UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E CONSTRUÇÃO CIVIL

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO DE APARECIDA DE GOIÂNIA-GO

01/02

CAMILLA RODRIGUES BORGES

D00014G10
GOIÂNIA
2010

CAMILLA RODRIGUES BORGES

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO DE APARECIDA DE GOIÂNIA-GO

01/02

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Gilson de Farias Neves Gitirana Junior

Co-orientador: Carlos Alberto Lauro Vargas

D00014G10
GOIÂNIA
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG

Borges, Camilla Rodrigues.
B732c Comportamento hidráulico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia-GO / Camilla Rodrigues Borges. - 2010.
2 v, 257 f. il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr· Gilson de Farias Neves Gitirana Junior ; Co-orientador: Carlos Alberto Lauro Vargas.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

1. Solo não saturado 2. Solos tropicais 3. Curva característica 4. Histerese. I. Título.

CDU: 626:537.623

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pos-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO DE APARECIDA DE GOIÂNIA-GO 01/02

Camilla Rodrigues Borges

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Prof. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Júnior (UFG)

Profª. Drª. Lilian Ribeiro de Rezende (UFG)

Prof. Dr. Tácio Mauro Pereira de Campos (PUC-RJ)

Goiânia, 30 de abril de 2010.

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus que sempre me deu disposição e condição para a realização da mesma. Dedico também aos meus pais, por todo amor e dedicação, por sempre se fazerem presente em todos os momentos mesmo estando longe, pelo apoio, compreensão e principalmente por sempre acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

À Deus por todas as bênçãos que tem me concedido, por estar sempre comigo principalmente em meio as tempestades, me guiando, iluminando meu caminho e me dando forças para seguir adiante em busca de novas conquistas.

À meus pais, João e Leusa, e aos meus irmãos, Gustavo e Renan pelo apoio, carinho, paciência, amor e compreensão nos momentos que tanto precisei, pelo incentivo ao aprendizado contínuo e pela confiança depositada em mim durante esta jornada da minha vida. Família que eu admiro, respeito e terei enorme gratidão por toda minha vida. Obrigada por compreenderem minha ausência nos momentos importantes!

A toda minha família, tios, primos pelo apoio, carinho, paciência. Principalmente aos meus avós por toda assistência, carinho, paciência e atenção.

Ao professor Gilson Gitirana Jr pela orientação, paciência, pelo incentivo nos momentos de dificuldade e pela confiança depositada em mim. Obrigada por sua dedicação e por todo conhecimento transmitido ao longo da pesquisa. Esses dois anos de convivência foram muito importantes para mim, tê-lo como orientador foram ensinamentos preciosos. Obrigada por tudo!

Ao professor Carlos Vargas pela co-orientação, paciência, dedicação, generosidade e pela sua imensa contribuição durante o desenvolvimento desta pesquisa.

A professora Patrícia Romão pela geração dos mapas.

Ao professor José de Camapum de Carvalho pela colaboração.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás, pela disponibilização dos equipamentos laboratoriais para execução dos ensaios. Ao técnico João Júnior e ao estagiário Victor Nakamura pelo apoio na execução dos ensaios.

À todos os professores e colegas do GECON pelos ensinamentos e companheirismo durante esta jornada.

À querida amiga Aparecida pelo carinho e por sempre atender cordialmente os meus pedidos na secretaria do GECON. A Ludmilla, nova secretária do GECON, pela paciência, e companhia na hora do almoço.

À professora Marcia Mara pelo carinho e palavras de apoio nos momentos de dificuldade no laboratório. Pelas balas e chocolates sempre dados com muito carinho.

As minhas grandes amigas Priscilla e Patrícia, que sempre acreditaram em mim, sempre me apoiando, e que mesmo não estando perto, estavam sempre presentes na minha vida, e se fizeram presentes nos momentos em que mais precisei.

A Rosely pelo carinho e apoio, por todos os momentos que passamos, sejam eles sorrindo ou chorando. Mesmo agora estando longe tenho sempre seu apoio, obrigada.

Ao Alexandre Araujo, companheiro de laboratório e de madrugadas de estudos, pela amizade, carinho, confiança, incentivo, apoio, caronas e por todos os momentos de felicidade e angústia que esteve ao meu lado.

Eder Chaveiro, Arthur e Eufrosina, pelo carinho, compaheirismo e apoio.

À FURNAS centrais elétricas S/A pelo suporte e o apoio na execução dos ensaios.

À CAPES, FUNAPE e CNPq pelo auxílio financeiro na realização desta pesquisa.

UnB pela utilização do granulômetro a laser.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

Um estudo do comportamento hidráulico de um perfil de solo tropical e não saturado de Aparecida de Goiânia-GO é apresentado nesta dissertação. O principal objetivo desta pesquisa foi contribuir para o entendimento das propriedades hidráulicas do solo, com especial ênfase na curva característica do solo e na sua histerese. O trabalho teve seu enfoque dividido em duas partes: caracterização física, química e mineralógica do perfil; e comportamento hidráulico do solo na condição não saturada. A partir da caracterização do solo, verificou-se que o perfil estudado se divide em dois extratos, um superior de 1,50 m de material transportado e um inferior residual jovem. Os resultados dos ensaios de granulometria mostraram que as várias combinações de preparação (i.e., com ou sem secagem prévia, desagregação química e desagregação física), produzem curvas granulométricas distintas. Variados graus de desagregação podem ser atingidos, sendo estes dependentes do grau de estabilidade das agregações do solo. Obteve-se uma boa correspondência entre a granulometria convencional e aquela utilizando o granulômetro a laser, para condições de desagregação supostamente equivalentes. A curva característica foi determinada tanto para o material natural, quanto para o solo reconstituído por adensamento a partir do estado de lama. Desta forma, procurou-se verificar o papel da estrutura no comportamento hidráulico do solo. As curvas características foram obtidas em trajetórias de secagem, molhagem, e mistas, tanto em termos de sucção matricial, quando de sucção total. Observou-se que o solo natural possui curvas características distintas do solo reconstituído. A desestruturação do solo reconstituído resulta em um maior valor de entrada de ar e uma curva característica unimodal, mesmo quando o material natural apresenta curva bimodal. Pode-se concluir que a distribuição de poros do material natural é afetada pela estruturação do solo. O procedimento de umedecimento e secagem utilizado com o método do papel filtro resultou em algumas curvas características com ausência de histerese. O estudo da distribuição da umidade ao longo da altura dos corpos de prova revelou que não se obteve umidades homogêneas, mesmo após os 14 dias, adotados como período para equilíbrio do potencial da água do solo. Pôde-se concluir que é exatamente a existência da histerese, aliada a um umedecimento ou secagem a partir da face dos corpos de prova que não são suficientemente lentos, que resultam na não homogeneidade de umidade.

Palavras-Chave: Solos não saturados. Solos tropicais. Curva característica. Histerese.

ABSTRACT

The hydraulic behavior of a tropical and unsaturated soil profile of Aparecida de Goiânia-GO is presented. The main objective of this research was to contribute to the understanding of hydraulic properties of a tropical soil, with special emphasis on the soil-water characteristic curves and its hysteresis. The research work done was divided into two main parts: physical, chemical and mineralogical characterization; and hydraulic behavior for the unsaturated condition. The characterization tests indicate that the soil profile studied is formed by two horizons. The top layer of 1,50 m comprised of transported material and a bottom layer comprised of young residual soil. The results of particle size analysis have shown that the various sample preparation conditions (i.e., with or without drying, chemical and physical disaggregation) produce different grain-size distribution curves. A varying state of disaggregation can be achieved, that state being dependent on the stability of the soil aggregates. A fairly good correspondence between conventional hydrometer and laser diffraction analysis was achieved, considering supposedly equivalent aggregation conditions. The soil-water characteristic curve (SWCC) was measured for both the natural and the soil reconstituted by mud consolidation. The role played by the soil fabric on the hydraulic behavior of the soil was analyzed. The SWCC was obtained for drying, wetting, and mixed paths, both in terms of total and matric suction. It was determined that the natural and reconstituted soils have distinct SWCCs. The disaggregation achieved with the reconstituted soil results in higher air-entry values and a unimodal SWCC, even when the natural soil presents a bimodal SWCC. Therefore, the pore-size distribution if affected by the different soil structures. The procedure for wetting and drying soil samples used along with the filter paper technique resulted in a number of SWCCs showing absence of hysteresis. The study of the moisture content along the specimen's heights revealed non-homogeneous moisture content distributions, even after 14 day of equilibrium of water potential. It was concluded that it is the very existence of SWCC hysteresis, along with a not sufficiently slow wetting and drying from the specimen surface that results in a non-homogeneous moisture content.

Keywords: Unsaturated soils. Tropical soils. Soil-water characteristic curve. Hysteresis.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AVEA – Alto valor de entrada de ar

CBR – California Bearing Ratio

CDsat – Compressão triaxial adensado drenado saturado

dc – Curva de secagem

DCT.C – Departamento de Apoio e Controle Técnico

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FURNAS – Furnas Centrais Elétricas S/A

CGTS – Geotechnical Consulting and Testing Systems

IT.DCT. – Instruções de Trabalho adotados pelo Departamento de Controle Técnico

mc - Curva mista

ms – Sucção matricial

MO – Matéria Orgânica

PVC – Cloreto de Polivinila

Rx – Raio x

SGM/SIC – Superintendência de Geologia e Mineração/ Secretaria de Indústria e Comércio

SUCS – Sistema de Classificação Unificado de Solos

TFSA – Terra Fina Seca ao Ar

TRB – Transportation Research Board

ts – Sucção total

UFG – Universidade Federal de Goiás

wc – Curva de molhagem

w ws – Umidade após secagem ao ar

w wn – Umidade sem secagem prévia ao ar

wecdcu – Com secagem prévia em estufa (60ºC) e com defloculante e com ultrassom

wecdsu – Com secagem prévia em estufa (60ºC) e com defloculante e sem ultrassom

wesdcu – Com secagem prévia em estufa (60ºC) e sem defloculante e com ultrassom

wesdsu – Com secagem prévia em estufa (60ºC) e sem defloculante e sem ultrassom

wncd – Sem secagem prévia ao ar e com defloculante

wncdcu – Sem secagem prévia ao ar e com defloculante e com ultrassom

wncdsu – Sem secagem prévia ao ar e com defloculante e sem ultrassom

wnsd – Sem secagem prévia ao ar e sem defloculante

wnsdcu – Sem secagem prévia ao ar e sem defloculante e com ultrassom

wnsdsu – Sem secagem prévia ao ar e sem defloculante e sem ultrassom

wscd – Com secagem prévia ao ar e com defloculante

wscdcu – Com secagem prévia ao ar e com defloculante e com ultrassom

wscdsu – Com secagem prévia ao ar e com defloculante e sem ultrassom

wssd – Com secagem prévia ao ar e sem defloculante

wssdcu – Com secagem prévia ao ar e sem defloculante e com ultrassom

wssdsu – Com secagem prévia ao ar e sem defloculante e sem ultrassom

LISTA DE SÍMBOLOS

a – Parâmetros de ajuste (relacionado ao valor de entrada de ar)

Al – Alumínio

b – Parâmetros de ajuste

B – Parâmetro (teste de saturação, contrapressão)

B – Boro

c – Parâmetros de ajuste

C – Carbono orgânico

Ca – Cálcio

cm – Centímetros

$\mathrm{cmolc/dm^3}$ – Centimol de carga por decímetro cubico

cosh – Cosseno hiperbólico

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

CV – Coeficiente de variação

Cu – Cobre

d – Parâmetros de ajuste

D – Diâmetro

e – Constante de Euler = 2,71828182845904523536028747135266249775 7

e - Índice de vazios

e_0 - Índice de vazios inicial

e_f - Índice de vazios final

e_i - Índice de vazios inicial

e_{max} - Índice de vazios máximo

e_{med} - Índice de vazios médio

e_{min} - Índice de vazios mínimo

Fe – Ferro

g – Aceleração da gravidade

g/kg – Grama por kilograma

GM – Pedregulho com presença de silte

h – Altura da coluna d´água, ou, carga piezométrica

h_i – Altura inicial do corpo-de-prova

h_f – Altura final do corpo-de-prova

h_{ae} – Carga piezométrica correspondente ao valor de entrada de ar

h_{we} – Carga piezométrica efetiva na curva de molhagem

H + Al – Acidez Total

IA – Índice de atividade da argila

IP – Índice de plasticidade

k – Coeficiente de permeabilidade

K – Potássio

kPa – Kilo Pascal

kN – Kilo Newton

kN/m^3 – Kilo Newton por métro cúbico

ln – Logaritmo neperiano

log – Logaritmo natural

m – Metro

m – Parâmetros de ajuste

Mg – Magnésio

mg/dm^3- Miligrama por decimetro cúbico

MH – Silte de alta compressibilidade.

mm – Milímetro

mm/min – Milímetro por minuto

Mn – Manganês

MPa – Mega Pascal

m/s - Metros

M_s – Massa de sólidos

M_T – Massa total

M_w– Massa de água

n – Parâmetros de ajuste (relacionado com a inclinação da curva característica do solo)

Na – Sódio

P – Fósforo

pH - Logaritmo negativo da concentração hidrogeniônica

r – Abertura do ângulo tangente da hipérbole

r – Raio de abertura dos poros no grupo

R_{min} – Raio mínimo

R_{max} – Raio máximo

S – Soma dos cátions trocáveis

S – Enxofre

s – Declividade (inclinação)

S – Grau de saturação

S_b – Grau de saturação correspondente ao primeiro valor de sucção de entrada de ar

S_d – Grau de saturação na curva de secagem

S_i – Grau de saturação inicial

Sr – Grau de saturação

S_{res} – Grau de saturação residual

S_{res1} – Grau de saturação correspondente ao primeiro valor de sucção do solo residual

S_{res2} – Grau de saturação correspondente ao segundo valor de sucção do solo residual

S_w – Grau de saturação na curva de molhagem

t – Tempo

T_s – Tensão superficial da água

u_a – Pressão de ar nos poros

u_w – Pressão de água nos poros

V – Volume

w – Teor de umidade do solo

w_f – Teor de umidade do papel filtro

w_f – Teor de umidade final do solo

w_i – Teor de umidade inicial

w_L – Limite de liquidez

w_n – Teor de umidade natural (de campo)

w_P – Limite de plasticidade

w_{ot} – Teor de umidade ótima

w_S – Limite de contração

w_u – Teor de umidade gravimétrica, onde este valor é igual na curva de secagem e de molhagem

Zn – Zinco

γ_d– Peso específico seco do solo

γ_n– Peso específico natural do solo

γ_s– Peso específico real dos grãos

Δh – Variação de altura do corpo-de-prova

Θ – Teor de umidade real

$\Theta_{\min}$ – Teor de umidade mínimo (residual)

θ – Ângulo de rotação da hiperbole

θ – Teor de umidade volumétrica

θ – Teor de umidade efetivo

θ_{1w} – Teor de umidade volumétrica da curva de molhagem primária

θ_{2d} – Teor de umidade volumétrica da curva de secagem secundária

θ_{3w} – Teor de umidade volumétrica da curva de molhagem terciária

θ_{ae} – Teor de umidade volumétrica correspondente ao valor de entrada de ar

θ_d – Teor de umidade volumétrica para a curva de secagem

θ_{ew} – Teor de umidade volumétrica da curva de molhagem efetiva

θ_i – Teor de umidade volumétrica no ponto de inflexão

θ_{md} – Teor de umidade volumétrica da curva de secagem principal

θ_{mw} – Teor de umidade volumétrica da curva de molhagem principal

θ_s – Teor de umidade volumétrica saturado

θ_r – Teor de umidade volumétrica residual

θ_u – Teor de umidade volumétrica de saturação, onde este valor de umidade é igual na curva de secagem e de molhagem

θ_w – Teor de umidade volumétrica para a curva de molhagem

λ – Parâmetros de ajuste (BROOKS e COREY, 1964)

λ – Declividade de dessaturação

ρ – Raio dos poros dentro do grupo

ρ_w – Massa específica dá água

σ – Tensão confinante

ψ – Sucção do solo

ψ_{ae} – Sucção correspondente ao valor de entrada de ar (valor de sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios do solo)

ψ_b – Sucção correspondente ao valor de entrada de ar (valor de sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios do solo)

ψ_{b1} – Primeiro valor de entrada de ar

ψ_{b2} – Segundo valor de entrada de ar

ψ_{cr} – Sucção crítica (valor de entrada de ar)

ψ_d – Sucção obtida na curva de secagem

ψ_i – Sucção no ponto de inflexão

ψ_{min} – Sucção mínima do solo, correspondente a sucção residual, onde este valor de sucção é igual na curva de secagem e de molhagem

ψ_{max} – Sucção máxima do solo, onde este valor de sucção é igual na curva de secagem e de molhagem

ψ_p – Intercépto da linha tangente no eixo da sucção matricial

ψ_{res}– Sucção do solo residual

ψ_{res1}– Primeiro valor de sucção do solo residual

ψ_{res2}– Segundo valor de sucção do solo residual

ψ_w – Sucção obtida na curva de molhagem

°C – Graus Celsius

% Al – Saturação de alumínio

% V – Saturação de bases

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVOS 2

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 3

CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA 4

2.1 INTRODUÇÃO 4

2.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO 5

2.3 EQUAÇÕES DE AJUSTE PARA A CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO 9

2.3.1 Equação de ajuste de Fredlund e Xing (1994) 11

2.3.2 Equação de ajuste de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) 12

2.4 HISTERESE DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO 14

2.4.1 Fatores que causam histerese da curva característica de sucção 14

2.4.2 Natureza da histerese de curvas características de sucção 18

2.5 MODELOS DE HISTERESE 20

2.5.1 Modelo-I de Mualem (1973) 22

2.5.2 Modelo-II de Mualem (1974) 29

2.5.3 Modelo independente de Mualem (1984b) 35

2.5.4 Modelo de Hogarth *et al.* (1988) 38

2.5.5 Modelo de Feng e Fredlund (1999) 42

2.6 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO 44

2.6.1 Método do papel filtro 44

2.6.2 Placa de pressão/sucção 51

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA 53

3.1 ÁREA ESTUDADA 53

3.2 AMOSTRAGEM 56

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO 57

3.3.1 Caracterização física 58

3.3.2 Caracterização mineralógica 61

3.3.3 Caracterização química 62

3.4 ENSAIOS EM SOLOS NÃO SATURADOS 62

3.4.1 Preparação dos corpos-de-prova 63

3.5.2 Obtenção de curva característica utilizando papel filtro 68

3.5.3 Método de calibração papel filtro 71

3.5.4 Célula de adensamento com controle de sucção 72

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL 75

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO 75

4.1.1 Análise táctil visual do perfil 75

4.1.2 Variação de umidade das amostras 76

4.1.3 Peso específico dos sólidos e limites de consistência 77

4.1.4 Índice de vazios e sua variabilidade 81

4.1.5 Classificação do solo 84

4.2 GRANULOMETRIA EM VÁRIOS ESTADOS DE AGREGAÇÃO 85

4.2.1 Granulometria por peneiramento e sedimentação 86

4.2.2 Granulometria a laser 90

4.2.3 Comparação das técnicas por sedimentação e a laser 94

4.2.4 Comparação da granulometria para várias condições de preparação 99

4.3 COMPACTAÇÃO 100

4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA 102

CAPÍTULO 5 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DO SOLO NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA 105

5.1 CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO NATURAL 105

5.1.1 Curva característica mista 109

5.1.2 Curvas características de secagem e molhagem 110

5.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO RECONSTITUÍDO A PARTIR DE UM ESTADO DE LAMA: Influência da estrutura do solo na curva característica 115

5.2.1 Resultados obtidos com a técnica do papel filtro 115

5.2.2 Resultados obtidos com a técnica da translação de eixos e comparações com os resultados obtidos com papel filtro 121

5.3 HISTERESE DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO NATURAL E RECONSTITUÍDO 124

5.3.1 Histerese da curva característica do solo indeformado 124

5.3.2 Análise da umidade ao longo da altura dos corpos de prova indeformados 127

5.3.3 Histerese da curva característica do solo reconstituído 131

CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 134

6.1 CONCLUSÕES 134

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 136

REFERÊNCIAS 138

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Elemento de solo não saturado com uma fase de ar contínua (modificada de FREDLUND; RAHARDJO, 1993) 5

Figura 2.2 – Curvas características de sucção para um solo arenoso, um siltoso e um argiloso (modificada de FREDLUND; XING, 1994) 7

Figura 2.3 – Curvas características de sucção do solo para várias texturas de solo (modificada de GITIRANA Jr.; FREDLUND, 2004) 8

Figura 2.4 – Curva característica de sucção típica de um solo siltoso (modificada de FREDLUND; XING, 1994) 9

Figura 2.5 – Ilustração esquemática do efeito de capilares com diâmetros variáveis conectados (a) o processo de secagem e (b) o processo de molhagem (HILLEL, 1980) 16

Figura 2.6 – Interação sólido-líquido-ar: (a) gota de água em repouso em uma superfície horizontal com material hidrofóbico; (b) gota de água escorre em uma superfície inclinada com material hidrofóbico; (c) gota de água em repouso na superfície do material hidrofílico; (d) gota de água escorrendo em uma superfície inclinada com material hidrofílico..... 17

Figura 2.7 – Ilustração esquemática da histerese de diferentes curvas características de sucção do solo (modificada de HOGARTH *et al*., 1988)..... 18

Figura 2.8 – Ilustração esquemática de curvas características de sucção do solo com ênfase nas curvas de varrredura (modificada de PHAM, 2001) 20

Figura 2.9 – Diagrama de Néel (1942; 1943) para o modelo de Mualem (1973); (b) curva de molhagem principal (c) curva de secagem principal (modificadas de MUALEM, 1973) 23

Figura 2.10 – Diagrama de Néel (1942; 1943) para o modelo de Mualem (1973); (b) curvas de varredura de secagem , (c) curvas de varredura de molhagem (modificadas de MUALEM, 1973) 23

Figura 2.11 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (Linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e os dados medidos de lama siltosa de Caribou (pontos) (MUALEM, 1973)..... 27

Figura 2.12 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e os dados medidos de lama argilosa de Rideau (pontos) (MUALEM, 1973) 27

Figura 2.13 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e os dados medidos de lama arenosa de Ribicon (pontos) (MUALEM, 1973) 28

Figura 2.14 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (Lina tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e resultados experimentais de solos arenosos (pontos) (MUALEM, 1973) 28

Figura 2.15 – Diagrama de preenchimento dos poros no plano: (a) processo de secagem principal ; (b) processo de molhagem principal (modificada de MUALEM, 1974) 30

Figura 2.16 – Processo de varredura: (a) curvas de varredura fora do ciclo principal; (b) diagrama correspondente a remolhagem; (c) diagrama correspondente a resecagem (modificada de MUALEM, 1974) 30

Figura 2.17 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha sólida), e resultados experimentais de solos arenosos (pontos) (MUALEM, 1974) 33

Figura 2.18 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo proposto (linha sólida), e os dados medidos de lama siltosa de Caribou (pontos) (MUALEM, 1974) 34

Figura 2.19 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo proposto (linha sólida), e os dados medidos de lama argilosa de Rideau (pontos) (MUALEM, 1974) 34

Figura 2.20 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo proposto (linha sólida), e os dados medidos de lama arenosa de Ribicon (pontos) (MUALEM, 1974) 35

Figura 2.21 – Ilustração esquemática do ciclo primário e curva prevista para o modelo independente de Mualem (1984b) 36

Figura 2.22 – Um esboço da histerese na relação de sucção do solo onde: MWC é a curva de molhagem principal (Equações (2.51) e (2.52)); EWC é a curva de molhagem efetiva

(Equações (2.60) e (2.61)); PWC é a curva de molhagem primária (Equações (2.57), (2.58) e (2.59)); TWC é a curva de molhagem terciária (Equações (2.64)e (2.65)); MDC é a curva de secagem principal (Equações (2.55) e (2.56)); e SDC é a curva de secagem secundária (Equações (2.62) e (2.63)) 40

Figura 2.23 – Tipos de fluxos entre o solo e o papel filtro (modificado de MARINHO, 1994a) 46

Figura 2.24 – Curvas de calibração do papel filtro Whatman nº 42 50

Figura 2.25 – Curvas de calibração do papel filtro Schleicher & Schuell nº 589 50

Figura 3.1 – Localização do campo experimental do DCT.C (imagem obtida do Google Earth™, 02/03/2010) 54

Figura 3.2 – Mapa de Solos da Região Metropolitana de Goiânia-GO e localização do poço 01 no campo experimental do DCT.C (Fonte: COMDATA, 2001; CAMPOS *et al.* 2003; Organização: ROMÃO, 2009) 55

Figura 3.3 – Mapa de Geologia da Região Metropolitana de Goiânia-GO, localização do poço 01 no campo experimental do DCT.C (Fonte: COMDATA, 2001; MORETON 1994; Organização: ROMÃO, 2009) 55

Figura 3.4 – Foto do poço: (a) detalhe da diferença de coloração do solo da superfície; (b) visão mais ampla do poço 56

Figura 3.5 – Blocos indeformados 63

Figura 3.6 – Moldagem dos corpos-de-prova: (a) anel cravado; (b) topo do corpo-de-prova rasado; (c) fundo do corpo-de-prova para rasagem; (d) embalagem e armazenamento dos corpos-de-prova antes de iniciar o ensaio 64

Figura 3.7 – Processo de reconstituição a partir de um estado de lama: (a) solo em forma de lama; (b) lama adicionada no cilindro e passando o dispersor; (c) vibração do cilindro para retirada de bolhas de ar; (d) cilindro colocado no tanque em imersão 66

Figura 3.8 – Processo de moldagem dos corpos-de-prova a partir da amostra reconstituída: (a) posicionamento dos moldes d PVC antes de cravar estes no solo; (b) moldes de PVC sendo cravados simultaneamente no solo; (c) uso de um fio de aço para cortar o solo; (d) detalhe do corpo-de-prova moldado e rasado com fio de aço 67

Figura 3.9 – Medidas de sucção total e matricial pela técnica do papel filtro.....69

Figura 3.10 – Montagem dos corpos-de-prova: (a) colocação do papel protetor em contato com o solo e papel Whatman n^{o}42 (sucção matricial); (b) colocação do papel Quanty (sucção matricial); (c) colocação do anel espaçador e papel Quanty (sucção total); (d) vista superior dos dois papeis posicionados para medição de sucção total.....72

Figura 3.11 – Equipamento de adensamento com controle de sucção/pressão.....73

Figura 4.1 – Perfil do solo comparando as umidades obtidas no campo e no laboratório 77

Figura 4.2 – Frequência do peso específico dos grãos das amostras.....79

Figura 4.3 – Propriedades de consistência e umidades 80

Figura 4.4 – Limites de consistência obtidos com secagem prévia ao longo da profundidade e valores obtidos pelo laboratório da UFRGS.....81

Figura 4.5 – Perfil do solo comparando o índice de vazios obtidos no campo e no laboratório 82

Figura 4.6 – Distribuição de frequência do índice de vazios nas amostras: a) amostras indeformadas de 1,0 a 1,5m; b) amostras reconstituídas a partir de um estado de lama de 1,0 a 1,5m; c) amostras indeformadas de 4,6 a 4,9m; d) amostras reconstituídas a partir de um estado de lama de 4,6 a 4,9m.....84

Figura 4.7 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil, sem secagem prévia ao ar 86

Figura 4.8 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil, com secagem prévia 87

Figura 4.9 – Curva granulométrica por peneiramento e sedimentação de 0,00 a 0,75 m. 88

Figura 4.10 – Curva granulométrica por peneiramento e sedimentação de 4,60 a 4,90 m 88

Figura 4.11 – Vista do ensaio de sedimentação 89

Figura 4.12 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil analisando as condições limites 91

Figura 4.13 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil sem secagem natural, analisando as desagregações.....92

Figura 4.14 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil com secagem em estufa, analisando as desagregações 92

Figura 4.15 – Granulometria por granulômetro a laser da profundidade de 0,0 a 2,4m 93

Figura 4.16 – Granulometria por granulômetro a laser da profundidade de 2,4 a 4,9m 94

Figura 4.17 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil sem secagem prévia, comparando as frações obtidas no ensaio convencional com o do granulômetro a laser sem uso de defloculante..... 95

Figura 4.18 – Porcentagem das frações granulométricas ao longo do perfil sem secagem prévia, comparando as frações obtidas no ensaio convencional com o do granulômetro a laser com uso de defloculante 95

Figura 4.19 – Curvas granulométricas obtidas para uma areia argilosa (com defloculante e com ultrassom) (modificado de LIMA *et al.*, 2002)..... 96

Figura 4.20 – Curvas granulométricas obtidas para argila arenosa (com defloculante e com ultrassom) (modificado de LIMA *et al.*, 2002) 97

Figura 4.21 – Curvas granulométricas obtidas por granulometria convencional e por granulômetro a laser da profundidade de 0,0 a 0,75, utilizando defloculante..... 97

Figura 4.22 – Curvas granulométricas obtidas por granulometria convencional e por granulômetro a laser da profundidade de 0,0 a 0,75, sem uso do defloculante..... 98

Figura 4.23 – Curvas granulométricas obtidas por granulometria convencional e por granulômetro a laser da profundidade de 3,0 a 3,3m, com uso de defloculante..... 98

Figura 4.24 – Curva granulométrica por granulômetro a laser de 0,00 a 0,75m..... 99

Figura 4.25 – Curva granulométrica por granulômetro a laser de 3,90 a 4,30m..... 100

Figura 4.26 – Curvas de compactação ao longo do perfil 101

Figura 4.27 – Perfil de solo com os valores de umidades e os valores de limites..... 101

Figura 4.28 - Difratogramada Análise Acumulada da amostra de 0,0 a 0,75m de profundidade 104

Figura 5.1 – Visualização do bloco indeformado: (a) pedriscos existentes, heterogeneidade do solo e plano de fraqueza; (b) veio de quartzo; (c) heterogeneidade do solo; (d) cor e textura diferentes, plano de fraqueza 106

Figura 5.2 – Ilustração da perda de solo durante o procedimento de ascensão capilar: (a) corpos de prova saturando por ascensão capilar em cima de uma pedra porosa e um papel filtro;(b) solo perdido no papel filtro; (c) a base dos dois corpos de prova mostrando a região em que perdeu solo; (d) detalhe da base do corpo de prova mostrando a região em que perdeu solo 108

Figura 5.3 – Curva característica mista dos solos do perfil 109

Figura 5.4 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 1,0 a 1,50 m de profundidade 112

Figura 5.5 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 2,0 a 2,40 m de profundidade 112

Figura 5.6 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 3,0 a 3,30 m de profundidade 113

Figura 5.7 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 3,9 a 4,30 m de profundidade 113

Figura 5.8 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 4,6 a 4,90 m de profundidade 114

Figura 5.9 – Dificuldade na moldagem dos corpos de prova nas amostras reconstituídas: (a) cravação dos moldes juntos; (b) uso do fio de aço na moldagem; (c) contração dos corpos de prova; (d) detalhe da contração dos corpos de prova 116

Figura 5.10 – Relação do grau de saturação (%) versus sucção matricial (kPa) em amostras indeformadas e reconstituídas a 1,0 a 1,5 m de profundidade 118

Figura 5.11 – Relação do grau de saturação (%) versus sucção matricial (kPa) em amostras indeformadas e reconstituídas a 2,0 a 2,4 m de profundidade 118

Figura 5.12 – Relação do grau de saturação (%) versus sucção matricial (kPa) em amostras indeformadas e reconstituídas a 4,6 a 4,9 m de profundidade 119

Figura 5.13 – Relação do grau de saturação (%) versus sucção (kPa) em amostra reconstituída a 1,0 a 1,5 m de profundidade 120

Figura 5.14 – Relação do grau de saturação (%) versus sucção (kPa) em amostra reconstituída a 2,0 a 2,4 m de profundidade 120

Figura 5.15 – Relação do grau de saturação (%) versus sucção (kPa) em amostra reconstituída a 4,6 a 4,9 m de profundidade 121

Figura 5.16 – Detalhe da cola da pedra porosa: (a) mostrando o inchamento; (b) o excesso da cola sendo retirado 122

Figura 5.17 – Curva característica do solo do ciclo completo (secagem inicial, molhagem e secagem) determinada na prensa de adensamento da amostra reconstituída a 4,6 a 4,9 m de profundidade. 123

Figura 5.18 – Ligação dos pontos obtidos na celula de adensamento (prensa) e com o papel filtro da amostra reconstituída a 4,6 a 4,9 m de profundidade. 123

Figura 5.19 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 1,0 a 1,50m de profundidade 124

Figura 5.20 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 2,0 a 2,40m de profundidade 125

Figura 5.21 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 3,0 a 3,30m de profundidade 125

Figura 5.22 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 3,9 a 4,30m de profundidade 126

Figura 5.23 – Curva característica do solo de amostra indeformada de 4,6 a 4,90m de profundidade 126

Figura 5.24 – Ilustração da variação da umidade dos corpos-de-prova, na curva de molhagem por gotejamento nas amostras indeformadas: (a) umidade do corpo de prova no momento em que está sendo feito o gotejamento; (b) valores do teor de umidades antes da equalização; (c) teor de umidade durante a equalização; (d) teor de umidade obtido após a equalização 127

Figura 5.25 – Ilustração da variação da umidade dos corpos-de-prova na curva de molhagem por ascensão capilar: (a) valores do teor de umidades antes da equalização;(b) teor de

umidade durante a equalização; (c) teor de umidade obtido após a equalização, nas amostras indeformadas. 129

Figura 5.26 – Ilustração da variação do grau de saturação na curva de molhagem, devido a diferença de umidades nos corpos-de-prova 130

Figura 5.27 – Ilustração da variação do grau de saturação na curva de secagem, devido a diferença de umidades nos corpos-de-prova. 131

Figura 5.28 – Curva característica do solo de amostra reconstituída de 1,0 a 1,50 m de profundidade 132

Figura 5.29 – Curva característica do solo de amostra reconstituída de 4,6 a 4,90 m de profundidade 132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Apresentação de equações de curvas características de sucção (modificada de PHAM, 2001) 10

Tabela 2.2 – Modelos de histerese (PHAM, 2001) 21

Tabela 2.3 – Tempos de equilíbrio para o método do papel filtro (LEONG; HE; RAHARDJO, 2002) 47

Tabela 2.4 – Curvas de calibração do papel filtro Whatman nº 42 47

Tabela 2.5 – Curvas de calibração do papel filtro Schleicher & Schuell no 589 48

Tabela 3.1 – Relação de amostras deformadas e indeformadas retiradas 57

Tabela 3.2 – Ensaios de caracterização física 58

Tabela 3.3 – Variações adotadas nos ensaios de granulometria por peneriamento e sedimentação e utilizando o granulômetro a laser 60

Tabela 4.1 –Determinações do peso específico natural, teor de umidade de campo, índices físicos e descrição táctil visual ao longo do perfil 76

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos, porcentagem de material, limites de consistência das amostras com e sem secagem prévia ao ar 78

Tabela 4.3 – Índices de vazios: desvio padrão e coeficiente de variação das amostras 83

Tabela 4.4 – Valores representativos de coeficiente de variação (modificado de HARR, 1996) 83

Tabela 4.5 – Resultados da porcentagem de material, limites de consistência e classificação SUCS e TRB 85

Tabela 4.6 – Tabela com o resultado do peso específico seco máximo e a umidade ótima ... 100

Tabela 4.7 – Resultados obtidos na análise química do perfil 103

Tabela 4.8 – Descrição dos minerais encontrados no perfil a partir do ensaio de Difração de Rx 104

Tabela 5.1 – Índices físicos iniciais das amostras naturais utilizadas na determinação das curvas características e as suas trajetórias obtidas 107

Tabela 5.2 – Valores da massa seca inicial dos corpos-de-prova, estimada a partir dos índices físicos, e a massa seca final obtida após o ensaio realizado por ascensão capilar da profundidade 3,9 a 4,3m 108

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas características mistas 110

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas características de secagem 111

Tabela 5.5 – Índices físicos iniciais das amostras reconstituídas utilizadas na determinação das curvas características e as suas trajetórias impostas 116

Tabela 5.6 – Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas características de secagem 117

Tabela 5.7 – Valores de teores de umidades obtidos nos corpos-de-prova na curva de molhagem realizada por gotejamento nas amostras indeformadas 128

Tabela 5.8 – Valores de teores de umidades obtidos nos corpos-de-prova na curva de secagem realizada por gotejamento nas amostras indeformadas 128

Tabela 5.9 – Valores de teores de umidades obtidos nos corpos-de-prova na curva de molhagem realizada por ascensão capilar, nas amostras indeformadas 129

Tabela 5.10 – Valores de teores de umidades obtidos nos corpos-de-prova na curva de secagem realizada por ascensão capilar, nas amostras indeformadas 130

Tabela 5.11 – Valores de teores de umidades obtidos nos corpos-de-prova na curva de molhagem realizada por gotejamento para as amostras reconstituídas 133

Tabela 5.12 – Valores de teores de umidades obtidos nos corpos-de-prova na curva de secagem realizada por gotejamento para as amostras reconstituídas 133

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Vários aspectos de execução e desempenho de obras de terra exigem o entendimento do comportamento do solo na condição não saturada. Por isso, as propriedades dos solos não saturados têm sido assunto de interesse na Geotecnia desde os seus primórdios e permanece sendo de grande interesse atualmente. Acredita-se que uma das razões para o menor número de estudos sobre o solo não saturado seja a complexidade do comportamento e os desafios representados por tais estudos. Os desafios acerca do entendimento de solos não saturados são amplificados quando se considera o comportamento de solos tropicais e residuais, pois estes tipos de solos possuem características peculiares de estruturação que dificultam o seu entendimento. Este é o caso dos solos tropicais do Centro-Oeste brasileiro.

Em termos de curva característica de sucção de solos tropicais, os principais fatores que dificultam o entendimento do comportamento do solo são as suas propriedades químicas, mineralógicas e estruturais, que neste caso variam com a profundidade. Os solos tropicais possuem propriedades influenciadas pela estruturação fazendo variar os índices de vazios, tamanho e volume dos poros. Em regiões de solos tropicais verifica-se que os mantos intemperizados encontram-se na condição não saturada, além disso, a composição química, mineralógica e a micro-morfologia dos solos tropicais impõem condições diferenciadas de comportamento (CAMAPUM DE CARVALHO, 2005).

Vários estudos recentes vêm demonstrando que o comportamento hidro-mecânico de um solo não saturado pode ser previsto a partir da interpretação e análise da curva característica de sucção do solo (i.e, a relação entre o teor de umidade e a sucção no solo). Dentre as propriedades do solo, a curva característica de sucção do solo é a que mais se destaca. Esta é vista hoje como a propriedade chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da geotecnia.

Um dos problemas em que se pode fazer uso da curva característica de sucção é a previsão da variação da sucção com a umidade em campo. Este tipo de previsão tem diversas aplicações, tais como a análise da estabilidade de taludes e encostas, análise de empuxos de terra, cálculo

de recalques, tanto expansão quanto colapso, e controle de compactação. É interessante notar que as características histeréticas da curva característica de sucção se tornam particularmente importante em problemas que envolvem ciclos de secagem e molhagem.

Existe um número limitado de estudos a respeito da influência da estrutura do solo na sua curva característica de sucção e de estudos acerca dos aspectos de histerese de solos tropicais. As abordagens para determinação da histerese da curva característica de sucção do solo envolvem ensaios de laboratório de alto custo e que requerem muito tempo para serem executados. Torna-se, portanto, importante estudar e avaliar estes aspectos de determinação das curvas característica de solos tropicais.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é contribuir para o entendimento das propriedades hidráulicas de um perfil de solo tropical no estado não saturado, com especial ênfase na curva característica de sucção do solo do perfil estudado e na sua histerese.

Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar a relação entre propriedades físicas, químicas e mineralógicas, e a curva característica de sucção do perfil de solo estudado;
- Comparar os dados granulométricos realizados por diversas técnicas;
- Determinar as curvas características de sucção do solo em amostras indeformadas e reconstituídas a partir de um estado de lama pelo método do papel filtro e célula de adensamento com controle de sucção/pressão;
- Comparar as curvas característica do solo das amostras indeformadas e reconstituídas a partir de um estado de lama, levando em consideração a histerese das mesmas;
- Analisar as características de histerese da curva característica de sucção;
- Estabelecer as melhores metodologias e técnicas de ensaio para determinação de curvas características histeréticas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto por seis capítulos que apresentam a introdução e os objetivos, a metodologia utilizada, os resultados e a sua análise e conclusões.

O presente capítulo expõe os aspectos gerais da pesquisa descrevendo a importância, a justificativa e os principais objetivos dessa dissertação. O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica necessária para a experimentação, compreensão e análise do comportamento de solos não saturados. O Capítulo 3 apresenta a área estudada e os métodos adotados para a amostragem dos solos e preparação dos corpos de prova. É apresentada também a metodologia utilizada nos ensaios laboratoriais de caracterização física, mineralógica e química, ensaios hidráulicos em solos na condição não saturada. O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões dos ensaios de caracterização, como índices físicos, granulometria em vários estados de agregação, compactação e caracterização química e mineralógica. O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões do comportamento hidráulico do solo na condição não saturada. Finalmente, o Capítulo 6 discorre a respeito das conclusões obtidas, as considerações finais e apresenta sugestões para pesquisas futuras.

Os Apêndices são divididos em cinco partes. No Apêndice A são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mineralógica. No Apêndice B são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios hidráulicos nos ensaios não saturados. No Apêndice C é apresentada uma metodologia de execução de ensaios de curva característica de sucção pelo método do papel filtro com amostras indeformadas, e remoldadas por compactação e reconstituídas a partir de um estado de lama. No Apêndice D é apresentada uma metodologia de verificações, procedimentos e execução de ensaios oedométricos com controle de sucção com amostras indeformadas e reconstituídas a partir de um estado de lama. No Apêndice E é apresentada a curva de calibração do papel filtro Quanty.

CAPÍTULO 2
REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre os temas abordados nesta dissertação. São apresentados inicialmente alguns conceitos fundamentais para o entendimento do comportamento do solo não saturado. Em seguida, é realizada uma revisão a respeito de curva característica de sucção do solo, histerese e modelos de histerese. É apresentada também uma revisão sobre técnicas experimentais para determinação da curva característica de sucção, incluindo o método do papel filtro e técnicas com controle de sucção.

2.1 INTRODUÇÃO

O estudo dos solos não saturados tem aplicações na engenharia tais como pavimentação, estabilidade de taludes, barragens de terra e fundações. Processos de escavações, remoldagens e recompactações do solo também resultam em um material não saturado. Estes materiais formam uma larga categoria de solos que tem sido difícil de considerar no âmbito da mecânica dos solos clássica (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Os solos não saturados têm sido referidos como um sistema trifásico. Porém, este pode ser considerado como um sistema composto por quatro fases: líquida, gasosa, sólida e, devido ao importante papel da interface ar-água no comportamento do sistema, admite-se a existência de uma membrana contrátil como sendo a quarta fase (Figura 2.1). Quando a fase de ar é contínua, a membrana contráctil interage com as partículas de solo influenciando o comportamento mecânico do solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Um dos principais fatores que impõem solicitações em solos não saturados são as variações no conteúdo de água dos poros do solo. Estas solicitações podem ter origem nas condições atmosféricas, por exemplo. A interação entre o solo superficial não saturado e a atmosfera depende de diversos mecanismos de fluxo e retenção de água, ar e calor. Avanços teóricos, experimentais e numéricos têm demonstrado a viabilidade de estudos envolvendo a quantificação da interação solo-atmosfera (GITIRANA, 2005).

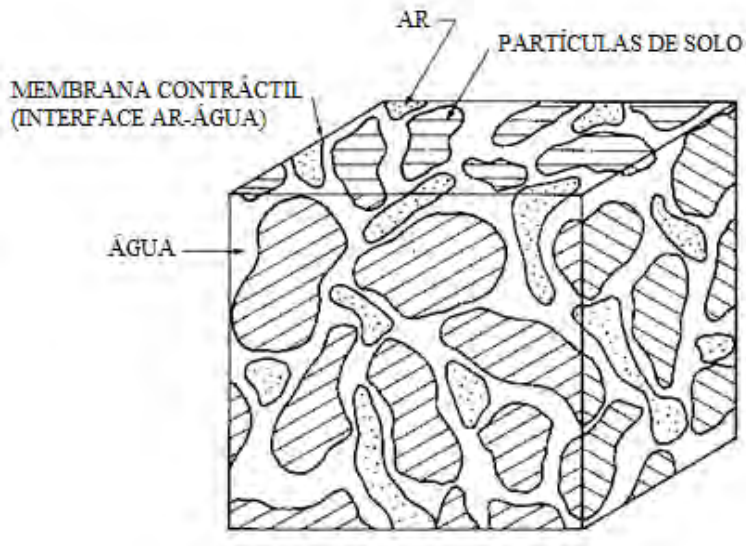


Figura 2.1 – Elemento de solo não saturado com uma fase de ar contínua (modificada de FREDLUND; RAHARDJO, 1993)

A descrição do comportamento do solo não saturado passa pela determinação da curva característica de sucção. A curva característica de sucção é definida com sendo a relação entre a quantidade de água armazenada no solo e a energia livre da água do solo, também chamada de sucção do solo. Significantes contribuições têm sido dadas por engenheiros geotécnicos na determinação da curva característica de sucção do solo. Contudo ainda há necessidade de mais investigações das determinações, a fim de aperfeiçoar as técnicas disponíveis.

Existem três variáveis de estado principais usadas para descrever a quantidade água presente no solo: o teor de umidade gravimétrica (w), a umidade volumétrica (θ) e o grau de saturação (S). Já a sucção total do solo é dividida em duas parcelas: a matricial e a osmótica (KRAHN; FREDLUND, 1972). A sucção matricial está relacionada com o tipo de partículas e seu arranjo estrutural. Segundo Bulut e Leong (2007), a sucção do solo é um resultado da ação de capilaridade, propriedade de energia superficial das partículas do solo (i.e., absorção), e concentração de íons da água intersticial. A sucção osmótica está relacionada à concentração de íons da água do solo.

2.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO

A curva característica de sucção do solo pode ser representada de várias formas e diferentes terminologias vêm sendo utilizadas. A curva característica de sucção do solo pode, por

exemplo, ser representada como a relação entre o teor de umidade volumétrico (θ) e a sucção matricial. Valores de teor de umidade volumétrico (θ) são apresentados utilizando escala aritmética. Já os valores de sucção, são comumente visualizados utilizando escala logarítmica (FREDLUND; XING, 1994), dada a larga faixa de valores possíveis.

Para a representação da energia livre da água do solo, pode-se utilizar a sucção matricial (i.e. pressão de capilaridade, $(u_a - u_w)$, onde u_a é a pressão de ar nos poros e u_w é a pressão de água nos poros) ou sucção total (i.e. a soma da sucção matricial e osmótica). Para valores de sucção altos (i.e. maiores que 1500 kPa), a sucção matricial e total pode ser geralmente assumida como iguais (FREDLUND; XING, 1994).

A curva característica de sucção de solos tropicais é influenciada por numerosos fatores, dentre os quais tem-se as propriedades químicas, mineralógicas e estruturais do solo. Solos tropicais possuem propriedades influenciadas por sua estrutura, determinante na distribuição de tamanho e volume dos poros. A composição química, mineralógica e a micromorfologia dos solos tropicais resultam em comportamento peculiar (CAMAPUM DE CARVALHO, 2005).

A curva característica de sucção do solo pode ser utilizada na obtenção de vários parâmetros utilizados para descrever o comportamento de solos não saturados (FREDLUND; XING, 1994). Estudos laboratoriais vêm mostrando que existe uma relação entre a curva característica de sucção do solo e as demais propriedades dos solos não saturados (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Diversos métodos têm sido desenvolvidos para prever o comportamento volumétrico, a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade, a adsorção, a difusão de vapor e a condutividade térmica do solo não saturado. Todos estes métodos tomam por base, informações relativas à curva característica de sucção (BARBOUR, 1998).

Exemplos de métodos de estimativa muito utilizados são os métodos de previsão da função de permeabilidade para um solo não saturado, baseados no coeficiente de permeabilidade saturado e na curva característica de sucção do solo (FREDLUND; FREDLUND; ZAKERZADEH, 2001; FREDLUND; XING; HUANG, 1994; LEONG; RAHARDJO, 1997; MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980). Procedimento semelhante tem sido utilizado para estimar propriedades de resistência ao cisalhamento de um solo não saturado (FREDLUND; RAHARDJO, 1993; FREDLUND *et al.*, 1998; VANAPALLI *et al.*, 1996).

O tipo de solo, o teor de umidade inicial, o índice de vazios, a textura, a mineralogia, o histórico de tensões e os métodos de compactação são os principais fatores que influenciam no formato da curva característica de sucção do solo. Na Figura 2.2 podem-se observar típicas curvas características de sucção de secagem para diferentes tipos de solos, onde o teor de umidade saturado (θ_s) e o valor de entrada de ar (ψ_b), geralmente crescem com a plasticidade e quantidade de finos do solo (FREDLUND; XING, 1994).

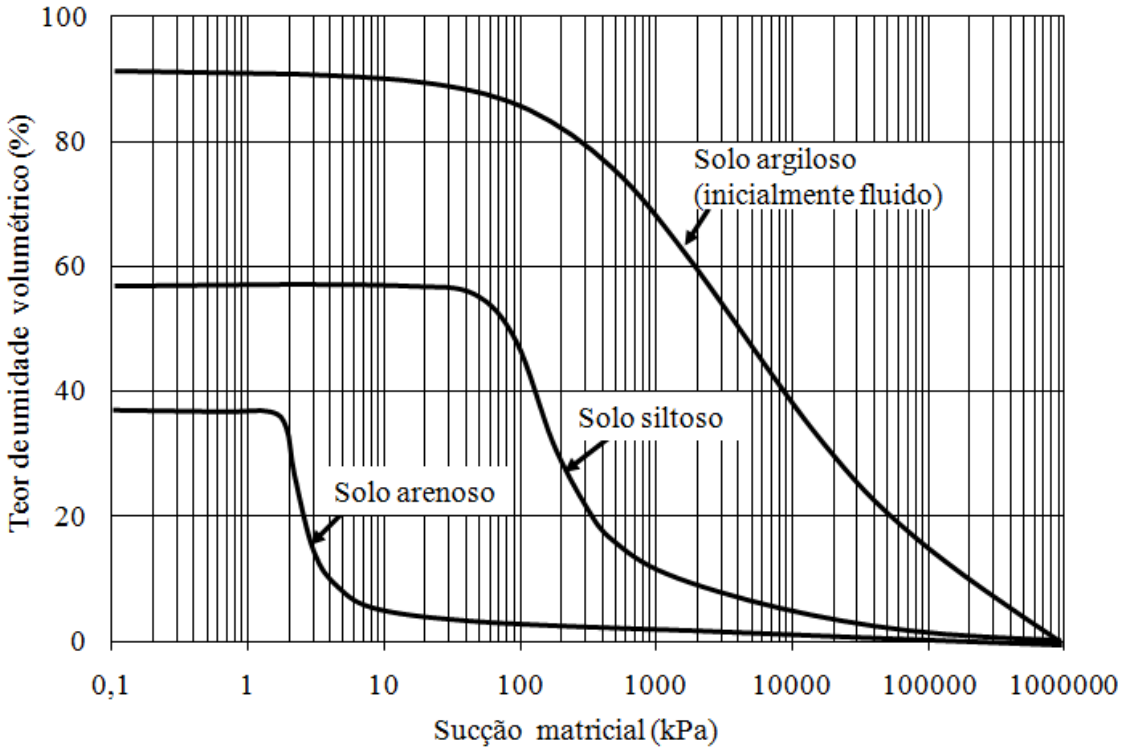


Figura 2.2 – Curvas características de sucção para um solo arenoso, um siltoso e um argiloso (modificada de FREDLUND; XING, 1994)

A Figura 2.3 mostra curvas características de sucção do solo com diferentes texturas e/ou distribuição do tamanho dos poros. Solos arenosos, representados pela curva 1a, mantêm-se saturados até o valor de entrada de ar, ψ_b. A partir deste ponto a curva apresenta um declive acentuado, indicando uma amplitude de tamanhos de poros limitada. Imediatamente o segundo ponto de curvatura (i.e, grau de saturação residual, S_{res}, e a sucção do solo residual, ψ_{res}) é alcançado, e incrementos maiores na sucção têm pouco efeito em S (GITIRANA Jr.; FREDLUND, 2004).

Solos siltosos estão representados pela curva 1b. Este tipo de solo possui curvas características de sucção semelhantes aos de solos arenosos, mas ψ_b e ψ_{res} geralmente são

mais elevados devido à presença de poros menores. Solos argilosos estão representados pelas curvas 1c e 1d. Estes geralmente possuem valores de entrada de ar superior aos de solos arenosos e siltosos. Além disso, o ponto residual nem sempre pode ser identificado visualmente (GITIRANA Jr.; FREDLUND, 2004).

A curva 2 da Figura 2.3 ilustra uma típica curva característica de sucção bimodal. Este tipo de curva possui dois valores de entrada de ar distintos e dois pontos residuais distintos, dando um total de quatro pontos de curvatura (GITIRANA Jr.; FREDLUND, 2004). Este tipo de curva, atribuído a distribuições de poros descontínuas, ocorrem frequentemente em solos tropicais naturais e compactados no ramo seco.

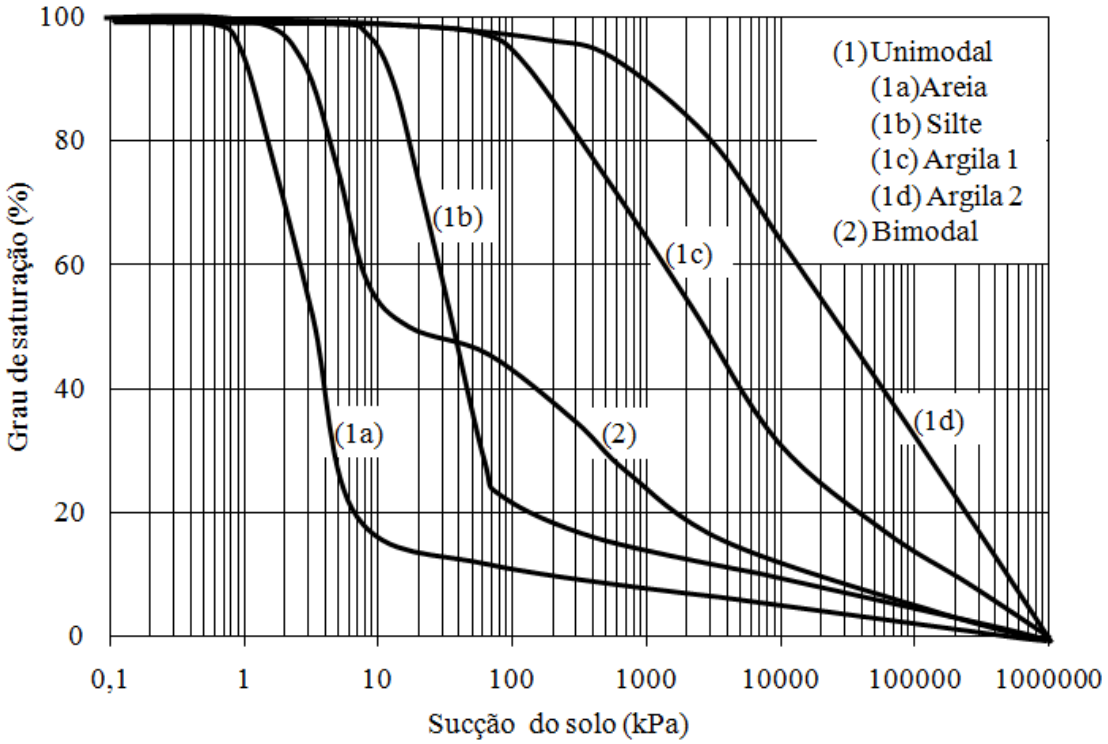


Figura 2.3 – Curvas características de sucção do solo para várias texturas de solo (modificada de GITIRANA Jr.; FREDLUND, 2004)

Além da mineralogia, textura, estrutura e outras características físico-químicas do solo, a história de tensões e a trajetória de sucção também influenciam na forma de curva característica de sucção. A Figura 2.4 apresenta curvas características de sucção principais de secagem e molhagem para um solo siltoso. A histerese é evidenciada pela diferença entre as curvas de secagem e molhagem. A histerese da curva característica de sucção será discutida mais a frente.

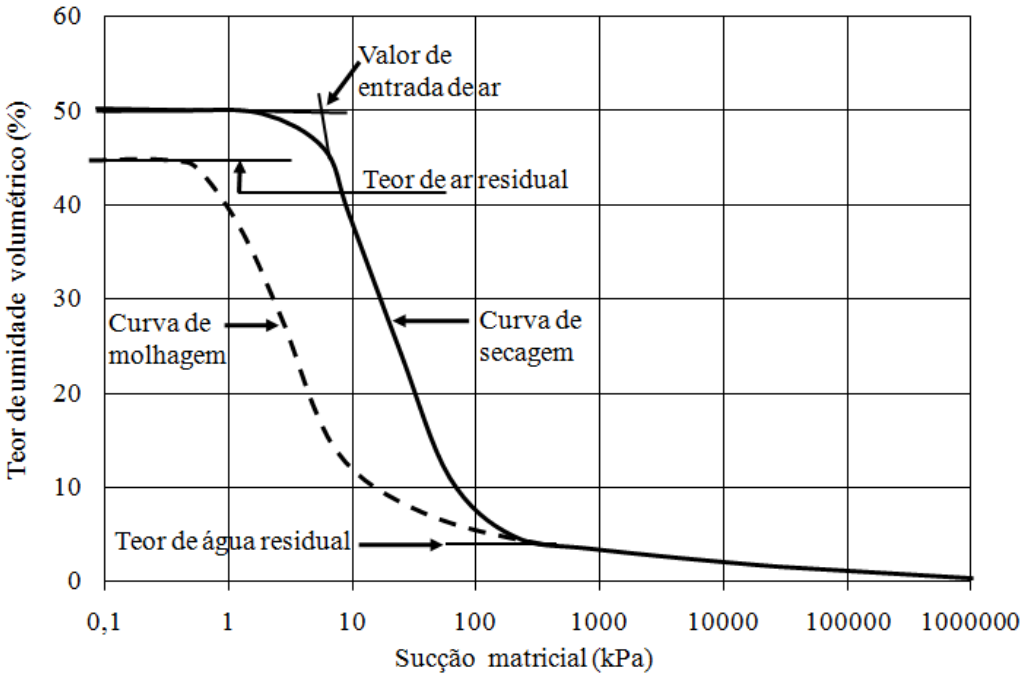


Figura 2.4 – Curva característica de sucção típica de um solo siltoso (modificada de FREDLUND; XING, 1994)

2.3 EQUAÇÕES DE AJUSTE PARA A CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO

Os dados obtidos para traçar a curva característica de sucção do solo são uma série de pontos desconectados. Equações de ajuste para curvas características de sucção podem ser utilizadas para representar os dados obtidos a partir de ensaios laboratoriais. As equações de ajuste são necessárias para a apresentação gráfica e modelagem numérica. Estas equações extrapolam e interpolam os dados onde estes não existem experimentalmente.

Equações de ajuste não devem ser confundidas com modelos de previsão. Modelos de previsão permitem estimativas a partir de outras informações sobre o solo, tal como a granulometria, propriedades físicas do solo, o arranjo estrutural, o estado de tensões, entre outros. A maioria das equações leva em consideração o formato da curva característica de sucção e a distribuição do tamanho dos poros (GERSCOVICH, 2001).

Quatorze diferentes equações de ajuste para a curva característica de sucção são apresentadas na Tabela 2.1. As equações de ajuste possuem de dois a quatro parâmetros. Geralmente, quanto maior o número de parâmetros de ajuste, maior a flexibilidade e capacidade de ajuste da equação. Algumas equações possuem derivadas descontínuas e outras contínuas. Equações

contínuas são preferidas, por serem mais apropriadas em modelagem numérica. Algumas equações não retornam um valor definido para sucção igual a zero nem possuem a limitação de $10^6\ kPa$ para umidade igual a zero. Essas equações oferecem dificuldades do ponto de vista de modelagem numérica. Considerando a disponibilidade dos parâmetros para realizar o ajuste adotou-se a equação de Gitirana Jr. e Fredlund (2004).

Tabela 2.1 – Apresentação de equações de curvas características de sucção (modificada de PHAM, 2001)

Itens	Nome	Descrição da equação	Parâmetros
1	Gardner (1958)	$\theta(\psi) = \frac{\theta_s}{1 + a\psi^n}$	a, n
2	Brooks e Corey (1964)	$\theta(\psi) = \theta_s$ para $\psi \leq \psi_{ae}$ $\theta(\psi) = \theta_s \left(\frac{\psi}{a}\right)^{-\mathrm{n}}$ para $\psi > \psi_{ae}$	a, n
3	King (1965)	$\theta(\psi) = \theta_s \left[\frac{\cosh(\psi/\psi_0)^b - \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s + \theta_r}\cosh(a)}{\cosh(\psi/\psi_0)^b + \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s + \theta_r}\cosh(a)}\right]$	ψ_0, a, b, θ_r
4	Brutsaert (1966)	$\theta(\psi) = \theta_s / \left(1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)$	a, n
5	van Genuchten (1980)	$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (a\psi)^n]^{\mathrm{m}}$	a, m, n
6	van Gennuchten - Mualem (1980)	$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (a\psi)^n]^{(1-1/\mathrm{n})}$	a, n
7	Genuchten-Burdin (1980)	$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (a\psi)^n]^{(1-2/\mathrm{n})}$	a, n
8	Equação Tani (1982)	$\theta(\psi) = \theta_s \left(1 + \frac{a - \psi}{a - n}\right) \exp\left(-\frac{a - \psi}{a - n}\right)$	a, n
9	Equação Boltzman (1984)	$\theta(\psi) = \theta_s$ para $\psi \leq \psi_{ae}$ $\theta(\psi) = \theta_s \exp\left(\frac{a - \psi}{a}\right)$ para $\psi > \psi_{ae}$	a, n
10	Equação Fermi (1987)	$\theta(\psi) = \frac{\theta_s}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{n}\right)}$	a, n
11	Fredlund e Xing (1994)	$\theta_w = \theta_s / \left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right\}^{\mathrm{m}}$	a, n, m
12	Pereira e Fredlund (1996)	$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{c}\right)^b\right]^a}$	a, b, c, θ_r
13	Feng e M. Fredlund (1999)	$\theta(\psi) = \frac{\theta_s b + c\psi^d}{b + \psi^d}$	b, c, d
14	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)	$\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 + \left(\psi / \sqrt{\psi_b \psi_{res}}\right)^d} + \theta_2$	$a, \psi_{res}, \psi_b, \theta$

2.3.1 Equação de ajuste de Fredlund e Xing (1994)

A equação proposta por Fredlund e Xing (1994) é baseada no pressuposto de que a forma da curva característica de sucção do solo depende da distribuição do tamanho dos poros do solo (i.e. a curva de secagem é uma função da distribuição do tamanho dos poros). A equação fornece um bom ajuste para solos arenosos, siltoso e argiloso com intervalos de sucções de 0 a $10^6\ kPa$. Para descrever a curva característica de sucção do solo, Fredlund e Xing (1994) sugerem a seguinte equação para a distribuição de poros:

$$f(\psi) = \frac{mn(\psi/a)^{n-1}}{a[e+(\psi/a)^n]\{log[e+(\psi/a)^n]\}^{m+1}} \tag{2.1}$$

Onde a, n e m são três parâmetros do solo. Integrando a equação, obtém-se a relação entre o teor de umidade volumétrico e a sucção:

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{ln[e + (\psi/a)^n]}\right]^m \tag{2.2}$$

Os três parâmetros, $a, n,$ e m proporcionam variações na forma da curva característica de sucção. Quando fixados os valores n e m, o parâmetro a (com unidade em kPa) está relacionado com o valor de entrada de ar. O parâmetro n controla a inclinação da curva característica de sucção do solo. A distribuição dada pela Equação (2.1) atinge seu valor máximo aproximadamente no valor de a. Portanto, o ponto $\big(a, \theta(a)\big)$ pode ser utilizado para aproximar o ponto de inflexão.

Fredlund e Xing (1994) incluem um fator de correção para atingir um intervalo maior de sucção. Dados experimentais indicam que a sucção de um solo atinge um valor máximo de aproximadamente 10^6 kPa no teor de umidade igual a zero. Este limite pode ser construído a partir da Equação (2.2), da seguinte forma:

$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi)\frac{\theta_s}{\{ln[e+(\psi/a)^n]\}^m} \tag{2.3}$$

A função $C(\psi)$ é definida da seguinte forma:

$$C(\psi) = \frac{ln(1+\psi/\psi_r)}{ln[1+(10^6/\psi_r)]} \quad (2.4)$$

Onde ψ_r é a sucção correspondente ao teor de umidade volumétrico θ_r. Assim $C(10^6)$ é igual à zero. Portanto, limitando o ponto onde $\psi = 10^6 kPa$, o teor de umidade θ calculado a partir da Equação (2.3) é igual à zero. A curva na faixa de sucção baixa não é significativamente afetada, uma vez que a função de correção $C(\psi)$ é aproximadamente igual a um para sucções baixas.

2.3.2 Equação de ajuste de Gitirana Jr. e Fredlund (2004)

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propuseram três equações para modelar curvas características de sucção do solo. As equações são baseadas na equação geral hiperbólica no sistema de coordenadas $\log(\psi) - S$. Os parâmetros da equação são definidos como coordenadas onde a assíntota da hipérbole é satisfeita. Portanto, uma relação geométrica clara e coerente existe entre a forma da curva característica de sucção e parâmetros da equação.

2.3.2.1 Curva unimodal com um ponto de curvatura

Os parâmetros do solo escolhidos para definir a curva são: o valor de entrada de ar (ψ_b) e um parâmetro, denominado "a", que define a transição próxima ao valor de entrada de ar Independentemente do significado físico dos parâmetros do solo escolhidos, estes parâmetros correspondem cada um a características distintas do formato típico das curvas características de sucção unimodais, conforme mostrado na Figura 2.3(1d).

Uma hipérbole é utilizada para representar este primeiro tipo de curva característica de sucção do solo. As duas linhas retas definidas por $(0, 1)$, $(\psi_b, 1)$, e $(10^6, 1)$ são as assíntotas da hipérbole, representada pela equação:

$$S = \frac{tan\theta(1+r^2)ln(\psi/\psi_b)}{(1-r^2tan^2\theta)} - \frac{(1+tan^2\theta)}{(1-r^2tan^2\theta)}\sqrt{r^2ln^2(\psi/\psi_b) + \frac{a^2(1-r^2tan^2\theta)}{(1+tan^2\theta)}} + 1 \quad (2.5)$$

Onde: $\theta = -\lambda/2$ = ângulo de rotação da hipérbole; $r = tan(\lambda/2)$ = abertura do ângulo tangente; $\lambda = arctan\{1 + [ln(10^6/\psi_b)]\}$ = declividade de dessaturação.

2.3.2.2 Curva unimodal com dois pontos de curvatura

Os parâmetros do solo escolhidos para definir a curva unimodal com dois pontos de curvatura são: o valor de entrada de ar (ψ_b), a sucção residual do solo (ψ_{res}), e o grau de saturação residual (S_{res}). Um quarto parâmetro, denominado "a", define as transições ao longo de ambos os pontos de curvatura. Novamente, os parâmetros adotados correspondem cada um a características distintas do formato típico das curvas características de sucção unimodais, conforme mostrado na Figura 2.3((1a), (1b) e (1c)).

Duas hipérboles são necessárias para definir totalmente a curva característica de sucção unimodais com dois pontos de curvatura. As três linhas retas definidas por $(0,1)$, $(\psi_b,1)$, (ψ_{res},S_{res}) e $(10^6,1)$ são as assíntotas da hipérbole. Estas duas hipérboles são fundidas através de uma terceira equação, produzindo uma equação contínua:

$$S=\frac{S_1-S_2}{1+\left(\psi/\sqrt{\psi_b\psi_{res}}\right)^d}+S_2 \tag{2.6}$$

Onde:

$S_i=\frac{tan\theta_i(1+r_i{}^2)ln(\psi/\psi_i^a)}{(1-r_i{}^2tan^2\theta_i)}+(-1)^i\times\frac{(1+tan^2\theta_i)}{(1-r_i{}^2tan^2\theta_i)}\sqrt{r_i{}^2ln^2(\psi/\psi_i^a)+\frac{a^2(1-r_i{}^2tan^2\theta_i)}{(1+tan^2\theta_i)}}+S_i^a;$
$i=1{,}2;\ \theta_i=-(\lambda_{i-1}+\lambda_i)/2=$ ângulo de rotação da hipérbole; $r_i=tan[(\lambda_{i-1}-\lambda_i)/2]$ =abertura do ângulo tangente; $\lambda_0=0$ e $\lambda_i=arctan\{(S_i^a-S_{i+1}^a)/[ln(\psi_{i+1}^a/\psi_i^a)]\}$ = declividade de dessaturação; $S_1^a=1;\ S_2^a=S_{res};\ S_3^a=0;\ \psi_1^a=\psi_b;\ \psi_2^a=\psi_{res};\ \psi_3^a=10^6$ e $d=2exp[1/ln\,(\psi_{res}/\psi_b)]$ = fator de ponderação para S_1 e S_2 que produz uma curva continua e suave.

2.3.2.3 Curva bimodal

Dois valores de entrada de ar e dois pontos residuais, ambos distintos, podem ser definidos para curvas características de sucção bimodais, resultando em um total de quatro pontos de curvatura, conforme mostrado na Figura 2.3(2). Um parâmetro adicional, a, é novamente utilizado para definir com clareza as transições de ambos os pontos de curvatura. Em resumo, oito parâmetros são identificados a representar curvas bimodais: ψ_{b1}, ψ_{res1}, S_{res1}, ψ_{b2}, S_b, ψ_{res2}, S_{res2}, e a.

Quatro hipérboles são necessárias para um modelo de curva característica de sucção bimodal delineada pelas cinco assíntotas que são definidas por $(0,1)$, $(\psi_{b1},1)$, (ψ_{res1},S_{res1}), (ψ_{b2},S_b), (ψ_{res2},S_{res2}) e $(10^6,1)$. Estas hipérboles são combindas da seguinte forma:

$$S=\frac{S_1-S_2}{1+\left(\psi/\sqrt{\psi_{b1}\psi_{res1}}\right)^{d_1}}+\frac{S_2-S_3}{1+\left(\psi/\sqrt{\psi_{res1}\psi_{b2}}\right)^{d_2}}+\frac{S_3-S_4}{1+\left(\psi/\sqrt{\psi_{b2}\psi_{res2}}\right)^{d_3}}+S_4 \tag{2.7}$$

Onde S_i,θ_i,r_i e λ_i são definidos da mesma forma que os da equação 3; $i=1,2,3,4$; $S_1^a=1$; $S_2^a=S_{res1}$; $S_3^a=S_b$; $S_4^a=S_{res2}$; $S_5^a=0$; $\psi_1^a=\psi_{b1}$; $\psi_2^a=\psi_{res1}$; $\psi_3^a=\psi_{b2}$; $\psi_4^a=\psi_{res2}$; $\psi_5^a=10^6$ e $d_j=2exp\left[1/ln\left(\psi_{j+1}^a/\psi_j^a\right)\right]$ = fator de ponderação, $j=1,2,3$.

2.4 HISTERESE DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO

A curva característica de sucção do solo obtida pelos processos de secagem e molhagem produz trajetórias diferentes, manifestando o fenômeno conhecido como histerese. A curva característica de sucção sofre histerese, ou seja, o teor de umidade correspondente em uma determinada sucção do solo para o caminho de molhagem é menor do que o caminho de secagem (PHAM, 2001).

A natureza da histerese da curva característica de sucção é conhecida há muito tempo, mas na maioria das aplicações na engenharia e agronomia as curvas características de sucção são consideradas como sendo únicas.

2.4.1 Fatores que causam histerese da curva característica de sucção

Vários fatores podem ser indicados como causadores da histerese de curvas características de sucção. Dentre estes, tem-se como principais:

- A conexão de poros de variados tamanhos na matrix do solo (TAYLOR, 1948; HILLEL, 1971, 1980; MARSHALL *et al.*, 1996);
- Aprisionamento de ar no solo (HILLEL, 1971; MARSHALL *et al.*, 1996);

- A diferença entre o ângulo de contato entre água e sólidos durante molhagem e secagem (MARSHALL *et al.*,1996);

- Deformações não recuperáveis do esqueleto sólido durante ciclos de molhagem e secagem (HILLEL, 1971; MARSHALL *et al.*, 1996).

O efeito da conexão de poros de variados tamanhos pode ser visualizado com o auxílio de um modelo físico simples mostrado na Figura 2.5, que representa um tubo capilar de diâmetros variados, apresentado por diversos autores (TAYLOR, 1948; HILLEL, 1971, 1980; MARSHALL *et al.* 1996). Este modelo é uma simplificação da situação do solo em que poros de diâmetros variados se encontram conectados, formando um caminho de movimento de água no solo.

Os dois "poros" conectados da Figura 2.5 possuem diferentes diâmetros $(D_1 < D_2)$. Para cada um dos diâmetros dos poros, existe um valor de sucção que indica o estado do poro (i.e., $\psi = T_s/D$, onde: T_s é a tensão superficial da água). Se a sucção é inferior, o poro se encontra seco, se a sucção for maior, o poro se encontra saturado. No caso da Figura 2.5, tem-se ψ_1 e ψ_2 para os dois diâmetros dos poros, D_1 e D_2, respectivamente $(\psi_1 > \psi_2)$ e $(D_1 < D_2)$.

A altura da coluna de água na Figura 2.5 é relacionada com o valor de sucção (i.e., $h = \psi/(\rho_w g)$), onde: ρ_w é a densidade da água e g é a aceleração gravitacional. A altura h_1 corresponde à altura de ascensão capilar correspondente ao poro de diâmetro D_1. A sucção matricial na elevação h_1 corresponde à $\psi_1 = T_s/D_1$. O conjunto de poros da Figura 2.5 pode ser preenchido completamente de água, ultrapassando a altura de coluna h_1. Pode-se, por exemplo, mergulhar o conjunto de capilares. Quando for permitida a drenagem livre da água (i.e., secagem), elevando a coluna de poros, a água drenará até a altura de coluna d'água h_1. Este processo é o que é chamado de "processo de secagem".

O processo de molhagem se dá de forma inversa e tem início com a coluna capilar completamente seca. Ao colocar a base da coluna capilar em contato com a superfície de água, ocorre a ascensão da água por capilaridade. Neste caso, porém, a coluna de água não ultrapassará a altura h_2, pois a secção de maior diâmetro não é capaz de produzir ascensão capilar neste nível de sucção. Este tipo de situação ocorre no solo, apesar de se dar de forma caótica, com variados tamanhos de poros e de disposição de conexões.

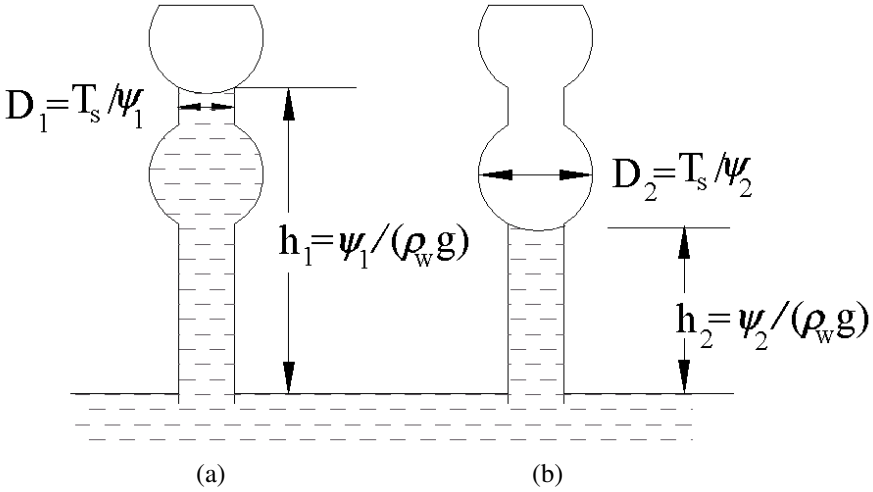


Figura 2.5 – Ilustração esquemática do efeito de capilares com diâmetros variáveis conectados (a) o processo de secagem e (b) o processo de molhagem (HILLEL, 1980)

O efeito do aprisionamento de ar no solo é observado pela umidade do solo quando a sucção é igual à zero, após um ciclo de secagem e molhagem (HILLEL, 1971; MARSHALL *et al.*, 1996). A umidade após o ciclo é geralmente inferior à umidade antes do início do ciclo. Fisicamente, o efeito de aprisionamento pode ser explicado como sendo o impedimento do fluxo livre de ar, que acontece pela descontinuidade da fase ar.

O aprisionamento de ar é parcialmente relacionado com o efeito de poros de variados tamanhos, mas não deve ser confundido com este. Os efeitos são relacionados, uma vez que a dificuldade de molhagem de poros de maiores tamanhos resulta em volumes de ar disponíveis para serem eventualmente aprisionados. Mas os efeitos são distintos, uma vez que no caso de poros conectados de variados tamanhos ocorre a saturação após a remoção de toda a sucção. Já no caso de ar aprisionado, mesmo após se atingir sucção igual à zero, não ocorre saturação do solo.

O efeito do ângulo de contato entre a água e as partículas sólidas tem por base a ação mecânica na interface água-ar-sólido (MARSHALL *et al.*, 1996). O efeito é ilustrado pelo modelo físico da Figura 2.6. A Figura 2.6(a) apresenta uma gota de água em repouso sobre um material hidrofóbico. Neste caso, tem-se um ângulo de contato negativo. A Figura 2.6(b) apresenta o resultado da inclinação da superfície hidrofóbica. Nesta situação, a gota de água escorre e é removida.

A Figura 2.6(c) apresenta uma gota de água em repouso sobre um material hidrofílico, tal como o quartzo ou um argilomineral. Esta situação é representativa da interação que ocorre entre água e partículas sólidas do solo. No caso da Figura 2.6(c), o ângulo de contato é positivo, indicando a atração entre o flúido e o sólido. O efeito relevante para o fenômeno da histerese é ilustrado na Figura 2.6(d). Neste caso tem-se o sistema da Figura 2.6(c) inclinado. A gota de água forma, neste caso, forma ângulos de contato distintos, quando considerada a região elevada e rebaixada do contato água-sólido.

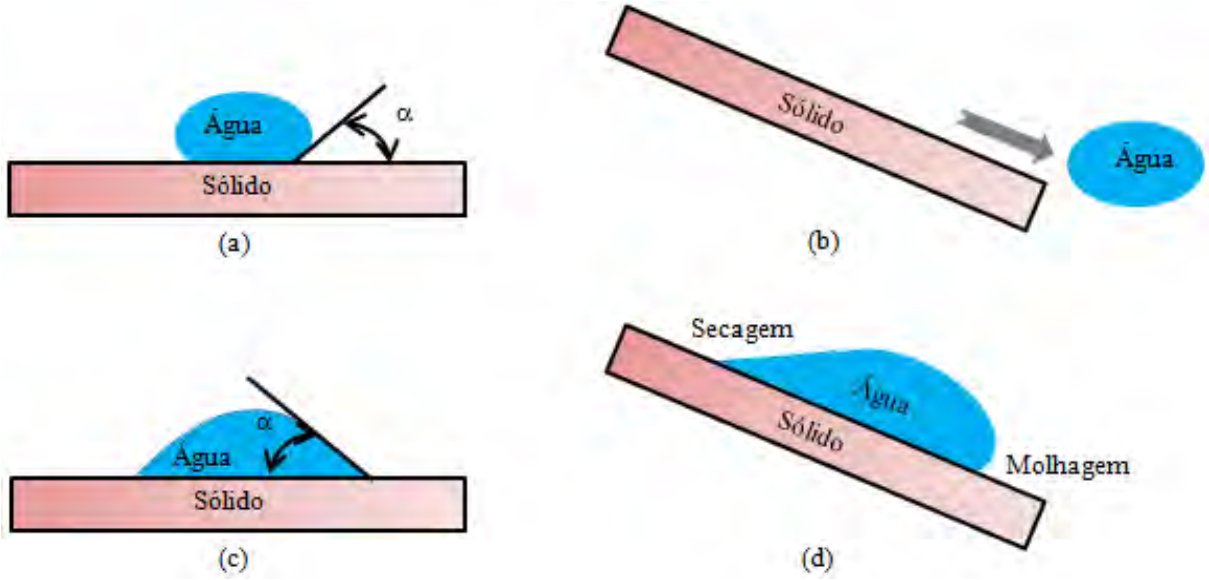


Figura 2.6 – Interação sólido-líquido-ar: (a) gota de água em repouso em uma superfície horizontal com material hidrofóbico; (b) gota de água escorre em uma superfície inclinada com material hidrofóbico; (c) gota de água em repouso na superfície do material hidrofílico; (d) gota de água escorrendo em uma superfície inclinada com material hidrofílico

Fica evidenciado que a atração entre a água e as partículas sólidas representa um impedimento ao fluxo de água. O que é relevante para o fenômeno de histerese é que este impedimento tem efeitos diferenciados durante a molhagem e a secagem. Durante a secagem, a atração evidenciada pelo ângulo de contato age contrária à secagem do solo. Ou seja, a forca de atração age em favor de mais altos valores de umidade durante a secagem. Já durante a molhagem, a atração age contrária ao avanço da molhagem do solo. Ou seja, a forca de atração age em favor de mais baixos valores de umidade durante a secagem.

Por fim, tem-se o efeito das deformações não recuperáveis do esqueleto sólido. Ciclos de secagem podem causar redução de volume e de tamanho de poros do solo (HILLEL, 1971; MARSHALL *et al.*, 1996). Deformações não recuperáveis são esperadas principalmente

quanto o ciclo de secagem atinge uma sucção nunca antes experimentada pelo solo. A variação de volume durante a secagem e resultante variação no tamanho dos poros produz alterações no valor de entrada de ar. Este efeito pode alterar as características de histerese.

2.4.2 Natureza da histerese de curvas características de sucção

Investigações levando em consideração a natureza da histerese da curva característica de sucção indicam que existem relações consistentes entre a histerese das curvas. A Figura 2.7 apresenta as diversas curvas características de sucção para diferentes trajetórias de sucção e a denominação comumente adotada para cada curva. Deve-se ressaltar que a nomenclatura para as curvas de histerese encontrada na literatura não é uniforme e existem denominações diferentes das adotadas aqui. O significado físico de cada curva é brevemente explicado a seguir:

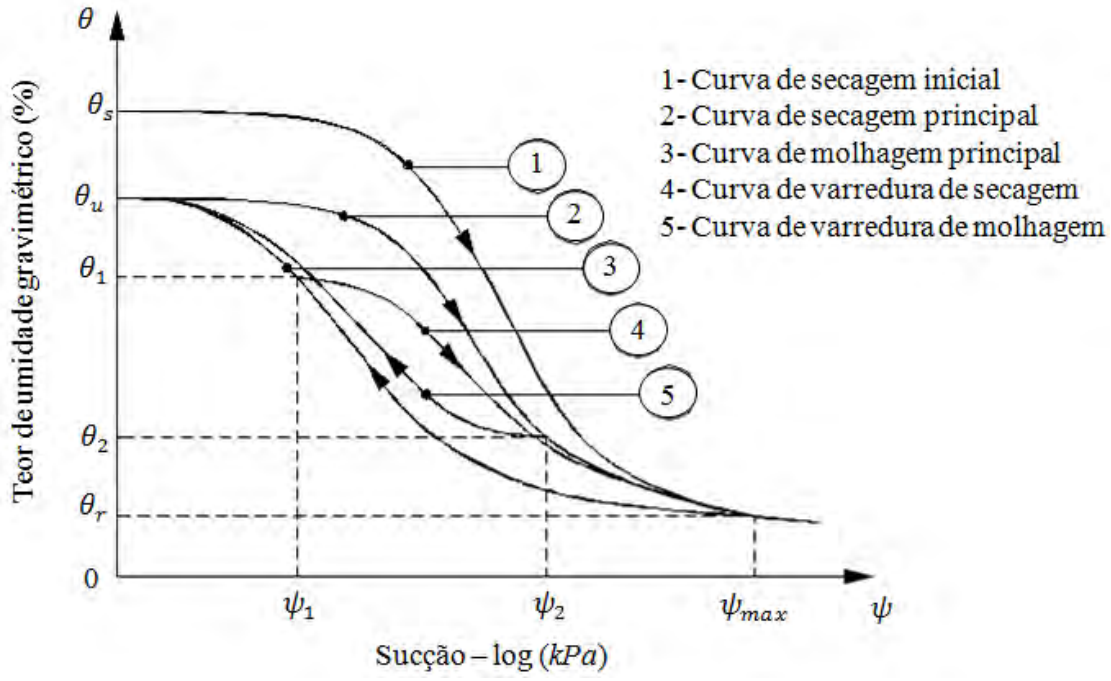


Figura 2.7 – Ilustração esquemática da histerese de diferentes curvas características de sucção do solo (modificada de HOGARTH *et al.*, 1988)

Curva de secagem inicial trata-se da curva obtida em trajetória de secagem e que parte de um estado de completa saturação. Enquanto esta curva tem importante significado com relação ao comportamento do solo, condições de campo de solos não saturados geralmente não correspondem à completa saturação, mesmo após a molhagem.

Curva de secagem principal trata-se da curva obtida em trajetória de secagem e que parte de um estado de saturação correspondente a um solo que vem sofrendo ciclos de molhagem e secagem, sem envolver períodos de prolongada molhagem com poro-pressões positivas.

Curva de molhagem principal trata-se da curva obtida em trajetória de molhagem e que parte de um estado de saturação baixo, i.e., iniciada no teor de umidade residual, correspondente a um solo que vem sofrendo ciclos de molhagem e secagem.

Curva de varredura de secagem trata-se da curva que parte da curva de molhagem, dentro de um intervalo onde o valor da sucção do solo na curva de molhagem não coincide com o de secagem, até atingir o teor de umidade residual.

Curva de varredura de molhagem trata-se da curva que parte da curva de secagem, dentro de um intervalo onde o valor da sucção do solo na curva de secagem não coincide com o de molhagem, até atingir o teor de umidade alto onde este é igual tanto para a curva de secagem, como de molhagem.

Curva de molhagem principal se inicia no teor de umidade residual. Já a curva de secagem principal começa no nível zero de sucção do solo e termina no ponto em que inicia a curva de molhagem principal (PHAM, 2001). As duas curvas juntas formam o ciclo principal de histerese.

A Figura 2.8 apresenta algumas curvas de varredura. Vários tipos de curvas de varredura existem, dependendo da trajetória e da posição relativa do ponto de partida da curva. Na prática, existem infinitas curvas de varredura. O ciclo principal de histerese é indicado pelos pontos ABCDA (i.e, as curvas de histerese fechadas). Já ABEA e DFCD são ciclos de histereses primários, pois estes envolvem pontos de partida em que as curvas principais coincidem.

Curvas de varredura primárias podem ser curvas de varredura de secagem ou curvas de varredura de molhagem. Curvas de varredura primárias são curvas características de sucção que partem de um valor de sucção do solo no qual as curvas principais não coincidem (i.e., BEA e DFC são curvas de varredura primárias). De acordo com Pham (2001), o intervalo de sucção em que as curvas não coincidem vão desde próximo do valor de entrada do ar, até a sucção no qual o teor de umidade residual ocorre.

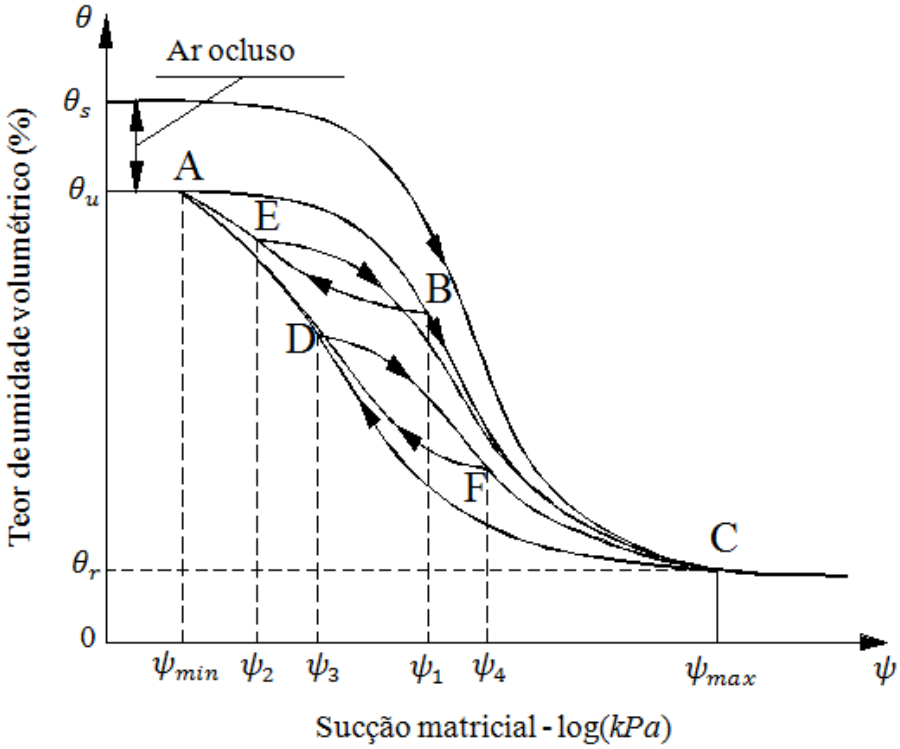


Figura 2.8 – Ilustração esquemática de curvas características de sucção do solo com ênfase nas curvas de varrredura (modificada de PHAM, 2001)

Para as aplicações de engenharia é comum se utilizar apenas da curva que representa a trajetória de sucção que representa a trajetória predominante do problema. A análise do primeiro enchimento de uma barragem, por exemplo, pode ser realizada utilizando a curva principal de molhagem, Porém, para problemas que envolvem ciclos de molhagem e secagem, a existência das outras curvas de molhagem e secagem, e a necessidade de recorrer a elas, torna o problema difícil. É necessário levar-se em conta os efeitos da histerese, pois a diferença entre os processos de molhagem e secagem é significativa. Um exemplo prático que envolve ciclos de secagem e molhagem é a análise de fluxos entre o solo e a atmosfera.

2.5 MODELOS DE HISTERESE

Para determinar todas as infinitas possibilidades de histerese das curvas características de sucção para um solo, faz-se necessário um modelo para predizer a histerese das curvas características de sucção, incluindo as curvas de varredura. Um modelo viável do ponto de vista prático deve ter por base um número finito de pontos de dados medidos, para assim, aplicar o efeito de histerese na prática de engenharia. Pham (2001) apresentou uma revisão

detalhada de modelos de histerese de curva característica de sucção. Esta modelagem envolve a definição de curvas de secagem principal, molhagem principal e de varredura.

Os modelos de histerese podem ser divididos em duas categorias, modelos com base física e modelos empíricos. A Tabela 2.2 apresenta vinte cinco modelos de histerese encontrados na literatura. As teorias relacionadas com cinco destes modelos são apresentadas mais a frente.

Tabela 2.2 – Modelos de histerese (PHAM, 2001)

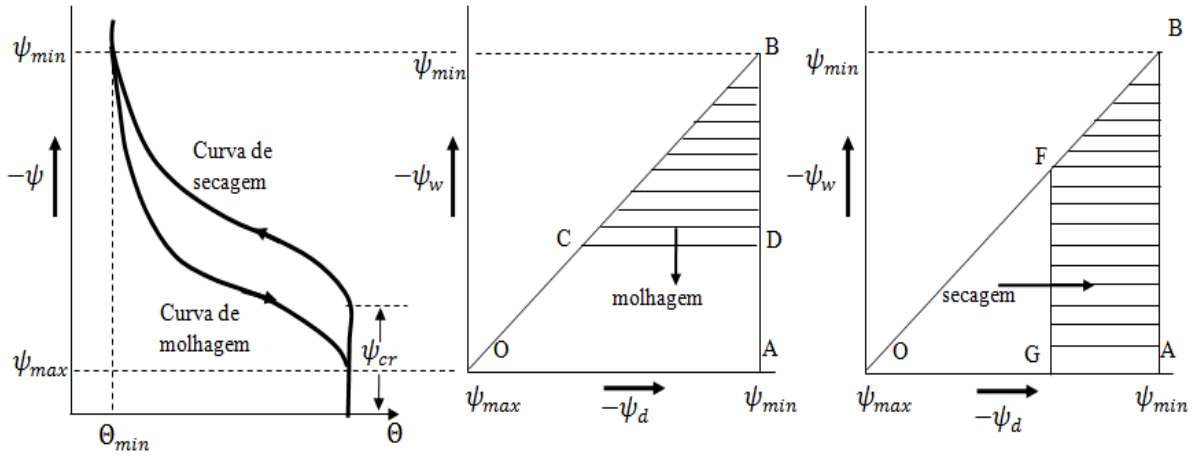
Autor/Ano	Propriedades do modelo	Dados medidos necessários
Everett 1954-1955	Modelo de domínio independente	Ciclo de histerese principal e uma família de curvas de varredura primárias
Enderby 1955-1956	Extensão do modelo de domínio independente de Everett para um modelo dependente	Ciclo de histerese principal e uma família de curvas de varredura primárias
Poulovassilis 1962	Aplicação do modelo de domínio independente de Everett	Ciclo de histerese principal e uma família de curvas de varredura primárias
Philip 1964	Modelo de domínio independente de Everett simplificado baseado na hipótese de similaridade	Ciclo de histerese principal
Modelo Linear (Hank et al.) 1964	Modelo empírico	Ciclo de histerese principal
Poulovassilis e Childs 1971	Modelo de domínio dependente	Ciclo de histerese principal e uma família de curvas de varredura primárias
Topp 1971a	Extensão do modelo de domínio independente de Everett para um modelo de domínio dependente	Ciclo de histerese principal e uma família de curvas de varredura primárias e uma curva de varredura de outras famílias
Mualem (Modelo – I) - 1973	Simplificação adicional da hipótese de similaridade de Philip	Ciclo de histerese principal
Mualem (Modelo – II) 1974	Simplificação do Modelo-I	Ciclo de histerese principal
Modelo de Pontos (Dane e Wierenga) - 1975	Modelo empírico	Ciclo de histerese principal
Mualem e Dagan (Modelo – III) - 1975	Extensão do modelo-II para um modelo de domínio dependente	Ciclo de histerese principal e uma curva de varredura primária
Parlange - 1976	Simplificação para hipóteses de similaridade de Mualem	Uma curva ciclo de histereses principal e dois pontos de encontro do ciclo de histereses principal
Mualem (Modelo Universal) 1977	Simplificação do Modelo – II	Curvas principais com um ciclo de histereses e dois pontos

Tabela 2.2 – Modelos de histerese (PHAM, 2001) (continuação)

Autor/Ano	Propriedades do modelo	Dados medidos necessários
Poulovassilis e El-Ghamry - 1978	Modelo de domínio dependente - estendido do modelo de domínio não independente (1971)	Ciclo de histerese principal e uma família de curvas de varredura primárias
Modelo – IIIexpl (Mualem e Miller) 1979	Melhoria do Modelo-III	Ciclo de histerese principal e curvas de varredura primárias
Scott *et al.* - 1983	Modelo empírico usando equações de ajuste de curvas.	Ciclo de histerese principal
Mualem - 1984b	Modificação do modelo de domínio dependente baseado na hipótese de similaridade do Modelo universal.	Ciclo de histerese principal
Mualem - 1984a	Modelo de domínio independente (melhoria do Modelo Universal)	Duas curvas ciclos primários.
Modelo de Jaynes 1985	Este modelo é uma melhora do Modelo de Ponto.	Ciclo de histerese principal
Hogarth *et al.*- 1988	Melhoria do modelo de Parlange (1976, 1980)	Curva de secagem principal e valor de entrada de ar
Nimmo - 1992	Um modelo semiempírico	Curva de secagem principal e dois pontos da curva de molhagem principal
Yaping Liu *et al.* 1995	Uma aplicação do modelo de Hogarth *et al.* (1988)	Uma família de curvas de varredura de secagem passando através um ponto com teor de umidade residual
Feng e Fredlund 1999	Método de ajuste de curva	Curva de secagem principal e dois pontos da curva de molhagem principal
Kawai *et al.* - 2000	Aplicação da equação de Brooks e Corey (1964)	Ciclo de histerese principal
Modelo hiperbólico (Karube e Kawai) 2001	Melhora do modelo de Kaiwai *et al.* As curvas são descritas por hipérboles	Ciclo de histerese principal

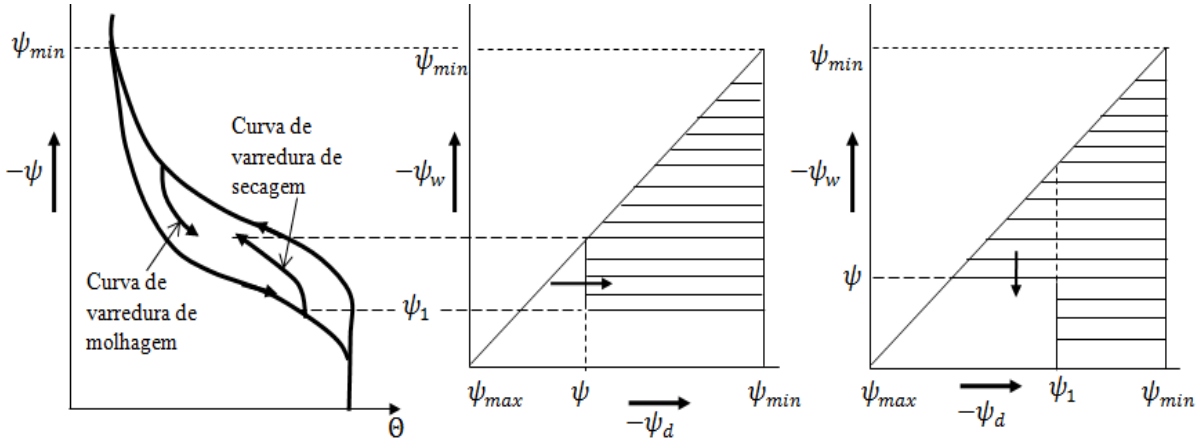
2.5.1 Modelo-I de Mualem (1973)

Mualem (1973) desenvolveu o "Modelo I" com base na hipótese de similaridade. Este foi uma significativa melhora no desenvolvimento histórico dos modelos de histerese do solo. O Modelo I de Mualem (1964) é semelhante ao Modelo de Philip (1964). Porém, são assumidas algumas diferenças básicas conduzindo o modelo para um método simples e acessível de prever a relação entre a sucção matricial e o teor de umidade dentro de um ciclo de histerese. Para descrever o processo de secagem e molhagem no solo (Figura 2.9 e Figura 2.10) Mualem (1973) utiliza diagramas de Néel (1942; 1943).



(a) (b) (c)

Figura 2.9 – Diagrama de Néel (1942; 1943) para o modelo de Mualem (1973); (b) curva de molhagem principal (c) curva de secagem principal (modificadas de MUALEM, 1973)



(a) (b) (c)

Figura 2.10 – Diagrama de Néel (1942; 1943) para o modelo de Mualem (1973); (b) curvas de varredura de secagem , (c) curvas de varredura de molhagem (modificadas de MUALEM, 1973)

Considerando Θ_{min} como o teor de umidade de um ponto conhecido das curvas de secagem e molhagem principais para sucções do solo altas, que não contribui para a histerese, o teor de umidade efetivo pode ser definido neste modelo da seguinte forma:

$$\theta(\psi) = \Theta(\psi) - \Theta_{min} \tag{2.8}$$

Após um ciclo de molhagem e secagem, o teor de umidade efetivo pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\theta = \iint f(\psi_w \psi_d) d\psi_w \, d\psi_d \tag{2.9}$$

Onde ψ é a sucção, e os subscritos w e d são referentes às trajetórias de molhagem e secagem.

Mualem (1973), de forma semelhante à hipótese de similaridade de Philip (1964), assume que a função da distribuição de água $f(\psi_w, \psi_d)$ pode ser representada pelo produto de duas funções de distribuição independente $h(\psi_w)$ e $l(\psi_d)$, podendo ser calculada como segue:

$$f(\psi_w, \psi_d) = h(\psi_w) l(\psi_d) \tag{2.10}$$

A curva de molhagem principal é obtida pela integração do triângulo CDB da Figura 2.9b, obtendo a seguinte equação:

$$\theta_w(\psi) \int_{\psi_{min}}^{\psi} h(\psi_w) \left[\int_{\psi_{min}}^{\psi_w} l(\psi_d) d\psi_d \right] d(\psi_w) \tag{2.11}$$

Onde θ_w é o teor de umidade volumétrico referente à trajetória de molhagem e ψ_{min} é a sucção mínima.

Mualem (1973) define duas novas funções, baseados em $h(\psi_w)$ e $l(\psi_d)$.

$$H(\psi) = \int_{\psi_{min}}^{\psi} h(\psi) d(\psi) \tag{2.12}$$

$$L(\psi) = \int_{\psi_{min}}^{\psi} l(\psi) d(\psi) \tag{2.13}$$

Substituindo as Equações (2.12) e (2.13) na Equação (2.11) obtêm-se a seguinte expressão:

$$\theta_w(\psi) = \int_{\psi_{min}}^{\psi} h(\psi_w) L(\psi_w) d(\psi_w) \tag{2.14}$$

Pela derivação da Equação (2.14), obtêm-se:

$$d\theta_w(\psi) = h(\psi)L(\psi)d\psi \tag{2.15}$$

A curva de secagem principal pode ser obtida pela integração do trapézio ABFG da Figura 2.9c, conforme mostrado pela seguinte equação:

$$\theta_d(\psi) = \theta_w(\psi) + \int_{\psi}^{\psi_{max}} h(\psi_w)d\psi_w \int_{\psi_{min}}^{\psi} l(\psi_d)d\psi_d \tag{2.16}$$

θ_d é o teor de umidade volumétrico referente à trajetória de secagem e ψ_{max} é a sucção máxima.

Substituindo a Equação(2.12) na Equação (2.16), obtêm-se:

$$\theta_d(\psi) = \theta_d(\psi) + [H(\psi_{max}) - H(\psi)]L(\psi) \tag{2.17}$$

Utilizando a Equação (2.15) e (2.17) para eliminar *L(ψ)*, têm-se:

$$\frac{d\theta_w(\psi)}{\theta_d(\psi)-\theta_w(\psi)} = \frac{h(\psi)d(\psi)}{H(\psi_{max})-H(\psi)} \tag{2.18}$$

Integrando ambos os lados da Equação (2.18), obtêm-se:

$$\int_{\psi_{min}}^{\psi} \frac{d\theta_w(\psi)}{\theta_d(\psi)-\theta_w(\psi)} = -ln\frac{H(\psi_{max})-H(\psi)}{H(\psi_{max})-H(\psi_{min})} \tag{2.19}$$

Pela definição na Equação (2.12), $H(\psi_{min})$ é igual a 0 (zero) e, portanto a Equação (2.19) torna-se:

$$H(\psi) = H(\psi_{min})\left[1 - exp\left(-\int_{\psi_{max}}^{\psi} \frac{d\theta_w(\psi)}{\theta_d(\psi)-\theta_w(\psi)}\right)\right] \tag{2.20}$$

$H(\psi_{max})$ é constante e pode ser determinada arbitrariamente. Para normalizar a função $h(\psi)$, Mualem (1973) assume $H(\psi_{max})$ igual a 1 (um), e então a Equação (2.20) torna-se:

$$H(\psi) = 1 - e^{-F(\psi)} \tag{2.21}$$

Onde $F(\psi)$ é igual a:

$$F(\psi) = \int_{\psi_{min}}^{\psi} \frac{d\theta_w(\psi)}{\theta_d(\psi) - \theta_w(\psi)} \tag{2.22}$$

Uma vez determinado $H(\psi)$, $L(\psi)$ é obtido da seguinte forma:

$$L(\psi) = \frac{\theta_d(\psi) - \theta_w(\psi)}{1 - H(\psi)} \tag{2.23}$$

A função *F(ψ)* pode ser determinada pela Equação (2.22), e as funções *H, L* e a função de distribuição de umidade, *f,* podem ser calculadas. Quando a função de distribuição de umidade, *f*, é calculada para todos os intervalos de valores de sucção de solo, o teor de umidade ao longo do processo de secagem e molhagem pode ser determinado.

Mualem (1973) realizou verificações da solução simplificada do modelo apresentado, comparando este com resultados experimentais e com o Modelo de Néll-Everett. A confiabilidade do modelo proposto é demonstrada pela comparação da previsão das curvas de varreduras com as medidas.

Os resultados obtidos da previsão pelo modelo de Mualem (1973) são mais satisfatórios do que as curvas obtidas utilizando o modelo geral de Néel-Everett. Quatro solos com os quais foram realizados experimentos extensos, por Poulovassilis (1970) e por Toop (1969, 1971b), foram selecionados. Dentre estes uma areia (POULOVASSILIS, 1970); uma lama siltosa de Caribou, uma lama argilosa de Rideau e uma lama arenosa de Rubicon (TOPP, 1969, 1971b).

Estas verificações podem ser visualizadas da Figura 2.11 a Figura 2.14, onde são mostradas as previsões das curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett, pelo modelo modificado proposto e os dados medidos.

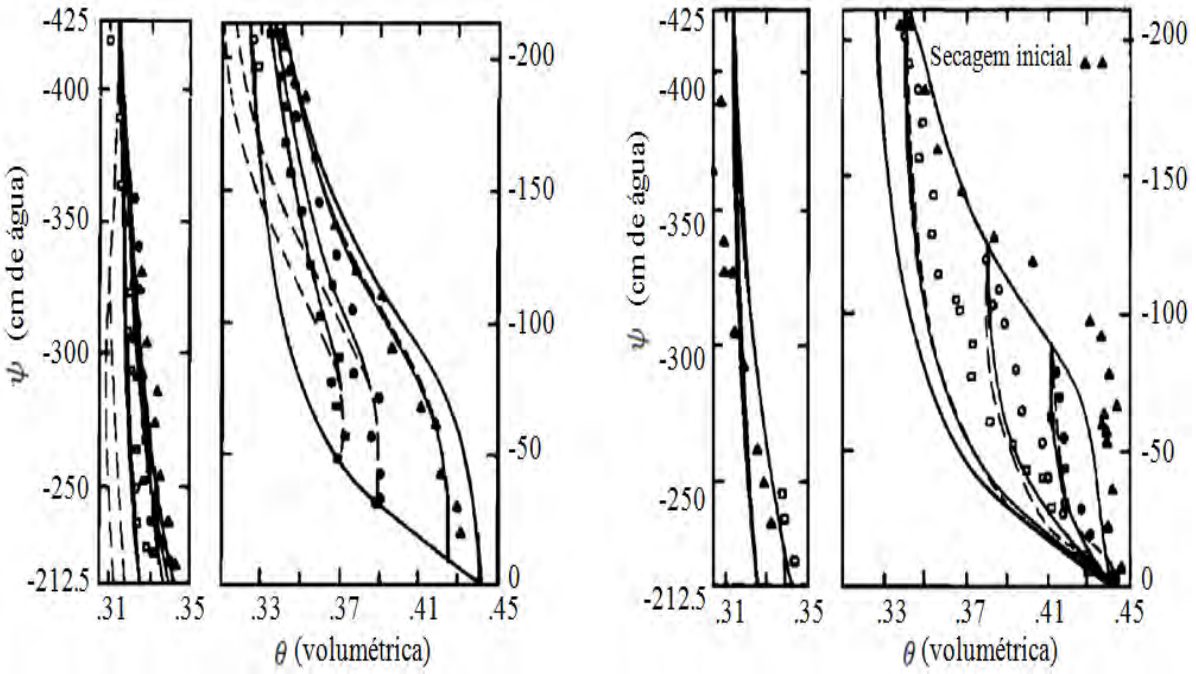


Figura 2.11 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (Linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e os dados medidos de lama siltosa de Caribou (pontos) (MUALEM, 1973)

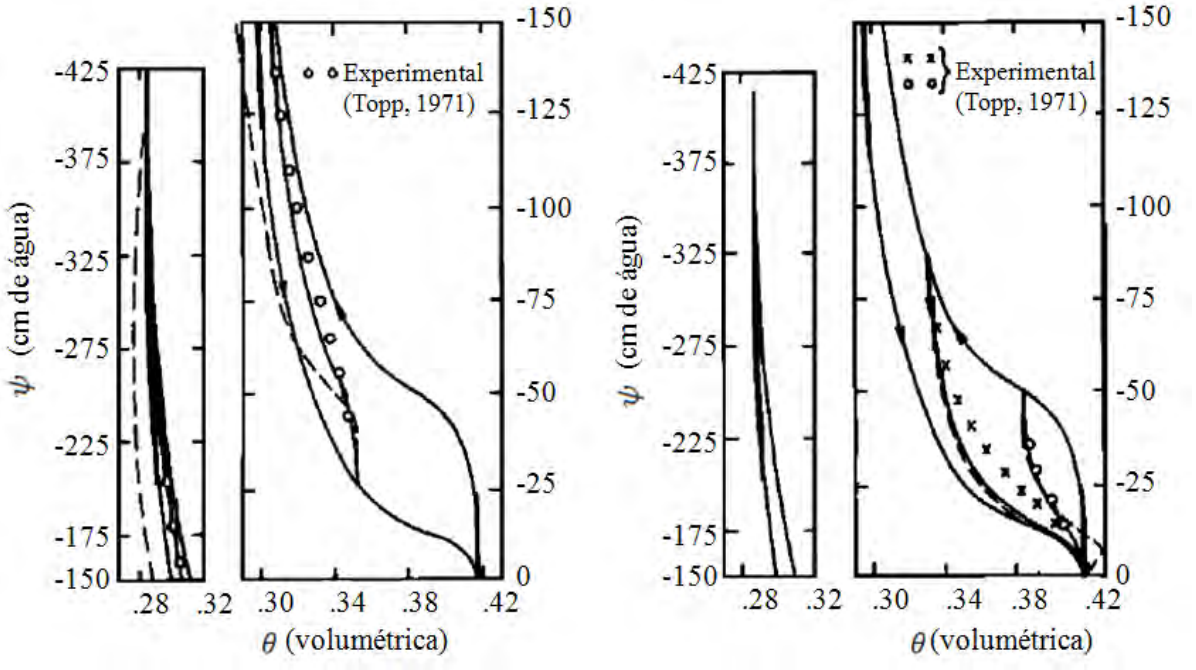


Figura 2.12 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e os dados medidos de lama argilosa de Rideau (pontos) (MUALEM, 1973)

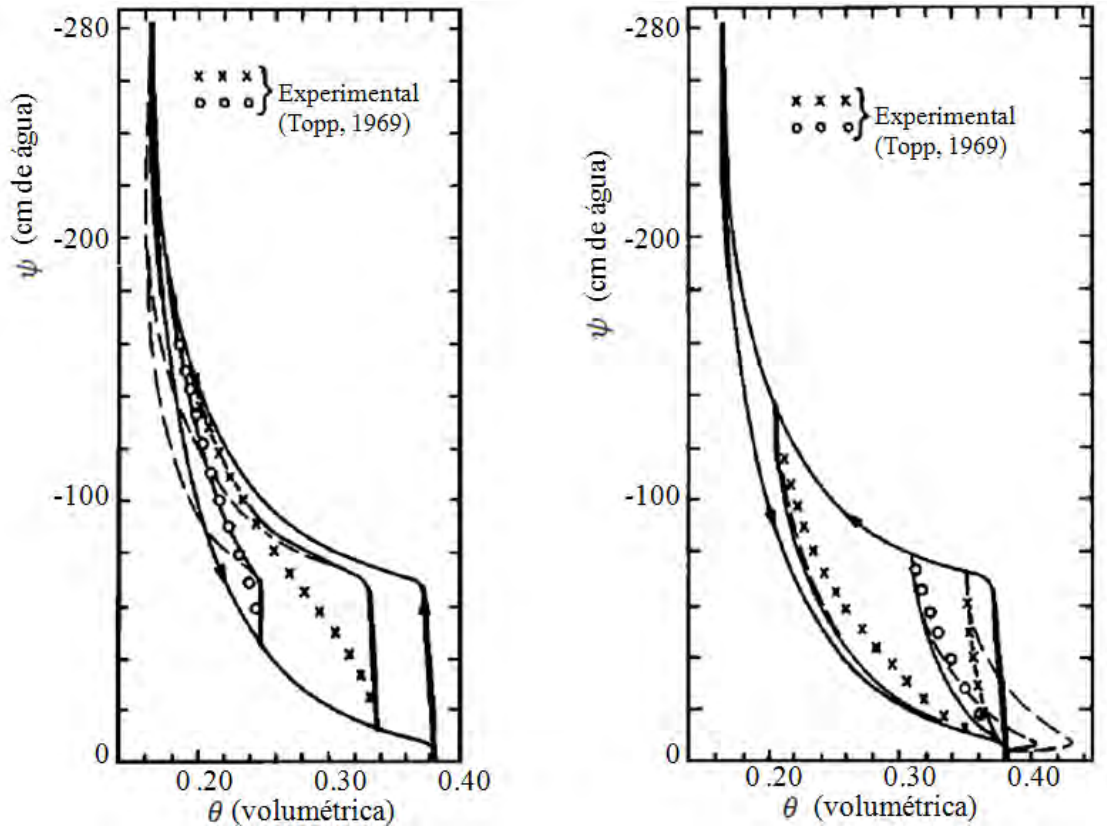


Figura 2.13 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (linha tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e os dados medidos de lama arenosa de Ribicon (pontos) (MUALEM, 1973)

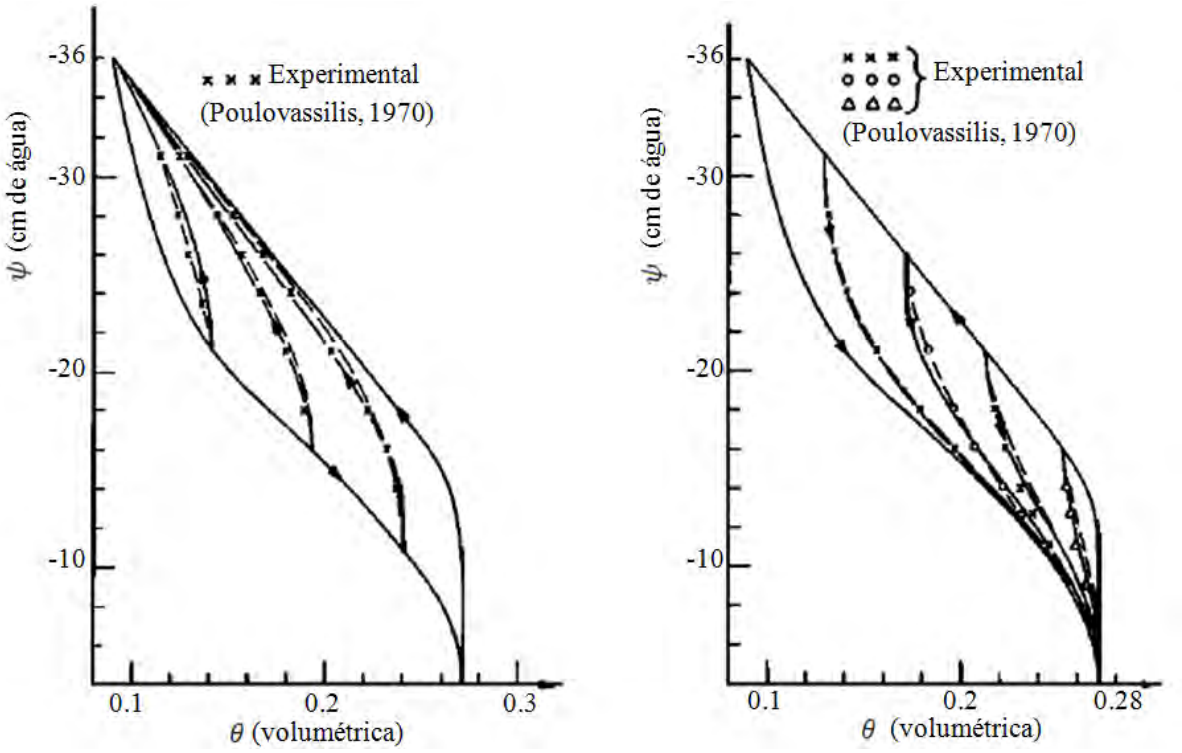


Figura 2.14 – Previsão de curvas de varredura pelo modelo de Néel-Everett (Lina tracejada), pelo modelo modificado proposto (linha solida), e resultados experimentais de solos arenosos (pontos) (MUALEM, 1973)

CAPÍTULO 3
METODOLOGIA

Foi elaborada durante este trabalho uma cuidadosa metodologia para o estudo do comportamento hidro-mecânico do perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia – GO. O foco principal do estudo se refere às variações de umidade do solo durante ciclos de molhagem e secagem, situação típica para os solos próximos da superfície do terreno. As características de histerese do solo se tornam de particular importância durante ciclos de molhagem e secagem. Foi planejada uma extensa campanha de ensaios de caracterização, ensaios mecânicos e ensaios para determinação da curva característica do solo.

Este capítulo apresenta inicialmente a área estudada, as técnicas adotadas para a amostragem dos solos e preparação de corpos-de-prova. Em seguida, são apresentadas as metodologias utilizadas nos ensaios laboratoriais de caracterização física, mineralógica e química, incluindo ensaios granulometria com sedimentação, granulômetria a laser, limites de liquidez e de plasticidade, peso específico real dos grãos, peso específico natural e compactação. Especial atenção foi dada às alternativas de preparação de amostras, variável de particular interesse para solos tropicais estruturados.

São apresentadas as metodologias adotadas para os ensaios de determinação da curva característica, incluindo a técnica do papel filtro e de ensaio oedométrico com controle de sucção pela técnica de translação de eixos.

3.1 ÁREA ESTUDADA

Foi selecionado como objeto principal deste estudo um campo experimental implantado nas dependências do Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.C) de Furnas Centrais Elétricas em Aparecida de Goiânia-GO (Figura 3.1). Esta área foi selecionada devido à conveniência de proximidade ao Laboratório de FURNAS e pelo perfil de solo ser típico da região. Sua localização geográfica é 16° 47′ 47″ S, 49° 13′ 48″ W, com elevação de 785m.

Figura 3.1 – Localização do campo experimental do DCT.C (imagem obtida do Google Earth™, 02/03/2010)

A Figura 3.2 apresenta o mapa da região metropolitana de Goiânia. A localização do Poço 01 do campo experimental do DCT.C no mapa indica que neste ponto existe um Latossolo Vermelho. Porém, o exame do material do local indica que o solo encontrado é um Cambissolo Háplico. O mapa de solo indica que o poço de amostragem encontra-se próximo aos limites dos dois tipos de solos. Este erro é aceitável, uma vez que a escala do mapeamento realizado é de 1:50.000.

O mapa Geológico da região metropolitana de Goiânia-GO é apresentado na Figura 3.3. A área de estudo é localizada em Aparecida de Goiânia onde ocorrem as unidades do Grupo Araxá-Sul de Goiás. Esta região é constituída principalmente de micaxistos e quartzitos micáceos.

Há uma diferença na coloração e no material presente na superfície do poço, como pode ser visualizado na Figura 3.4. O material de superfície se trata de um material transportado, e do extrato inferior é um solo residual jovem originado de micaxisto. O solo da superfície aparenta ser um colúvio (neossolo), identificado devido à presença de materiais angulosos de diversos tamanhos, sem serem selecionados.

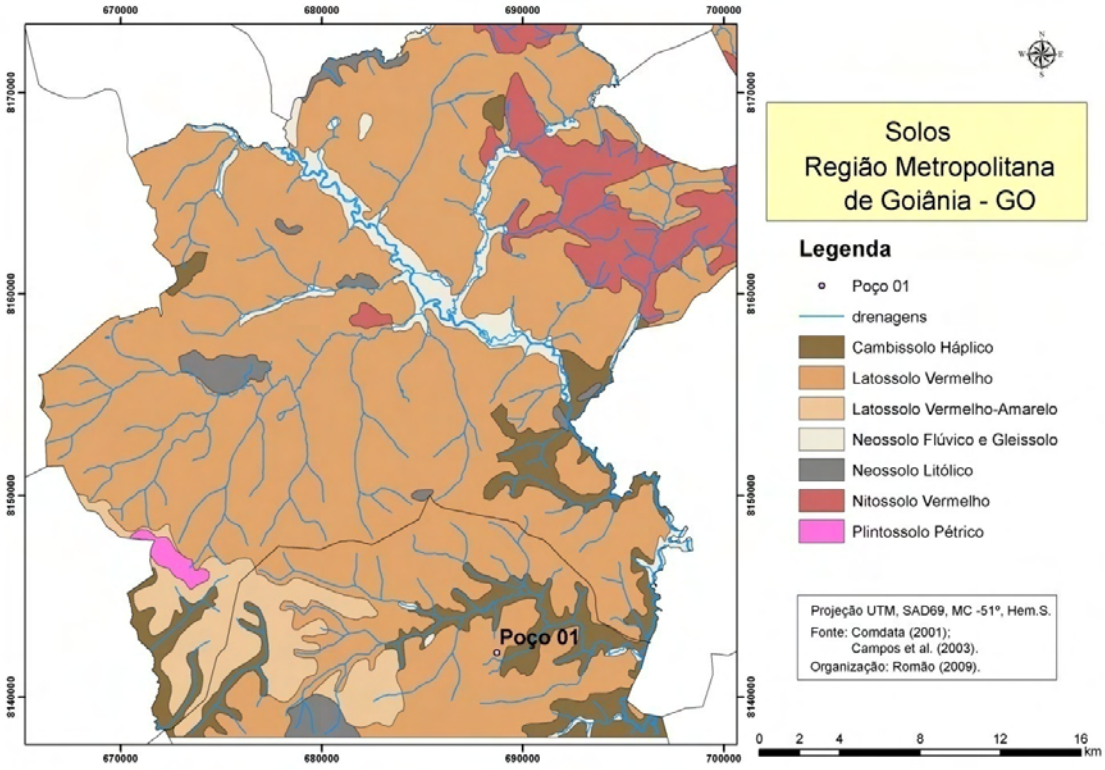


Figura 3.2 – Mapa de Solos da Região Metropolitana de Goiânia-GO e localização do poço 01 no campo experimental do DCT.C (Fonte: COMDATA, 2001; CAMPOS *et al.* 2003; Organização: ROMÃO, 2009)

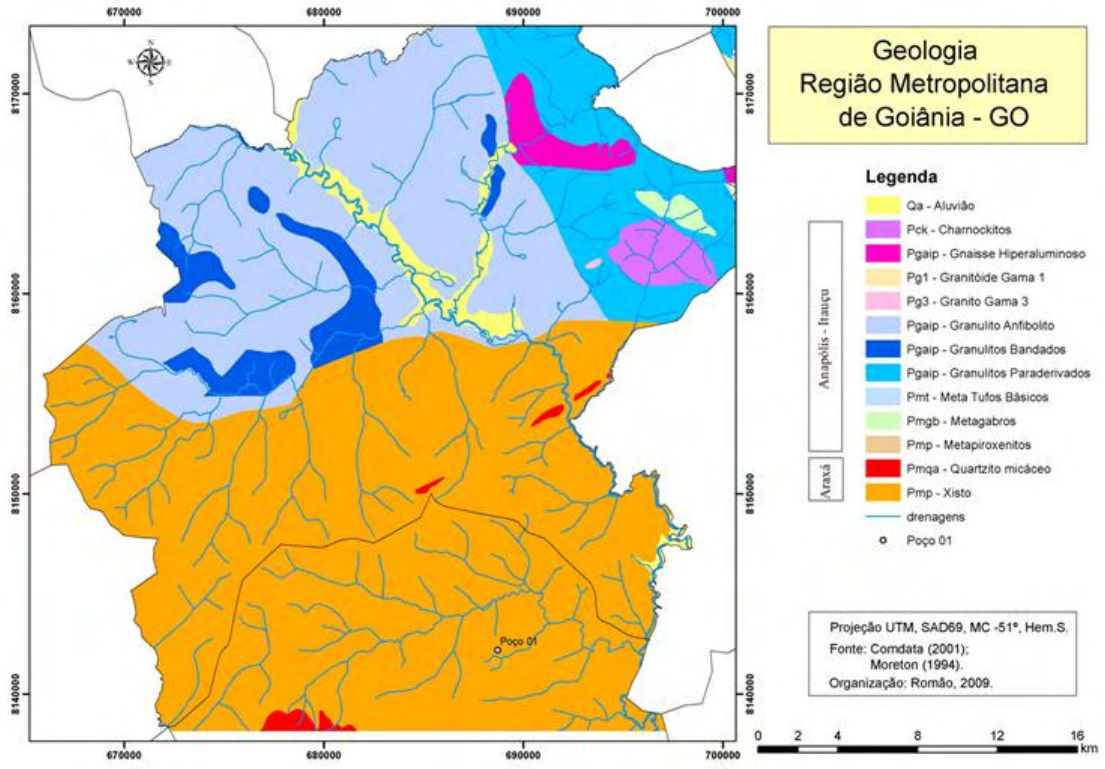


Figura 3.3 – Mapa de Geologia da Região Metropolitana de Goiânia-GO, localização do poço 01 no campo experimental do DCT.C (Fonte: COMDATA, 2001; MORETON 1994; Organização: ROMÃO, 2009)

(a) (b)

Figura 3.4 – Foto do poço: (a) detalhe da diferença de coloração do solo da superfície; (b) visão mais ampla do poço

3.2 AMOSTRAGEM

Na área escolhida executou-se abertura de um poço de amostragem durante setembro e outubro de 2008. As amostras foram retiradas no fim do período de estiagem, tendo ocorrido poucos dias de chuva durante os trabalhos. O poço foi escavado com diâmetro de 1,50 m e profundidade de 5,0 m. Deu-se prioridade à caracterização do perfil próximo à superfície, cujo material tem maior importância nos processos de transporte de umidade entre o solo e a atmosfera. As amostras necessárias foram destinadas a ensaios de laboratório, realizados ao longo do perfil, com o objetivo de caracterizar o comportamento hidro-mecânico do solo do perfil.

A relação de amostras deformadas e indeformadas coletadas para a realização da caracterização do solo do campo experimental e dos estudos envolvendo ensaios especiais para solos não saturados são apresentadas na Tabela 3.1. Procurou-se retirar amostras deformadas a cada 30 cm, aproximadamente, totalizando três profundidades de amostragem por metro. No entanto, transições entre camadas alteraram algumas das cotas de amostragem previstas. As amostras indeformadas foram retiradas de acordo com as Instruções de Trabalho adotadas pelo Departamento de Controle Técnico (IT.DCT.) (FURNAS, 2009a), sendo a quantidade de material retirado limitada em função das dimensões do poço de amostragem.

Tabela 3.1 – Relação de amostras deformadas e indeformadas retiradas

Amostra (n°)	Profundidade (m)	Data da amostagem	Quantidade (sacos)	Referência Blocos (n°s)
1ª	0,00 a 0,75	29/09/08	2	
2ª	0,75 a 1,00	30/09/08	2	
3ª	1,00 a 1,20	01/10/08	3	Blocos 1, 2 e 3
	1,00 a 1,50	01/10/08	3	
	1,10 a 1,50	02/10/08	2	
4ª	1,50 a 1,90	06/10/08	5	
5ª	2,00 a 2,40	07/10/08	5	Blocos 4, 5 e 6
6ª	2,40 a 3,00	14/10/08	5	
7ª	3,00 a 3,30	20/10/08	5	Blocos 7, 8 e 9
8ª	3,40 a 3,60	22/10/08	2	
	3,40 a 3,80	22/10/08	2	
9ª	3,90 a 4,30	23/10/08	4	Blocos 10, 11 e 12
10ª	4,60 a 4,90	30/10/08	8	Blocos 13, 14 e 15

Amostras indeformadas foram coletadas no formato de blocos cúbicos. Foi possível retirar três blocos por metro dentro do poço. Os blocos cúbicos retirados possuem 30 cm de aresta, com exceção de dois blocos, a 1,0 e 2,0 metros, que foram retirados com 40 cm de aresta. Os blocos foram acomodados em caixas de madeira e protegido por camadas intercaladas e parafina e talagarça. Areia e serragem foram utilizadas para o preenchimento dos espaços entre as paredes das caixas e a amostra.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização foram realizados em várias condições de preparação, uma vez que várias pesquisas recentes (LIMA *et al.*, 2002; ROSENO; CAMAPUM DE CARVALHO, 2007) vêm indicando a importância da condição de preparação na caracterização da micro e macro-estrutura de solos tropicais.

Os ensaios foram realizados para o solo ao longo do perfil. O material de superfície tem maior importância nos processos de transporte de umidade entre o solo e a atmosfera. Devido a esse fator, deu-se prioridade à caracterização do perfil próximo à superfície. A seguir são apresentadas as metodologias adotadas para a realização das análises de caracterização física, mineralógica e química do perfil estudado.

3.3.1 Caracterização física

Foram realizados ensaios de caracterização física do perfil do campo experimental do DCT.C. Foram utilizadas amostras deformadas, coletadas em dez profundidades distribuídas de 0,0 a 5,0 metros. Os procedimentos básicos de preparação de amostras de solos para ensaios de caracterização foram realizados de acordo com IT.DCT.MS.0004 (FURNAS, 2009a) e de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986a). Procedimentos adicionais de preparação foram realizados, como tentativa de preservação e destruição da estrutura e agregações existentes. Estes procedimentos serão descritos mais a frente.

A Tabela 3.2 apresenta o elenco de ensaios de caracterização realizados e as normas seguidas. Para a caracterização das amostras foram realizados ensaios de peso específico natural, peso específico dos grãos, limites de consistência, granulometria por peneiramento e sedimentação e granulometria a laser. Foram também realizados ensaios de compactação.

Tabela 3.2 – Ensaios de caracterização física

Ensaio	Método	Norma ou recomendações de ensaio	Formas de preparação do solo
Peso específico natural	Balança hidrostática	IT.DCT.MS.019 (FURNAS, 2008b) baseada na NBR 10838 (ABNT, 1988)	N/A(1)
Peso específico real dos grãos	Picnômetro	IT.DCT.MS.009 (FURNAS, 2007b) e IT.DCT.MS.010 (FURNAS,2007c) baseados nas NBR 6458 (ABNT, 1984) e NBR 6508 (ABNT, 1984)	Secagem ao ar, amostra passada na #10 e amostra retida na #4
Limite de liquidez	Aparelho de Casagrande	IT.DCT.MS.011 (FURNAS, 2007d) baseada na NBR 6459 (ABNT, 1984)	Com e sem secagem prévia ao ar
Limite de plasticidade	Moldagem de cilindro	IT.DCT.MS.012 (FURNAS, 2007e) baseada na NBR 7180 (ABNT, 1984)	Com e sem secagem prévia ao ar
Limite de contração	Contração de pastilha de lama	NBR 7183 (ABNT, 1982)	Com e sem secagem prévia ao ar
Granulometria	Peneiramento de sedimentação	IT.DCT.MS.008 FURNAS (2007a), baseada na NBR 7181 (ABNT, 1984)	Com e sem secagem prévia ao ar, com e sem defloculante
Granulometria	Granulometria a laser	Lima *et al.* (2002) e Roseno e Camapum (2007)	Com e sem secagem prévia (ao ar e em estufa) e com e sem defloculação por vários métodos
Compactação	Compactação tipo Proctor	IT.DCT.MS.017 (FURNAS, 2008a), baseada na NBR 7182 (ABNT, 1986)	Sem reuso e com secagem previa ao ar

(1) Nenhuma preparação

As normas vigentes da ABNT foram adotadas em todos os ensaios. Além das normas da ABNT, foram seguidos Instruções de Trabalho adotadas pelo Departamento de Controle Técnico de Furnas. Estas instruções não ferem as normas da ABNT, servindo apenas de complemento.

Os ensaios de peso específico natural por balança hidrostática foram realizados utilizando torrões retirados durante a escavação do poço de amostragem e utilizando amostras indeformadas (blocos) Foram moldados corpos-de-prova em três porções dos blocos: topo, meio e base. Além das determinações pelo ensaio de balança hidrostática, foram feitas também numerosas determinações utilizando corpos-de-prova moldados para o ensaio de papel filtro. Estes dados são valiosos para indicar, junto com o correspondente valor de umidade e o peso específico dos grãos, a variabilidade do índice de vazios nas amostras.

Os ensaios de peso específico real dos grãos foram realizados utilizando o método do picnômetro. Todas as amostras foram preparadas com secagem prévia, adotando-se duas variações nos ensaios: (a) amostra passada na peneira # 10; e (b) amostra retida na peneira # 4 (para as amostras que possuem partículas maiores que 4,8 mm).

Os ensaios de limite de liquidez, plasticidade e de contração, foram realizados utilizando os procedimentos padrão de norma. Foram adotadas duas variações nos ensaios: com secagem prévia ao ar (ws) e sem secagem prévia (wn). Estas variações foram realizadas para verificar se há diferença de valores com o material preservado e com a destruição da estrutura existentes.

Os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação e utilizando o granulômetro a laser foram realizados utilizando variações de preparação das amostras e execução do ensaio. A Tabela 3.3 apresenta as variações adotadas.

Os ensaios de granulometria com granulômetro a laser foram realizados no laboratório da UnB de acordo com os procedimentos propostos por Manso (1999), Lima *et al.* (2002) e por Roseno e Camapum (2007). As variações de forma de execução são mais numerosas, pois o granulômetro a laser oferece diferentes alternativas com a combinação de defloculação química e defloculação mecânica por ultrassom.

Tabela 3.3 – Variações adotadas nos ensaios de granulometria por peneriamento e sedimentação e utilizando o granulômetro a laser

Ensaio	Simbologia	Descrição
Granulometria por peneiramento e sedimentação	wscd	Com secagem prévia ao ar e com defloculante
	wssd	Com secagem prévia ao ar e sem defloculante
	wncd	Sem secagem prévia ao ar e com defloculante
	wnsd	Sem secagem prévia ao ar e sem defloculante
Granulometria a laser	wscdcu	Com secagem prévia ao ar e com defloculante e com ultrassom
	wscdsu	Com secagem prévia ao ar e com defloculante e sem ultrassom
	wssdcu	Com secagem prévia ao ar e sem defloculante e com ultrassom
	wssdsu	Com secagem prévia ao ar e sem defloculante e sem ultrassom
	wecdcu	Com secagem prévia em estufa (60ºC) e com defloculante e com ultrassom
	wecdsu	Com secagem prévia em estufa (60ºC) e com defloculante e sem ultrassom
	wesdcu	Com secagem prévia em estufa (60ºC) e sem defloculante e com ultrassom
	wesdsu	Com secagem prévia em estufa (60ºC) e sem defloculante e sem ultrassom
	wncdcu	Sem secagem prévia ao ar e com defloculante e com ultrassom
	wncdsu	Sem secagem prévia ao ar e com defloculante e sem ultrassom
	wnsdcu	Sem secagem prévia ao ar e sem defloculante e com ultrassom
	wnsdsu	Sem secagem prévia ao ar e sem defloculante e sem ultrassom

Dois fatores motivaram a realização de ensaios nas variadas condições de preparação e execução. Primeiramente, foi elaborada a hipótese de que as variações de ensaio poderiam fornecer informações a respeito da quantidade de agregações no solo e a respeito da estabilidade destas agregações frente aos variados mecanismos desagregadores. Além disso, as várias combinações de formas de execução do ensaio foram adotadas porque existe uma quantidade limitada de dados da literatura relacionado à técnica a laser e a de sedimentação. Os dados obtidos neste trabalho poderiam possibilitar um melhor entendimento da relação entre os resultados obtidos pelas duas técnicas.

É importante ressaltar que a técnica a laser, apesar de exigir um equipamento que permanece com custo relativamente elevado, tem se tornado cada vez mais viável, graças ao barateamento dos equipamentos. Deve ser levado em conta também que o custo de execução do ensaio a laser é extremamente baixo, pois a operação é simples, não exigindo técnico especializado e o resultado do ensaio é obtido em poucos segundos. Para que a técnica a laser se torne mais difundida, é importante a construção de um banco de dados relacionando os resultados da técnica nova e da técnica tradicional.

Os ensaios de compactação dos solos foram realizados no LABS.C de FURNAS em 10 amostras. Os ensaios foram realizados utilizando a energia Proctor normal, sem reuso, e com secagem prévia ao ar. Os dados de compactação a princípio fogem do objetivo principal desta pesquisa, que é buscar o entendimento do comportamento hidráulico do solo na condição natural. No entanto, pode-se compreender o valor destes dados ao examinar que a flutuação de umidade em uma área de empréstimo é avaliada com relação às condições desejadas de compactação do solo. É de interesse, portanto, determinar se há relação entre as flutuações previstas ou observadas em campo e as condições desejadas de compactação.

3.3.2 Caracterização mineralógica

A caracterização do perfil de intemperismo do solo foi feita por meio de difração de Raios-X (DRX) no LABS.C de FURNAS de acordo com a IT.DCT.MR.014 (FURNAS, 2009b), IT.DCT.MR.015 (FURNAS, 2009c),e IT.DCT.MR.016 (FURNAS, 2009d). A técnica de difratometria de Raios-X consiste em determinar as distâncias interplanares (i.e, distâncias mantidas pelos íons ou átomos formadores dos cristais), através do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de Raios-X incidente e o plano que o difrata e, o comprimento de onda desses raios. Esta técnica tem sido muito utilizada para a identificação de minerais constituintes de diversos materiais.

As amostras devidamente identificadas foram submetidas à moagem prévia em moinho orbital até que se tivesse 100% do material passante na peneira com abertura de 0,043 mm. Concluída esta etapa, parte do material foi analisada pelo método do pó não orientado (i.e, Análise Integral).

Na seqüência, procedeu-se à separação, por sedimentação em coluna, da fração argila das amostras, seguida por montagem em vidro de três lâminas orientadas. Com estas lâminas fez-se Análise Natural e Análise Glicolada. Desta forma, pôde-se garantir a completa saturação da atmosfera interna, possibilitando a identificação de argilominerais expansivos, caso existam (FOOKES, 1997; RESENDE; KER; REZENDE *et al.*, 2005).

Outra lâmina foi destinada à Análise Calcinada. A Análise Calcinada consiste em manter a lâmila em estufa a 550ºC, por 3 horas. Esta análise permite a identificação da presença de

minerais que passam por retração de sua estrutura nestas condições. Este é o caso da caulinita, gibbsita e a goethita (RESENDE *et al.*, 2005).

3.3.3 Caracterização química

Na agronomia, ensaios químicos nos solos são frequentemente realizados, para a determinação da fertilidade e nutrientes presentes no solo. No meio geotécnico, esses ensaios podem ser realizados para avaliar o grau de intemperismo dos solos.

Nestes ensaios foram utilizadas as normas da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Foram realizadas determinações de teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), alumínio (Al), fósforo (P), carbono orgânico (C), matéria orgânica (MO), pH em água, capacidade de troca catiônica (valor T ou CTC), soma dos cátions trocáveis (valor S), saturação de alumínio (%Al) e saturação de bases (%V). Os solos foram previamente secos ao ar e passados na peneira nº 10 (2 mm), processo denominado na agronomia como TFSA (terra fina seca ao ar).

3.4 ENSAIOS EM SOLOS NÃO SATURADOS

A campanha de ensaios para o solo na condição não saturada teve dois objetivos principais:

- Avaliar o desempenho das técnicas do papel filtro e da translação de eixos, bem como a aparelhagem recém-implantada no Laboratório de Geotecnia da UFG;
- Avaliar a histerese da curva característica ao longo de toda a faixa de sucção presente em campo (de 0 a 1.000.000 kP*a*);
- Avaliar o papel da estrutura do solo nas suas propriedades e comportamento não saturado.

Vários aspectos foram estudados tais como a histerese, a dependência entre as mudanças de volume total e as curvas características do solo. Os estudos foram realizados com amostra indeformadas e reconstituídas a partir de um estado de lama provenientes do campo experimental.

3.4.1 Preparação dos corpos-de-prova

A seguir serão descritos o procedimento de preparação e de moldagem dos corpos-de-prova indeformados e reconstituídos a partir de um estado de lama. Esses corpos-de-prova foram utilizados nos ensaios de curva características pelo método do papel filtro e utilizando a célula de adensamento com controle de sucção.

3.4.1.1 Preparação dos corpos-de-prova indeformados

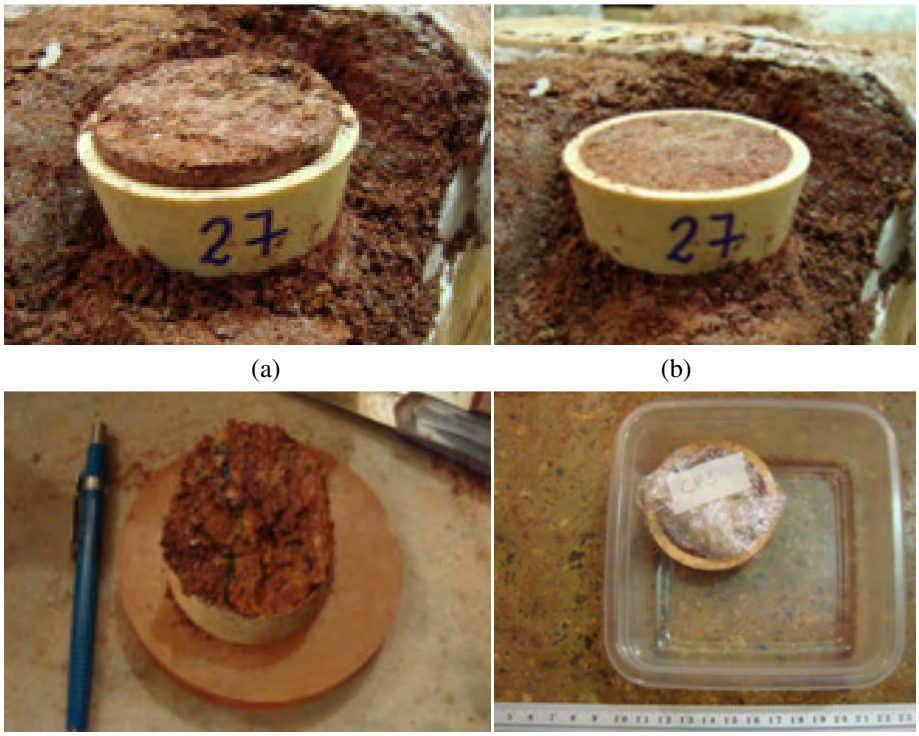
A moldagem dos corpos-de-prova indeformados foi executada diretamente dos blocos retirados do poço de amostragem. Para moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, sendo uma das extremidades biselada. A parafina que protege os blocos contra a perda de umidade foi removida e para a retirada dos corpos-de-prova foi necessário tornar a superfície do bloco plana (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Blocos indeformados

O anel de PVC foi posicionado com a extremidade biselada na superfície plana em contato com o solo e foi continuamente cravado no bloco. O solo foi removido em volta do anel com o auxílio de estilete, faca e espátula. Após o solo preencher completamente o anel, rasou-se a superfície superior do corpo-de-prova e retirou-se este do bloco. Com o topo do corpo-de-prova posicionado para baixo e apoiada em uma superfície lisa e limpa, a parte inferior deste foi rasada (Figura 3.6).

Logo após este procedimento, pesou-se o corpo-de-prova, que foi embalado em papel filme (Figura 3.6d) e armazenado em recipientes fechados e guardados em caixa de isopor para evitar o ganho ou perda de umidade antes do início do ensaio. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada dentro da câmara úmida para que a variação da umidade fosse pequena.

Apesar desse cuidado, julgou-se necessário determinar o teor de umidade de cada corpo-de-prova.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.6 – Moldagem dos corpos-de-prova: (a) anel cravado; (b) topo do corpo-de-prova rasado; (c) fundo do corpo-de-prova para rasagem; (d) embalagem e armazenamento dos corpos-de-prova antes de iniciar o ensaio

3.4.1.2 Preparação dos corpos-de-prova reconstituídos a partir de um estado de lama

O objetivo do processo de reconstituição a partir de um estado de lama foi reconstituir amostras com o mesmo índice de vazios de campo, porém sendo as amostras desprovidas da estruturação original do solo indeformado. O processo de reconstituição foi executado com amostras deformadas obtidas nas mesmas profundidades dos blocos indeformados.

O procedimento de reconstituição do solo desenvolvido neste trabalho foi baseado na desagregação e umidecimento do solo, sendo este realizado em cilindros metálicos. Primeiramente, o solo foi passado na peneira 4 (4,8 mm) e levado à estufa (110 °C), para "desagregação térmica". A partir dos valores do peso específico dos sólidos (γ_s), calculou-se o valor do índice de vazios inicial (e_i), considerando o grau de saturação (S) de 100% e uma umidade ligeiramente acima do limite de liquidez (5 %):

$$e_i = \frac{\gamma_s w}{\gamma_w S_r} \tag{3.1}$$

Uma vez obtido o índice de vazios inicial, calculou-se qual seria o peso específico natural do solo na condição inicial:

$$\gamma_n = \frac{\gamma_s(1+w)}{1+e_i} \tag{3.2}$$

Os cilindros usados no processo de reconstituição foram os mesmo utilizados no ensaio de compactação e California Bearing Ratio (CBR) (cilindro do tipo "grande"). Conhecido o volume interno do cilindro, tem-se a massa total de solo que preenche o cilindro:

$$M_T = \gamma_n V \tag{3.3}$$

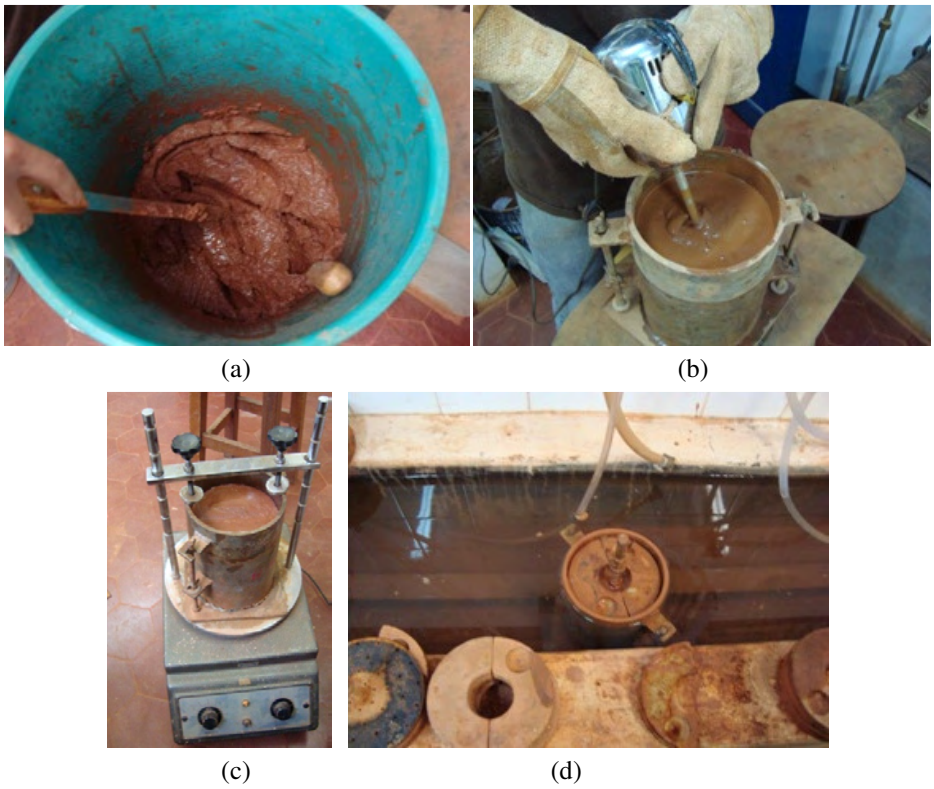
Como o solo é inicialmente levado à estufa (110°C), este não possui umidade inicial. As massas de sólidos (M_s) e de água (M_w) a serem utilizadas na moldagem do solo são obtidas da seguinte forma:

$$M_s = M_T(1 + w) \tag{3.4}$$

$$M_w = M_T - M_s \tag{3.5}$$

Onde w é a umidade inicialmente estabelecida.

Misturando-se as quantidades calculadas de solo e água conforme as Equações (3.4) e (3.5), obtem-se o material com consistência de lama (Figura 3.7a). Com o auxílio de um dispersor utilizado para a preparação de amostras para sedimentação, homogeneiza-se a lama antes de ela ser colocada no cilindro. O cilindro é preparado passando no seu interior vaselina, para que, durante a retirada do corpo-de-prova, este não fique aderido ao cilindro. Papel filtro comum é colocado no fundo do cilindro.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.7 – Processo de reconstituição a partir de um estado de lama: (a) solo em forma de lama; (b) lama adicionada no cilindro e passando o dispersor; (c) vibração do cilindro para retirada de bolhas de ar; (d) cilindro colocado no tanque em imersão

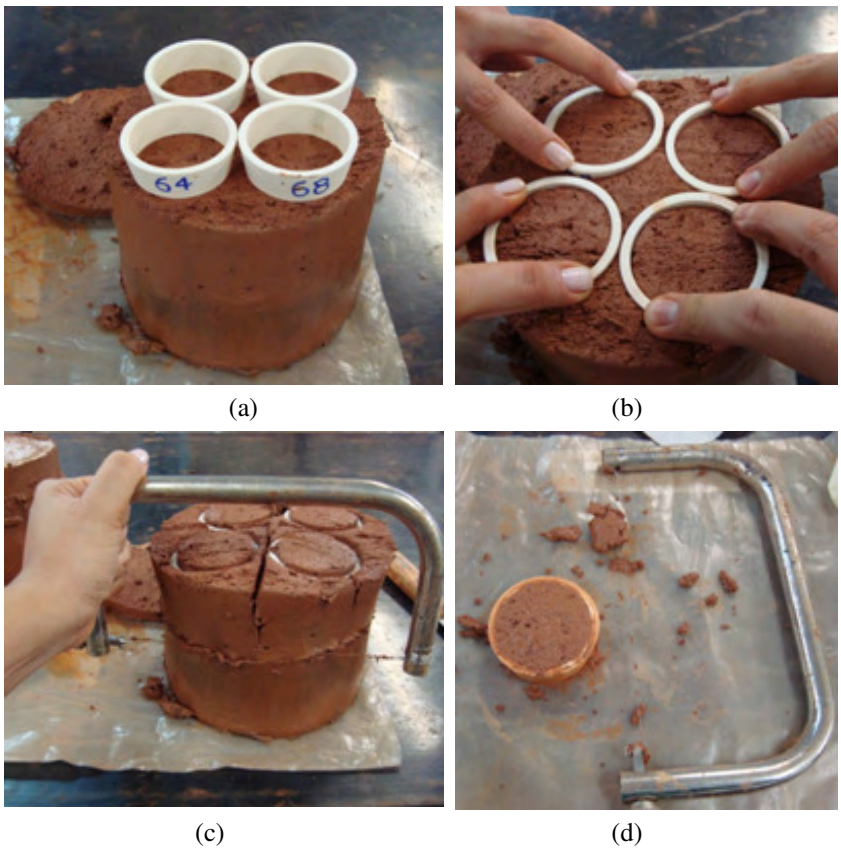
O material preparado é transferido para o cilindro em camadas, utilizando-se novamente o dispersor (Figura 3.7b) em pequenos intervalos de tempo (5minutos). Com a finalidade de se remover eventuais bolhas de ar, deve-se lançar mão de um vibrador de conjuntos de peneiras (Figura 3.7c). O processo de vibração além de facilitar a saída das bolhas de ar e acelera a reconstituição do solo.

Após moldagem e colocação da lama no cilindro, posicionou-se papel protetor na parte superior da amostra. O cilindro deve ser levado a um tanque de imersão (Figura 3.7d), onde são aplicadas pequenas cargas que posteriormente são acrescidas, conforme o monitoramento da altura do corpo-de-prova, até se atingir o índice de vazios de campo. Espera-se, seguindo este procedimento, conseguir a desagregação e desestruturação do solo.

Para atingir o índice de vazios (e) do bloco correspondente a mesma profundidade da amostra deformada, deve-se calcular o valor de teor de umidade final da amostra (w_f) para um grau de saturação (S) de 100%. A partir do teor de umidade final da amostra (w_f), calcula-se a

massa total final e o novo valor do peso específico natural do solo (γ_n), obtendo-se assim o volume final. Como a área do cilindro é constante, obtem-se a altura correspondente da amostra no cilindro. Assim, tem-se o valor da altura final (h_f). A variação de altura necessária para se atingir as condições finais de índice de vazios desejadas será $\Delta h = h_i - h_f$.

A Figura 3.8 apresenta o processo de moldagem dos corpos-de-prova a partir da amostra reconstituída a partir de um estado de lama. Inicialmente, verificaram-se as medidas dos anéis de PVC utilizando paquímetro. Após a reconstituição do solo necessário para se obter o índice de vazios almejado, retirou-se o cilindro do tanque e com auxílio do extrator. Para moldagem dos corpos-de-prova na amostra reconstituída são utilizados os mesmo anéis de PVC utilizados para amostras indeformadas. Estes são posicionados na amostra e cravados ao mesmo tempo, para se evitar deformações nas laterais do cilindro de solo reconstituído. Posteriormente, o solo é rasado com auxílio de fio de aço (Figura 3.8).



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.8 – Processo de moldagem dos corpos-de-prova a partir da amostra reconstituída: (a) posicionamento dos moldes d PVC antes de cravar estes no solo; (b) moldes de PVC sendo cravados simultaneamente no solo; (c) uso de um fio de aço para cortar o solo; (d) detalhe do corpo-de-prova moldado e rasado com fio de aço

3.5.2 Obtenção de curva característica utilizando papel filtro

Para a realização dos ensaios pelo método do papel filtro foram utilizados 20 corpos-de-prova com aproximadamente 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura. Os corpos-de-prova são dispostos em pares, formando 10 conjuntos. Desta forma obtiveram-se dez pontos em cada determinação da curva característica.

Os corpos-de-prova foram reutilizados nas determinações de sucção pelo método do papel filtro. Para tal, foi realizada a determinação de umidade durante a moldagem dos corpos-de-prova e o cálculo da massa seca de cada corpo-de-prova. Esta técnica permitiu a redução da quantidade de corpos-de-prova utilizados e a eliminação de variabilidades causadas pelo solo. No entanto, foram tomados cuidados especiais para a preservação dos corpos-de-prova, para a minimização da perda de massa durante o manuseio e para correção da umidade final dos papéis filtro.

Nos ensaios em amostras naturais foram realizadas curvas características de sucção mistas, de secagem e de molhagem. Já com amostra reconstituídas foram obtidas curvas de secagem e de molhagem. O método consiste em colocar as amostras de solo juntamente com o papel filtro até o conjunto equilibrar a umidade destes, assim mede-se a sucção do solo através de uma curva de calibração do papel filtro.

No sistema foi determinada a sucção total (papel filtro colocado sobre um espaçador em contato com o solo) e a matricial (papel filtro colocado entre os dois corpos-de-prova). Na medição de sucção matricial foi necessário o uso de dois papéis filtros comum para proteger o papel filtro especial evitando-se assim a contaminação por solo.

Todos os ensaios foram realizados simultaneamente com papel filtro Whatman n^o 42 e Quanty, ambos com e sem contato. O papel filtro Whatman utilizado foi o n^o 42 que possui curvas de calibração publicadas na literatura. Trata-se de um papel filtro quantitativo, código 1442 185, de procedência Inglesa, e o número do lote é n^o 1298477. O papel Quanty é um papel filtro quantitativo de relativamente baixo custo, com especificações técnicas de 80 g/m^2 e permeabilidade ao ar de 3 l/s.m^2. Este é um papel filtro quantitativo JP 42 Faixa Azul, de procedência Alemã e lote é n^o 0146.

Quando moldados os corpos-de-prova nas amostras indeformadas, estes estavam com a umidade do bloco (i.e., a umidade natural do solo). A partir desta umidade, inicialmente, parte dos corpos-de-prova passou por secagem e outra parte por molhagem, obtendo-se assim a partir destes a curva mista (mc).

Para efetuar a molhagem dos corpos-de-prova foi utilizando um contagotas. Estes foram molhados até atingir o teor de umidade desejado, já calculado previamente a partir dos índices físicos. Já no processo de secagem, os corpos-de-prova foram deixados ao ar para secar e seu controle foi feito por medidas de peso sucessivas.

Após o corpo-de-prova atingir a umidade desejada, iniciou-se o processo de montagem do sistema. A Figura 3.9 ilustra o sistema utilizado. O sistema foi constituído de um corpo-de-prova, papel filtro comum de proteção, papel filtro para medida de sucção matricial, outro papel filtro comum para proteção, outro corpo-de-prova com a mesma umidade do primeiro, um anel de PVC de 10 mm de altura, servindo como espaçador e sobre este último corpo-de-prova seguido de outro papel filtro para medida de sucção total.

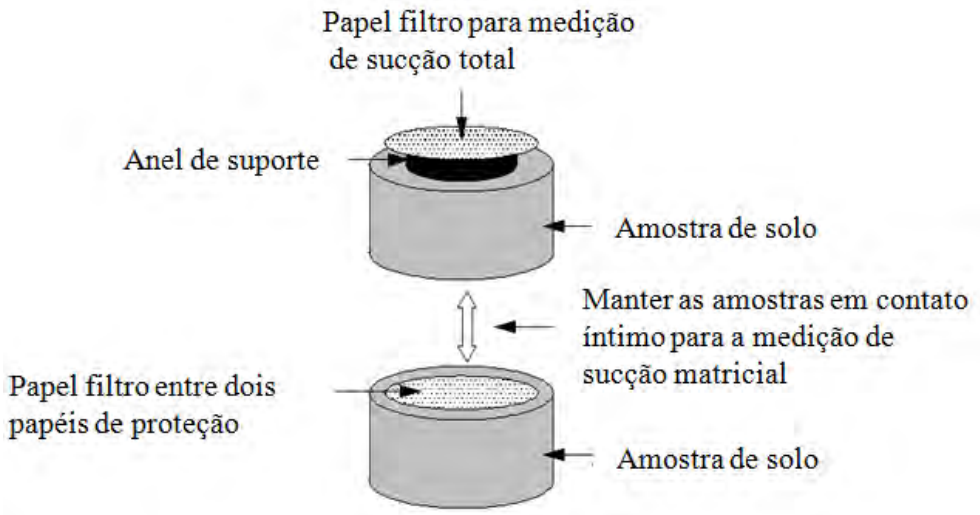


Figura 3.9 – Medidas de sucção total e matricial pela técnica do papel filtro

Embalou-se todo o sistema em papel filme e em seguida em papel alumínio. Reservou-se o conjunto em um recipiente com tampa e em uma caixa de isopor, para que não houvesse variação da temperatura. Os corpos-de-prova permaneceram armazenados por 14 dias. Após este período, os papéis foram retirados e pesados em balança de precisão (0,0001 g). Em

seguida, os mesmos foram levados à estufa por 24 horas e pesados novamente, para a determinação do teor de umidade.

A determinação da umidade do solo é feita a partir de pesagem e de dados dos índices físicos. Há uma preocupação quanto à perda do solo, por isso, utiliza-se em todas as curvas obtidas, mista, secagem e molhagem, o mesmo papel protetor e o mesmo papel filme que envolve o conjunto, para que se pudessem descontar esses valores no peso final, obtendo a massa de solo sem perdas.

Após a obtenção da curva mista, foi iniciada a curva de molhagem (wc). Para determinar a curva de molhagem do solo os corpos-de-prova passaram inicialmente por um processo de secagem ao ar. Em seguida, estes foram acrescidos de água até a umidade desejada a fim de se obterem dez pontos para se traçar a curva característica.

A última curva a ser obtida foi a curva de secagem (dc). Esta consistiu do umedecimento de todos os corpos-de-prova por ascensão capilar. Verificou-se que foi possível atingir graus de saturação próximos de 85%. Em seguida, os corpos-de-prova passam por processo de secagem ao ar, até atingir umidades pré-estabelecidas, obtida através de pesagens sucessivas.

Os ensaios com amostras reconstituídas a partir de um estado de lama seguem o mesmo princípio. A principal diferença é a ausência da determinação da curva mista. O ensaio se inicia com a curva de secagem, devido ao grau de saturação inicial dos corpos-de-prova estarem próximos a 100% de saturação.

Foram tomados alguns cuidados na pesagem dos papéis filtro. Durante a execução da pesagem dos papéis foram feitas medidas do tempo despendido para remover o papel filtro do corpo-de-prova e para retirar o papel filtro da estufa. Além disso, foram realizadas medidas da perda de umidade dos papéis filtro em intervalos de tempo de trinta segundos e um minuto. Com esses valores foram realizadas correções, estas são mostradas no Apêndice C.

O método do papel filtro permite determinar uma grande faixa de sucções, podendo atingir valores muito altos. Porém, existe uma dificuldade neste ensaio para determinar valores baixos de sucção. Outra dificuldade encontrada foi a medição da variação de volume total dos corpos-de-prova.

A partir dos resultados obtidos com papel filtro Whatman n°42 e Quanty pode-se comparar e correlacionar às umidades e sucções obtidas nestes papéis. Uma curva de calibração do papel Quanty foi proposta e comparada com várias curvas de calibração utilizadas do papel Whatman n° 42. Estas são mostradas no Apêndice E.

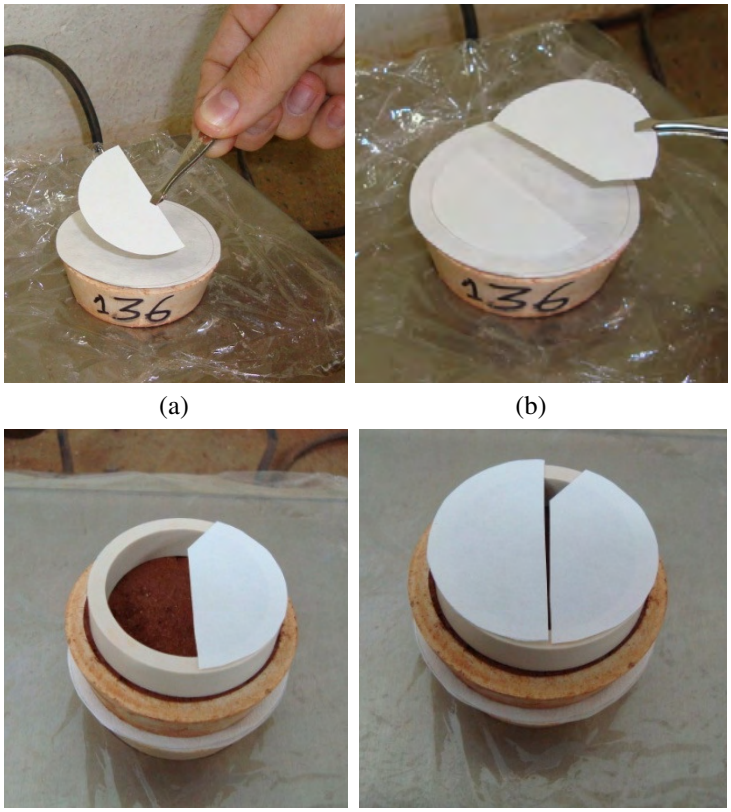
3.5.3 Método de calibração papel filtro

Ensaios laboratoriais para medição de curvas característica do solo, como o método de papel filtro, requerem medições cuidadosas e materiais de qualidade, dentre os quais papel filtro quantitativo. O papel filtro Quanty foi utilizado com objetivo de analisar a eficiência e a viabilidade do uso deste, devido ao seu baixo custo, para a determinação da curva característica. O procedimento de calibração para o papel de filtro consiste em permitir o equilíbrio da umidade deste com uma sucção conhecida. Depois de alcançar este equilíbrio, o papel filtro foi pesado e seco em estufa. O teor de umidade foi então obtido e relacionado com a sucção gerada.

A partir dos resultados de sucção obtidos com papel filtro Whatman n°42, pode-se correlacionar estes com a umidade obtida no papel Quanty, pois estes estavam em equilíbrio e possuem umidades diferentes, porém sucções iguais. A partir da associação da sucção obtida pela curva de calibração do papel filtro Whatman n°42, pode-se traçar uma curva de calibração do papel Quanty e compará-la com várias curvas de calibração utilizadas para o papel Whatman n°42.

A Figura 3.10 mostra a montagem dos corpos-de-prova, indicando a diferença da identificação de cada um e sua posição. Os papéis filtro foram cortados em formato de semicirculo, para que não houvesse sobreposição destes. Para diferenciar os papéis utilizados, o papel Quanty foi diferenciado com um corte na ponta, como pode ser visualizado na Figura 3.10b.

Mais informações sobre os procedimento e execução do ensaio são apresentadas no Apêndice C – Metodologia de execução de ensaios de curva característica pelo método do papel filtro com amostras indeformadas e reconstituídas.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.10 – Montagem dos corpos-de-prova: (a) colocação do papel protetor em contato com o solo e papel Whatman n°42 (sucção matricial); (b) colocação do papel Quanty (sucção matricial); (c) colocação do anel espaçador e papel Quanty (sucção total); (d) vista superior dos dois papeis posicionados para medição de sucção total

3.5.4 Célula de adensamento com controle de sucção

O sistema adensamento com controle de sucção/pressão da marca CGTS e modelo SWC-150 (Figura 3.11), foi utilizado para obter a curva característica do solo. Este equipamento foi projetado para obter a curva característica de um solo, tanto curvas de secagem quanto de molhagem. Este equipamento permite medições de valores baixos de sucção, podendo assim complementar a curva realizada pelo método do papel filtro. Desta forma, pode-se obter uma melhor definição da curva característica próximo ao valor de entrada de ar, que em solos estruturados podem estar presentes em valores muito baixos de sucção. Além disso, o equipamento permite medir de forma muito cuidadosa a variação de volume total e o estabelecimento preciso das sucções de interesse.

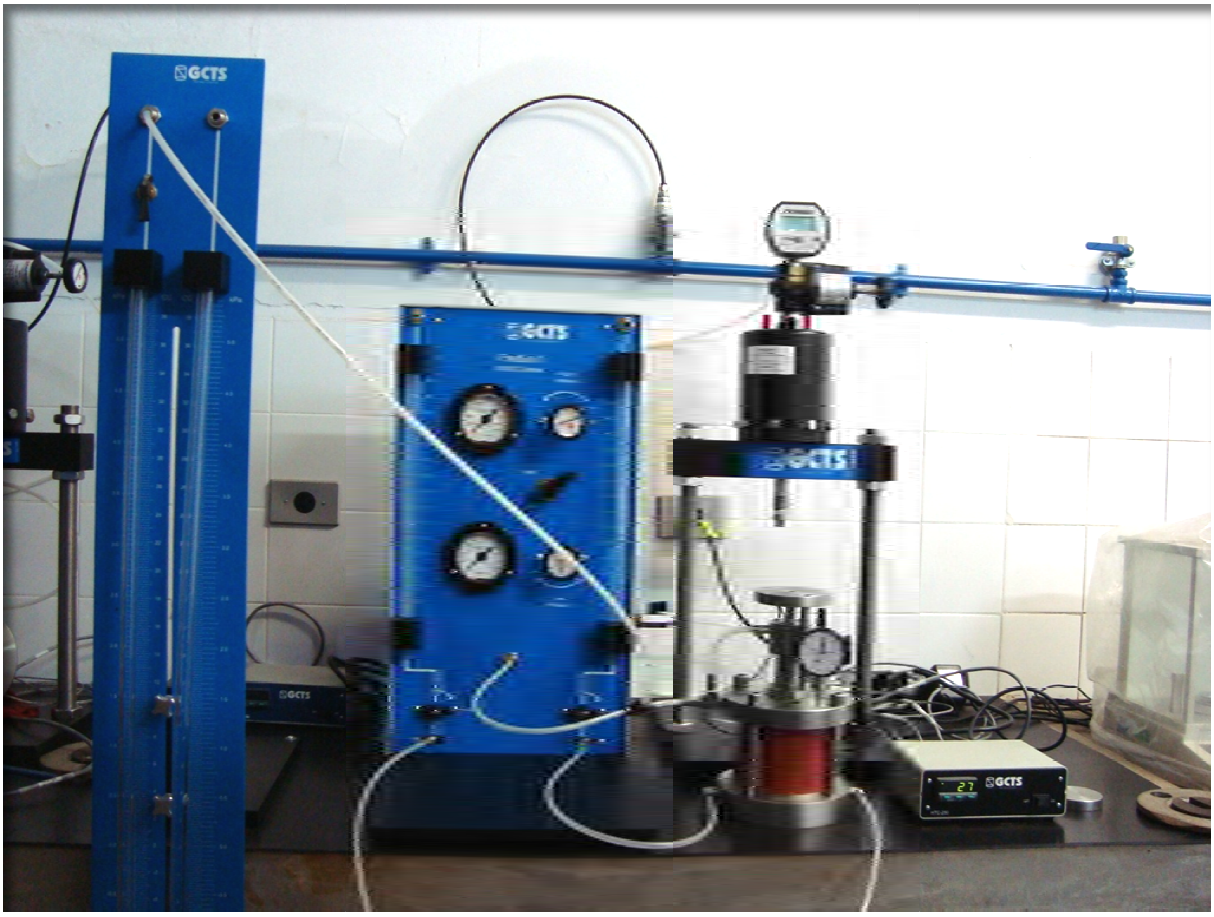


Figura 3.11 – Equipamento de adensamento com controle de sucção/pressão

Este sistema pode ser utilizado para obter a curva característica de um solo, tanto curvas de secagem quanto de molhagem. O dispositivo permite controlar sucções de zero até 1500 kP*a*, e ainda aplicar carregamento unidimensional no solo.

O equipamento funciona com ar comprimido que é gerado por um compressor de ar instalado no Laboratório de Solos da UFG. O compressor mantém a pressão constante de 850 kP*a* e produz ar que passa por um secador para retirar toda umidade do ar. O equipamento SWC-150 é composto por câmara de pressão, pedras porosas, anel de aço, carneiro pneumático, painel de controle, extensômetro e aquecedor.

A amostra pode ser reconstituída ou indeformada, em condições secas ou saturadas, conforme a curva que se quer determinar. Para a realização dos ensaios para obtenção das curvas características, foram executados ensaios na célula de adensamento com controle de sucção/pressão para amostras indeformadas e reconstituídas. Tanto para o ensaio em amostras