,3	10,7
2,5	51,3	37,1	14,2
3,5	47,9	35,4	12,5
4,5	49,6	38,4	11,2
5,5	48	38,4	9,6

4.2 Ensaios Químicos

4.2.1 Ensaios de Fluorescência de Raio-X

A Figura 4.3 apresenta as porcentagens dos óxidos predominantes no perfil de solo em função das profundidades das amostras coletadas. Observam-se

valores praticamente constantes dos óxidos mais correntes até a profundidade de 6,0m, porém, a partir dessa profundidade, há uma redução das porcentagens de sílica em contrapartida ao aumento das porcentagens de óxidos de alumínio; já as porcentagens do óxido de magnésio e de hematita (Fe_2O_3) sofrem um leve aumento.

Essas variações das porcentagens de óxidos no perfil de solo coluvionar indicam que a partir da profundidade de 6,0m há um material bastante distinto do subjacente em termos de composição química.

Estes resultados foram apresentados por **MIGUEL et al (2007)**.

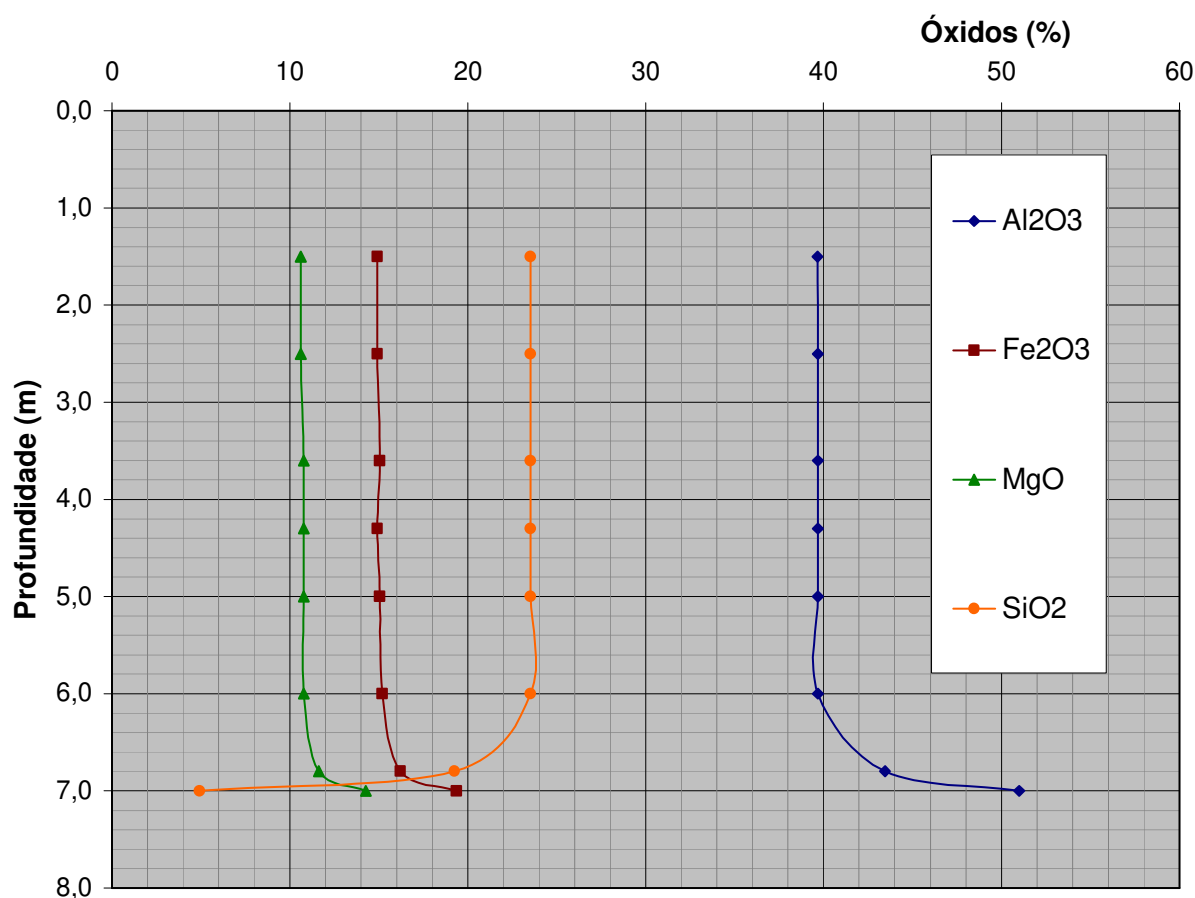


Figura 4.3 - Porcentagens de óxidos predominantes *versus* profundidade (Miguel et al, 2007).

4.2.2 Ensaios de Difração em Raios-X

Quanto à composição mineralógica, ensaios de difração de Raios-X foram realizados nas amostras, incluindo uma amostra da profundidade de 6,5m. Os resultados estão apresentados na Figura 4.4.

As amostras até a profundidade de 6,0m apresentaram praticamente a mesma mineralogia, representadas pelas amostras 1,5m e 6,0m. Verifica-se que, entre as profundidades de 6,5m e 7,0m, a quantidade dos minerais caulinita e hematita diminuem, surgindo, em contrapartida, os minerais gibbsita e goethita. A diminuição de sílica e o aumento de óxido de alumínio (Fig. 4.3), após a profundidade de 6,0m, se traduzem na presença de gibbsita, ao contrário para as profundidades sobrejacentes que são compostas em maior grau pelas caulinitas. Esses resultados vêm confirmar que o material subjacente à profundidade de 6,0m é bastante distinto do sobrejacente, conforme também indicaram os resultados dos ensaios de Fluorescência de Raio-X.

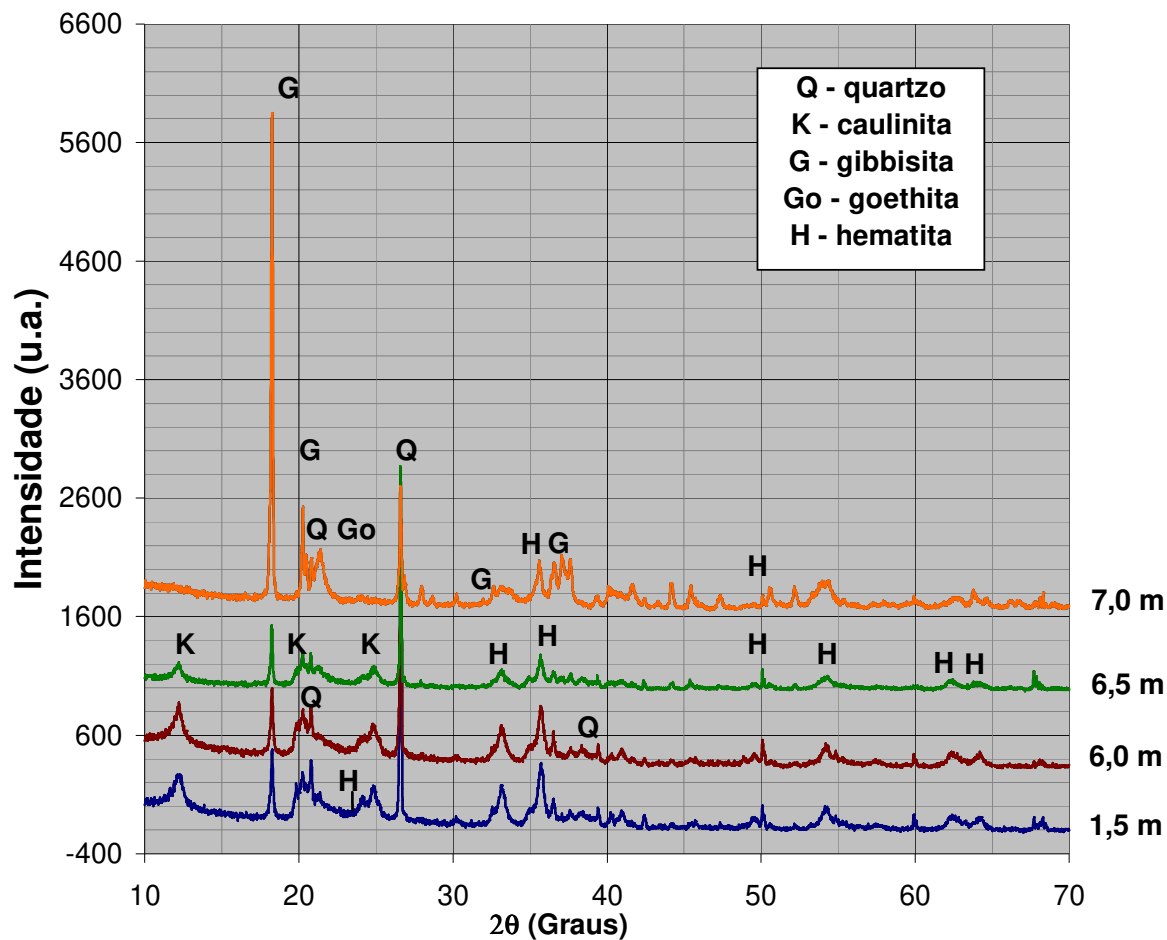


Figura 4.4 - Alguns resultados dos ensaios de difração em Raio-X em profundidade (Miguel et al, 2007).

4.3 Interpretação das Lâminas Delgadas e Impregnadas

O material da profundidade 1,5 m é basicamente composto por grãos de quartzo bem angulosos, apresentando extinções ondulantes, típicas de material sedimentar. O entorno dos grãos apresentam-se recobertos por material ferruginoso de coloração avermelhada, com composição hematítica. Alguns

destes grãos encontram-se fraturados e preenchidos por este mesmo material que estão a sua volta e podem ser vistos na Figura 4.5.

Este material hematítico serve como cimento entre os grãos de quartzo (Figura 4.6), que possuem baixo contato entre si, fornecendo um material de alta porosidade e com poros comunicantes.

Pela análise geral das duas lâminas, Figuras 4.5 e 4.6, deduz-se tratar de material coluvionar, pela falta de orientação dos grãos mais alongados, de fonte bem próxima, fonte esta provavelmente sedimentar.

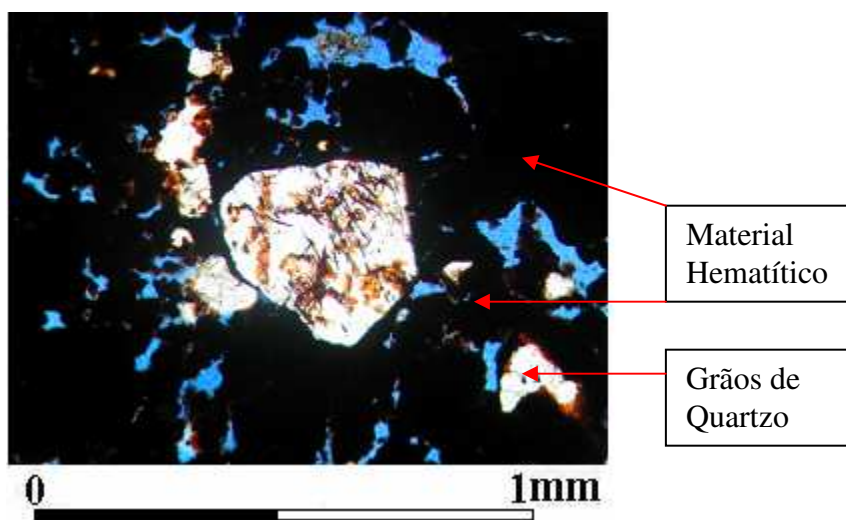


Figura 4.5 – (profundidade 1,5m)

Na profundidade 2,5 m, o material é composto basicamente por grãos de quartzo e zircão e material hematítico. Os grãos de quartzo possuem as mesmas características do material da parte superior.

Poros comunicantes

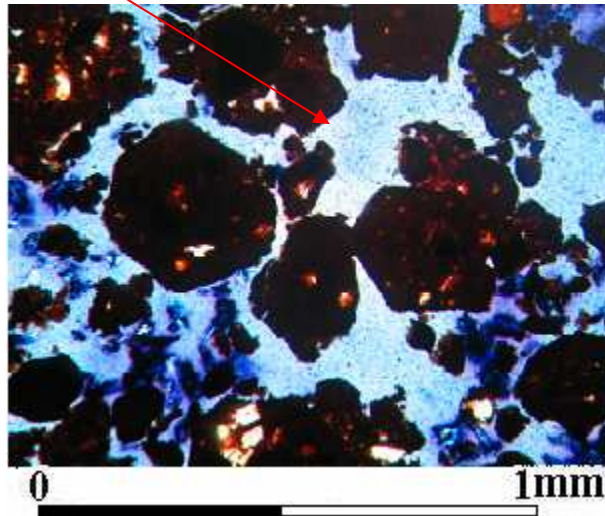


Figura 4.6 – (profundidade 1,5m)

A Figura 4.7 mostra a porosidade do material. Esta porosidade fica extremamente reduzida quando ocorre à cimentação por material hematítico. Nesta profundidade começa-se a observar poros, aparentemente, não comunicantes.

O material cimentante, de composição provavelmente hematítica, pode ser visto em quase toda a superfície da lâmina (Figura 4.8), recobrando parcialmente os grãos de quartzo.

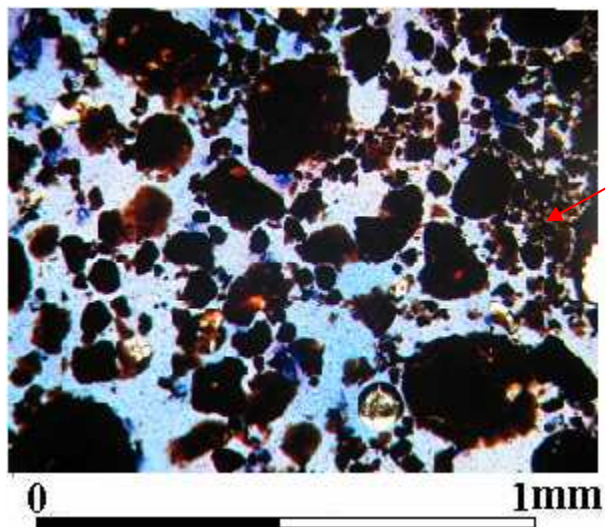


Figura 4.7 – (profundidade 2,5m)

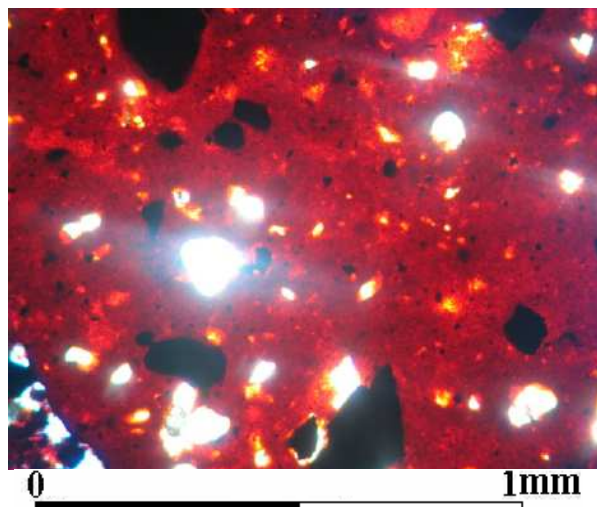


Figura 4.8 – (profundidade 2,5m)

Nesta profundidade ainda podem ser encontrados materiais orgânicos vegetais como contribuintes na composição da formação superficial.

O solo da profundidade 3,5 m apresenta composição essencialmente quartzosa com material hematítico. Alguns cristais de zircão também podem ser encontrados, porém de forma rara e esparsa.

Os grãos de quartzo apresentam características semelhantes aos das amostras superiores. O material que preenche as fraturas recobre as bordas dos minerais e alguns são quase totalmente recobertos, como visto na Figura 4.9. Começa a ser notada uma diferença de cores, devida à transformação do material hematítico em goethita.

Devido a maior quantidade de material cimentante do que nas camadas superiores, existe um equilíbrio maior entre os poros, fornecendo poros comunicantes e não comunicantes.

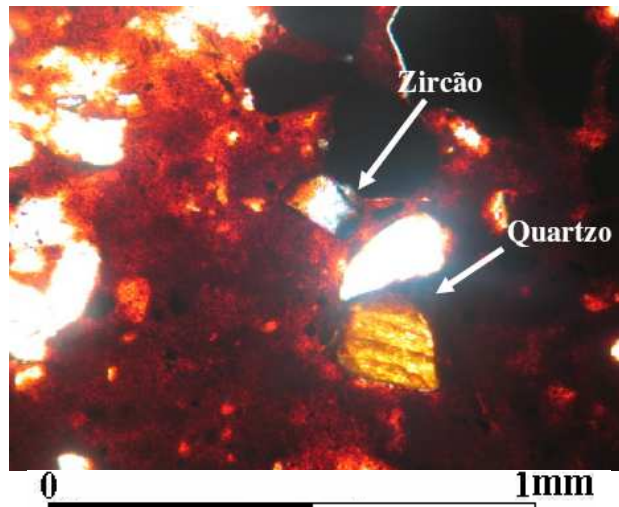


Figura 4.9 – (Profundidade 3,5m)

O material da profundidade 4,5m é composto basicamente por grãos de quartzo. Ocorrem fraturamentos leves, preferencialmente nos grãos maiores, como pode ser visto na Figura 4.10, sendo pouco freqüentes nos cristais menores. Estas fraturas encontram-se preenchidas por material ferruginoso de composição hematítica, verificado na Figura 4.11, assim como nas amostras das camadas superiores.

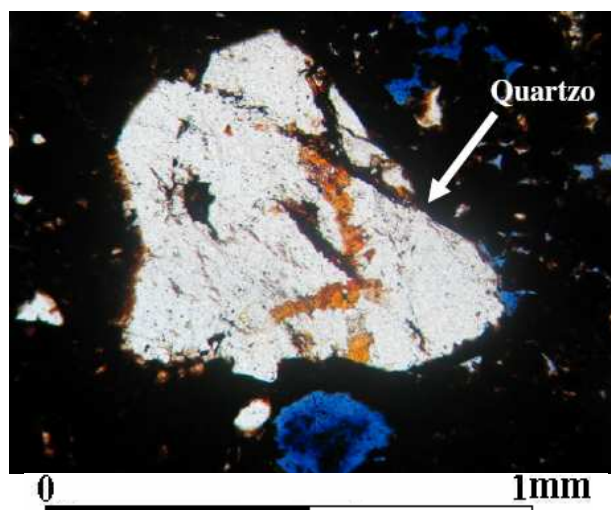


Figura 4.10 – (profundidade 4,5m)

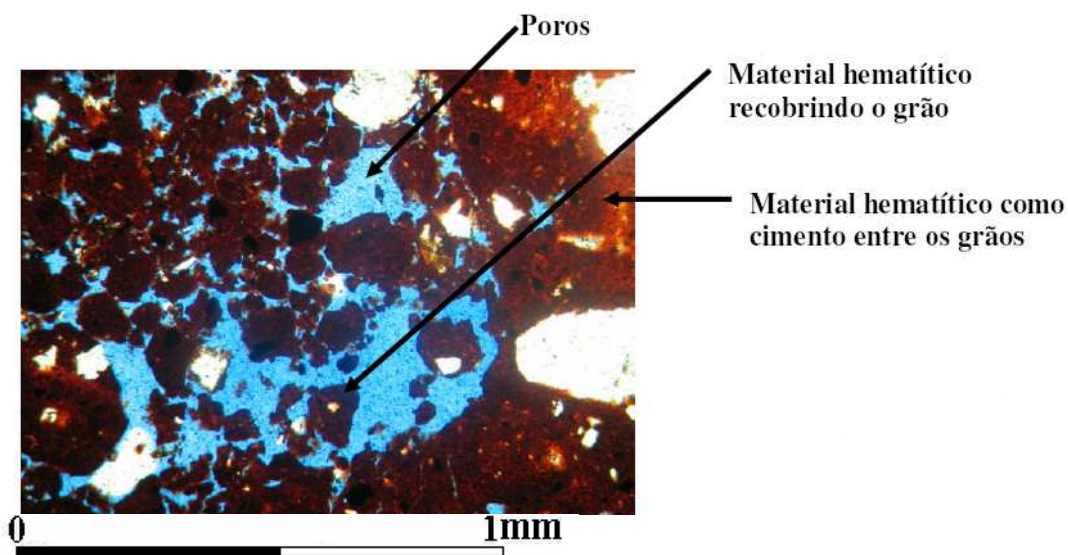


Figura 4.11– (profundidade 4,5m)

A porosidade existente nestas amostras representa poros não comunicantes, contudo podem, em associação, ter comunicação de forma generalizada. A diminuição do tamanho destes poros pode estar associada a materiais mais finos, fração de argila, de composição hematítica, goethítica e gibbsítica, lixiviadas das camadas superiores. Percebe-se que o material da profundidade 3,5m possui uma melhor distribuição de poros do que este material.

Na profundidade 5,5m, o material é muito semelhante ao solo da profundidade 4,5m. Há ocorrência de fraturas, preferencialmente nos grãos maiores. Estas fraturas encontram-se preenchidas por material ferruginoso tanto de composição hematítica, quanto de composição goethítica. Este material ferruginoso, servindo de cimento entre os grãos de quartzo e como recobrimento dos mesmos, pode ser observado na Figura 4.12.

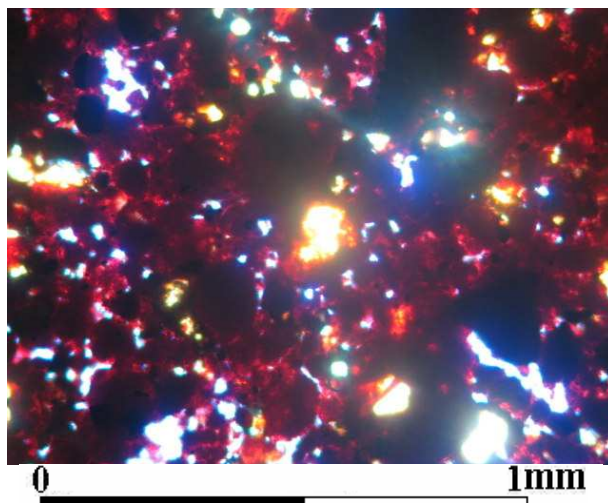


Figura 4.12 – (profundidade 5,5m)

Os poros, vistos nas amostras analisadas da profundidade 5,5m, não apresentam comunicação entre si. São pequenos se comparados com os das amostras superiores, isto se deve ao fato de receber maior contribuição de material fino, de composição hematítica, goethítica e gibbsítica. Aumentando, assim, a aglutinação e cimentação dos demais grãos. Na figura 4.13 pode-se verificar o caráter mais compacto deste material.

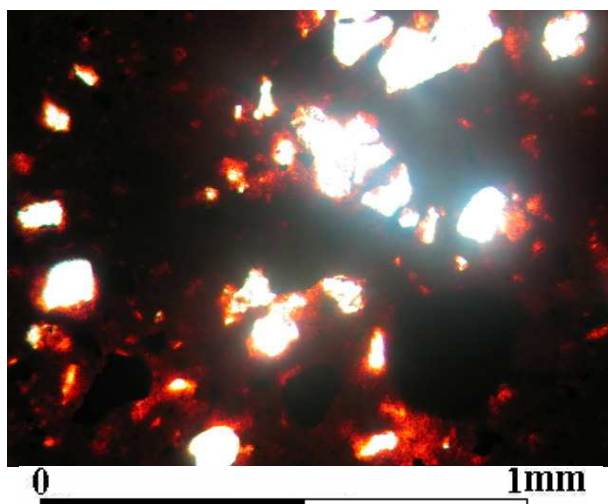


Figura 4.13 – (profundidade 5,5 m)

As lâminas da profundidade 6,5m apresentam composição predominantemente quartzosa, com grãos angulosos em sua maioria, porém com alguma contribuição de material mais arredondado.

Alguns cristais apresentam suas bordas com algum desgaste e recobrimento por material ferruginoso, provavelmente de composição hematítica/goethítica, como pode ser observado na figura 4.14.

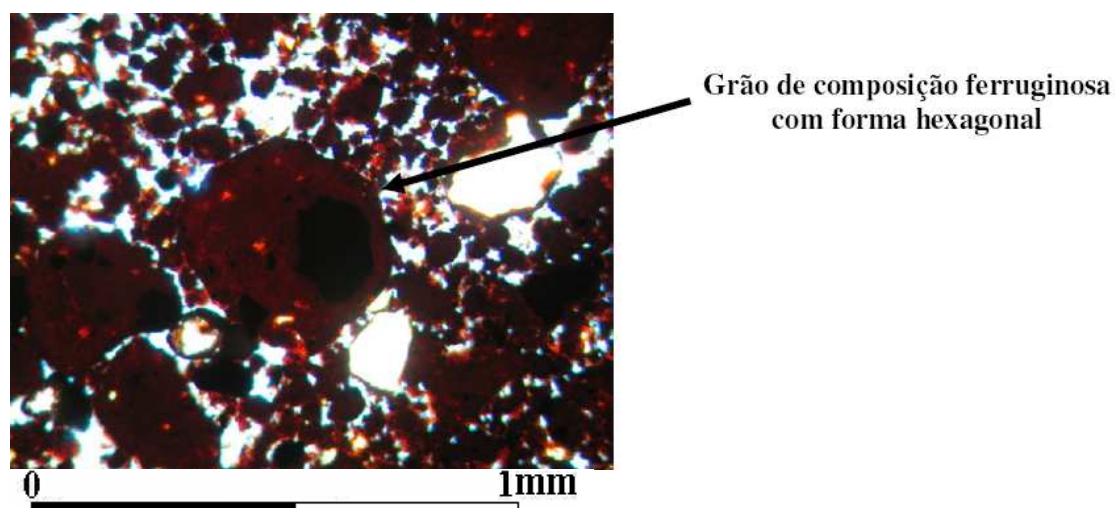


Figura 4.14 – (profundidade 6,5m)

A porosidade deste material é, aparentemente, maior que a do material superior e inferior, com comunicação entre poros mais freqüente que nas amostras superiores. Na Figura 4.15 pode-se observar a quantidade de poros e a melhor distribuição dos macroporos e microporos, se comparados com a amostra de 5,5m.

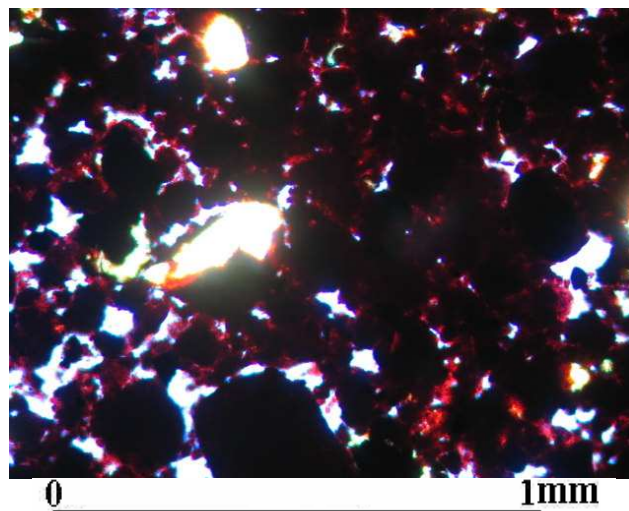


Figura 4.15 – (profundidade 6,5m)

A ocorrência de material anguloso indica um material coluvionar de fonte próxima, igualmente aos materiais das camadas superiores, porém a existência conjunta dos grãos de quartzo mais arredondados evidencia a contribuição de outro material, podendo ser do material subjacente a ele, isto é, residual de diabásio.

4.4 Curvas de Retenção de Água

4.4.1 Curvas Obtidas pelo Método do Papel Filtro

As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram a caracterização dos corpos-de-prova durante a sua moldagem para serem utilizados nos ensaios.

Tabela 4.3 - Caracterização dos corpos de prova (UMEDECIMENTO).

Prof. (m)	γ_{natural} (kN/m ³)	$\gamma_{\text{sólidos}}$ (kN/m ³)	ω (%)	e (-)	Sr (%)
1,5	14,45	29,89	23,09	1,560	44,94
2,5	13,99	30,42	23,57	1,688	42,50
3,5	15,03	30,64	22,98	1,504	46,74
4,5	15,15	30,79	23,61	1,521	47,91
5,5	16,32	30,78	23,79	1,335	54,87
6,5	15,21	30,64	21,15	1,443	45,06

Tabela 4.4 - Caracterização dos corpos de prova (SECAGEM).

Prof. (m)	γ_{natural} (kN/m ³)	$\gamma_{\text{sólidos}}$ (kN/m ³)	ω (%)	e (-)	Sr (%)
1,5	13,90	29,89	22,54	1,635	41,20
2,5	13,74	30,42	23,15	1,727	40,79
3,5	14,22	30,64	22,64	1,643	42,23
4,5	14,45	30,79	22,81	1,617	43,44
5,5	15,77	30,78	23,06	1,402	50,63
6,5	14,59	30,64	20,93	1,540	41,7

Nota-se que a amostra de 5,5m de profundidade é mais densa, apresentando índice de vazios menores, mostrando um indício de que os óxidos de ferro (hematita e goethita) das camadas superiores têm se depositado nesta profundidade, como pôde ser visto na Figura 4.13.

Como os corpos-de-prova de secagem foram moldados meses depois dos corpos-de-prova de umedecimento, houve uma diferença nas umidades, logo índice de vazios e no grau de saturação.

As curvas obtidas pelo método do papel filtro, tanto método de umedecimento quanto de secagem, para as profundidades 1,5m até 6,5m, foram obtidas não levando em consideração as variações volumétricas sofridas pelos corpos-de-prova durante a execução do ensaio.

As curvas de retenção são geralmente plotadas em função do teor de umidade volumétrica ou grau de saturação, mas como não foi considerada a variação volumétrica dos corpos-de-prova analisados, as curvas serão mostradas em função do teor de umidade gravimétrico.

Pela Figura 4.16, nota-se que as curvas de todas as profundidades possuem um comportamento de um solo tropical, apresentando macro e microporos, como explicado em **CAMAPUM de CARVALHO e LEROUUEIL (2004)**.

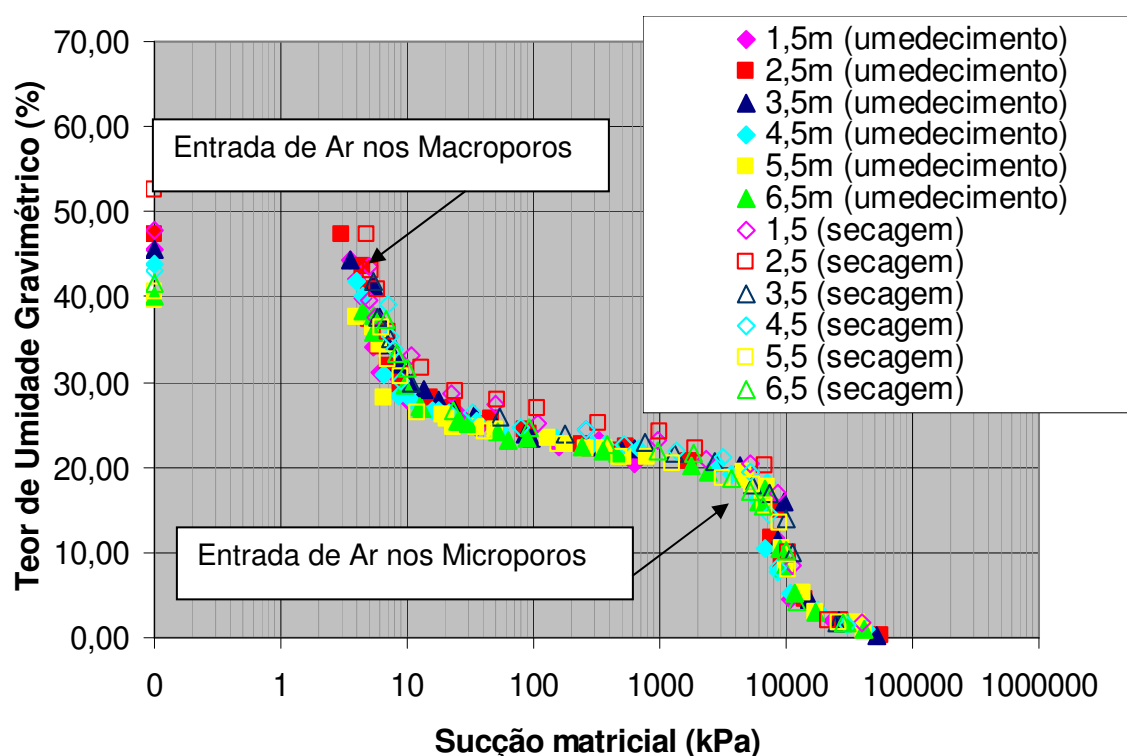


Figura 4.16 – Curvas de Retenção: teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (papel filtro)

As curvas de retenção separadas por profundidades são mostradas nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22.

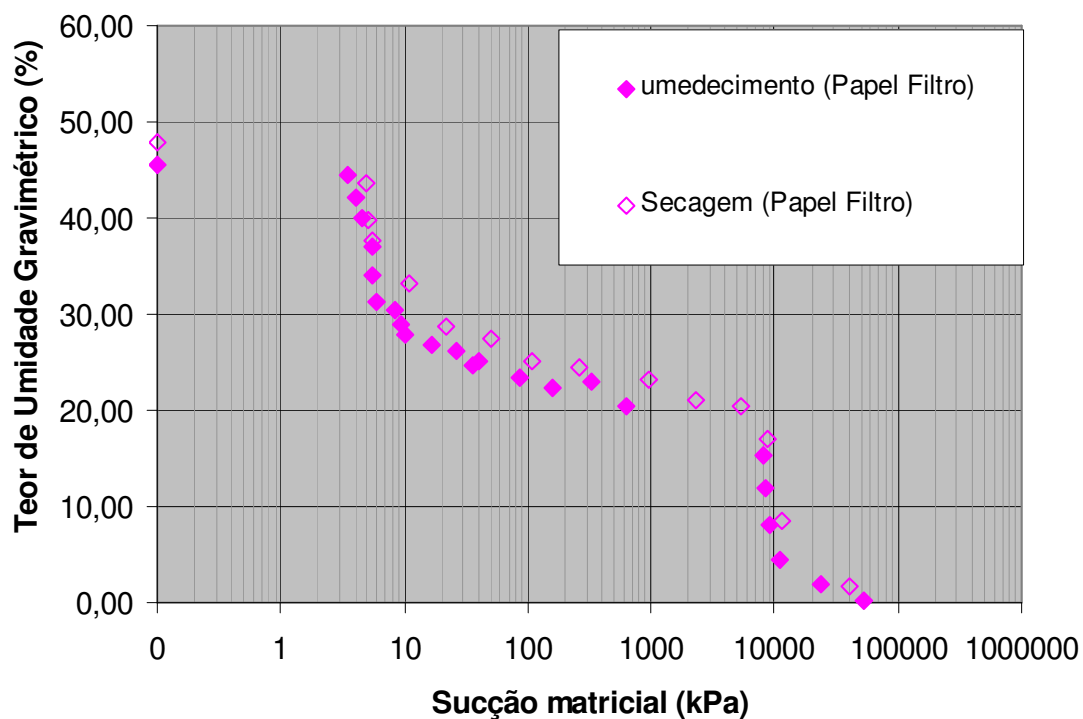


Figura 4.17 – Curvas de Retenção (Profundidade 1,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (papel filtro)

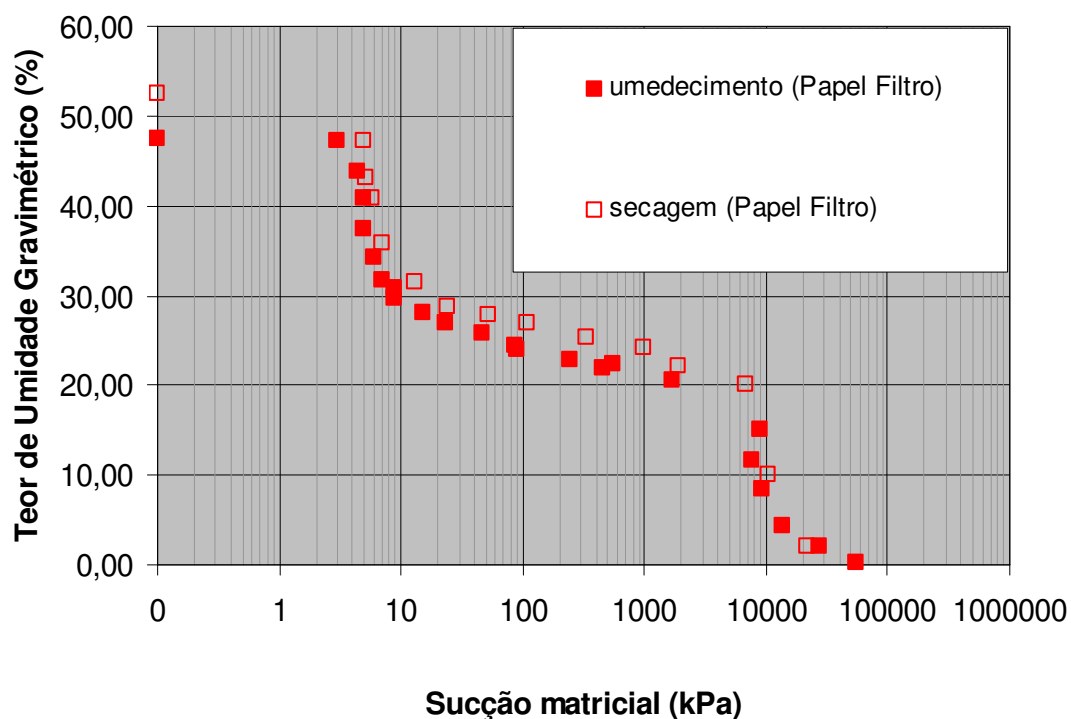


Figura 4.18 – Curvas de Retenção (Profundidade 2,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (papel filtro)

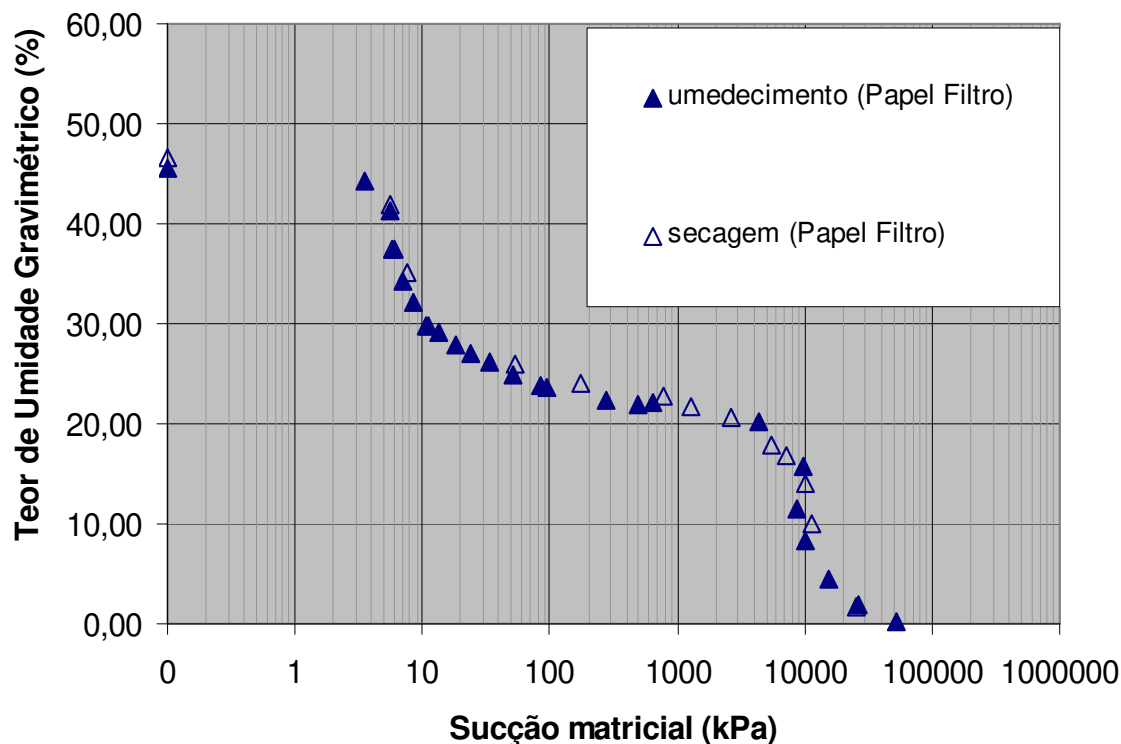


Figura 4.19 – Curvas de Retenção (Profundidade 3,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (papel filtro)

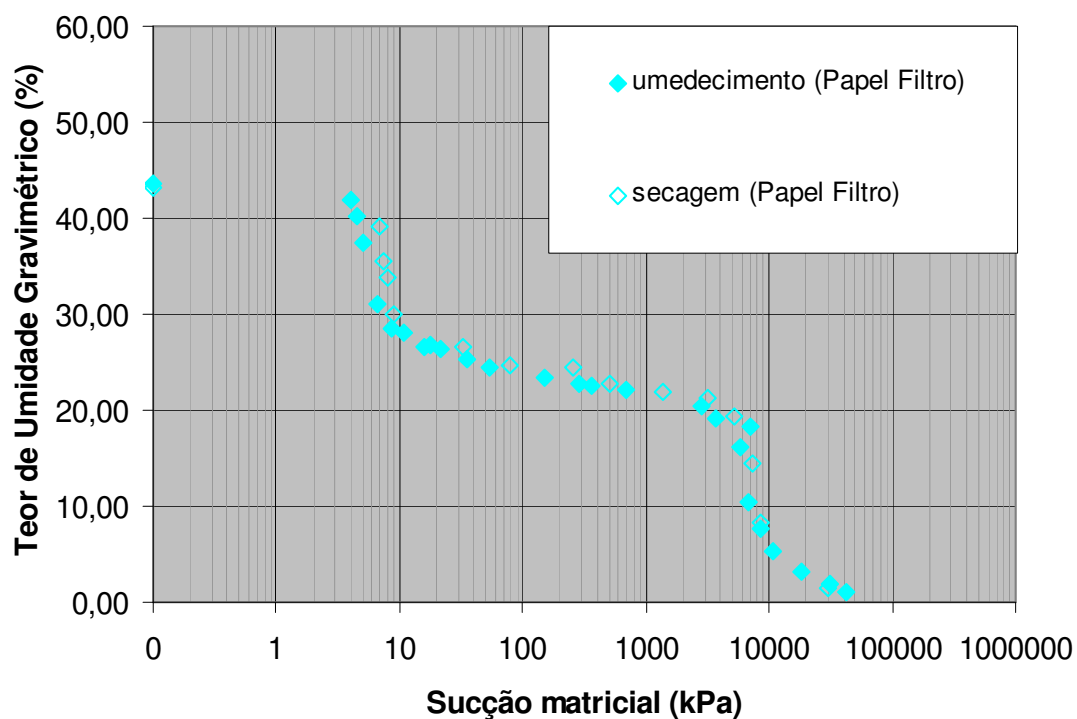


Figura 4.20 – Curvas de Retenção (Profundidade 4,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (papel filtro)

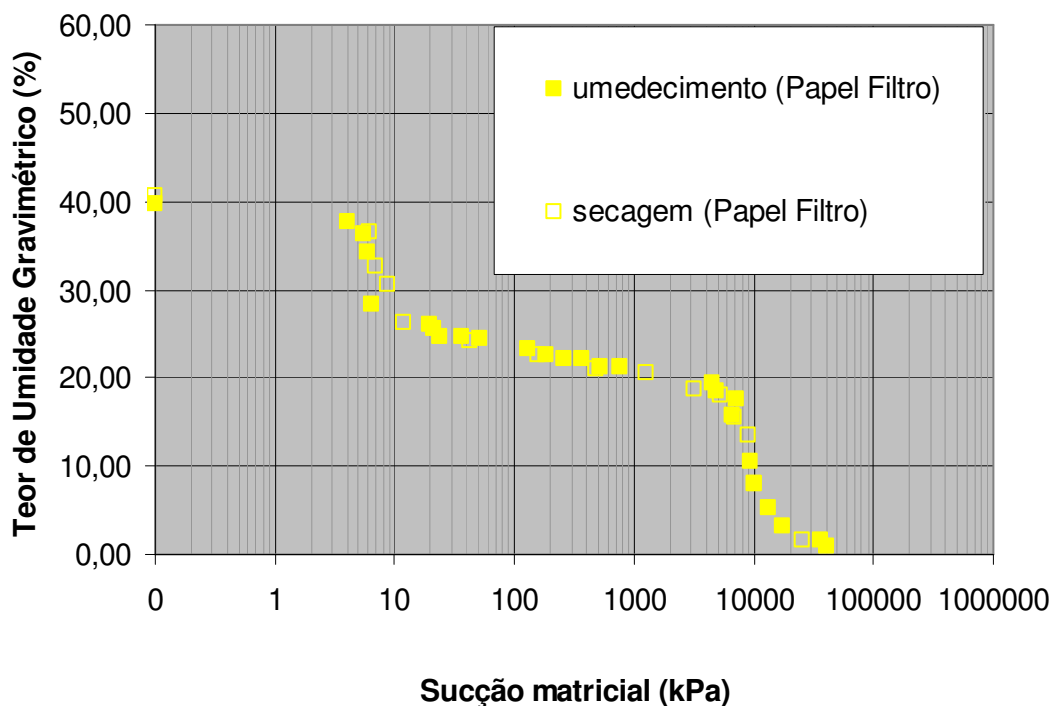


Figura 4.21 – Curvas de Retenção (Profundidade 5,5m): teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial (papel filtro)

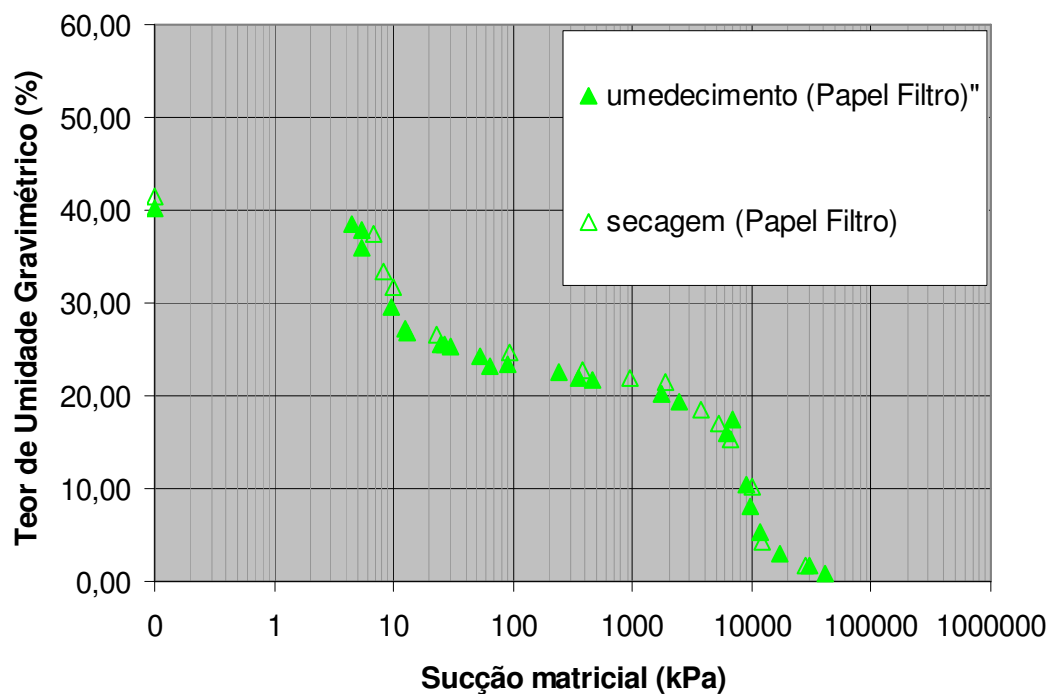


Figura 4.22 – Curvas de Retenção (Profundidade 6,5m): teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial (papel filtro)

Nota-se que as curvas (umedecimento e secagem) são bastante semelhantes em todas as profundidades, o formato e, mesmo, os valores, são bem próximos.

Foram colocadas num mesmo gráfico (Figura 4.23) todas as curvas (profundidades), obtidas pelo mesmo método (secagem) para uma melhor visualização.

Estas pequenas diferenças ocorrem principalmente devido à diferença entre as estruturas das amostras das diferentes profundidades.

Percebe-se que a porosidade do material, juntamente com a distribuição destes poros, influencia nos valores de sucção matricial para um mesmo teor de umidade gravimétrico, principalmente no trecho entre a entrada de ar dos macroporos e a entrada de ar nos microporos (Figura 4.23).

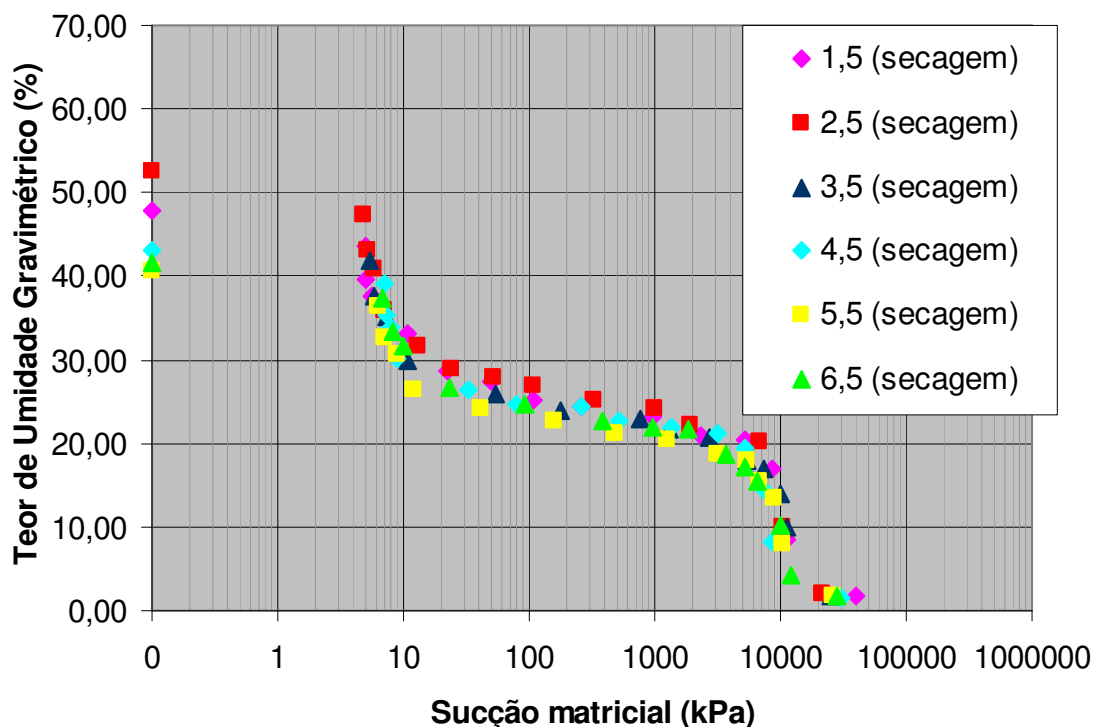


Figura 4.23 – Curvas de Retenção: teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial (papel filtro - secagem).

O valor de entrada de ar em todos os solos foram bem próximos, podendo ser considerados iguais para todas as profundidades, em torno de 3 kPa.

O fenômeno da *histerese*, verificado em algumas profundidades, porém com pouca expressividade no método do papel filtro, será analisado mais adiante.

4.4.2 Curvas de Retenção Obtidas pela Translação de Eixos

As curvas de retenção determinadas pelo método da translação de eixos foram obtidas por **MIGUEL (2007)**, utilizando o processo de secagem e umedecimento, para as amostras das profundidades de 1,5m, 2,5m, 3,5m e 4,5m.

As Figuras 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 mostram as curvas de retenção obtidas em relação ao teor de umidade gravimétrico das amostras.

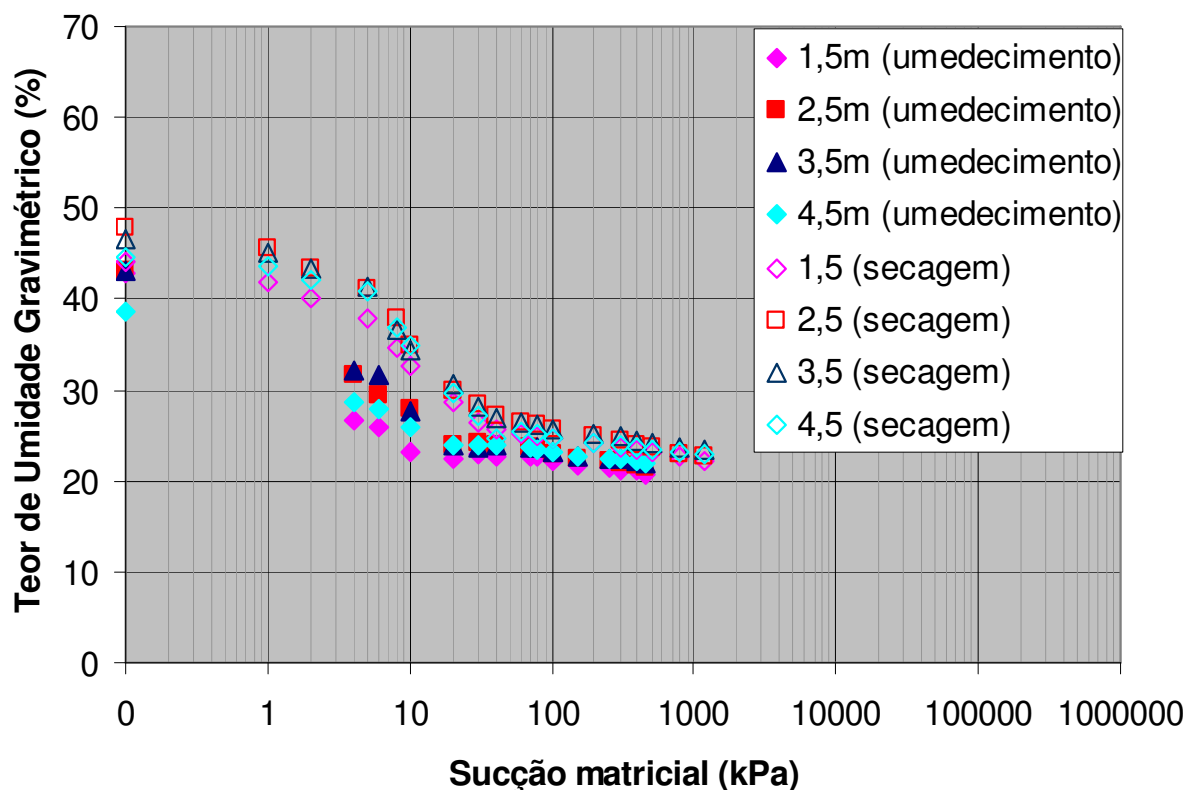


Figura 4.24 – Curva de Retenção: teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial (translação de eixos).

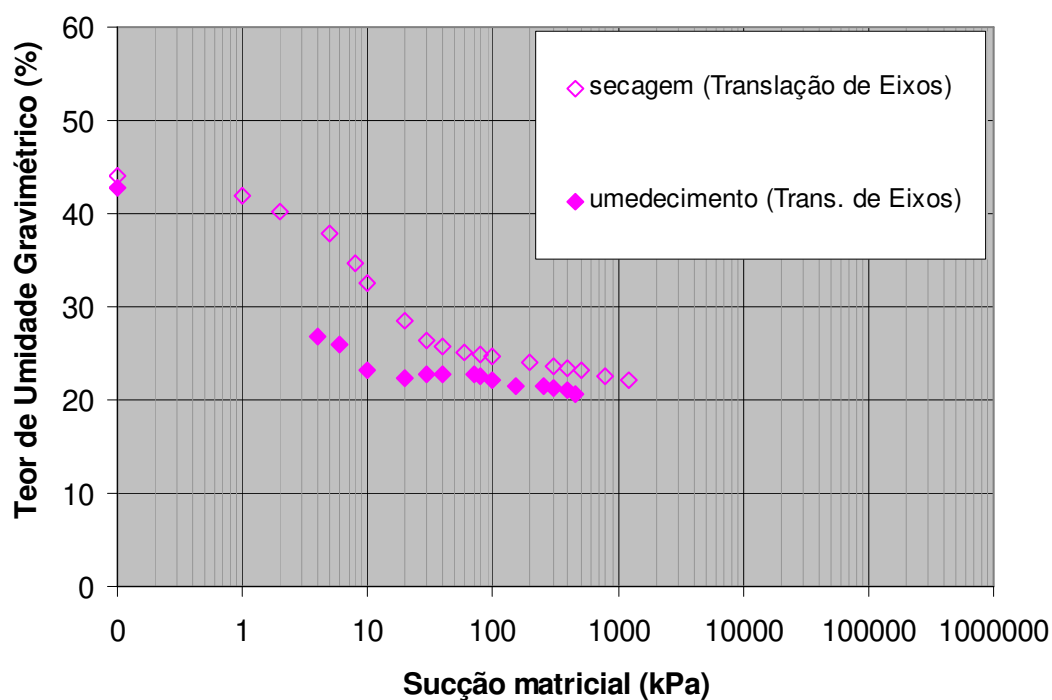


Figura 4.25 – Curva de Retenção (Profundidade 1,5m): teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial (translação de eixos).

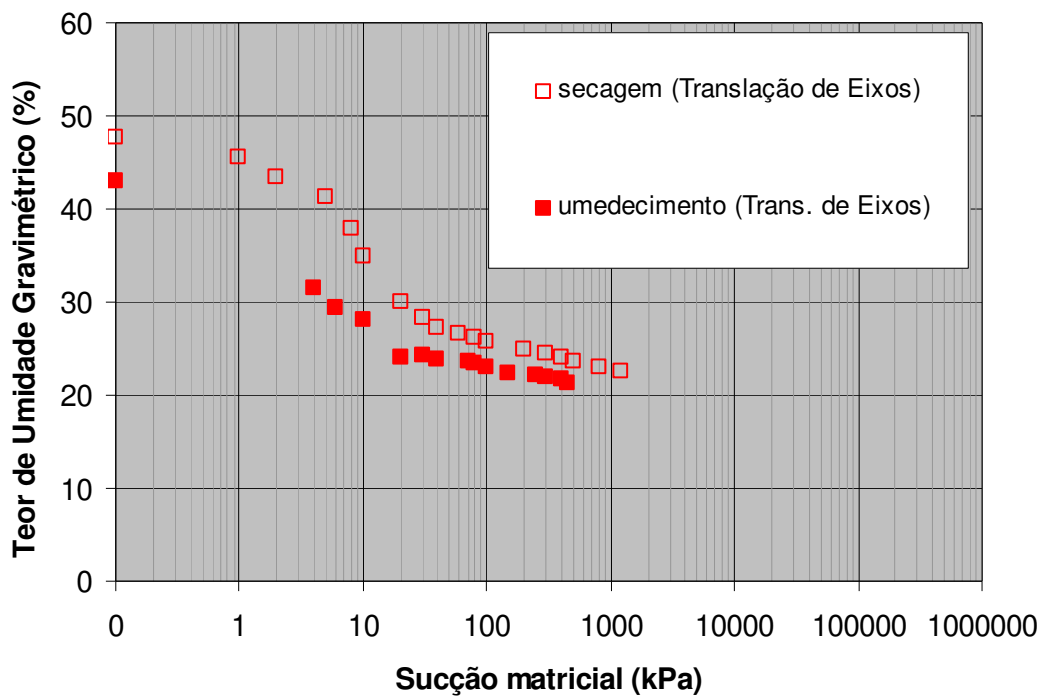


Figura 4.26 – Curva de Retenção (Profundidade 2,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (translação de eixos).

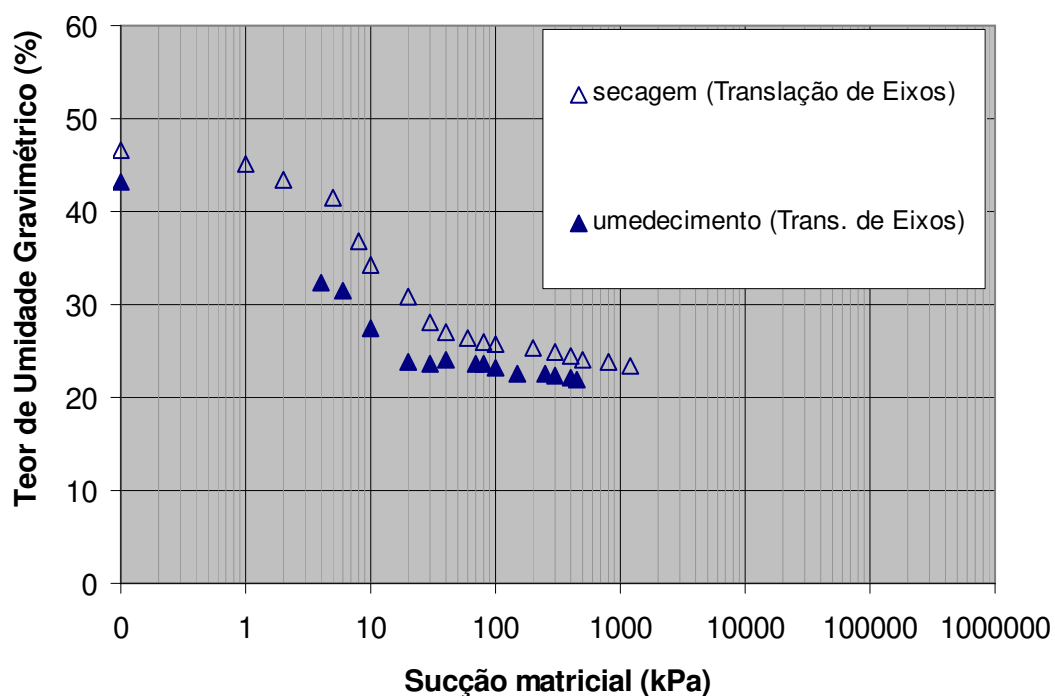


Figura 4.27 – Curva de Retenção (Profundidade 3,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (translação de eixos).

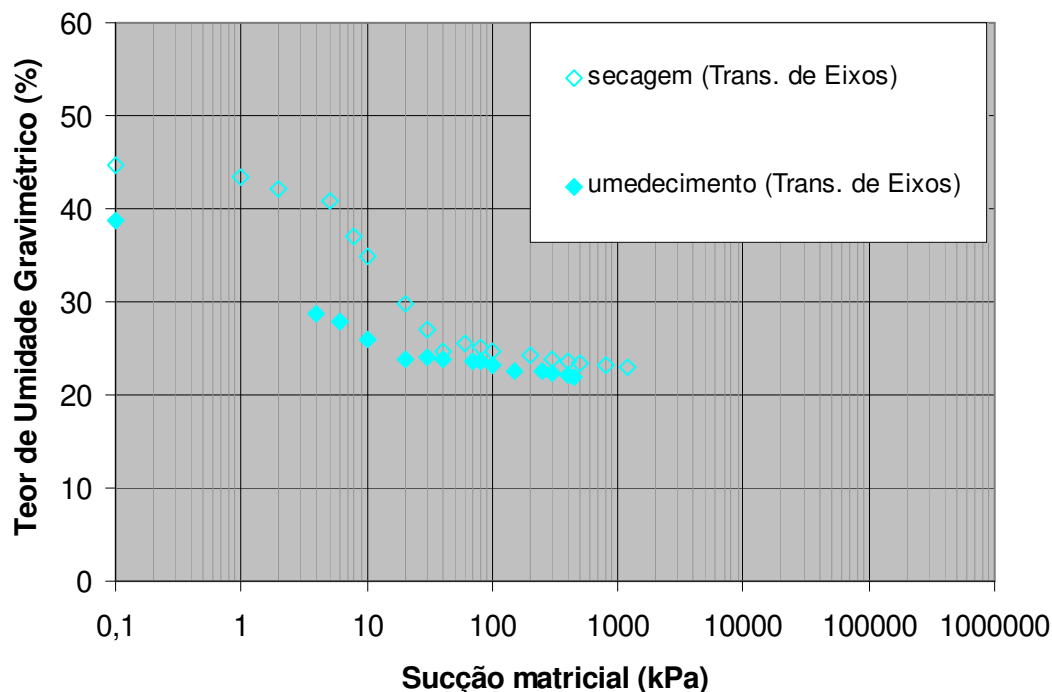


Figura 4.28 – Curva de Retenção (Profundidade 4,5m): teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial (translação de eixos).

Devido à limitação do método, no que diz respeito a máxima sucção imposta, poder-se-iam obter análises equivocadas sobre este tipo de solo. Como foram determinados pontos até se atingir o valor de sucção matricial de 1200 kPa, no caso do método de secagem, e valor de sucção matricial de 450 kPa, no método de umedecimento, a curva apresentou uma aparência típica de solos de regiões temperadas, não tropicais, ou até mesmo de uma areia. As curvas são distintas até, aproximadamente, ao valor de sucção matricial de 40 kPa, a partir do qual, elas tendem, praticamente, a uma curva comum. Isto comparando as curvas obtidas pelo mesmo método, mas para profundidades diferentes.

Os valores da entrada de ar nos macroporos são praticamente iguais em todas as profundidades, e com valores muito baixos, em torno de 1 kPa.

4.5 Monitoramento da Sucção em Campo, por meio de tensiômetros

No período de monitoramento, a estação chuvosa (entre novembro e fevereiro) foi atípica, precipitando muito mais do que os valores das médias anuais registrados na região; e a época de estiagem (entre maio e agosto) também foi incomum, havendo um período de seca e alguns dias muito quentes. Na Figura 4.29, pode-se perceber mais claramente esse fato, a qual mostra os valores de pluviosidade em função do tempo de monitoramento.

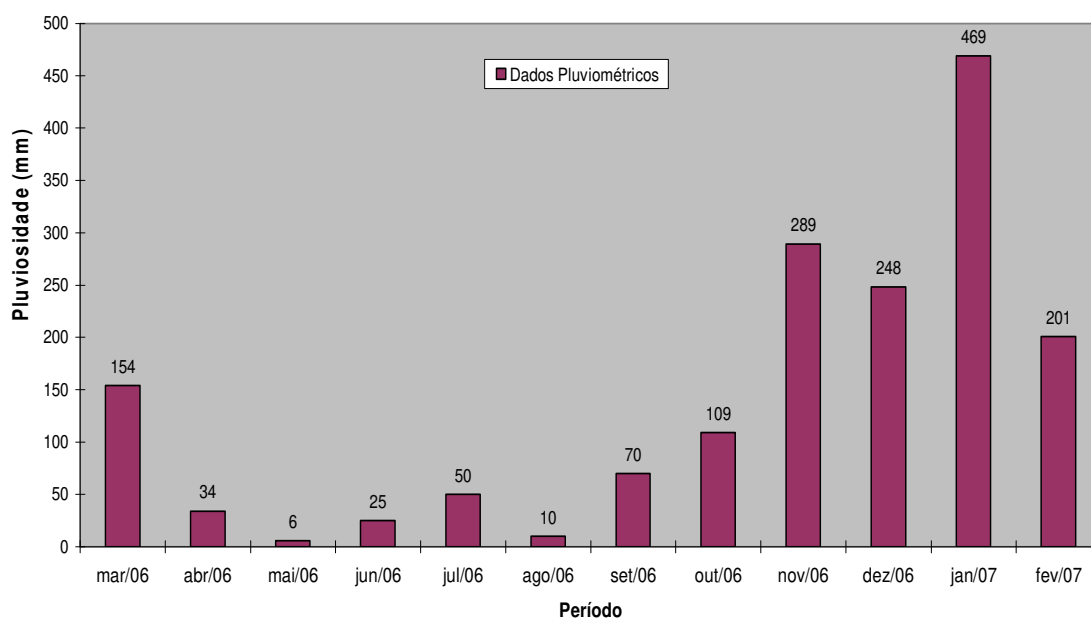


Figura 4.29 - Dados pluviométricos do Campo Experimental

Observou-se que os tensiômetros instalados respondiam às precipitações dentro de alguns dias após a ocorrência das mesmas (1 ou 2 dias), dependendo da quantidade precipitada. Essa verificação foi observada na época de seca, onde, provavelmente os tensiômetros sofreram cavitação.

Os tensiômetros instalados na mesma profundidade obtiveram comportamentos bem parecidos, fornecendo resultados bastante próximos. Logo, foi calculada a média dos valores obtidos de sucção matricial para cada profundidade para uma melhor visualização. Lembrando que os tensiômetros estão instalados dentro de uma cava com um metro de profundidade, logo, quando se falar nas profundidades será em relação ao nível do terreno.

Os primeiros valores de sucções obtidos nos tensiômetros (T5 e T6), instalados nas profundidades de 3,0m e 4,0m respectivamente, não foram muito confiáveis, devido, provavelmente, ao mau contato da pedra porosa com o solo.

Nas Figuras 4.30 e 4.31 são apresentadas variações da sucção matricial e da umidade gravimétrica ao longo do período de um ano. Pode-se também perceber as épocas de estiagem e de chuva, demonstradas pelos baixos valores de pluviosidade. No período de seca (entre maio e outubro), os tensiômetros não registraram os valores de sucções matriciais, devido à cavitação, por isso, foram considerados os valores de sucções máximos (Tabela 3.1) como aqueles que os tensiômetros foram capazes de medir, no entanto, sabe-se que esses valores, referentes àquele período, são bem maiores do que os apresentados.

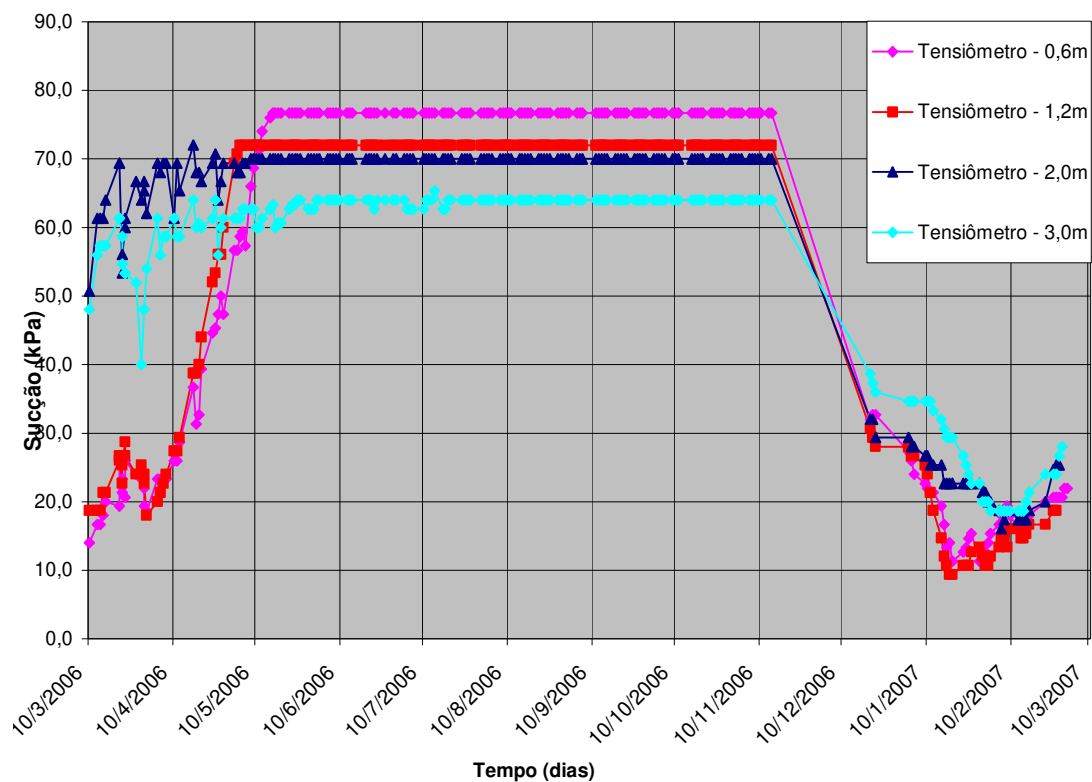


Figura 4.30 - Sucção matricial ao longo de um ano

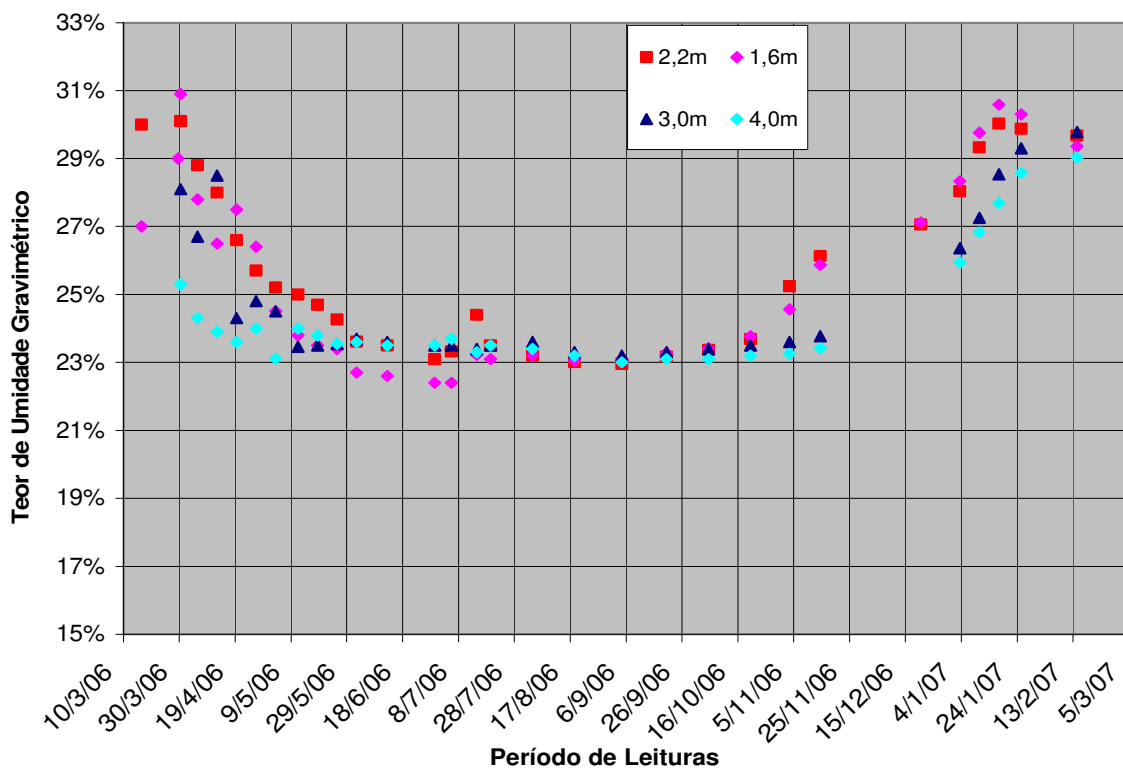


Figura 4.31 – Teor de umidade gravimétrica ao longo de um ano

Os valores de umidade gravimétrica variaram de 22,4% a 30,9% para a profundidade de 1,6m. Para as profundidades de 2,2m, 3,0m e 4,0m, os valores dessa umidade foram bem próximos aos obtidos para a profundidade 1,6m, na época da estiagem, porém, na época de chuva, esses valores apresentaram-se pouco inferiores.

Foram obtidos valores da umidade relativa do ar no momento em que se faziam as leituras dos tensiômetros. A Figura 4.32 apresenta a umidade relativa do ar em função da sucção matricial, não mostrando correlação, isto é, para um mesmo valor de umidade relativa, têm-se vários valores de sucções, e vice-versa. Pode-se notar que os pontos estão bem dispersos.

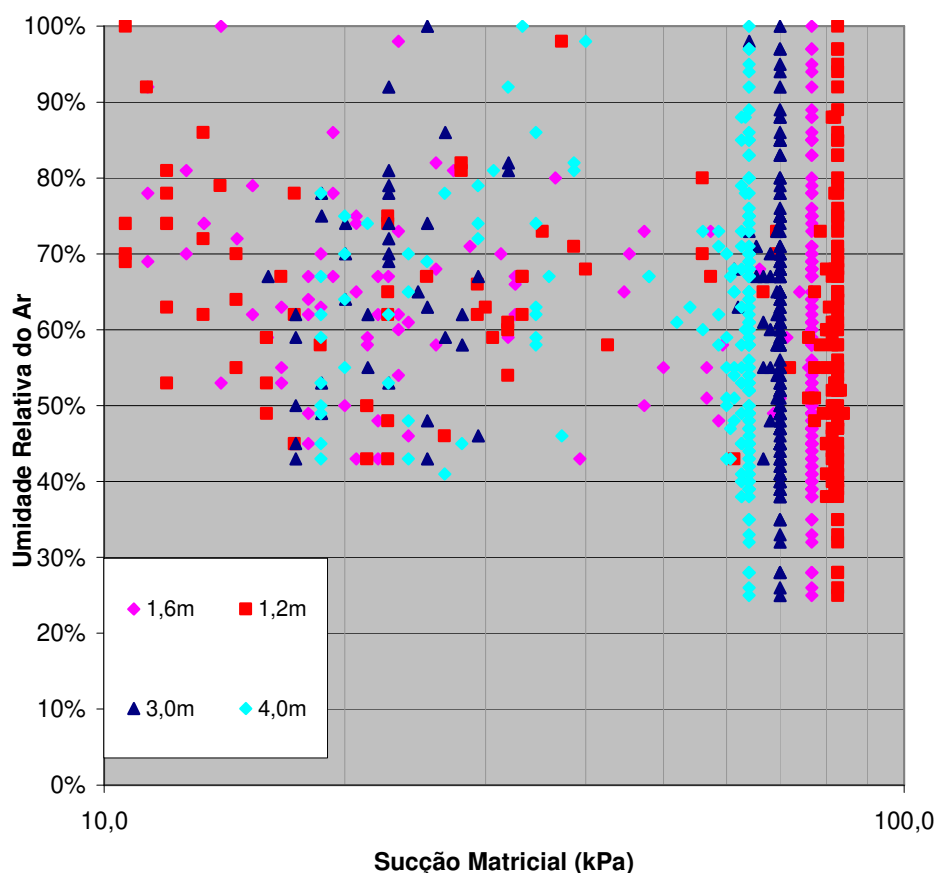


Figura 4.32 – Umidade relativa do ar *versus* sucção matricial

Durante o monitoramento, pôde-se obter o perfil de sucção matricial, que está apresentado na Figura 4.33. Nota-se que esse perfil varia significativamente, o que indica, provavelmente, que a zona de variação sazonal do Campo Experimental atinge profundidades bem maiores.

Na Figura 4.34, estão apresentados pontos da curva de retenção, obtidos com os tensiômetros em trajetórias de secagem e de umedecimento, e os valores de umidade gravimétrica, obtidos das amostras deformadas.

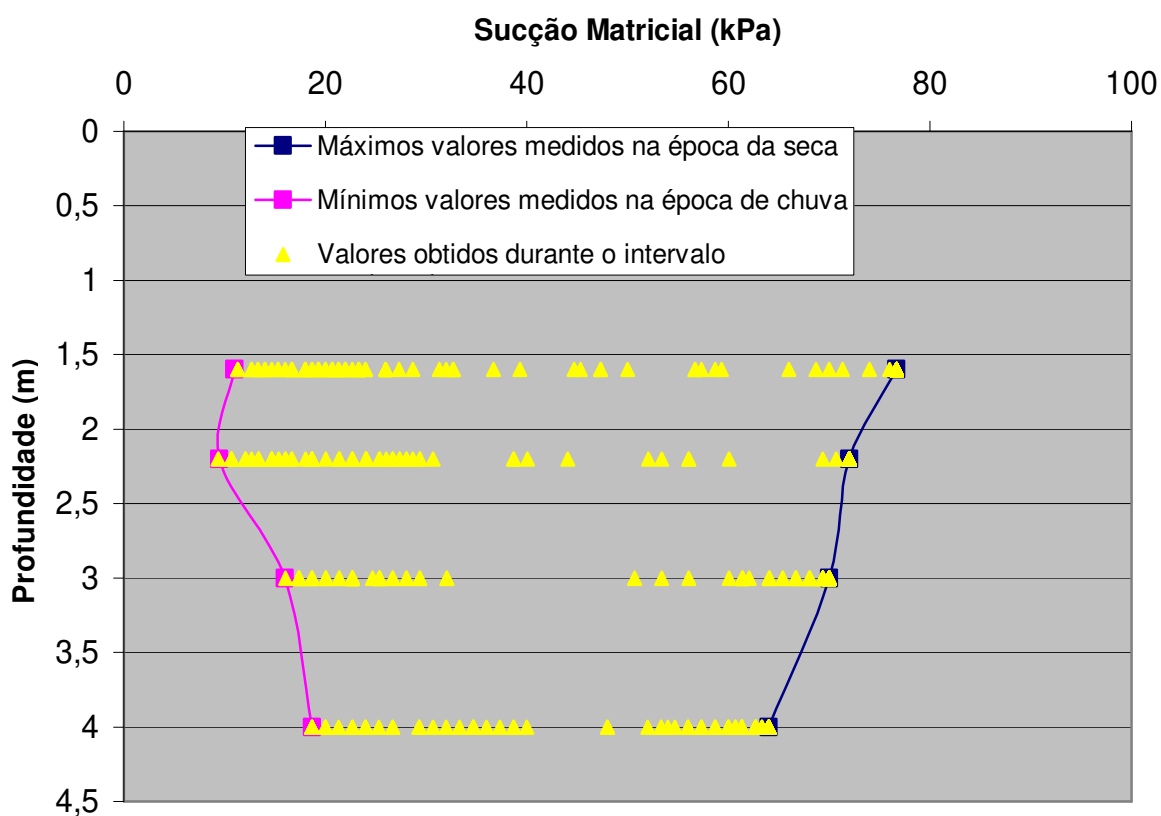


Figura 4.33 – Perfil de Sucção

Observa-se nas Figuras 4.33 e 4.34 que as curvas obtidas pela trajetória de secagem e umedecimento não coincidem. A diferença entre os pontos obtidos na secagem e no umedecimento, considerando uma mesma profundidade, é devida ao fenômeno de *histerese*. Pode-se notar na Figura 4.34, claramente, para as profundidades de 1,6m e 2,2m, o fenômeno da *histerese*. Nas profundidades

3,0m e 4,0m, este fenômeno não ficou evidenciado devido aos erros de calibração que influenciaram as primeiras leituras.

O fenômeno da *histerese* foi observado de modo mais expressivo nas amostras da profundidade de 2,2m com relação às de 1,6m, Figura 4.34, devido, muito provavelmente, ao maior índice de vazios da profundidade 1,60m, fazendo com que houvesse poucas bolhas de ar capturadas por estes poros. Além disso, às distintas distribuições de poros da profundidade 2,2m, intercalando poros comunicantes com poros não comunicantes, constatadas nas estruturas das amostras analisadas através da descrição de lâminas delgadas e impregnadas, Figura 4.7 e 4.8.

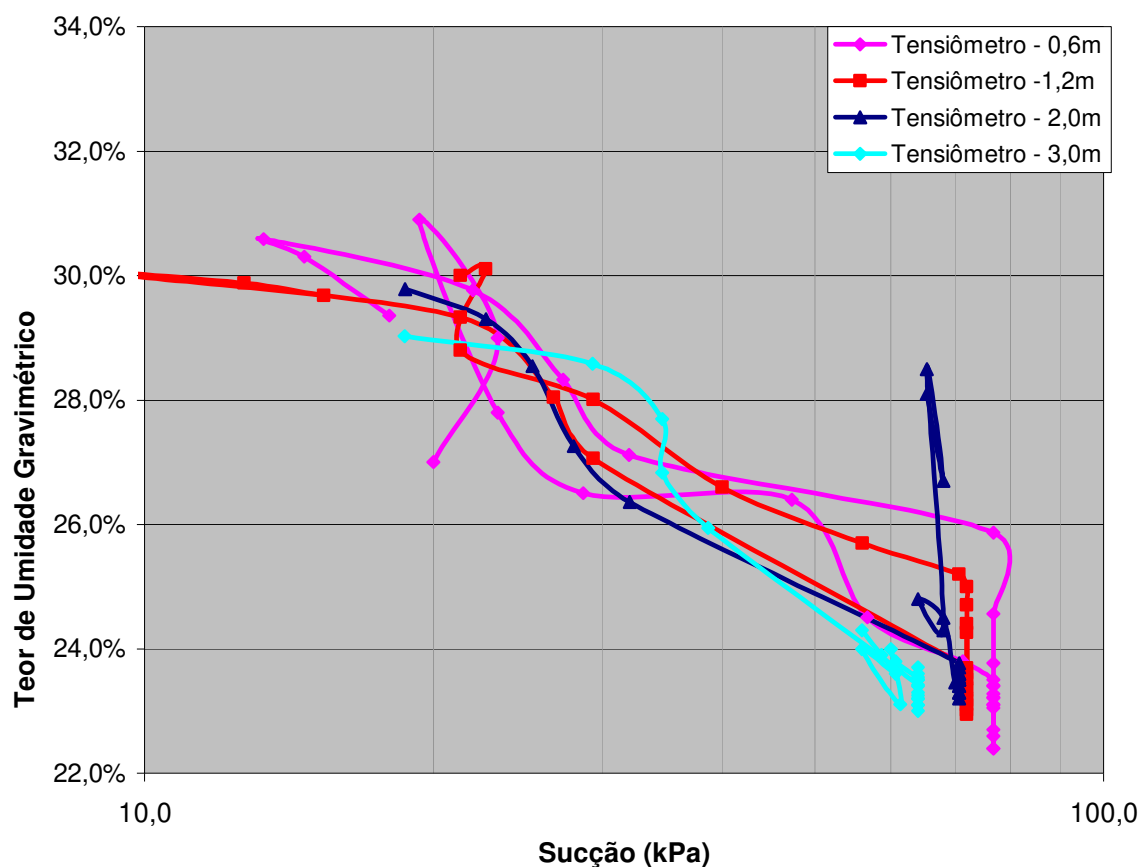


Figura 4.34 – Curvas de retenção obtidas em campo

4.6 Histerese

Colocando-se em um mesmo gráfico as curvas de retenção obtidas pelo processo de secagem (papel filtro e translação de eixos), pelo processo de umedecimento (papel filtro e translação de eixos) e pelo monitoramento em campo, percebe-se a diferença entre estas curvas, mesmo sendo obtida por diferentes métodos. As Figuras 4.35, 4.36, 4.37, e 4.38 mostram a *histerese*, para as profundidades 1,5m, 2,5m, 3,5m e 4,5m. As Figuras 4.39 e 4.40 mostram as curvas para as profundidades de 5,5m e 6,5m, respectivamente, mas, para estas profundidades, as curvas foram determinadas só pelo método do papel filtro.

No trecho após a entrada de ar nos microporos, as curvas se mostraram praticamente idênticas, por isto, foram plotadas as curvas considerando uma variação de umidade de 15% a 50% e uma variação de sucção matricial de 0 a 10000 kPa, para uma melhor visualização da *histerese*.

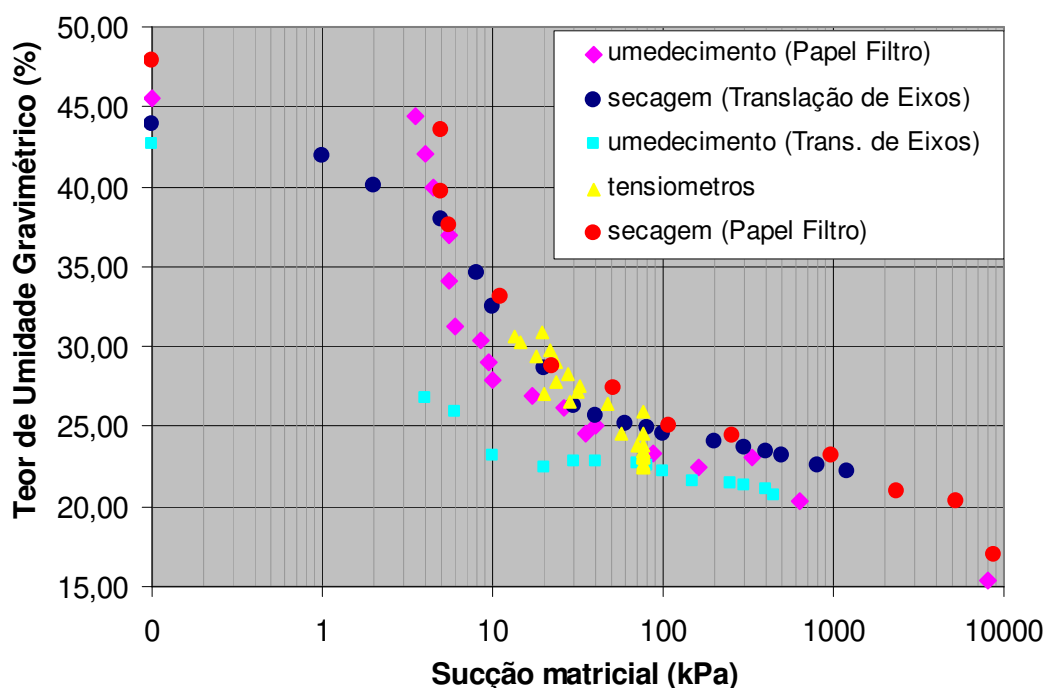


Figura 4.35 – Fenômeno da *histerese* (Profundidade 1,5m)

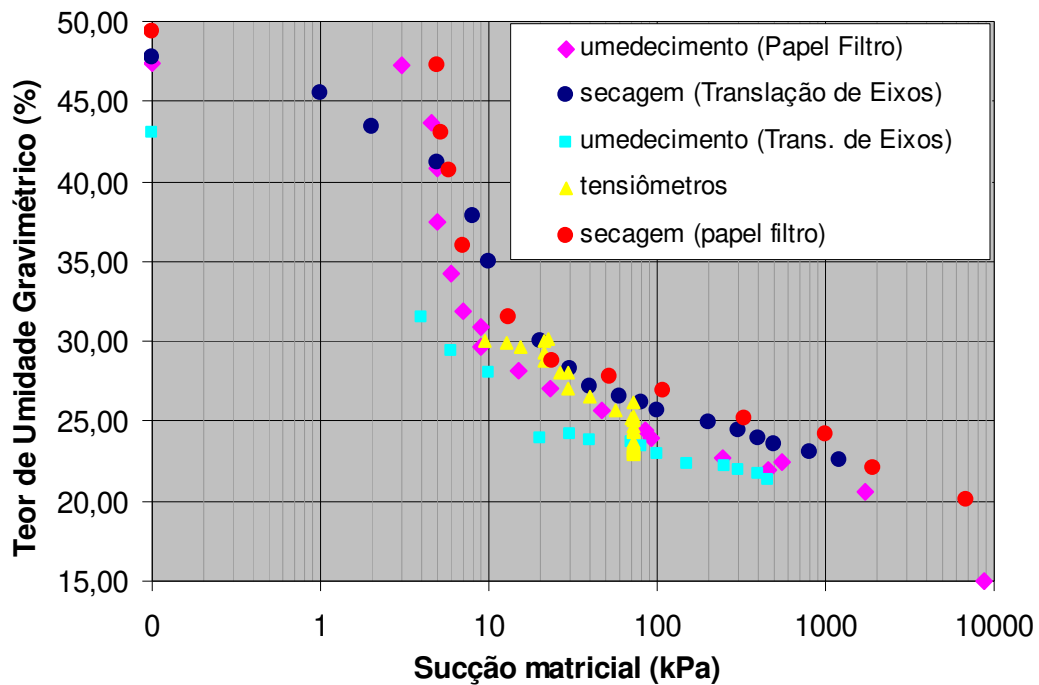


Figura 4.36 – Fenômeno da *histerese* (Profundidade 2,5m)

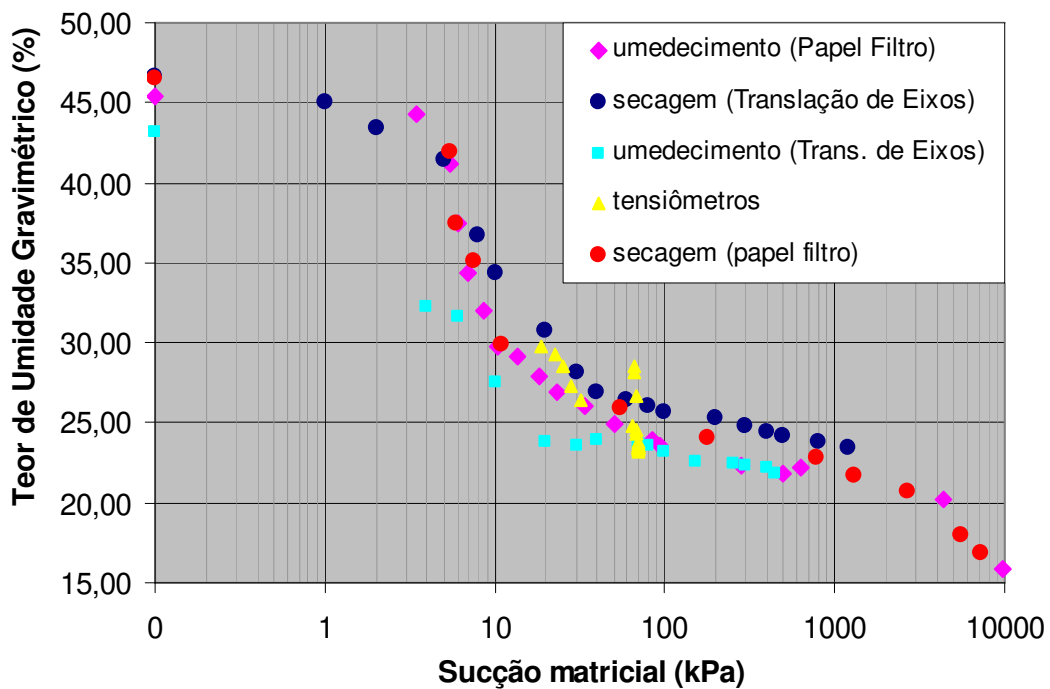


Figura 4.37 – Fenômeno da *histerese* (Profundidade 3,5m)

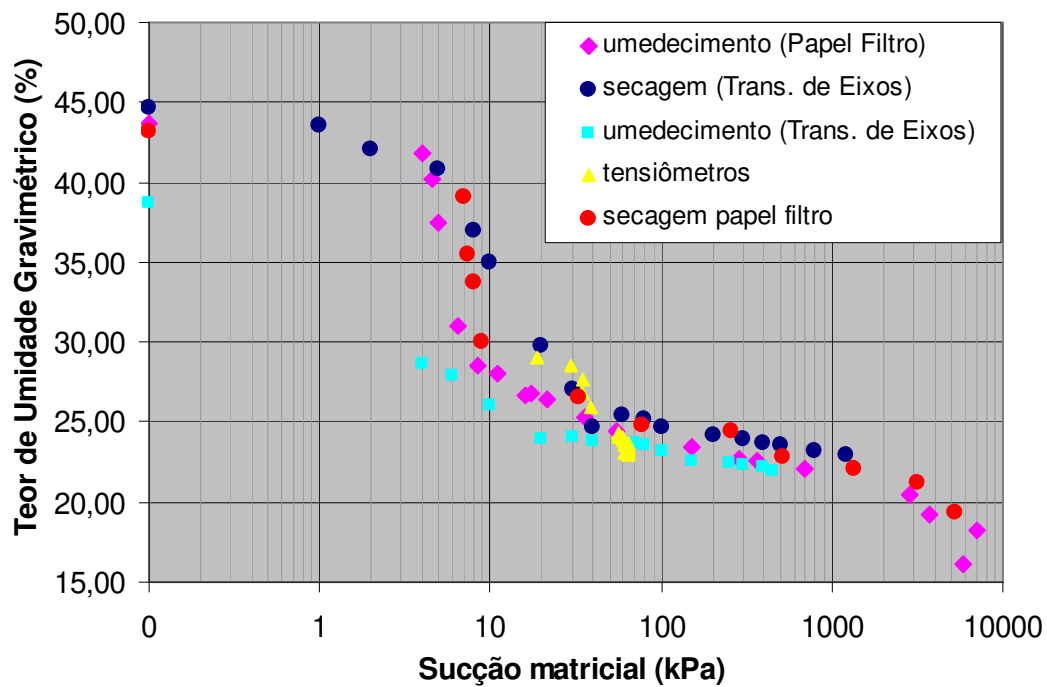


Figura 4.38 – Fenômeno da *histerese* (Profundidade 4,5m)

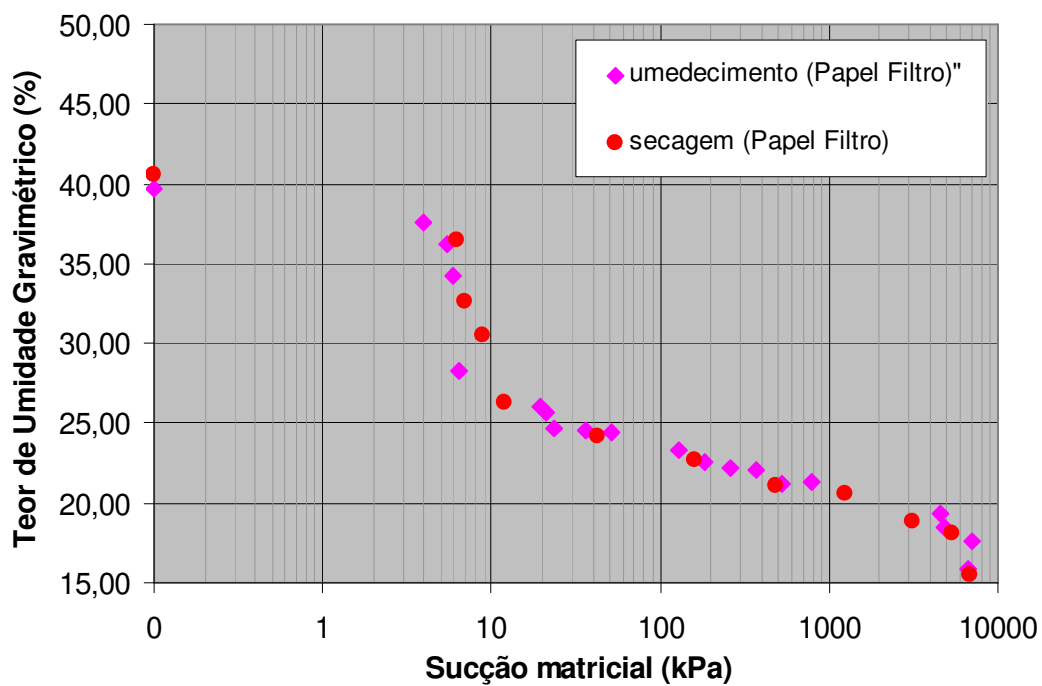


Figura 4.39 – Fenômeno da *histerese* (Profundidade 5,5m)

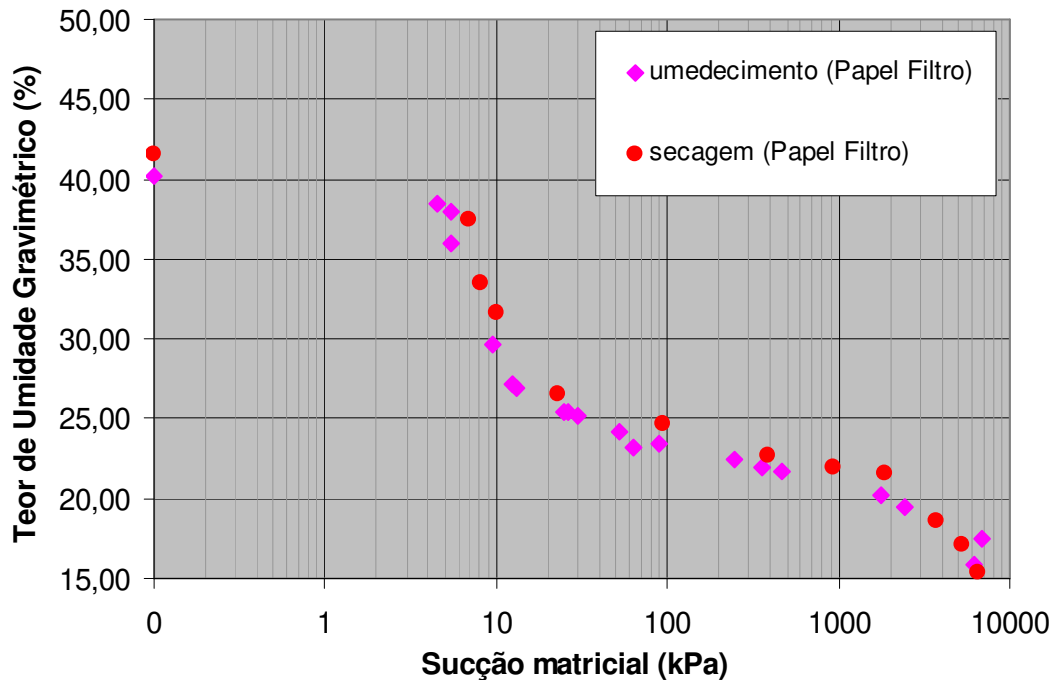


Figura 4.40 – Fenômeno da *histerese* (Profundidade 6,5m)

Nas Figuras 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 e 4.40, percebe-se a presença do fenômeno da *histerese* para profundidades menores. Conforme a profundidade vai aumentando, o fenômeno fica menos evidente. A diferença entre as curvas aparece principalmente entre a entrada de ar nos macroporos até a entrada de ar nos microporos.

A diferença entre as curvas (secagem e umedecimento) aparece mais claramente nas profundidades 1,5m e 2,5m, pois nestas profundidades existe grande quantidade de poros comunicantes, como pode ser visto nas Figuras 4.6 e 4.7. Nas profundidades 3,5m e 4,5m a diferença entre as curvas (*histerese*) foi bem menor, devido a uma melhor distribuição dos poros e por possuírem um índice de vazios menor do que o das amostras de profundidades menores, conforme visto na tabela 4.1 e nas análises das lâminas.

Na profundidade 5,5m, onde existem poucos poros comunicantes (Figura 4.13) e uma matriz cimentante mais expressiva, as curvas de secagem e umedecimento são praticamente iguais, não ficando evidenciado o fenômeno da *histerese*. As curvas de secagem e umedecimento da profundidade de 6,5m possuem uma pequena diferença, pois o material da profundidade 6,5m, conforme foi visto e analisado com as lâminas, possui uma contribuição do material subjacente (solo residual de diabásio) a ele e um melhor equilíbrio entre os poros comunicantes e não comunicantes (Figura 4.15).

A diferença entre as curvas obtidas pelos processos de umedecimento, mediante aos métodos de translação de eixos e de papel filtro, ocorre devida, principalmente, a técnica de umedecimento utilizado no método de papel filtro, ou seja, a água é colocada no corpo-de-prova, com o auxílio de um conta-gotas. Com isso o solo realiza um trabalho passivo, pois ele está sendo induzido a umedecer. Já no método de translação de eixos, o solo precisa realmente fazer um trabalho para que consiga atingir a umidade de equilíbrio com a sucção imposta na câmara de Richards. Esta diferença é bem clara para sucções abaixo de 500 kPa. Para sucções maiores, os dois métodos fornecem valores praticamente iguais. Outro fator que fornece esta diferença, é o ar ocluso presente nos poros dos corpos-de-prova devido ao procedimento da técnica de translação de eixos, pois no momento em que se aplica a sucção, a falta de um contato efetivo com a placa porosa saturada permitirá a entrada de ar nos poros, ficando o ar ocluso.

Nas curvas de retenção obtidas com o método do papel filtro, nota-se que elas sempre interceptam as aquelas obtidas com a translação de eixos (secagem), em valores relativamente baixos de sucção. Isto se deve, como já citado por outros autores, à dificuldade do papel filtro de reter água acima de 175% de umidade, ou seja, à dificuldade de conseguir medir sucções abaixo de 3 kPa.

Os pontos obtidos com os tensiômetros ficaram abaixo das curvas de retenção determinadas por secagem e acima das curvas por umedecimento, tanto

pelo método do papel filtro como pelo método de translação de eixos. Porém, estes pontos ficaram mais próximos das curvas de secagem e de umedecimento obtidas pelo papel filtro. Provavelmente, essa aproximação com o método do papel filtro deve-se ao fato do solo no campo umedecer pela infiltração da água da chuva, ou seja, o solo exerce um trabalho passivo assim como no ensaio do papel filtro feito por gotejamento.

A curva de secagem ficou muito próxima da curva de umedecimento obtidas pelo método do papel filtro. Porém, comparando com as curvas obtidas com a Câmara de Richards, pode-se ver que as curvas de secagem ficaram bem próximas. Ou seja, o método do papel filtro pelo processo de umedecimento fornece uma curva com valores próximos aos pelo processo de secagem, provavelmente, por causa da indução (inundar, colocar água no corpo-de-prova). Também pode ter influência, devido ao ciclo que pode ocorrer durante o umedecimento do corpo de prova (umedecimento-secagem-umedecimento) na realização dos ensaios, pois quando se colocava água no corpo de prova (umedecimento), esperava-se um pouco para colocar o papel filtro, e nesse tempo de espera havia perda de umidade do corpo de prova.

Nota-se que os pontos obtidos *in situ* formam uma curva de retenção de água, com o formato das curvas obtidas em laboratório.

Percebe-se que o fenômeno da *histerese* está relacionado com a quantidade, tamanho e, principalmente, a distribuição e geometria dos poros, visto que as amostras analisadas possuem mesma composição mineralógica.

4.7 Ajuste das Curvas de Retenção de Água

As equações de **FREDLUND E XING (1994)** foram utilizadas para se obter a modelagem das curvas de retenção obtidas e permitir uma melhor visualização de seus comportamentos.

Como o solo estudado se trata de um solo tropical, optou-se por separar a curva em duas, uma que vai da sucção de 0kPa até 1000kPa e outra, do trecho de 1000kPa até 1000000kPa. A curva utilizada para obter a modelagem foi a de secagem.

Exatamente por se tratar de um solo tropical, também se utilizou um modelo de ajuste para este tipo de solo, segundo o modelo de **GITIRANA e FREDLUND (2004)**. Também foram utilizados os dados de secagem para o ajuste.

Foram traçados modelos de ajuste para os dois métodos utilizados, Papel Filtro e Translação de Eixos, e também uma terceira modelagem, utilizando os dados do método de translação de eixos para valores de sucção até 10 kPa e os dados do método do papel filtro para valores de sucção maiores que 10 kPa.

Com o método de translação de eixos, só foi possível utilizar o modelo de **FREDLUND E XING (1994)**, pois o modelo de **GITIRANA e FREDLUND (2004)** não se adapta às curvas obtidas com o método de translação de eixos, por causa do “falso” formato delas, distinto das de solos não tropicais. Assim, os ajustes das hipérboles do modelo de **GITIRANA e FREDLUND (2004)** não podem ser definidos.

As Figuras 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46 mostram os ajustes das curvas utilizando os dados do papel filtro e as Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os resultados dos parâmetros utilizados nas equações.

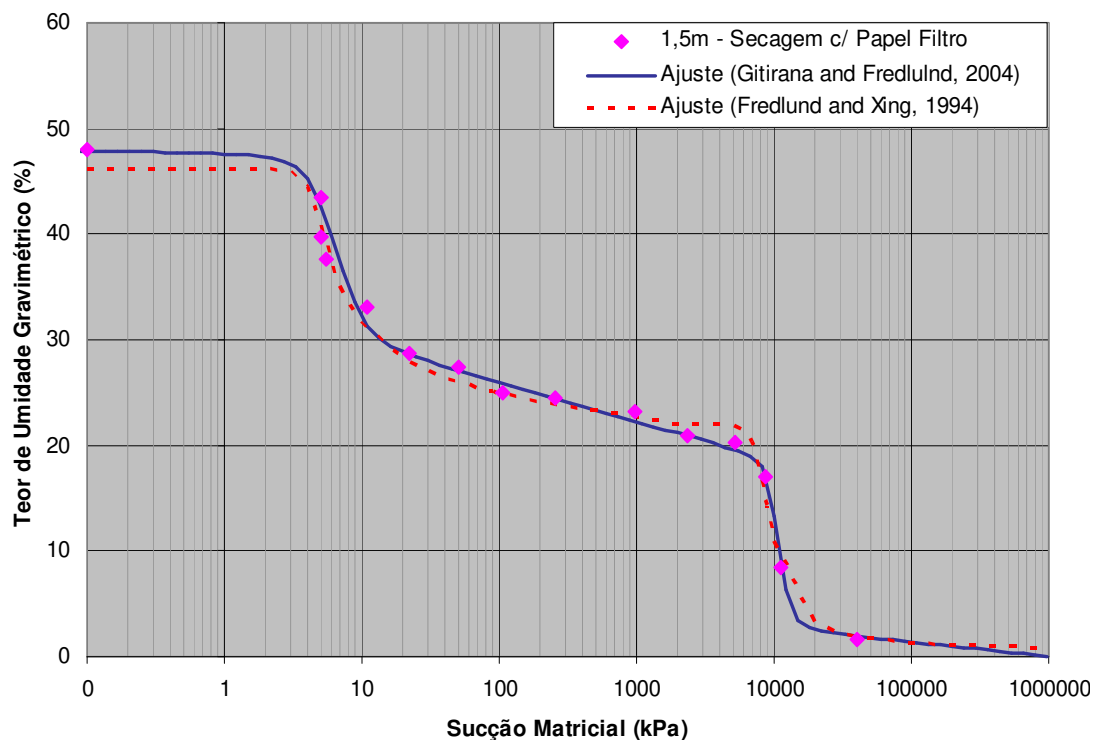


Figura 4.41 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 1,5m)

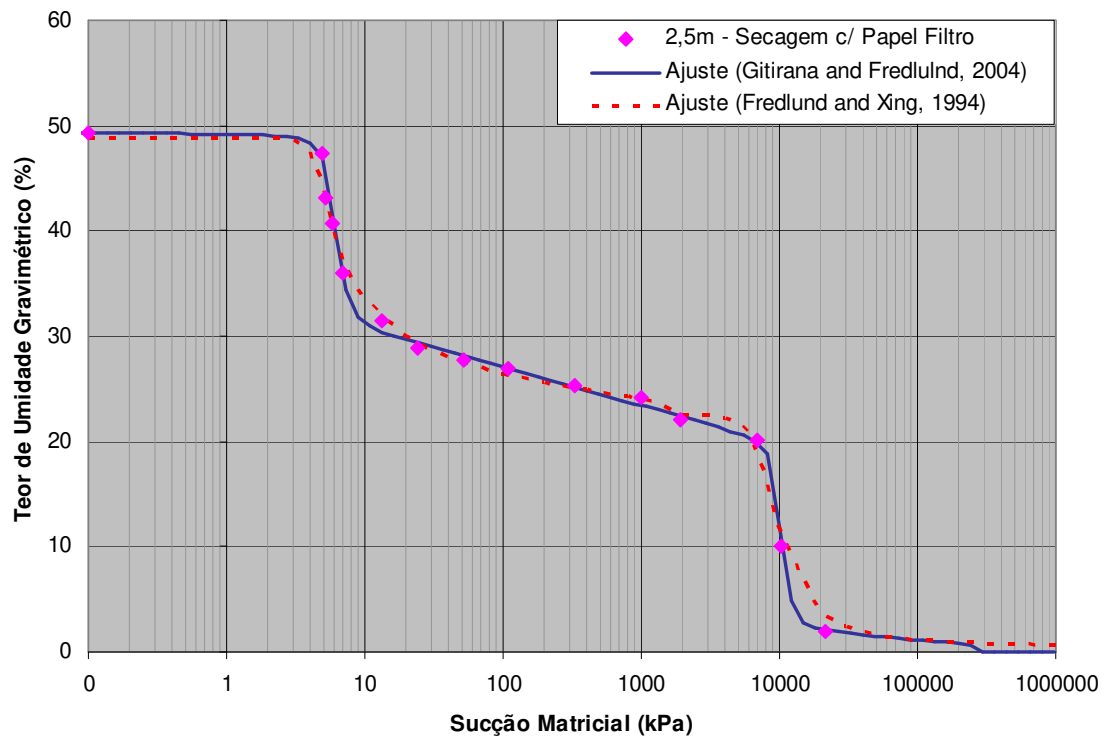


Figura 4.42 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 2,5m)

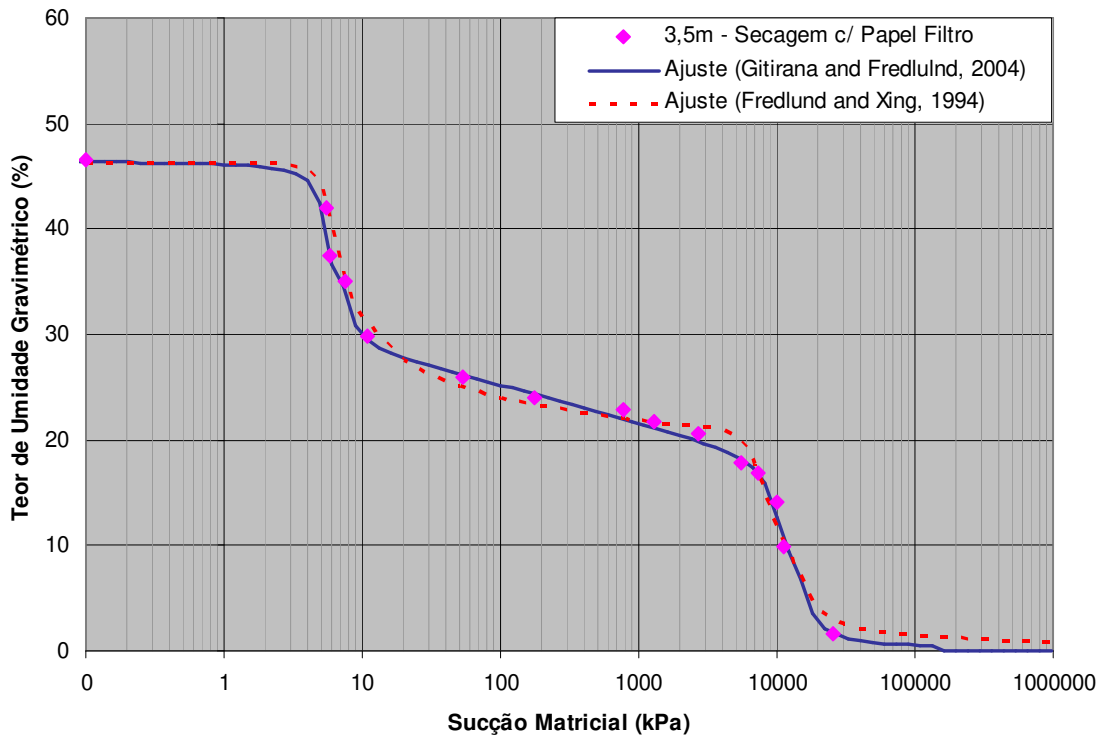


Figura 4.43 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 3,5m)

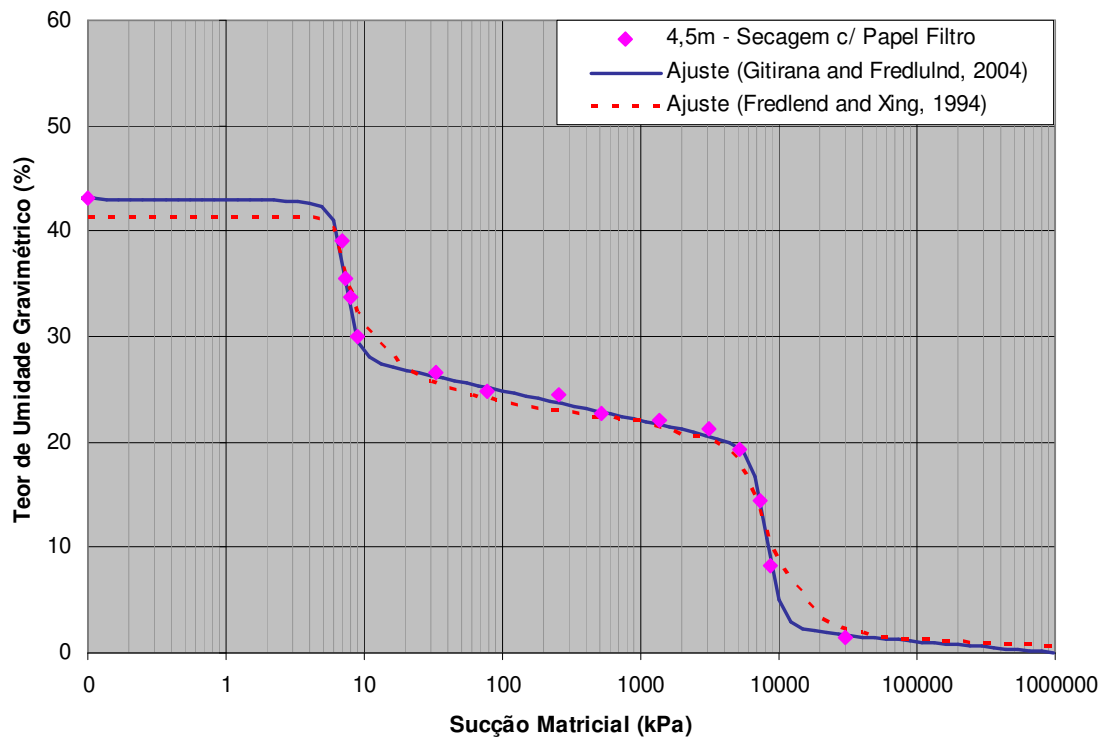


Figura 4.44 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 4,5m)

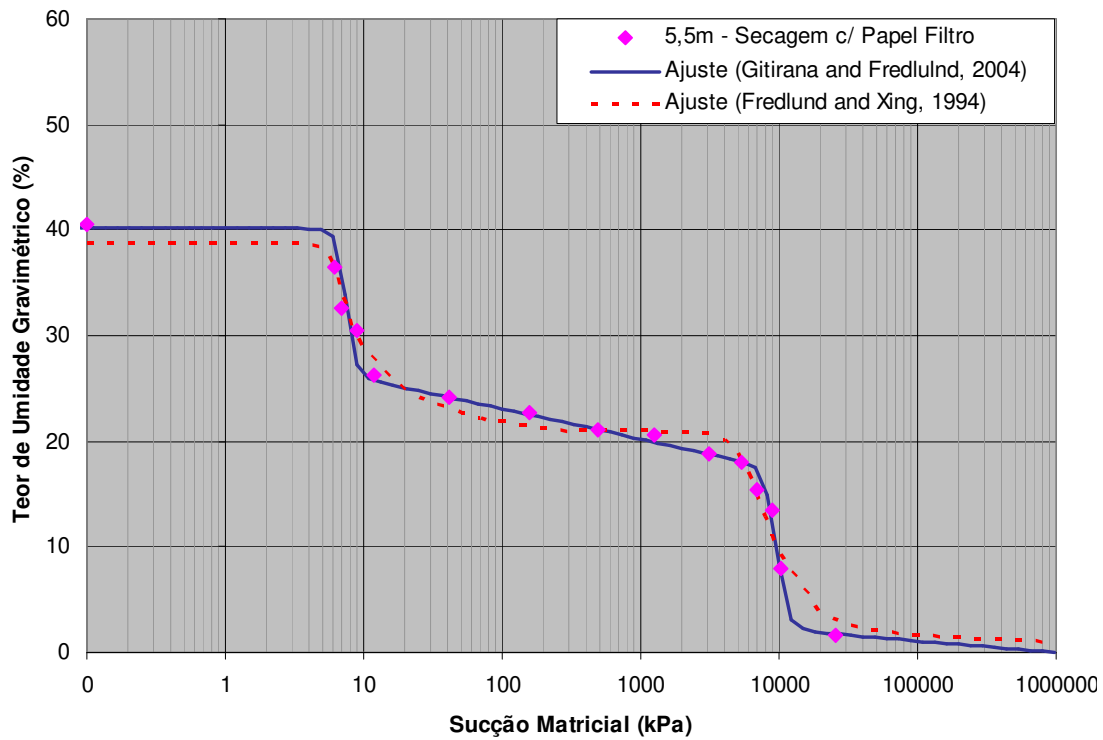


Figura 4.45 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 5,5m)

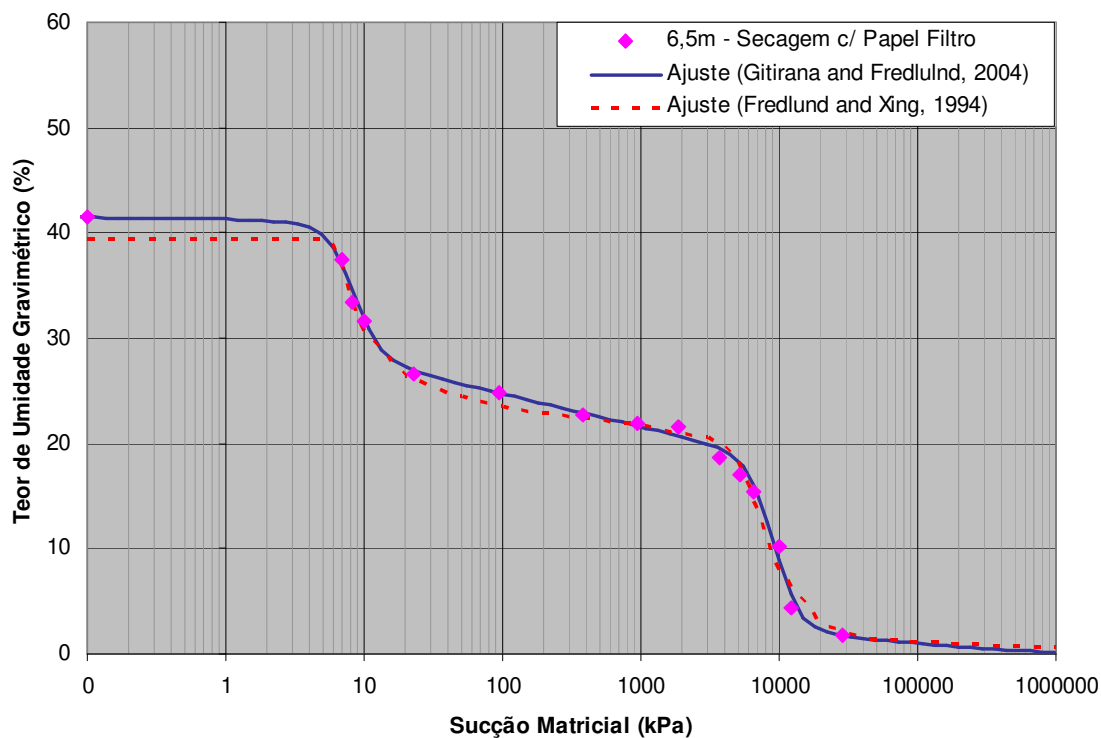


Figura 4.46 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com Papel Filtro (profundidade 6,5m)

Tabela 4.5 - Resultados dos modelos de ajuste (Gitirana e Fredlund, 2004), utilizando os dados obtidos com o método do papel filtro.

Prof.	Ψ_{b1}	w_{b1}	Ψ_{res1}	w_{res1}	Ψ_{b2}	w_{b2}	Ψ_{res2}	w_{res2}	a
(m)	(kPa)	-	(kPa)	-	(kPa)	-	(kPa)	-	-
1,5	4,5	0,480	9,5	0,291	9550	0,191	12000	0,024	0,040
2,5	5,4	0,493	7,19	0,309	9177	0,202	11500	0,020	0,041
3,5	5,5	0,465	7,29	0,285	10000	0,188	15000	0,002	0,062
4,5	6,3	0,431	8,61	0,276	6500	0,200	10000	0,020	0,029
5,5	6,5	0,406	8,77	0,259	7800	0,178	11500	0,020	0,019
6,5	6,0	0,416	12,00	0,270	6100	0,197	13300	0,015	0,031

Tabela 4.6 - Resultados dos modelos de ajuste (Fredlund e Xing, 1994), utilizando os dados obtidos com o método do papel filtro.

Prof. (m)	w_s	a	m	n
1,5 <1000 kPa	0,406	5,0	0,16	9,00
1,5 >1000 kPa	0,120	9500,0	0,75	8,00
2,5 <1000 kPa	0,460	5,0	0,18	8,00
2,5 >1000 kPa	0,122	9700,0	0,95	5,00
3,5 <1000 kPa	0,400	6,0	0,16	8,50
3,5 >1000 kPa	0,100	10500,0	0,85	4,50
4,5 <1000 kPa	0,370	7,0	0,13	11,00
4,5 >1000 kPa	0,095	9000,0	0,90	4,00
5,5 <1000 kPa	0,330	7,2	0,13	9,00
5,5 >1000 kPa	0,083	10000,0	0,75	4,00
6,5 <1000 kPa	0,350	7,5	0,12	10,50
6,5 >1000 kPa	0,085	9000,0	0,90	4,00

As Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50 mostram os ajustes das curvas utilizando os dados obtidos com o método da translação de eixos. Os resultados dos parâmetros obtidos com as equações de **FREDLUND e XING (1994)** estão na Tabela 4.6.

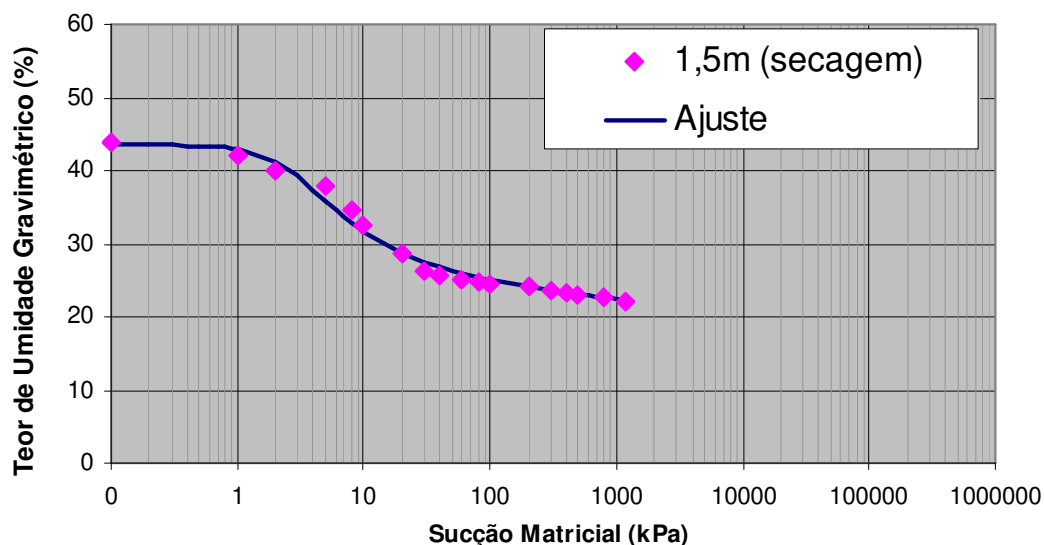


Figura 4.47 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 1,5m) (Fredlund e Xing, 1994)

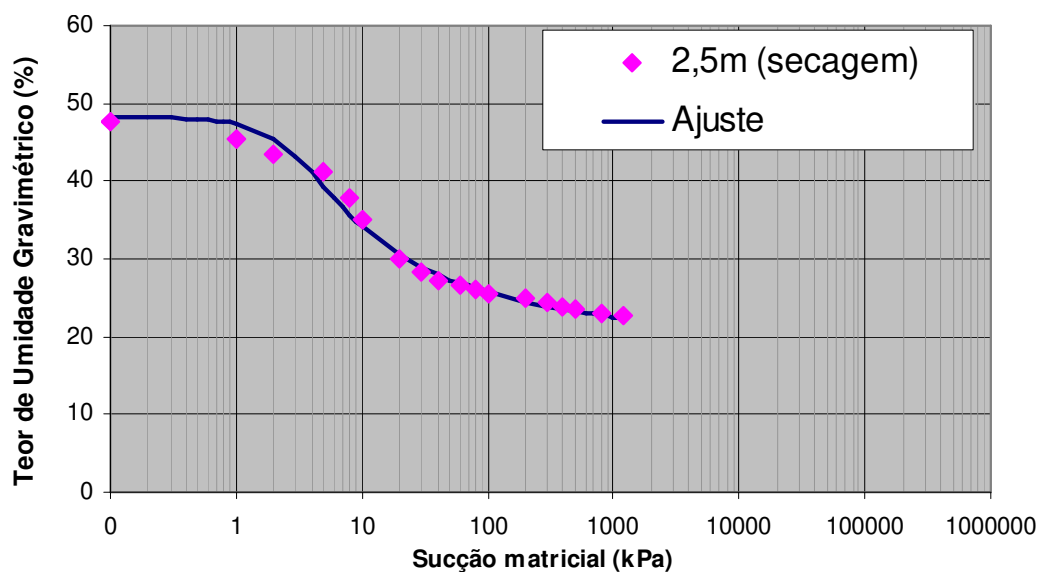


Figura 4.48 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 2,5m) (Fredlund e Xing, 1994)

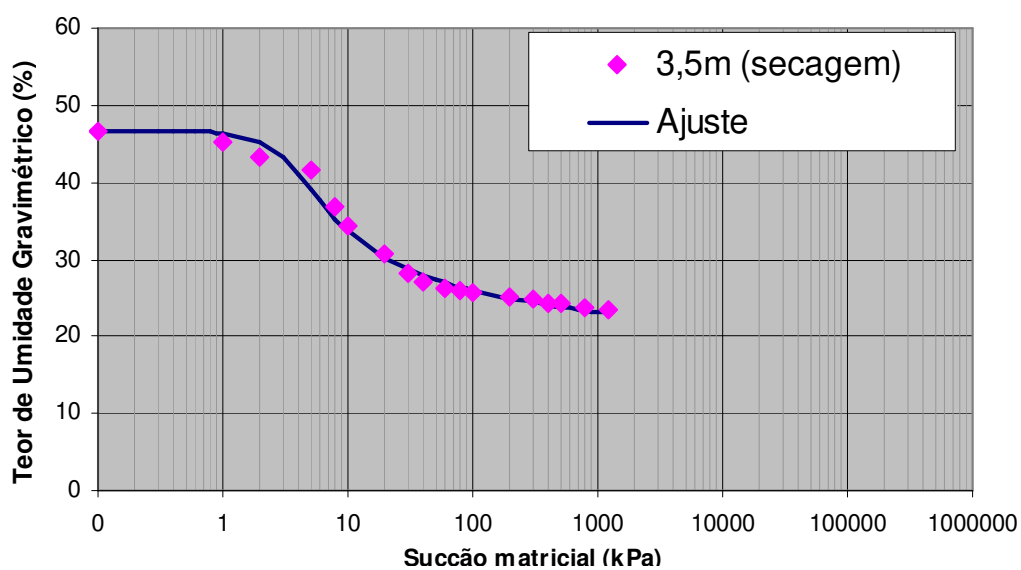


Figura 4.49 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 3,5m) (Fredlund e Xing, 1994)

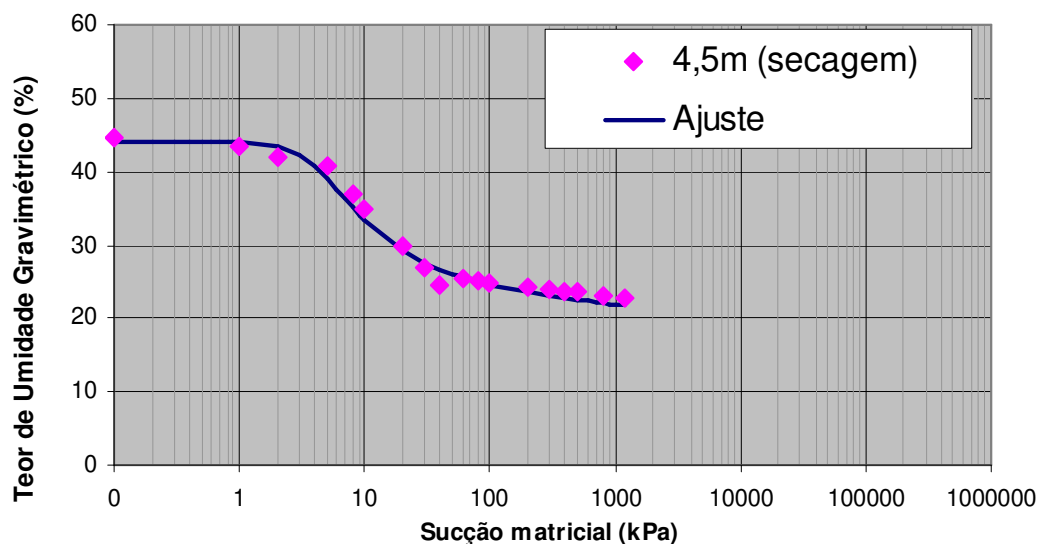


Figura 4.50 – Modelos de Ajuste das Curvas de Retenção obtidas com a Translação de Eixos (Profundidade 4,5m) (Fredlund e Xing, 1994)

Tabela 4.7 - Resultados dos Modelos de Ajuste (Fredlund e Xing, 1994), utilizando os dados obtidos com o método da translação de eixos.

Prof. (m)	Ws	a	m	n
1,5	0,370	4,0	0,20	2,20
2,5	0,410	4,0	0,25	2,00
3,5	0,390	4,7	0,20	2,50
4,5	0,370	6,0	0,20	2,70

Para verificar a diferença entre os métodos, no início das curvas, foram colocados na Tabela 4.8 os parâmetros obtidos, utilizando o mesmo modelo, para os métodos papel filtro e translação de eixos.

Tabela 4.8 - Comparação dos parâmetros obtidos com a modelagem de Fredlund e Xing, 1994

Prof. (m)	Ws		a		m		n	
	Papel Filtro	Trans. De Eixos	Papel Filtro	Trans. De Eixos	Papel Filtro	Trans. De Eixos	Papel Filtro	Trans. De Eixos
1,5	0,41	0,37	5,00	4,00	0,16	0,20	9,00	2,20
2,5	0,46	0,41	5,00	4,00	0,18	0,25	8,00	2,00
3,5	0,40	0,39	6,00	4,70	0,16	0,20	8,50	2,50
4,5	0,37	0,37	7,00	6,00	0,13	0,20	11,00	2,70

Nota-se que o método do papel filtro fornece valores bem diferentes dos valores obtidos com a translação de eixos, principalmente, nos valores de “n”. Isto ocorre devido a limitação do papel filtro, no que diz respeito a capacidade de medida do método (a partir de 7 kPa), fazendo com que a curva fique menos inclinada no trecho inicial, e, assim, alterando o valor de “n”.

Como o modelo de **GITIRANA e FREDLUND (2004)** forneceu um melhor ajuste, foi feita uma nova modelagem utilizando os dados da translação de eixos para sucções até 10kPa e, para as demais sucções, foram utilizados os dados do papel filtro. As curvas obtidas são mostradas nas Figuras 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54 e os parâmetros obtidos estão na Tabela 4.9.

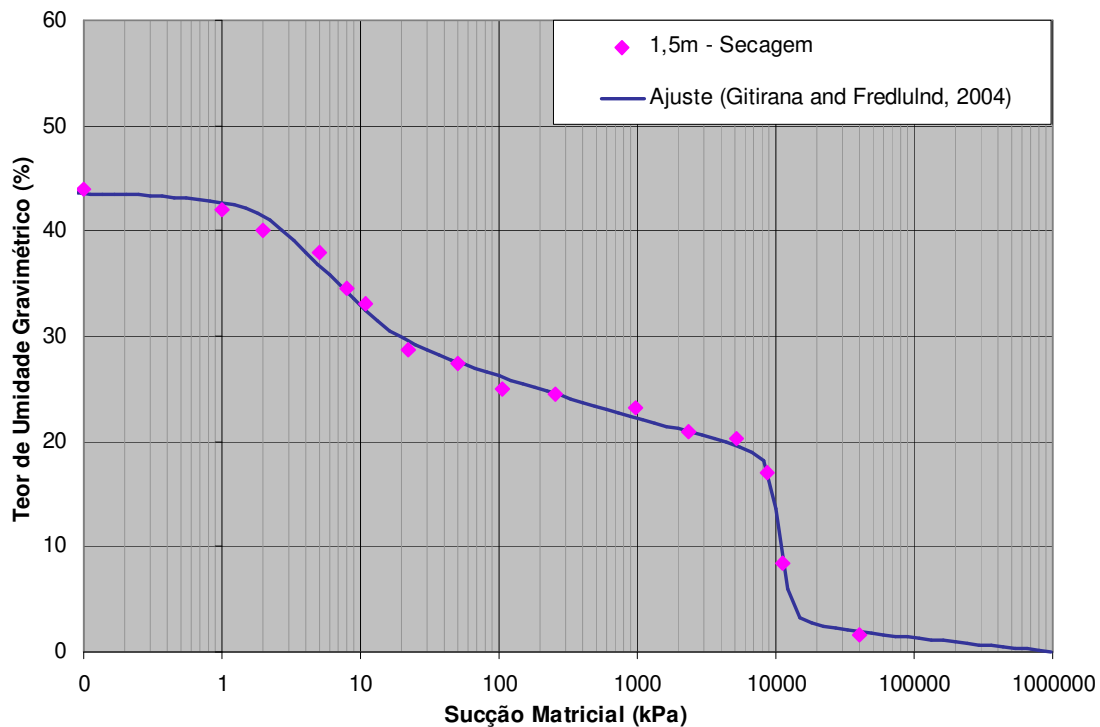


Figura 4.51 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 1,5m)

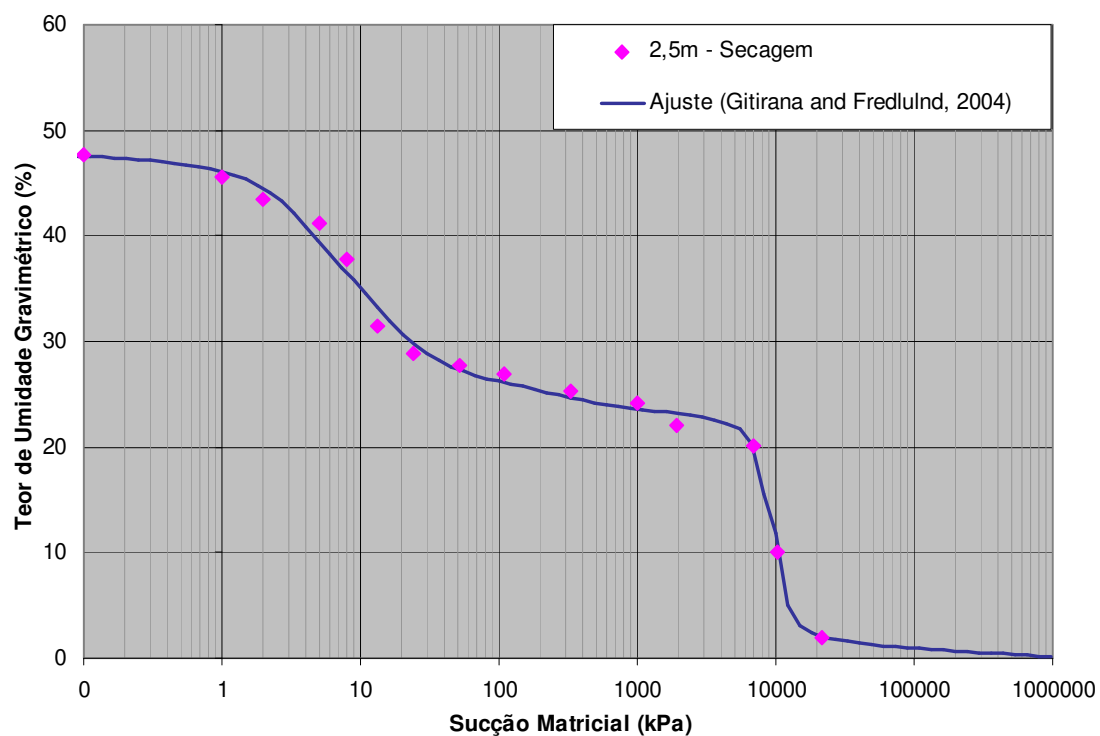


Figura 4.52 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 2,5m)

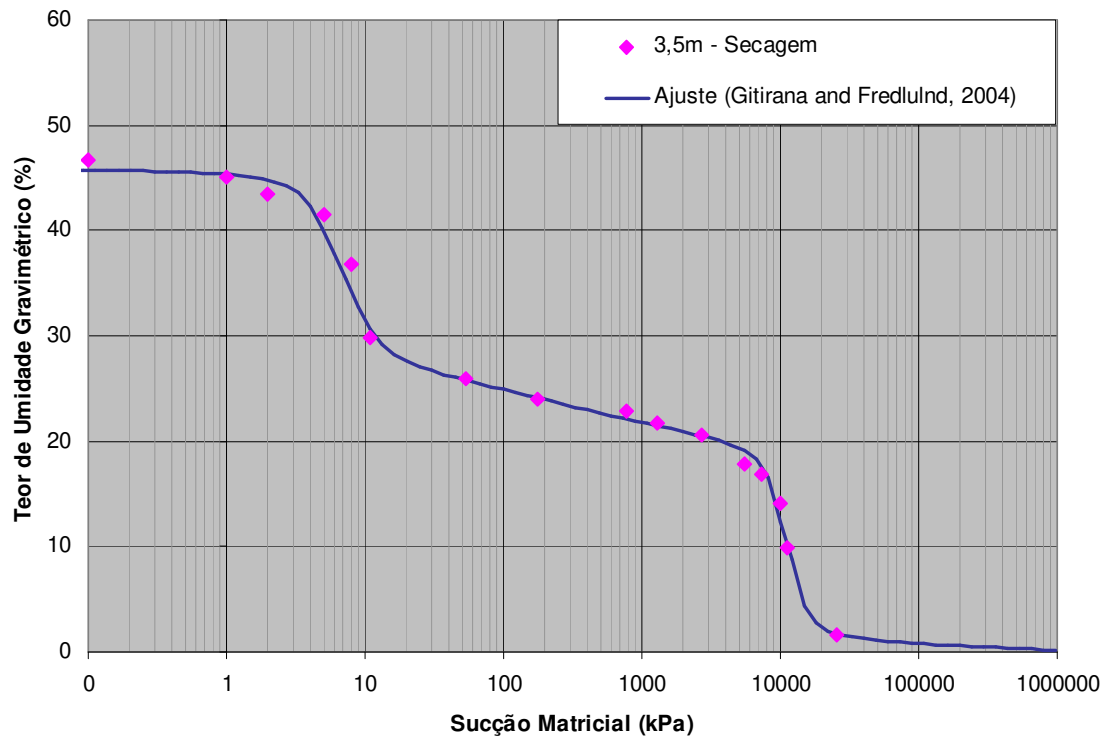


Figura 4.53 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 3,5m)

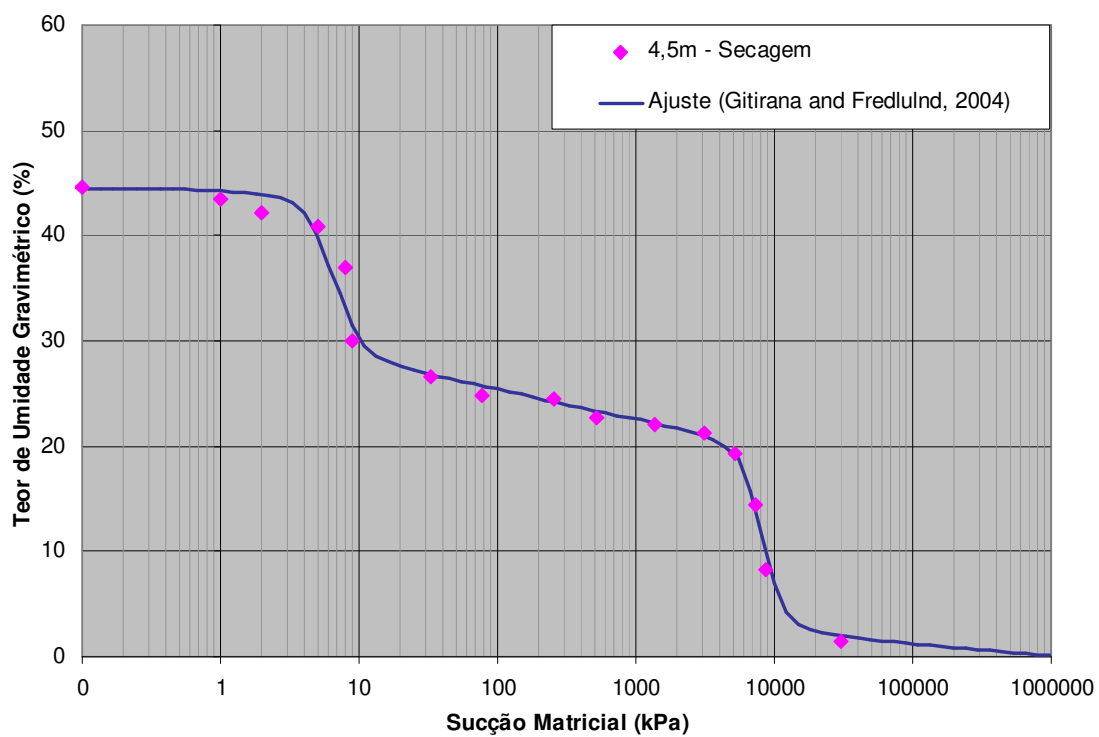


Figura 4.54 – Modelo de Ajuste das Curvas de Retenção (profundidade 4,5m)

Tabela 4.9 - Resultados dos Modelos de Ajuste (Gitirana e Fredlund, 2004), utilizando dados de ambas as técnicas: papel filtro e translação de eixos.

Prof. (m)	ψ_{b1} (kPa)	w_{b1} -	ψ_{res1} (kPa)	w_{res1} -	ψ_{b2} (kPa)	w_{b2} -	ψ_{res2} (kPa)	w_{res2} -	a -
1,5	2,5	0,440	12,0	0,290	9550	0,191	12000	0,024	0,037
2,5	3,5	0,479	17,0	0,250	8100	0,232	10500	0,013	0,071
3,5	4,5	0,467	10,0	0,269	9000	0,197	13500	0,010	0,050
4,5	5,0	0,445	8,5	0,276	6500	0,210	10000	0,020	0,048

Conforme se pode notar nas Figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47, os resultados obtidos não foram muito bons no início das curvas, pois foram utilizados dados de diferentes métodos e de diferentes corpos-de-prova.

Também se pode perceber que os valores de entrada de ar nos macroporos (ψ_{b1}) aumentam conforme se avança em profundidade, devido ao tamanho e distribuição desses macroporos, como visto nas análises das lâminas de solo.

5 Considerações Finais

O perfil de solo do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações, até, aproximadamente, 6,5m de profundidade trata-se de uma argila silto-arenosa, de alta porosidade, que sofreu transporte por gravidade, de comportamento laterítico, composto por argilo-minerais do tipo caulinita, quartzo e óxidos de ferro (hematita), servindo como cimentação entre os grãos de argila e de areia. O material subjacente à profundidade de 6,5m, até 7,0m, se refere a um silte arenoso, residual de diabásio, que sofreu laterização intensa, porém não possui comportamento laterítico, nem plasticidade, composto basicamente por gibbsita e por óxidos de ferro do tipo goethita, além de quartzo.

As curvas de retenção de água do solo para o perfil de solo coluvionar, até a profundidade de 6,5m, obtidas pela técnica do papel filtro, mostraram-se ser do tipo bimodal, típicas de solos tropicais com estruturas macro e microagregadas. Os valores de pressão de entrada de ar são relativamente baixos, igualmente aos valores obtidos para areias, mostrando que o comportamento deste solo se

assemelha em alguns aspectos, como por exemplos, a permeabilidade e a granulometria sem o uso de defloculante na fase de sedimentação, ao de areias.

O fenômeno da *histerese* foi observado no perfil de solo, ao longo da profundidade, sendo sempre mais evidente em amostras de solo com maior índice de vazios e com comunicação entre os poros. O material cimentante foi muito importante para a compreensão de como os poros se distribuem, quando os grãos dos argilo-minerais e quartzo estiverem recobertos pelos mesmos.

Embora outros fatores, tais como a orientação das partículas e a variação iônica no solo possam também modificar a forma da curva de retenção de água, uma vez que as interações entre as partículas e as forças de ligação e de retenção de água podem ser alteradas, as análises apresentadas mostraram claramente a influência da distribuição dos poros e da comunicação dos mesmos na definição das curvas de retenção de água do solo.

Quanto ao monitoramento da sucção matricial do perfil de solo em campo, por meio da instalação de tensiômetros convencionais, mesmo com uma alta variação de umidade no período de um ano (22% a 31%), foi possível obter valores de sucção. O volume pluviométrico observado no período foi maior do que o esperado, mesmo assim, o perfil de solo manteve um valor mínimo de sucção matricial, que os tensiômetros conseguiram registrar. Dessa maneira, poder-se-ia considerar este valor mínimo de sucção em alguns projetos geotécnicos.

Apesar da diferença vista entre as curvas obtidas por diferentes métodos (papel filtro, translação de eixos, tensiômetros convencionais), pode-se considerar que todas elas apresentam bons resultados. Principalmente o método do papel filtro para sucções matriciais maiores que 10 kPa e o método de translação de eixos para sucções matriciais menores que 1200 kPa. Os tensiômetros convencionais, mesmo com suas limitações, permitiram realizar o monitoramento da sucção matricial em campo.

Como podem ser visto, todas as técnicas possuem algumas limitações. O papel filtro não consegue absorver água após 175% de teor de umidade do papel, o que corresponde a uma sucção de 3 kPa, porém sucções até 10 kPa também não são confiáveis.

A técnica de translação de eixos possui vários atenuantes. O tempo de equilíbrio do corpo-de-prova com a placa porosa é longo, o contato entre a placa e o solo deve ser garantido o máximo possível e, devido à imposição de sucção matricial, a formação de ar ocluso na amostra é praticamente inevitável.

Os tensiômetros possuem como limitante a cavitação da pedra porosa, impedindo a leitura de sucções matriciais maiores que 100 kPa.

É importante entender como são obtidas as curvas de umedecimento, pois, como foi visto, há uma diferença nas curvas obtidas por técnicas diferentes, devido ao procedimento utilizado no umedecimento dos corpos-de-prova. As curvas de umedecimento podem ser obtidas adicionando água diretamente aos corpos-de-prova, como na técnica do papel filtro, ou fazendo com que os corpos-de-prova realizem um trabalho para umedecer, como na técnica de translação de eixos.

O modelo utilizado para solo de estrutura bimodal, de **GITIRANA e FREDLUND (2004)** se ajustou muito bem aos valores experimentais das curvas de retenção, obtidos com o método do Papel Filtro.

O modelo de **FREDLUNG e XING (1994)** também apresentou bons ajustes aos valores experimentais obtidos, entretanto, quando se modificou esse modelo, adotando uma ajuste até a sucção 1000 kPa e outro ajuste para sucções maiores que 1000 kPa, com a finalidade de aplicá-lo para solos de estrutura bimodal, verificaram-se ajustes bem mais satisfatórios.

Os modelos obtidos para as curvas de retenção de água poderão ser utilizados em futuras pesquisas com o propósito de compreender os comportamentos hidráulico e mecânico do perfil de solo coluvionar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Amostras de Solos - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. NBR 6457.1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação da Massa Específica dos Grãos. NBR 6508. 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Análise Granulométrica. NBR 7181. 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação do Limite de Liquidez. NBR 6459. 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180. 1984.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas (procedimentos). NBR 9604. 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – Determinação do Limite e Relação de Contração de Solos. NBR 7183. 1982.

ALBUQUERQUE, P.J.R. de; MASSAD, F.; CARVALHO, D. de e FERREIRA, M.A.M.. Comportamento à Compressão de Estacas Escavadas, Hélice Contínua e Hélice Tipo Ômega, em Solo Residual de Diabásio. Campinas/SP: UNICAMP, 2001. 198p.

ALONSO, E. E.; GENS, A. e HIGHT, D. W., (1987) Special Problems Soils. General Report, In: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H. e GARDNER, W. R. (1972) Soil Physics, 4ed. London, Wiley and Sons.

BOOCKING e FREDLUND, D.J. (1980) Limitation of axis translation technique, 4^o International Conference on Expansive Soils, pp.117-135, Denver, EUA

CALLE, J.A.C. (2000) Análise de Ruptura de Talude de um Solo Não Saturado, Tese de Mestrado, EESC-USP/ São Carlos.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. and LEROUEIL, S. (2000) Modelo de normalização da curva característica. 32^a Reunião Anual de Pavimentação, Brasília /DF, v.1, p175-183.

- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C. e PEREIRA, J. H. F. (2000) Courbes de Retention d'eau d'un Profil d'alteration, 3^o International Conference on Unsaturated Soil, Vol. 1, pp. 289-294, Recife, Brasil.
- CAMPOS, T.M.P. (1994) Equipamentos e Técnicas para Determinação da Sucção no Campo, Anais do II Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Vol. 1, pp. 9-18, Recife.
- CARVALHO, J.C. de & LEROUEIL (2004), S. Curva Característica e Sucção Transformada. Revista Solos e Rochas, São Paulo, Vol. 27, (3): 231-242.
- CASAGRANDE, A. (1948). Classification and Identification of Soils. American Society Civil Engineering (113), 901-991.
- CAVALCANTE, E. H.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; CARVALHO, D. de (2006) Workshop Campos Experimentais - Campo Experimental da Unicamp., 08/2006, *XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Vol. 1, pp.28-35, Curitiba, PR, Brasil
- CHANDLER, R. J. e GUTIERREZ, C.I. (1986) The filter paper method of suction measurement, *Géotechnique*, Vol. 36, 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. *Proc. of The Institution of Civil Engineering*. 92-2, pp.89-89.
- CRONEY, D. (1952) The Movement and Distribution of Water in Soils, *Geotechnique*, pp 1-16
- CRONEY, D.; COLEMAN, J. D.; BLACK, P. M. (1958) Movement and Distribution of Water in Soil in Relation in Highway Design and Performance. Highway Research Board, Special Report, N° 40, pp. 226-252, Washington

CRONEY, D. e COLEMAN, J.D. (1961) Pore Pressure and Suction in Soils. Proceeding in Conference on Pore Pressure and Suction in Solis, pp. 31-37, London

DINEEN, K. and RIDLEY, A. M. (1999) The Soil Moisture Characteristic Curve the Influence of Histeresis on its Measurement and Interpretation, XII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 2, pp. 1013-1018, Foz do Iguaçu/PR / Brasil

EDIL, T. B. e MOTAN, S. E. (1984) Laboratory Evaluation of Soil Suction Components, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Philadelphia, 7(4),pp 173-181

FARIAS, W.M; CARDOSO, F.B. da F.; MARTINS, E. de S. e CARVALHO, J.C. de. (2002) A Influência do Oxi-Hidróxido de Fe Matricial no Comportamento de Mecânico de Solos Tropicais. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo/SP.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; PEREIRA, A. (2004) Determinação das curvas características de solos coluvionares pelo uso combinado da placa de sucção e método do papel filtro. In: V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. São Carlos/SP. pp. 243-248.

FEUERHARMEL, C.; PEREIRA, A.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; VIVIAN, J. B. (2007) Determinação das curvas características de solos coluvionares em diferentes condições de moldagem. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador/BA. pp. 343-348.

FREDLUND, D.G. (1979) Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils. Canadian Geotech. Journal, 16, pp. 121-139.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1993.

FREDLUND, D.G. & XING, A. (1994) Equations for the soilwater characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, p. 521-532.

FREDLUND, D.J. (1998) Bringing Unsaturated Soil Mechanics into Engineering Practice, 2^o International Conference on Unsaturated Soil, Vol. 2, pp. 1-36, Beijing, China.

GARDNER, W.R. (1937) A Method of Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture over a wide Moisture Range, Soil Science, Vol. 43, No 4, pp. 277-283.

GERSCOVICH, D.M.S. e SAYÃO, A.S.F.J. (2002) Evaluation of the Soil-Water Characteristics Curve Equations for Soils from Brazil. Proceeding of the third International Conference on Unsaturated Soils. Vol. 1, 295-300, Recife, Brasil.

GIACHETI, H.L. (1991) Estudo Experimental de Parâmetros Dinâmicos de Alguns Solos Tropicais do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. EESC/USP, São Carlos.

GITIRANA Jr, G. de F. N. e FREDLUND, D. G. (2004) A soil water characteristic curve equation with independent properties, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130-2, pp. 209-213.

GUIMARÃES, L.S.P. (1996) Caracterização Química e Geotécnica de um Perfil de Solo Residual, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG

HILLEL, D. (1971) Soil Water- Physical Principle and Processes, New York, Academic Press, cap. 1-5

JENNINGS, J.E. & KNIGHT, K. The Additional Settlement of Foundations Due to a Collapse of Structure of Sandy Sub Soils on Wetting. In: IV International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering. Londres. Proceedings. Vol.1, p.316-319, 1957.

JUCÁ, J. F. T. (1990) Comportamento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada, 346 p, Doctorado, Universidad Politécnica de Madri, España

LIBARDI, P.L. (1995) Dinâmica da água no Solo, Edição do Autor, ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 497p.

LEE, H. C. e WRAY, W. K. (1995) Techniques to Evaluate Soil Suction – A Vital Unsaturated Soil Water Variable. Unsaturated Soils, Vol 2, 615-622

LEROUÉIL, S. e VAUGHAN, P.R. (1990) “The General and Congruent Effects Structure in Natural Soils and Weak Rocks”. Geotechnique, Vol. 40, N° 3, pp.467-488.

MARINHO, F.A.M. (1994) Técnica do papel filtro para medição de sucção. *In*: Encontro sobre Solos Não Saturados. Porto Alegre/RS. pp. 112-125.

MARINHO, F.A.M. (1997) Medição de sucção em solos. *In*: III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Rio de Janeiro/RJ. pp. 373-397.

MARINHO, F.A.M. (2005) Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados. Tese de Livre Docência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 300p.

- MARTÍNEZ-CARVAJAL, M.E, CARVALHO, J.C.de; FERNANDES G. (2005) Influência da Desagregação nos Limites de Atterberg. In: II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiânia/GO. CDrom..
- MARSHALL, T.J. e HOLMES, J.W. (1981) Soil Physics. Cambridge, Cambridge University Press, cap. 1-4
- Mc QUEEN, I.S. e MILLER, R.F.(1968) Calibration and Evaluation of wide-range gravimetric method for measuring soil moisture stress. Soil Science 10, p. 521-527
- MIGUEL, M. G., ALBUQUERQUE, P. J. R., AZEVEDO, G. S., SILVA, G. S. V., CARVALHO, D. de. (2006) Avaliação de um Solo de Diabásio da Região de Campinas/SP Quanto ao seu Comportamento Laterítico. Proc: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2006. Cobramseg'2006. Vol.1, Curitiba/PR, 273–278
- MIGUEL, M.G. (2007) Determinação das Curvas Características da Camada de Solo Superficial de Campinas. Relatório de Pesquisa apresentado à Fapesp. Proc. 2005/00164-7
- MIGUEL, M.G.; ALBUQUERQUE, P.J.R.; SAUEIA, F.N.; BENATTI, J. C. B.; MARQUE, R. e HAINAL, V.H.J. (2007) Aspectos Geológicos-Geotécnicos da Camada de Solo Argiloso, Laterítico e Coluvionar de Campinas/SP, In: III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos, Cuiabá/MT. CDrom
- MITCHELL, J.K. (1976) Fundamentals Soil Behavior, New York, John Wiley & Sons.
- NELSON, J.D. e MILLER, D.J. (1992) Expansive Soils – Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley & Sons, p. 259.

NEWILL, D. (1961) A laboratory investigation of two red clays from Kenya. Geotechnique, 11, pp. 302-318.

OLIVEIRA, O.M. (2004) Estudo sobre a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual Compactado Não Saturado, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PINGS, W.B. (1968) "Bacterial Leaching", Mineral Industries Bulletin, Colorado School of Mines, Vol. 2, N° 3, pp. 19.

REICHARDT, K. (1985) Processos de Transferências no Sistema Solo-Planta-Atmosfera, Fund., Cargill, Campinas, 466p

REIS, R.M. (2004) Comportamento Tensão-Deformação de Dois Horizontes de um Solo Residual de Gnaisse, Tese de Doutorado. Departamento de Geotecnia-USP/São Carlos.

RICHARDS, B.G.; EMERSOM, W.W. e PETER, P. (1986) Discussion of "Evaluation of soil suction components" by T. B. Edil and S. E. Motan. Geotechnical Testing Journal, ASTM, Philadelphia, 9(1):41-45, March

RÖHM, S.A, (1992) Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso Laterizado Não Saturado da Região de São Carlos. Tese de Doutorado. Departamento de Geotecnia- USP/São Carlos.

RÖHM, S.A, (1993) Solos Não Saturados: Monografia Geotécnica nº 4, São Carlos/EESC-USP, Publicação 081/93, 135p.

ROJAS, E. (2002) Modeling the Soil Water Characteristic Curve During Wetting e Drying cycles, 3° International Conference on Unsaturated Soil, Vol. 1, pp. 215-219, Recife, Brasil.

SOTO, M. A. (2004) Comparação de Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaio de Solos Não Saturados, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

STANNARD, D.I. (1992) Tensiometers - Theory, Construction and Use, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 15, nº1, march, pp. 48-58

TEIXEIRA, R. S. e VILAR, O. M. (1997) Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado Não Saturado, Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Rio de Janeiro/RJ. Editora Freitas Bastos, Vol. 1, pp. 161-169.

VANAPALLI, S. K. (1994) Simple Procedures and their Interpretation in Evaluating the Shear Strength an Unsaturated Soil, PhD Thesis, University of Saskatchewan, Canadá.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil. 1978, 509p.

VAUGHAN, P.R. (1985) "Mechanical and Hydraulic properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particularly as related to their structure and mineral components". First International Conference in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasília

VAUGHAN, P.R. (1988) Characterising the Mechanical Properties of *in situ* Residual Soils. Second International Conference on geomechanics in Tropical Soils, pp. 20-37, Singapore

VAZ, L.F. (1996) Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. Revista Solos e Rochas, São Paulo, Vol 19, n. 2, p. 117-136.

VIEIRA, A. M. (1999) Variação Sazonal de Sucção em um Talude de Solo Residual de Gnaisse. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VILAR, O.M. (1997-a) Ensaio de Campo em Solos Não Saturados. Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Rio de Janeiro/RJ. Editora Freitas Bastos. Vol.2, pág.491.

VILAR, O.M. (1997-b) Introdução à Mecânica dos Solos Não Saturados - Notas de Aula

WALLACE, K.B. (1973) Structural behaviour of residual soils of the continually wet Highlands of Papua New Guinea. Geotechnique, 23, N° 2, pp. 203-218.