

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

**AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES SAZONAIS DE
UMIDADE E SUCÇÃO EM UM PERFIL DE SOLO
TROPICAL**

ARLAM CARNEIRO SILVA JÚNIOR

D0036G11
GOIÂNIA
2011

ARLAM CARNEIRO SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES SAZONAIS DE
UMIDADE E SUCÇÃO EM UM PERFIL DE SOLO
TROPICAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação
em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da
Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de
Mestre

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Profº. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Jr.

D0036G11
GOIÂNIA
2011

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

S586a Silva Júnior, Arlam Carneiro.
Avaliação das flutuações sazonais de umidade e sucção em um perfil de solo tropical [manuscrito] / Arlam Carneiro Silva Júnior. - 2011.
xv, 137 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Júnior.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas, símbolos e tabelas.

1. Solos não saturados 2. Sucção 3. Umidade 4. Atmosfera 5. Previsão I. Título.

CDU: 624.131.2

ARLAM CARNEIRO SILVA JÚNIOR

AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES SAZONAIS DE UMIDADE E SUCÇÃO EM UM PERFIL
DE SOLO TROPICAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da
Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de
Mestre

Aprovada em ____/____/____.

Profº. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Jr. (Presidente)

Universidade Federal de Goiás

Profª. Dra. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (Membro interno)

Universidade Federal de Goiás

Profº Dr. Manoel Porfírio Cordão Neto (Membro externo)

Universidade de Brasília

DEDICATÓRIA

A todos os professores que mesmo passando, permanecem.

Com carinho especial, aos maiores mestres: meus pais.

AGRADECIMENTOS

Obrigado Deus, por inspirar o meu viver! Obrigado por revelar no simples as coisas mais belas e sobrenaturais.

Meus pais, meus maiores exemplos para vida, minha eterna honra a vocês! Muito obrigado pela presença, sempre certa, para educar, formar, amar, estar. Tudo que vem de vocês para sempre vou guardar! Minha irmã, obrigado pelas companhias na escola, catequese, música, igreja. Que nossa parceria seja para a vida inteira!

Lee. Obrigado por raiar na minha vida e enchê-la de alegria. Por me fazer mais humano, e compassivo. Por me ensinar a nobreza em servir e a gratidão em receber. Sempre juntos...!

Minha família, com coloridos tão diferentes, obrigado por me mostrar que as diferenças nunca foram barreiras para amizade sincera. Meus avós, pelas histórias e cuidado, meus tios, primos pelo cuidado e amor. Amo todos vocês!

Obrigado aos grandes amigos que alegram e fortalecem o meu viver. Pelas aventuras e desafios que enfrentamos juntos!

Aos novos e velhos amigos do mestrado, obrigado pelas discussões sempre bem vindas, e pela ajuda para vencer cada etapa da pesquisa. Pelos professores do mestrado, em especial ao meu orientador pela dedicação e cuidado neste trabalho. À equipe técnica de Furnas e do Laboratório de Solos da Universidade Federal de Goiás, pelo suporte e carinho.

A todos que direto ou indiretamente colaboraram para que esta pesquisa fosse concluída, minha eterna gratidão!

RESUMO

A avaliação da interação solo-atmosfera tem um papel fundamental em diversos exemplos de obras geotécnicas como operações de compactação, construção e operação de barragens e estabilidade de taludes. E geralmente, nestes exemplos, os solos se encontram no estado não saturado. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar e aperfeiçoar a abordagem mecanística de previsão das variações das condições de sucção e umidade de um perfil de solo não saturado. Foram aplicados e avaliados três métodos de previsão de curva característica solo-água, e um novo método foi proposto. Os métodos de previsão, analisados nesta pesquisa, são baseados na granulometria do material e outras propriedades índice. Foram considerados para previsão os solos do campo experimental de Furnas em Aparecida de Goiânia (Goiás), do campo experimental da Universidade de Brasília e três solos de clima temperado do Canadá. Foram obtidos bons resultados de previsão a partir dos métodos utilizados. Foram monitorados, durante seis meses, as condições de umidade, sucção, lençol freático e condições atmosféricas do campo experimental de Furnas. A umidade foi obtida através da retirada de amostras do solo e a sucção foi obtida por dois métodos de medição: papel filtro e tensiômetro. Um dispositivo para instalação e abrigo do papel filtro no campo foi desenvolvido. A aplicação do método do papel no campo teve bons resultados de sucção total e a utilização do tensiômetro permitiu a medição de uma limitada faixa de sucção matricial. Foram ainda realizadas previsões de sucção e umidade para o campo experimental de Furnas a partir de análises numéricas. Curvas características solo-água experimentais e previstas foram consideradas nas análises numéricas. Foram encontradas maiores dificuldades para prever sucção e umidade para o metro mais raso analisado.

Palavras-chaves: Solos não saturados. Sucção. Umidade. Atmosfera. Previsão.

ABSTRACT

The evaluation of soil-atmosphere interaction is crucial in several examples of geotechnical works as compaction operations, construction and operation of dams and slope stability. Generally, in these examples, the soils are in unsaturated state. The main objective of this study is to assess and refine the mechanistic approach to predict the changing conditions of suction and moisture of a soil profile unsaturated. Three methods for predicting soil-water characteristic curve were evaluated, and a new method was proposed. The prediction methods, examined in this study, are based on particle size and other index properties. Were considered the soil of the experimental field of Furnas in Aparecida de Goiania (Goiás - Brazil), the soil of the experimental field of the University of Brasília and soils of temperate climate. Good results were obtained from the prediction methods used. Were monitored for six months, the water content, suction, groundwater and atmospheric conditions of the experimental field of Furnas. The water content was obtained by removal of soil samples and suction was obtained by two measuring methods: filter paper and tensiometer. A device for installation and under the filter paper in the field was developed. The method of the paper filter had good results of total suction and the use of a tensiometer allowed measurements of a limited range of matric suction. Water content and suction predictions were made for the experimental field of Furnas from numerical analysis. It considered soil-water characteristic curves experimental and provided in numerical analysis. It have found most difficult to predict suction and moisture for the shallowest depth analyzed.

Keywords: Unsaturated soils. Suction. Water content. Atmosphere. Forecast.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Ensaio de caracterização e hidráulicos realizados por Borges (2010)	36
Tabela 2.2: Peso específico natural, teor de umidade no momento da amostragem, peso específico natural seco, índices físicos e descrição tátil visual ao longo do perfil do campo experimental de Furnas (Modificado de BORGES, 2010)	37
Tabela 2.3: Resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos, porcentagem de material, limites de consistência das amostras (modificado de BORGES, 2010)	38
Tabela 2.4: Variações adotadas nos ensaios de granulometria	39
Tabela 2.5: Descrição das simbologias utilizadas nos gráficos de curvas características solo-água	45
Tabela 2.6: Propriedades do solo de Brasília ao longo da profundidade.....	49
Tabela 2.7: Propriedades dos solos de clima temperado.....	51
Tabela 4.1: Resultados de Wang e Lao (2002)	88
Tabela 4.2: Disposição dos equipamentos ao longo da profundidade.....	96
Tabela 4.3: Teores de umidade gravimétrica ao longo do perfil em várias datas ao longo do ano	108
Tabela 4.4: Grau de saturação ao longo do perfil em várias datas ao longo do ano	109
Tabela 4.5: Dados de sucção (kPa) obtidos pelos tensiômetros	110
Tabela 4.6: Dados de sucção (kPa) obtidos pelo método do papel filtro	111
Tabela 5.1: Propriedades gerais do solo analisado.....	123
Tabela 5.2: Pontos de referência para a curva característica solo-água	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Aplicação do modelo mecanístico na previsão de umidade e sucção	28
Figura 1.2: Solo saturado e solo não saturado.....	29
Figura 1.3: Curvas características típicas	30
Figura 1.4: Obtenção das propriedades constitutivas do solo não saturado.....	31
Figura 2.1: Localização do campo experimental (Google Earth em 16/04/2010).....	35
Figura 2.2: Localização do campo experimental do DCT.C e mapa de solos da região (Elaboração: Rafael B. Azevedo)	35
Figura 2.3: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 1,00 a 1,50 m	40
Figura 2.4: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 2,00 a 2,40 m	40
Figura 2.5: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 3,00 a 3,30 m	41
Figura 2.6: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 3,90 a 4,30 m	41
Figura 2.7: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 4,60 a 4,90 m	42
Figura 2.8: Quantidade de materiais na profundidade de 1,00 a 1,50	43
Figura 2.9: Quantidade de materiais na profundidade de 2,00 a 2,40	43
Figura 2.10: Quantidade de materiais na profundidade de 3,00 a 3,30 m	44
Figura 2.11: Quantidade de materiais na profundidade 3,90 a 4,30	44
Figura 2.12: Quantidade de materiais na profundidade de 4,60 a 4,90	44
Figura 2.13: Curvas características solo-água para a profundidade de 1,00 a 1,50 m	46
Figura 2.14: Curvas características solo-água para a profundidade de 2,00 a 2,40 m	46

Figura 2.15: Curvas características solo-água para a profundidade de 3,00 a 3,30 m	47
Figura 2.16: Curvas características solo-água para a profundidade de 3,90 a 4,30 m	47
Figura 2.17: Curvas características solo-água para a profundidade de 4,60 a 4,90 m	48
Figura 2.18: Curvas granulométricas obtidas com o uso de defloculante para o solo de Brasília	49
Figura 2.19: Curvas granulométricas obtidas sem o uso de defloculante para o solo de Brasília	50
Figura 2.20: Curvas características solo-água obtidas pelo método do papel filtro para o solo de Brasília.....	50
Figura 2.21: Curvas granulométricas dos solos de clima temperado	52
Figura 2.22: Curvas características solo-água dos solos de clima temperado	52
Figura 3.1: Esquema analítico para fracionamento da curva granulométrica (GITIRANA JR., CAMAPUM DE CARVALHO E CORDÃO NETO, 2006)	55
Figura 3.2: Grão de solo e volume de vazios	56
Figura 3.3: Inclinação da curva granulométrica.....	64
Figura 3.4: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “ABNT wncd” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)	67
Figura 3.5: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “ABNT wnsd” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)	67
Figura 3.6: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “GL wncdcu” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)	68
Figura 3.7: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “GL wncdsu” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)	68

Figura 3.8: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “GL wnsdcu” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)	69
Figura 3.9: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “GL wnsdsu” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)	69
Figura 3.10: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (2,0 a 2,4m)	70
Figura 3.11: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (3,0 a 3,3m)	71
Figura 3.12: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (3,9 a 4,3m)	71
Figura 3.13: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (4,6 a 4,9m)	72
Figura 3.14: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (1m)	73
Figura 3.15: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (2m)	73
Figura 3.16: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (3m)	74
Figura 3.17: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (4m)	74
Figura 3.18: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (5m)	75
Figura 3.19: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (6m)	75
Figura 3.20: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (7m)	76

Figura 3.21: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (8m)	76
Figura 3.22: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (10m)	77
Figura 3.23: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante da areia de Breaver Creek.....	78
Figura 3.24: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante da argila de Regina.....	78
Figura 3.25: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do silte de Saskatchewan	79
Figura 4.1: Métodos de medição de sucção total e matricial	81
Figura 4.2: Medição de sucção total in situ (Fredlund, 1989)	82
Figura 4.3: Equipamento para medição de sucção pelo método do papel filtro em campo (CRILLY, SCHREINER E GOURLEY, 1991)	84
Figura 4.4: Resultados da medição de sucção pela técnica do papel filtro (CRILLY, SCHREINER E GOURLEY, 1991)	84
Figura 4.5: Equipamento desenvolvido para medição de sucção pelo método do papel filtro em campo (GOURLEY E SCHREINER, 1995)	85
Figura 4.6: Resultados do ensaio de papel filtro para vários tempos de equilíbrio (GOURLEY E SCHREINER, 1995)	86
Figura 4.7: Equipamento utilizado para medição de sucção matricial pela técnica do papel filtro (WANG E LAO, 2002)	87
Figura 4.8: Tensiômetro e seus componentes	89
Figura 4.9: Tipos de dispositivos de medição de pressão	90

Figura 4.10: Modelos e especificações de vários tensiômetros (Adaptada de Marinho <i>et al.</i> , 2008)	93
Figura 4.11: Poço de monitoramento	94
Figura 4.12: Sistema de acesso ao poço de monitoramento (Desenhista: Marlos J. R. Guimarães).....	95
Figura 4.13: Detalhe dos furos nas manilhas pré-moldadas.....	95
Figura 4.14: Disposição dos equipamentos em campo (plano horizontal).....	96
Figura 4.15: (a): Dispositivo para instalação do papel filtro; (b) Fabricação do dispositivo para instalação do papel filtro; (c): Tubo externo e tubo interno; (d): Posição fechada; (e): Posição aberta	98
Figura 4.16: Saturação do tensiômetro	100
Figura 4.17: Instalação dos tensiômetros no campo	101
Figura 4.18: Obtenção de amostras de umidade	102
Figura 4.19: Comparação entre teores de umidade dos papéis filtro	104
Figura 4.20: Leitura dos tensiômetros.....	105
Figura 4.21: Imagens do campo experimental em diversas épocas	106
Figura 4.22: Leituras do nível d'água	107
Figura 4.23: Variação da quantidade de água armazenada no solo (umidade volumétrica)	109
Figura 4.24: “Sucção matricial (tensiômetro)” versus “Sucção matricial (curva de secagem)”	112
Figura 4.25: “Sucção matricial (tensiômetro)” versus “Sucção matricial (curva de molhagem)”	112

Figura 4.26: “Sucção total (papel filtro)” versus “Sucção total (curva de secagem)”	113
Figura 4.27: “Sucção total (papel filtro)” versus “ Sucção total (curva de molhagem)”	114
Figura 4.28: “Sucção matricial (tensiômetro)” versus “Sucção total (papel filtro)”	115
Figura 4.29: Curvas características solo-água (laboratório) e pontos experimentais (campo) – 1,0 a 1,5m.....	116
Figura 4.30: Curvas características solo-água (laboratório) e pontos experimentais (campo) – 2,0 a 2,4m.....	116
Figura 4.31: Curvas características solo-água (laboratório) e pontos experimentais (campo) – 3,0 a 4,3m.....	117
Figura 4.32: Dados de temperatura obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas	118
Figura 4.33: Dados de precipitação obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas	118
Figura 4.34: Dados de radiação solar obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas	118
Figura 4.35: Dados de velocidade do vento obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas	119
Figura 5.1: Metodologia para a previsão de sucção e umidade	120
Figura 5.2: Geometria considerada para análise numérica	121
Figura 5.3: Condição inicial de poro pressão negativa	122
Figura 5.4: Médias mensais históricas de precipitação para o período de 2001 a 2009 (INMET – Instituto Nacional de Meteorologia).....	122
Figura 5.5: Médias mensais históricas de evapotranspiração para o período de 1961 a 1990 (EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).....	123

Figura 5.6: Editor do FlexPDE	125
Figura 5.7: Previsão de umidade gravimétrica ao longo do perfil (Análise numérica 1).....	127
Figura 5.8: Previsão de umidade gravimétrica ao longo do perfil (Análise numérica 2).....	127
Figura 5.9: Previsão de umidade gravimétrica ao longo do perfil (Análise numérica 3).....	128
Figura 5.10: Previsão de sucção ao longo do perfil (Análise numérica 1)	128
Figura 5.11: Previsão de sucção ao longo do perfil (Análise numérica 2)	129
Figura 5.12: Previsão de sucção ao longo do perfil (Análise numérica 3)	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas

ABNT wncd – Granulometria convencional com defloculante

ABNT wnsd – Granulometria convencional sem defloculante

AN1 – Primeira análise numérica

AN2 – Segunda análise numérica

AN3 – Terceira análise numérica

Ajuste wM – Curva de ajuste para os pontos wM

Ajuste dM – Curva de ajuste para os pontos dM

Ajuste wT – Curva de ajuste para os pontos wT

Ajuste dT – Curva de ajuste para os pontos dT

CCSA – Curva característica solo-água

DCT.C – Departamento de apoio e controle técnico

dM – Trajetória de secagem de sucção matricial

dT – Trajetória de secagem de sucção total

DE – Dados experimentais

et al. – Et alii (entre outros)

exp – Exponencial

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GL – Granulômetro a laser

GL wncdcu – Granulometria a laser com defloculante e com ultrassom

GL wncdsu – Granulometria a laser com defloculante e sem ultrassom

GL wnsdcu – Granulometria a laser sem defloculante e com ultrassom

GL wnsdsu – Granulometria a laser sem defloculante e sem ultrassom

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IP – Índice de plasticidade

UFG – Universidade Federal de Goiás

PVC – Cloreto de polivinila

wM – Trajetória de molhagem de sucção matricial

wT – Trajetória de molhagem de sucção total

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Fator de não esfericidade da partícula

α^* – Parâmetro do poro efetivo

α_K – Fator de forma

γ_d – Peso específico natural seco

γ_n – Peso específico natural

γ_s – Peso específico real dos grãos

γ_w – Peso específico do líquido

θ – Umidade volumétrica

θ^* – Umidade volumétrica média

θ_i – Ângulo de rotação da hipérbole

θ_i – Umidade volumétrica da fração i

λ – Parâmetro do material

λ_0 – Declividade de dessaturação

ξ – Parâmetro para cálculo da altura capilar para solos plástico-coesivos

ρ_d – Massa específica natural seca

ρ_s – Massa específica dos sólidos

ρ_w – Massa específica do líquido

ϕ – Ângulo de aplicação

χ – Parâmetro adimensional do material

ψ_b – Valor de entrada de ar (sucção)

ψ_{b1} – Primeiro valor de entrada de ar

ψ_{b2} – Segundo valor de entrada de ar

ψ_{CCSA} – Sucção obtida pela curva de ajuste de Fredlund e Xing (1994)

ψ_t – Sucção total

ψ_T – Sucção medida pelo tensiômetro

ψ_m – Sucção matricial

ψ_p – Sucção medida pelo método do papel filtro

ψ_r – Sucção residual

ψ_{res} – Sucção residual

ψ_{res1} – Primeiro valor de sucção residual

ψ_{res2} – Segundo valor de sucção residual

ψ_π – Sucção osmótica

$\partial/\partial t$ – Derivada em relação ao tempo

$\partial/\partial y$ – Derivada em relação a direção

% – Porcentagem

a_c – Coeficiente de adesão

A_G – Área superficial

A_v – Superfície de vazios

C_u – Coeficiente de uniformidade

C_ψ – Parâmetro de correção de umidade

d – Fator de ponderação para S_1 e S_2

d_{eq} – Diâmetro equivalente

D_H – Diâmetro equivalente da partícula para mistura homogênea

D_{10} – Diâmetro correspondente a 10% de material passante

D_{30} – Diâmetro correspondente a 30% de material passante

D_{60} – Diâmetro correspondente a 60% de material passante

D_{80} – Diâmetro correspondente a 80% de material passante

e – Índice de vazios

e_0 – Índice de vazios inicial

h – Carga total

h_c – Altura capilar

h_{co} – Altura de capilaridade

$h_{co,P}$ – Altura de capilaridade para solo plástico-coesivo

$h_{co,G}$ – Altura de capilaridade para partículas graúdas

h_p – Altura do poro

i – Inclinação da curva

k – Coeficiente de permeabilidade

L – Leste

m – Massa

m – Fator de influência da distribuição de poros

m – Metro

mm – Milímetro

m_{si} – Massa das partículas da fração i

n – Porosidade

n_i – Número de grãos da fração i

N – Norte

O – Oeste

pH – Logaritmo negativo da concentração hidrogeniônica

p_r – Coeficiente de correção para a sucção residual

p_b – Coeficiente de correção para o valor de entrada de ar

p_s – Coeficiente de correção para o grau de saturação residual

r_g – Raio do grão do solo

r_i – Abertura do ângulo tangente

r_p – Raio do poro

S – Grau de saturação

S – Sul

S_a – Parcela de grau de saturação resultante da sucção adesiva

S_a^* – Parcela de grau de saturação resultante de da sucção adesiva truncado

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

S_c – Parcela de grau de saturação resultante da sucção capilar

S_m – Massa específica

S_r – Grau de saturação total

S_{res} – Grau de saturação residual

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

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

T_s – Tensão superficial

u_w – Poro-pressão de água

$(u_a - u_w)$ – Sucção

V_g – Volume do grão do solo

V_s – Volume de solo

V_t – Volume total

V_v – Volume de vazios

V_{vi} – Volume de vazios da fração i

w – Umidade gravimétrica

w_L – Limite de liquidez

w_P – Limite de plasticidade

w_{Pf} – Umidade do papel filtr

w_S – Limite de contração

y – Elevação em relação a um determinado referencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	OBJETIVOS	32
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	33
2	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO PERFIL DE SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS E DOS DEMAIS SOLOS ANALISADOS	34
2.1	PERFIL DO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS.....	34
2.1.1	Caracterização física do solo	36
2.1.2	Granulometria.....	39
2.1.3	Curva característica solo-água	45
2.2	PERFIL DE SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNB (CAMAPUM DE CARVALHO, 2005).....	48
2.3	SOLOS DE CLIMA TEMPERADO SELECIONADOS	51
3	PREVISÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA.....	53
3.1	REVISÃO DE ALGUNS DOS MÉTODOS DE PREVISÃO BASEADOS NA GRANULOMETRIA DISPONÍVEIS NA LITERATURA	53
3.1.1	Modelo de Arya e Paris (1981)	54
3.1.2	Modelo de Arya e Dierolf (1989)	58
3.1.3	Albertin <i>et al.</i> (2003)	59
3.2	UM NOVO MÉTODO DE PREVISÃO PARA A CURVA CARACTERÍSTICA SOLO- ÁGUA	62
3.2.1	Equação de ajuste de Gitirana Jr. e Fredlund (2004).....	63
3.2.2	Obtenção do valor de entrada de ar	63

3.2.3	Obtenção do grau de saturação e sucção residuais	65
3.3	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVISÃO AO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS	66
3.4	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVISÃO AO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNB.....	72
4	MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DO SOLO E ATMOSFÉRICAS NO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS.....	80
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DOS MÉTODOS DISPONÍVEIS PARA MONITORAMENTO DA SUCÇÃO EM CAMPO	80
4.1.1	Papel filtro	81
4.1.2	Tensiômetro.....	88
4.2	DESCRIÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL E DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE CAMPO	93
4.2.1	Metodologia de emprego da técnica do papel filtro	97
4.2.2	Metodologia de emprego dos tensiômetros	100
4.2.3	Metodologia de determinação de umidade gravimétrica	101
4.2.4	Metodologia de coleta de dados meteorológicos	102
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.3.1	Desempenho dos instrumentos de medição de sucção	103
4.3.2	Variação temporal e espacial das condições de umidade e sucção do solo ..	105
4.3.3	Comparação entre as diversas técnicas de medição de sucção	111
4.3.4	Dados meteorológicos	117
5	ANÁLISE NUMÉRICA DA FLUTUAÇÃO DE SUCÇÃO E UMIDADE	120
5.1	GEOMETRIA, CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	121

5.2	PROPRIEDADES DO SOLO	123
5.3	MODELO DE ANÁLISE	124
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	126
6	CONCLUSÕES.....	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

1 INTRODUÇÃO

A interação solo-atmosfera tem um papel fundamental em vários exemplos de obras geotécnicas. Nas operações de compactação, a umidade natural do solo de empréstimo interfere de maneira decisiva na eficiência e custo do serviço. As condições de estabilidade e estanqueidade de taludes de terra dependem diretamente das variações sazonais do fluxo de água no solo. A análise, execução e desempenho de diversas etapas de construção e de operação de barragens de terra dependem das condições e propriedades dos solos próximos da superfície, região mais influenciada pelas variações atmosféricas.

Nestes exemplos, os solos se encontram geralmente no estado não saturado e em direto contato com a atmosfera. As condições atmosféricas, por sua vez, são responsáveis por constantes variações no conteúdo de água dos poros do solo, que é o principal fator que define o comportamento de solos não saturados. Desta forma, as condições e comportamento hidro-mecânico dos solos não saturados podem ser consideradas função das condições na fronteira solo-atmosfera (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

As implicações da interação solo-atmosfera para os tipos de problemas citados acima são numerosas. Escavações em áreas de empréstimo podem estar sujeitas a problemas de instabilidade devido à redução da sucção do solo. Áreas de empréstimo são selecionadas, dentre outros fatores, em função da adequabilidade da umidade em campo. Solos cuja umidade natural seja muito abaixo ou muito acima da umidade ótima de compactação exigem gastos adicionais para preparo e podem resultar em consideráveis atrasos no cronograma de execução de barragens de terra. Finalmente, as condições de fluxo em barragens de terra são intimamente ligadas ao fluxo solo-atmosfera.

A variação de umidade e sucção ao longo de um perfil de solo, importantes para a compreensão do solo não saturado, pode ser obtida utilizando abordagens mecánísticas. No entanto, a eficiência do método depende principalmente da acurácia dos dados meteorológicos e de propriedades do solo. A Figura 1.1 mostra em forma de um fluxograma a aplicação do modelo mecánístico na previsão das flutuações de umidade e sucção do solo.

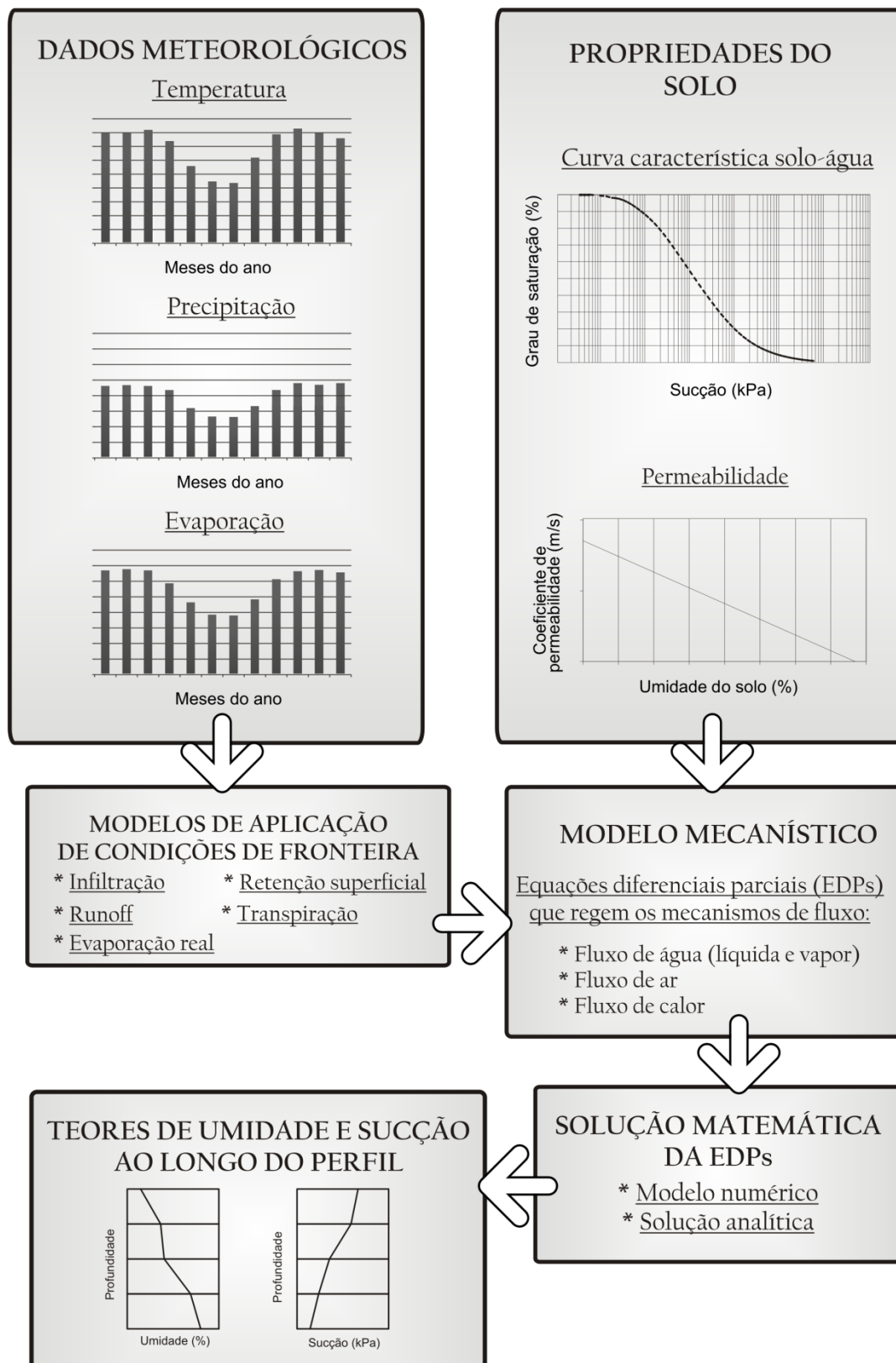


Figura 1.1: Aplicação do modelo mecânico na previsão de umidade e sucção

O desenvolvimento de modelos mecânicos adequados para a previsão de umidade e sucção envolve a compreensão do comportamento de solos não saturados. A Teoria Clássica da Mecânica dos Solos ocupa-se, basicamente, da descrição do comportamento de argilas, siltes e areias em condições saturadas, ou seja, a água preenche todos os vazios do solo. Esta condição corresponde geralmente à região com poro pressão positiva localizada abaixo do nível d'água. No entanto, ocorre com frequência na natureza a condição não saturada, onde os vazios são preenchidos tanto por água quanto por ar, alterando completamente o comportamento do solo. Esta condição corresponde geralmente à região com poro pressão negativa. A Figura 1.2 ilustra as duas condições.



Figura 1.2: Solo saturado e solo não saturado

O estudo dos solos não saturados tem inúmeras aplicações na Engenharia tais como: pavimentação, estabilidade de taludes naturais e aterros, fundações e projetos de disposição de rejeitos.

Na tentativa de conseguir prever o comportamento da água no solo não saturado a propriedade mais fundamental é a curva característica solo-água (FREDLUND E RAHARDJO, 1993). A curva característica solo-água (CCSA) representa a relação entre a sucção e a quantidade de água no solo. A sucção do solo corresponde ao valor da energia livre na água do solo por unidade de volume. Pode-se também interpretar a sucção como uma medida da energia necessária para desprender a água do solo (FREDLUND E

RAHARDJO, 1993). A quantidade de água é geralmente calculada em termos de conteúdo de umidade gravimétrica (w), grau de saturação (S) ou umidade volumétrica (θ).

A curva característica solo-água pode ser influenciada por diversos fatores, tais como a textura do solo, índice de vazios e condições de compactação. A Figura 1.3 apresenta exemplos de curvas características. O valor de entrada de ar (ψ_b), apresentado também na Figura 1.3, é o valor da sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios do solo.

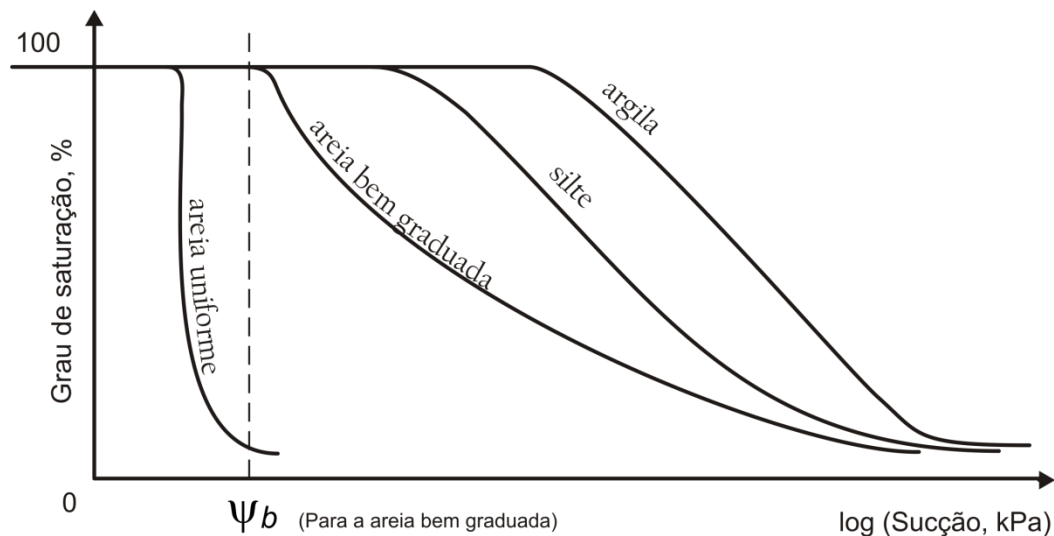


Figura 1.3: Curvas características típicas

A sucção do solo é dividida em duas parcelas: a matricial e a osmótica. A componente matricial está relacionada com a matriz do solo, ou seja, com o tipo de partículas e seu arranjo estrutural, sendo tradicionalmente interpretada pela teoria da capilaridade (TERZAGHI, 1943). A componente osmótica está relacionada à concentração de íons da água do solo. A sucção total é a soma destas duas parcelas conforme apresentado na seguinte equação:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_\pi \quad (1.1)$$

onde: ψ_t é a sucção total; ψ_m é a sucção matricial; ψ_π é a sucção osmótica

Diferentes aspectos do comportamento do solo não saturado, tais como: resistência ao cisalhamento, variação de volume, difusidade, e absorção além de muitas propriedades dos solos tais como calor específico, permeabilidade e condutividade térmica podem ser relacionados com a CCSA (FREDLUND AND RAHARDJO, 1993).

Além da compreensão do comportamento de solos não saturados, segundo a Figura 1.1 existem vários outros componentes experimentais e teóricos que precisam ser analisados para a previsão da umidade e sucção em um perfil de solo.

Como necessidades experimentais, tem-se primeiramente a necessidade de determinação das condições atmosféricas. No caso da previsão de condições futuras, este problema se reduz à utilização de valores correspondentes às médias históricas ou ao uso de previsão atmosférica, para intervalos curtos de tempo futuro.

Além da determinação das condições atmosféricas, devem ser concebidos modelos teóricos que representem as condições atmosféricas em termos de condições de fronteira. Um exemplo importante é a aplicação de condições de fronteira especiais para a determinação da evaporação real na superfície do solo (WILSON, 1990). Outro exemplo importante é a aplicação de condições de fronteira especiais para o cálculo do escoamento superficial (GITIRANA JR., 2005).

Tem-se também como necessidade experimental a avaliação das propriedades constitutivas do solo não saturado e a medição do estado do solo (umidade e sucção). As propriedades constitutivas são necessárias para a aplicação do modelo mecanístico de comportamento. Conforme mostrado na Figura 1.4, existem várias abordagens para a determinação de tais propriedades que podem ser obtidas de maneira direta ou indireta.

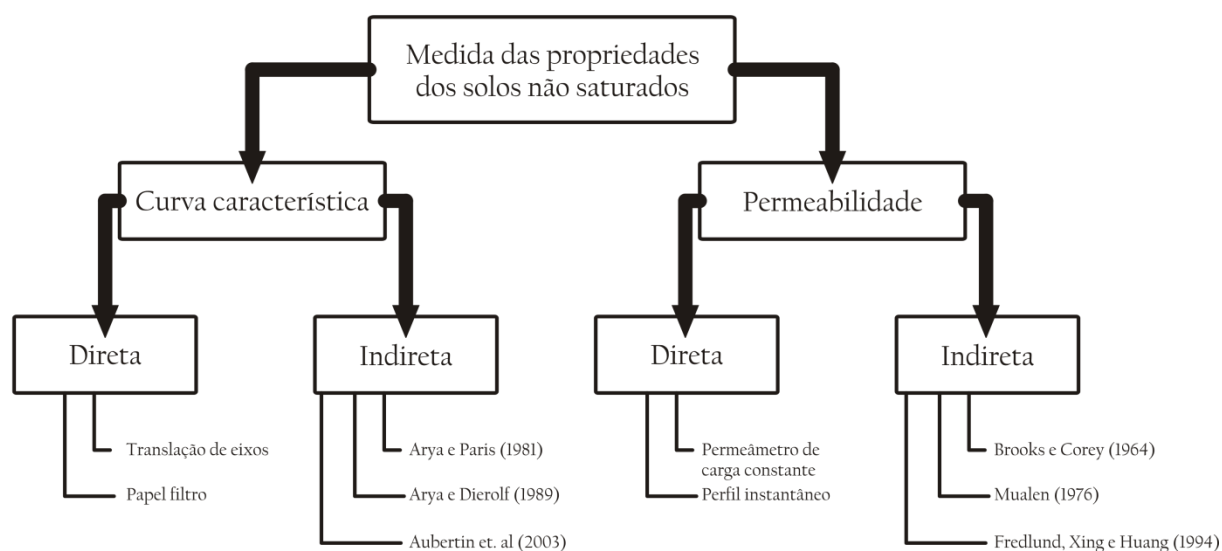


Figura 1.4: Obtenção das propriedades constitutivas do solo não saturado

Especial foco deve ser dado às abordagens indiretas, baseadas na previsão a partir de dados simples de caracterização do solo. Este tipo de abordagem permite uma mais fácil aplicação da abordagem mecanística, uma vez que dispensa o uso de ensaios complexos e demorados. Infelizmente, os modelos indiretos de previsão de propriedades de solos não saturados ainda carecem de melhor avaliação, principalmente com relação a sua aplicação em solos tropicais.

A medição do estado do solo é também necessária, em vários estágios de monitoramento do comportamento, retro análises, e verificação do desempenho dos próprios modelos e comportamento. Existem várias técnicas de monitoramento de umidade e sucção, mas tem-se observado pouca aplicação dessas técnicas na prática da Geotecnia. É importante também o desenvolvimento de técnicas simples e de fácil uso, para a popularização do emprego da mecânica dos solos não saturados.

Finalmente, é necessário como componente teórico, o desenvolvimento de modelos mecanístico e de soluções matemáticas para tais modelos. Os modelos mecanístico devem contemplar os principais mecanismos de comportamento e que sejam aplicáveis na prática.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar e aperfeiçoar a abordagem mecanística de previsão das variações das condições de sucção e umidade de um perfil de solo não saturado.

Os objetivos secundários, necessários para se alcançar o objetivo principal, são:

- Monitorar, durante 8 meses, as condições de umidade, sucção e condições atmosféricas do campo experimental do Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.C) de Furnas, em Aparecida de Goiânia;
- Comparar o desempenho de diversos métodos de monitoramento de sucção in-situ;
- Aplicar e avaliar o desempenho de métodos existentes de previsão de curvas características a partir da curva granulométrica;
- Realizar a previsão da flutuação de umidade e sucção em campo utilizando as condições atmosféricas e as propriedades do material.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi organizado em seis capítulos contemplando introdução, apresentação dos solos analisados, métodos de previsão de curva característica solo-água, monitoramento em campo, análise numérica da flutuação de sucção e umidade, e conclusão.

No presente capítulo foram introduzidos aspectos gerais em relação ao trabalho, justificativas e objetivos. Uma pequena revisão sobre solos não saturados também é apresentada neste capítulo. No Capítulo dois, os solos analisados no trabalho são apresentados e suas características e propriedades são descritas. No Capítulo três, são apresentados e discutidos quatro métodos de previsão de CCSA. O monitoramento em campo de sucção, umidade e dados meteorológicos, é descrito e analisado no Capítulo quatro. No Capítulo cinco é realizada uma análise numérica da flutuação de sucção e umidade, utilizando dados obtidos na pesquisa. No Capítulo seis as principais conclusões do trabalho são discutidas e as considerações finais são apresentadas.

2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO PERFIL DE SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS E DOS DEMAIS SOLOS ANALISADOS

O principal objeto de estudo desta dissertação é o perfil de solo do campo experimental de Furnas. É apresentada neste capítulo de forma concisa a descrição do perfil, baseada principalmente em dados experimentais apresentados no trabalho de Borges (2010). Serão realizadas análises mais aprofundadas dos dados, principalmente com relação à granulometria do perfil para vários estados de agregação e com relação à curva característica solo-água do perfil.

Além do perfil de solo de Furnas, são considerados também nesta dissertação os dados do perfil de solo do campo experimental da Universidade de Brasília (UnB), localizado em Brasília e um conjunto de solos de países de clima temperado. Os dados destes solos de maior relevância para o presente estudo serão também apresentados.

2.1 PERFIL DO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS

O campo experimental implantado nas dependências do Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.C), localizado em Furnas (Aparecida de Goiânia - GO) é o principal objeto de pesquisa desta dissertação. A Figura 2.1 mostra a localização do campo experimental. Suas coordenadas geográficas são 16°47'47" sul e 49°13'49" oeste. A altitude neste ponto possui valor igual a 788 m. Esta área foi escolhida pela conveniente proximidade aos laboratórios de Furnas Eletrobras e por possuir um perfil de solo tipicamente tropical.

Na Figura 2.2 é apresentado o mapa de solos da região metropolitana de Goiânia. Esta região é constituída principalmente de micaxistos e quartizitos micáceos. Em termos de tipo de solo, o campo experimental do DCT.C encontra-se próximo aos limites de dois tipos de solo: latossolo vermelho e cambissolo háplico.

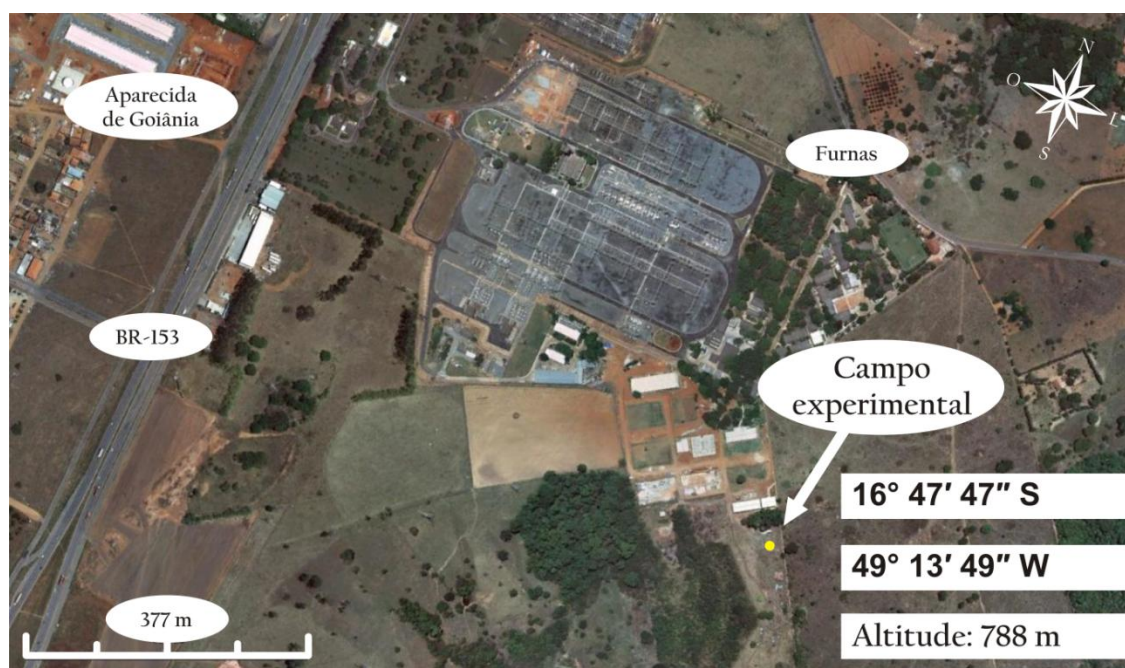


Figura 2.1: Localização do campo experimental (Google Earth em 16/04/2010)

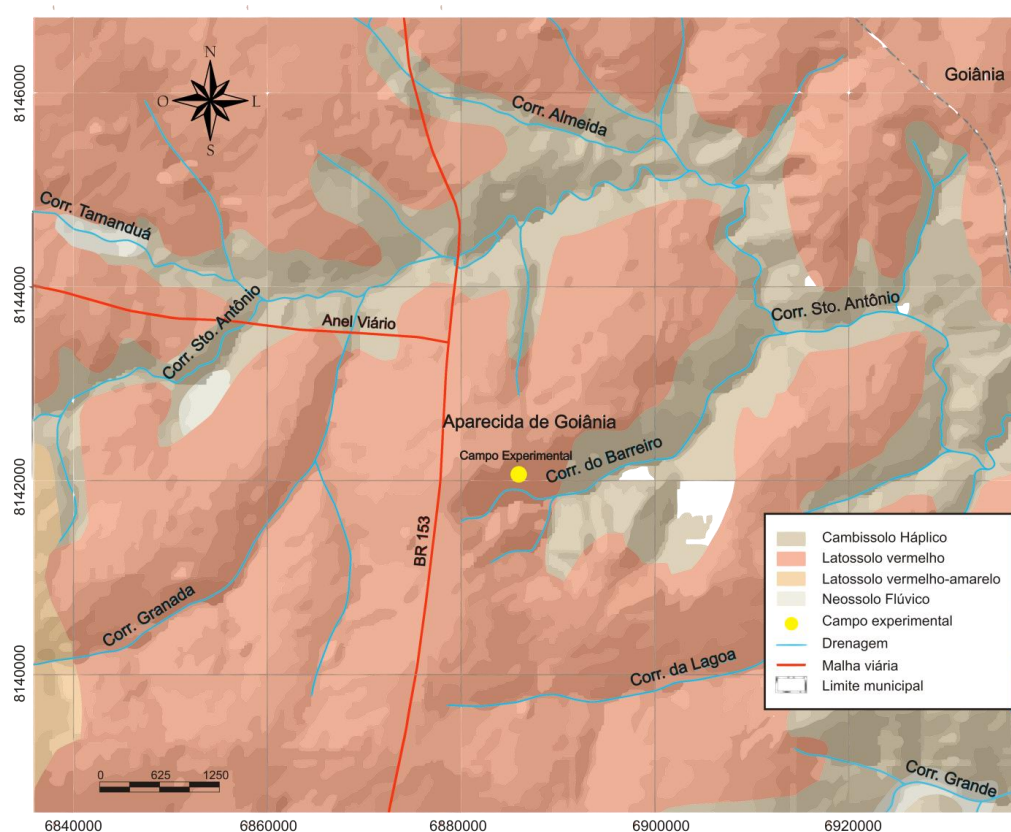


Figura 2.2: Localização do campo experimental do DCT.C e mapa de solos da região (Elaboração: Rafael B. Azevedo)

Foi realizado, no campo experimental, um poço para retirada de amostras deformada e indeformadas. Este poço foi preservado e transformado em um poço de acesso para a instalação de instrumentos utilizados no monitoramento da sucção e da umidade do solo ao longo do perfil. Detalhes a respeito do poço de monitoramento e de toda a metodologia empregada na determinação da sucção e umidade ao longo do perfil serão apresentados no Capítulo 4.

Uma extensa campanha de ensaios de laboratório foi conduzida por Borges (2010), incluindo ensaios de caracterização e de determinação das curvas características solo-água. O trabalho de Borges (2010) compreendeu um estudo do comportamento hidráulico deste mesmo solo, com ênfase na análise da curva característica solo-água e a sua histerese. Os ensaios realizados por Borges (2010) estão listados na Tabela 2.1. Foram realizadas caracterizações física, química e mineralógica do solo além de ensaios especiais de solos não saturados.

Tabela 2.1: Ensaios de caracterização e hidráulicos realizados por Borges (2010)

Caracterização física do solo	Peso específico natural; Peso específico dos grãos; Limites de liquidez e plasticidade; Limite de contração; Granulometria por peneiramento e sedimentação; Granulometria a laser; Compactação
Caracterização mineralógica	Difração de raios-x
Caracterização química	Determinações dos teores de elementos químicos; Determinação do teor de matéria orgânica; pH em água; Capacidade de troca catiônica; Soma dos cátions trocáveis; Saturação do alumínio; Saturação das bases
Ensaios em solos não saturados	Obtenção da curva característica pelo método do papel filtro e por célula de adensamento com controle de sucção

São apresentados neste capítulo os aspectos mais relevantes, para este estudo, dos resultados obtidos por Borges (2010). São apresentadas também análises mais aprofundadas dos resultados disponíveis, com especial atenção à granulometria em vários graus de agregação.

2.1.1 Caracterização física do solo

A Tabela 2.2 fornece dados de peso específico natural, teor de umidade, peso específico natural seco e índice de vazios para diversas profundidades do perfil do solo de Aparecida, além das observações visuais sobre granulometria, cor e presença de minerais. Os dados são referentes ao período de abertura do poço que compreendeu os meses de setembro e

outubro de 2008. Devido a grande variação de quantidade de água que ocorre nos solos tropicais, dados como umidade devem ser analisadas apenas de forma pontual.

Tabela 2.2: Peso específico natural, teor de umidade no momento da amostragem, peso específico natural seco, índices físicos e descrição tátil visual ao longo do perfil do campo experimental de Furnas (Modificado de BORGES, 2010)

Profundidade (m)	$\gamma_n^{(1)}$ (kN/m ³)	w ⁽²⁾ (%)	$\gamma_d^{(3)}$ (kN/m ³)	e ⁽⁴⁾	Observação visual do perfil
0,00 a 0,20	-	8,6	-	-	Cascalho grosso de cor marrom, com matéria orgânica
0,20 a 0,40	-	7,3	-	-	
0,40 a 0,60	17,65	9,0	16,19	0,593	Cascalho grosso de cor avermelhada, com presença de quartzo
0,60 a 0,80	17,46	9,7	15,92	0,652	
0,80 a 1,00	15,77	15,1	13,71	0,919	
1,00 a 1,50	-	-	-	-	
1,50 a 1,70	13,66	18,8	11,50	1,355	Residual jovem de cor avermelhada
1,70 a 1,90	13,07	21,2	10,78	1,512	
2,00 a 2,40	-	-	-	-	
2,40 a 2,60	14,21	22,7	11,58	1,293	Residual jovem de cor avermelhada, com veios de quartzo e mica
2,60 a 2,80	13,72	21,9	11,26	1,360	
2,80 a 3,00	14,26	20,7	11,81	1,248	
3,00 a 3,30	-	-	-	-	
3,40 a 3,60	14,89	22,7	12,14	1,240	
3,60 a 3,80	14,73	20,7	12,21	1,227	
3,80 a 4,00	14,74	22,8	12,00	1,266	Residual jovem de cor avermelhada, com veios de rocha alterada e quartzo
4,00 a 4,30	-	-	-	-	
4,60 a 4,90	-	-	-	-	

(1) Média do peso específico natural; (2) Média do teor de umidade gravimétrica; (3) Média do peso específico natural seco; (4) Índice de vazios

A máxima profundidade analisada foi de 4,90 m, correspondendo à profundidade do poço de monitoramento. O máximo valor de peso específico natural e peso específico seco foram obtidos para a profundidade entre 0,40 e 0,60 metros, consequência da significativa presença de cascalho. Para profundidades maiores que 2,40 m, o valor do peso específico natural não teve grandes variações, se apresentando próximo de 14 kN/m³. Os teores de umidade obtidos foram crescentes com o aumento da profundidade, exceto nos primeiros 20 cm, o que pode confirmar o final de estiagem e o início do período chuvoso, observados

nesta época do ano. O índice de vazios variou bastante e teve valores mínimo e máximo iguais a 0,593 e 1,512. A inspeção visual do perfil mostra o solo para as primeiras profundidades composto de uma grande quantidade de cascalho grosso, que ao longo da profundidade vai sendo substituído por um solo residual jovem de cor avermelhada. É possível observar para profundidades próximas a quatro metros, veios de rocha alterada, indicando a proximidade da rocha mãe.

A Tabela 2.3 apresenta resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos, material passante na peneira 200 (0,075 mm) e limites de consistência das amostras. Os valores de peso específico real dos grãos são praticamente constantes durante toda profundidade observada e possui valor médio igual a 26,62 kN/m³. Os valores de material passante na peneira 200 aumentam para as maiores profundidades. A profundidade entre 3,40 e 3,90 obteve a maior porcentagem de material passante na peneira 200 atingindo 70,2%. Os maiores limites de consistência foram obtidos para as profundidades com maior presença de material passante na peneira 200. O maior índice de atividade da argila observado foi para a profundidade entre 3,40 e 4,30 m.

Tabela 2.3: Resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos, porcentagem de material, limites de consistência das amostras (modificado de BORGES, 2010)

Profundidade (m)	$\gamma_s^{(1)}$ (kN/m ³)	% < 0,075mm ⁽²⁾	Limites de consistência (%)				Atividade ⁽⁷⁾
			w _L ⁽³⁾	w _P ⁽⁴⁾	w _s ⁽⁵⁾	IP ⁽⁶⁾	
0,00 a 0,75	25,80	24,9	46	30	27	16	1,35
0,75 a 1,00	26,30	41,6	55	37	25	18	0,74
1,00 a 1,50	26,82	57,3	54	35	35	19	0,84
1,50 a 1,90	27,08	68,8	58	39	42	19	1,10
2,00 a 2,40	26,76	62,5	60	40	43	20	1,64
2,40 a 3,00	26,56	58,0	59	39	44	20	2,02
3,00 a 3,30	26,62	59,0	57	39	46	18	1,83
3,40 a 3,90	27,19	70,2	57	38	42	19	4,36
3,90 a 4,30	26,75	60,7	55	37	42	18	1,80
4,60 a 4,90	26,33	56,1	55	38	40	17	1,90

(1) Peso específico real dos grãos; (2) Porcentagem de material que passa na peneira 200 (abertura da peneira igual a 0,075 mm); (3) Limite de liquidez; (4) Limite de plasticidade; (5) Limite de contração; (6) Índice de plasticidade; (7) Índice de atividade da argila

2.1.2 Granulometria

São apresentados da Figura 2.3 a Figura 2.7 os resultados dos ensaios de granulometria. As granulometrias foram obtidas pelo método convencional de peneiramento e sedimentação segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984), e pelo processo de granulometria a laser segundo recomendações de Lima, Souza e Camapum de Carvalho (2002) e Roseno e Camapum (2007). São apresentadas, para cada profundidade, seis curvas granulométricas, sendo quatro correspondentes a granulometria a laser (GL) e duas correspondentes ao método convencional (ABNT). A Tabela 2.4 indica as descrições para as variações empregadas nos ensaios e a simbologia adotada. As variações na metodologia de ensaio tiveram o intuito de determinar os diversos graus de agregação, eventualmente possíveis. O efeito do ultrassom é uma possibilidade o ensaio de granulometria a laser, e é semelhante ao efeito do defloculante no método convencional, que é desagregar partículas unidas que se estruturam formando partículas maiores. Todas as granulometrias apresentadas aqui foram preparadas sem secagem prévia.

Os resultados de granulometria obtidos pelo granulômetro a laser tiveram comportamentos semelhantes aos resultados obtidos pelo método convencional, exceto para a profundidade mais rasa onde não houve coerência entre os resultados. Nesta profundidade, por exemplo, nota-se um patamar bem definido na altura de 60 % de material passante para a curva granulométrica GL wnsdcu, fato este que não é observado nas outras curvas. O efeito do defloculante e do ultrassom será avaliado mais adiante.

Tabela 2.4: Variações adotadas nos ensaios de granulometria

Simbologia	Descrição
GL wncdcu	Granulometria a laser com defloculante e com ultrassom
GL wncdsu	Granulometria a laser com defloculante e sem ultrassom
GL wnsdcu	Granulometria a laser sem defloculante e com ultrassom
GL wnsdsu	Granulometria a laser sem defloculante e sem ultrassom
ABNT wncd	Granulometria convencional com defloculante
ABNT wnsd	Granulometria convencional sem defloculante

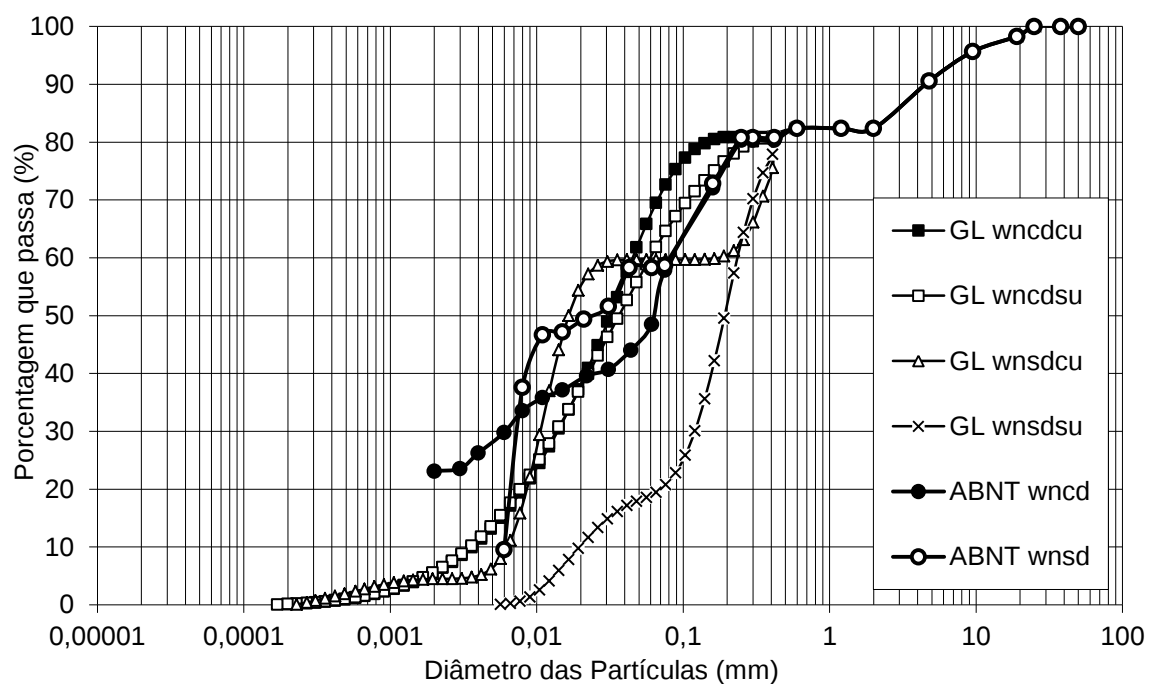


Figura 2.3: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 1,00 a 1,50 m

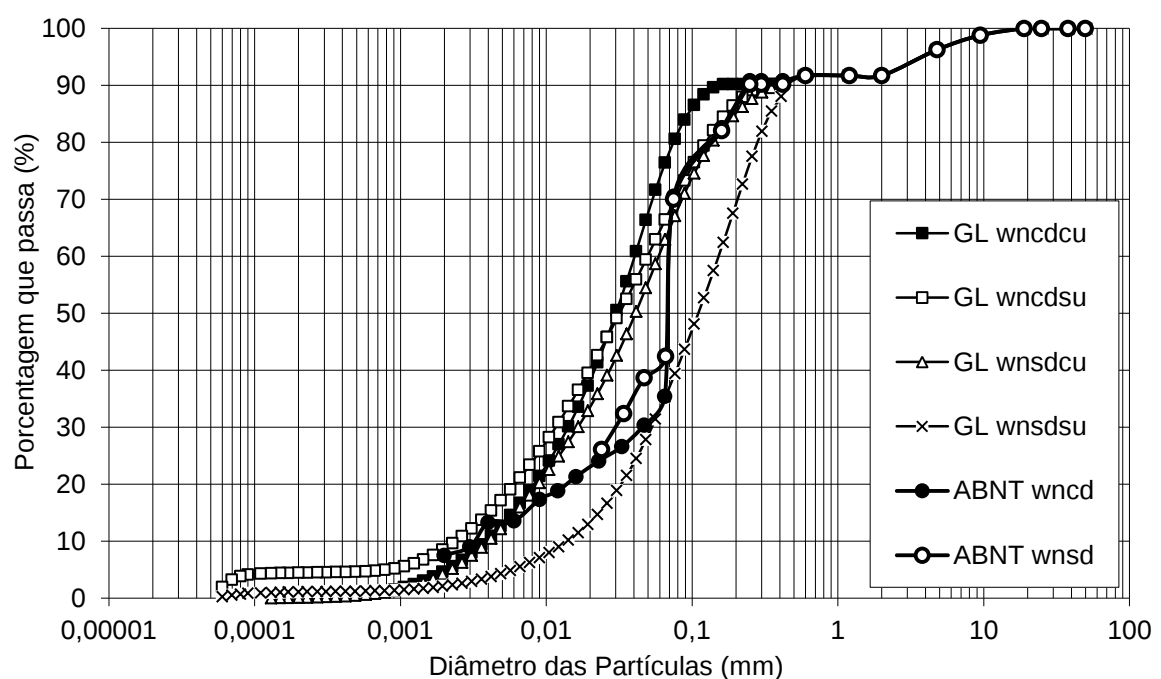


Figura 2.4: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 2,00 a 2,40 m

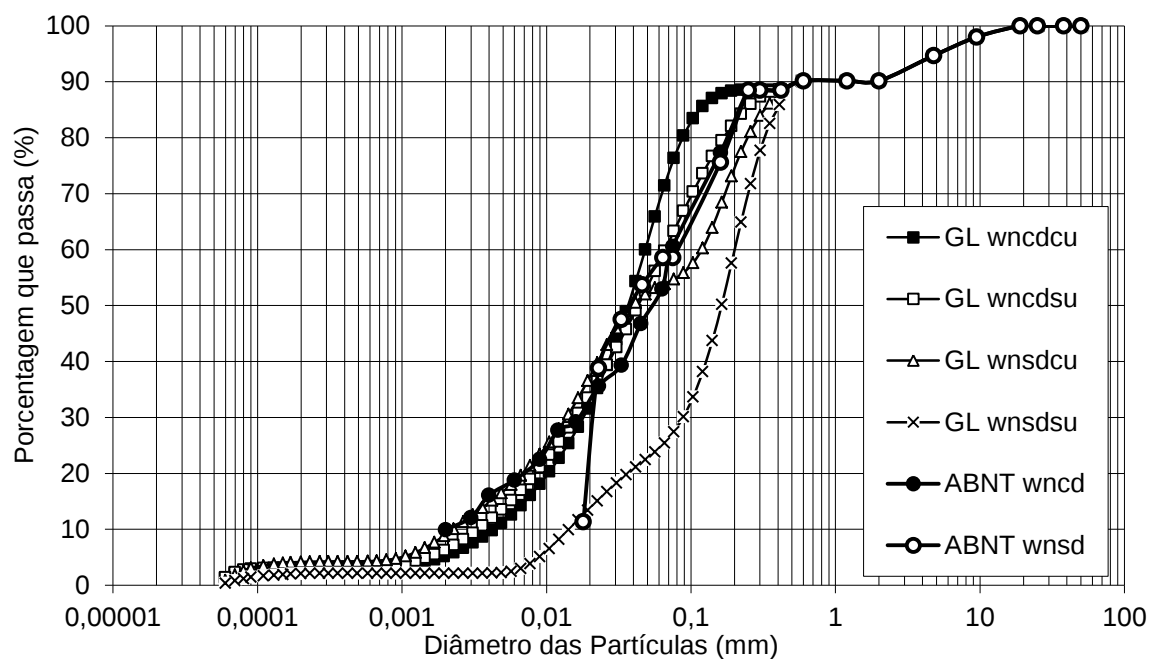


Figura 2.5: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 3,00 a 3,30 m

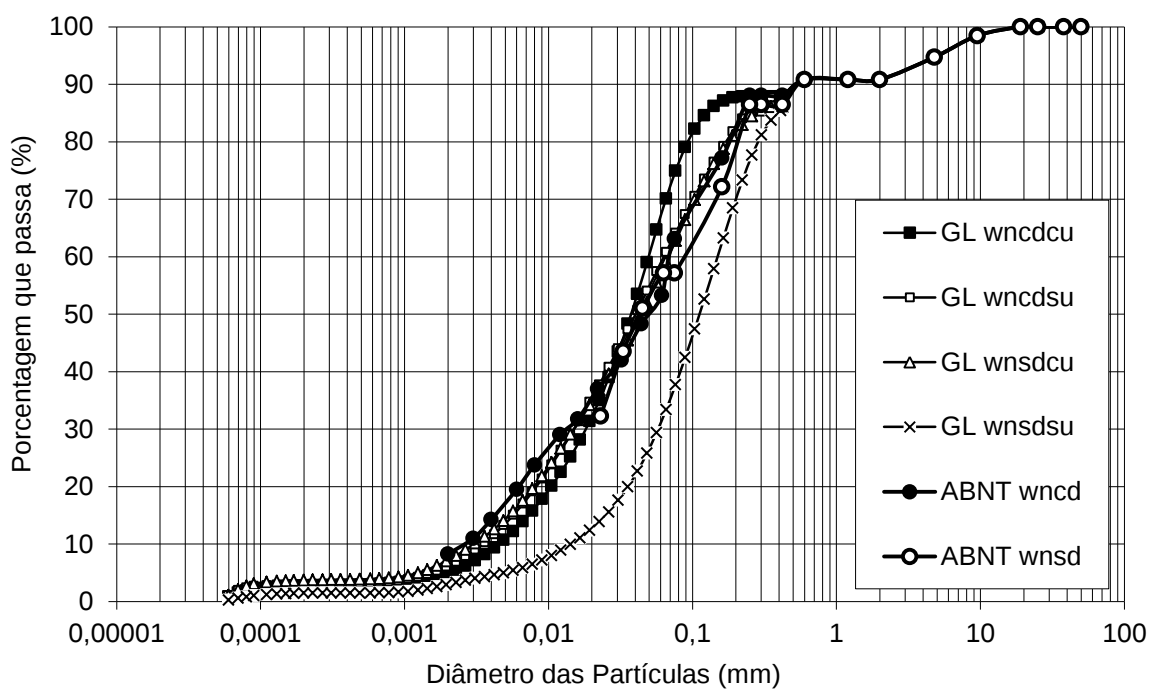


Figura 2.6: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 3,90 a 4,30 m

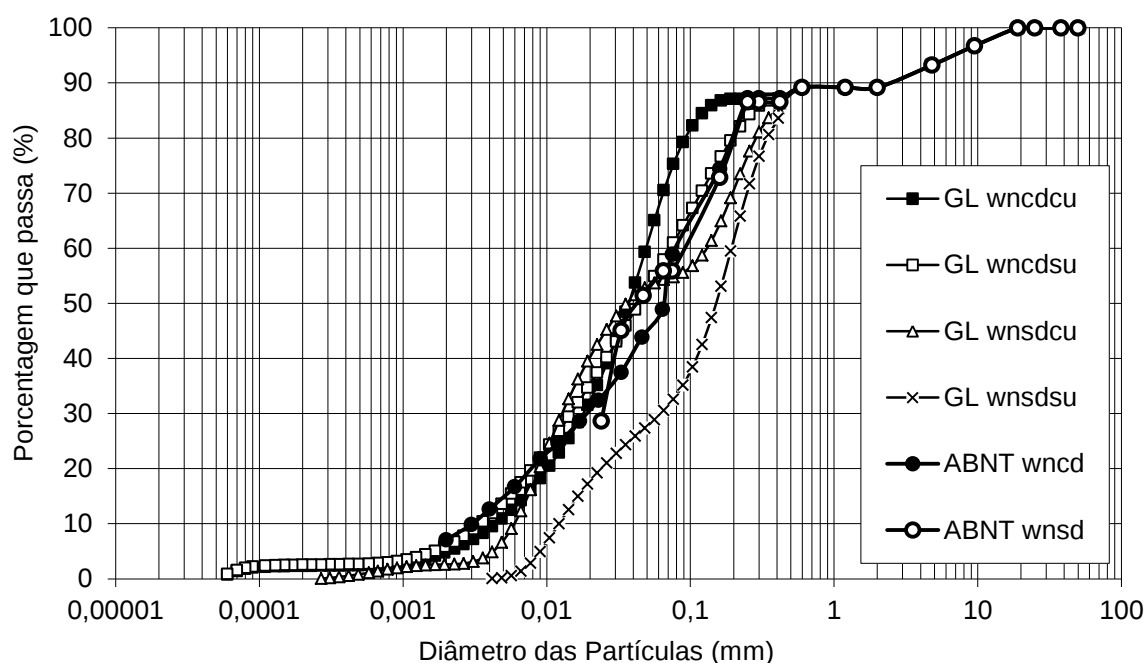


Figura 2.7: Curva granulométrica correspondente a profundidade de 4,60 a 4,90 m

Da Figura 2.8 a Figura 2.12 são apresentadas as porcentagens das frações granulométricas, para as cinco profundidades correspondentes analisadas. A forma de visualização dos resultados selecionada facilita a identificação das variações obtidas para as várias condições de ensaio, e facilita a compreensão do efeito do defloculante e do ultrassom. Foram desconsiderados para a construção dos gráficos presentes nas figuras, a fração maior que 0,60 mm, pois esta foi retirada por peneiramento das amostras utilizadas nos ensaios utilizando granulometria a laser.

A ação do defloculante e do ultrassom alterou de forma significativa a distribuição granulométrica em todas as profundidades analisadas. Analisando primeiramente os resultados obtidos seguindo a metodologia da ABNT observa-se que ao mesmo tempo em que a porcentagem de silte aumentou, a porcentagem de argila diminuiu. Isto indica possível floculação das partículas de granulometria argila e defloculação das partículas de granulometria areia fina. A quantidade de areia média não foi alterada de forma significativa pelo efeito do defloculante.

Analisando os resultados da granulometria a laser, a ação conjunta do uso do defloculante e do ultrassom teve resultados incoerentes, pois ao diminuir a quantidade de areia, aumentou a quantidade de silte, mas não aumentou de forma clara a quantidade de argila. Na profundidade de 2,00 a 2,40 m, por exemplo, ao se utilizar somente defloculante obteve-se

uma maior quantidade de argila que quando utilizado o defloculante em conjunto com o ultrassom.

Comparando os resultados obtidos pelo método convencional e os obtidos pela granulometria a laser, é possível notar uma clara diferença entre os ensaios obtidos para uma mesma condição. A quantidade de argila foi sempre maior para o ensaio pelo método convencional com uso do defloculante, e a maior quantidade de silte foi encontrada nos ensaios de granulometria a laser com o efeito conjunto do ultrassom e do defloculante. Pelos presentes dados, o ensaio de granulometria a laser não mostrou uma clara relação com ensaio convencional, não sendo indicado utilizá-lo como único ensaio de granulometria.

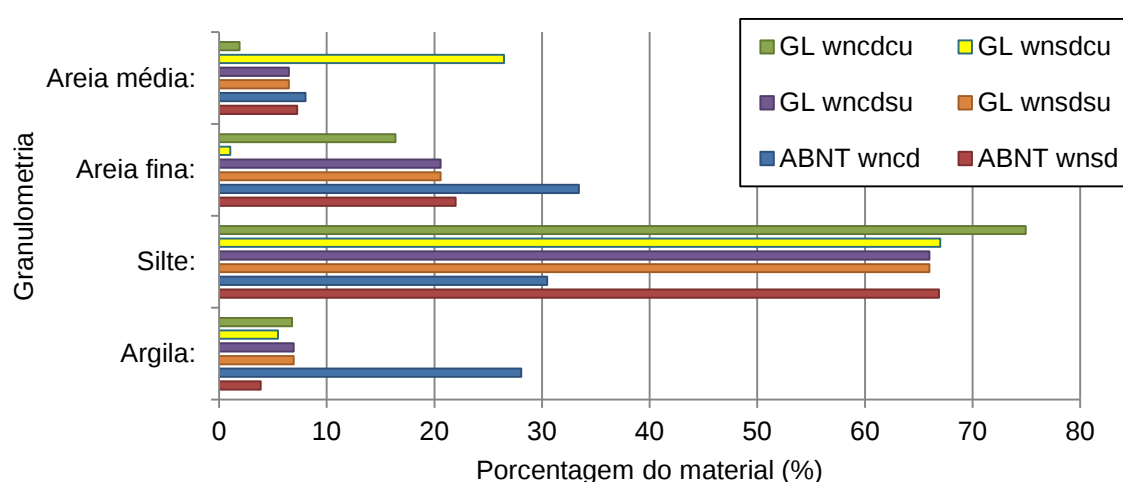


Figura 2.8: Quantidade de materiais na profundidade de 1,00 a 1,50

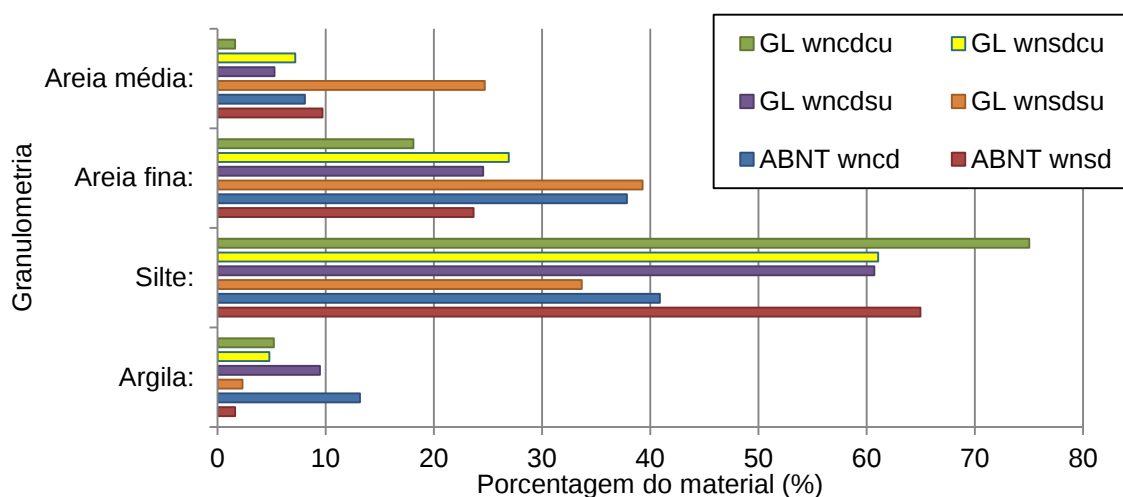


Figura 2.9: Quantidade de materiais na profundidade de 2,00 a 2,40

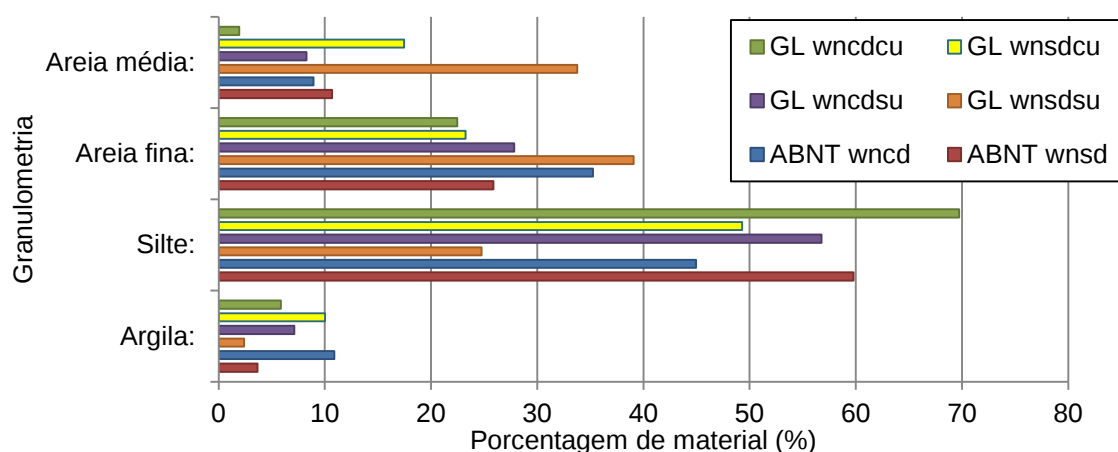


Figura 2.10: Quantidade de materiais na profundidade de 3,00 a 3,30 m

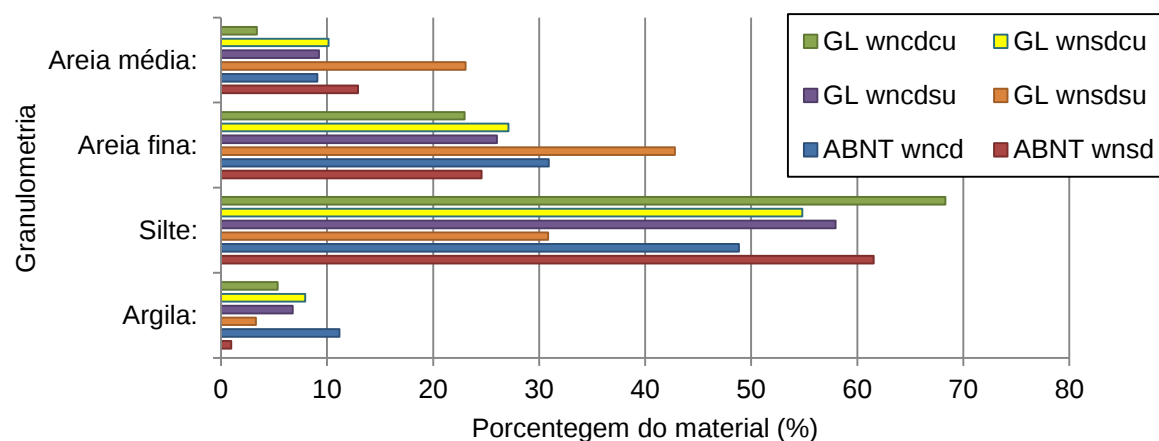


Figura 2.11: Quantidade de materiais na profundidade 3,90 a 4,30

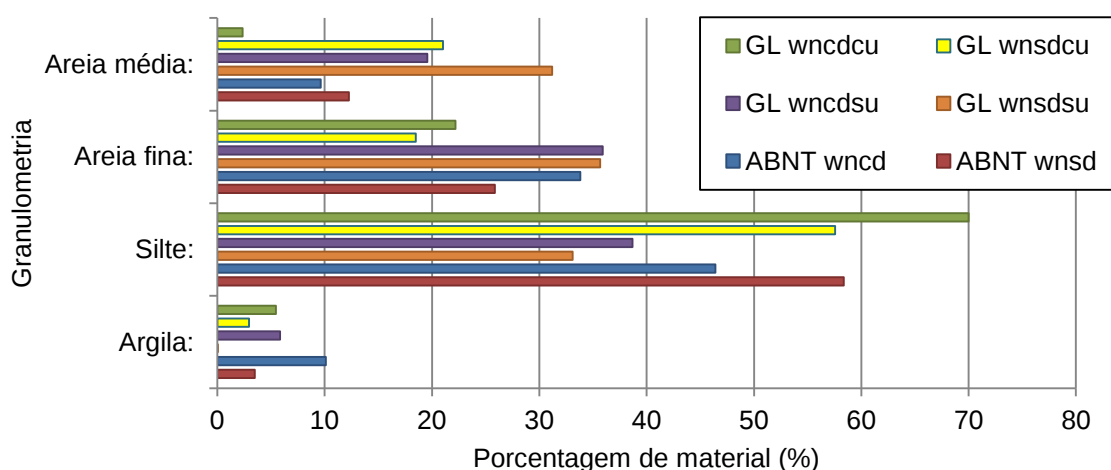


Figura 2.12: Quantidade de materiais na profundidade de 4,60 a 4,90

2.1.3 Curva característica solo-água

São apresentadas, da Figura 2.13 a Figura 2.17, as curvas características solo-água (CCSA) de todas as profundidades ensaiadas. A Tabela 2.5 descreve as simbologias utilizadas nas figuras. Cada figura possui quatro conjuntos de dados, correspondentes às trajetórias de molhagem (sucção matricial e total) e às trajetórias de secagem (sucção matricial e total), além dos ajustes para cada conjunto de pontos, formando às curvas. Foi utilizado a equação de ajuste de Gitirana Jr. e Fredlund (2004). Os conjuntos de pontos experimentais foram obtidos pelo método do papel filtro de medição de sucção utilizando a curva de calibração de Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992).

Tabela 2.5: Descrição das simbologias utilizadas nos gráficos de curvas características solo-água

Simbologia	Descrição
wM	Trajetoária de molhagem de sucção matricial
dM	Trajetoária de secagem de sucção matricial
wT	Trajetoária de molhagem de sucção total
dT	Trajetoária de secagem de sucção total
Ajuste wM	Curva de ajuste para os pontos wM
Ajuste dM	Curva de ajuste para os pontos dM
Ajuste wT	Curva de ajuste para os pontos wT
Ajuste dT	Curva de ajuste para os pontos dT

As curvas para a profundidade mais rasa apresentaram um formato mais próximo do bimodal enquanto todas as outras curvas apresentaram formato unimodal. A diferenciação entre unimodal e bimodal se dá pela quantidade de pontos definidos como valores de entrada de ar, um e dois respectivamente. Em solos tropicais, é comum relacionar curvas bimodais a existência de agregações que produzem macro e micro poros, equivalentes a dois valores de entrada de ar, e um patamar intermediário.

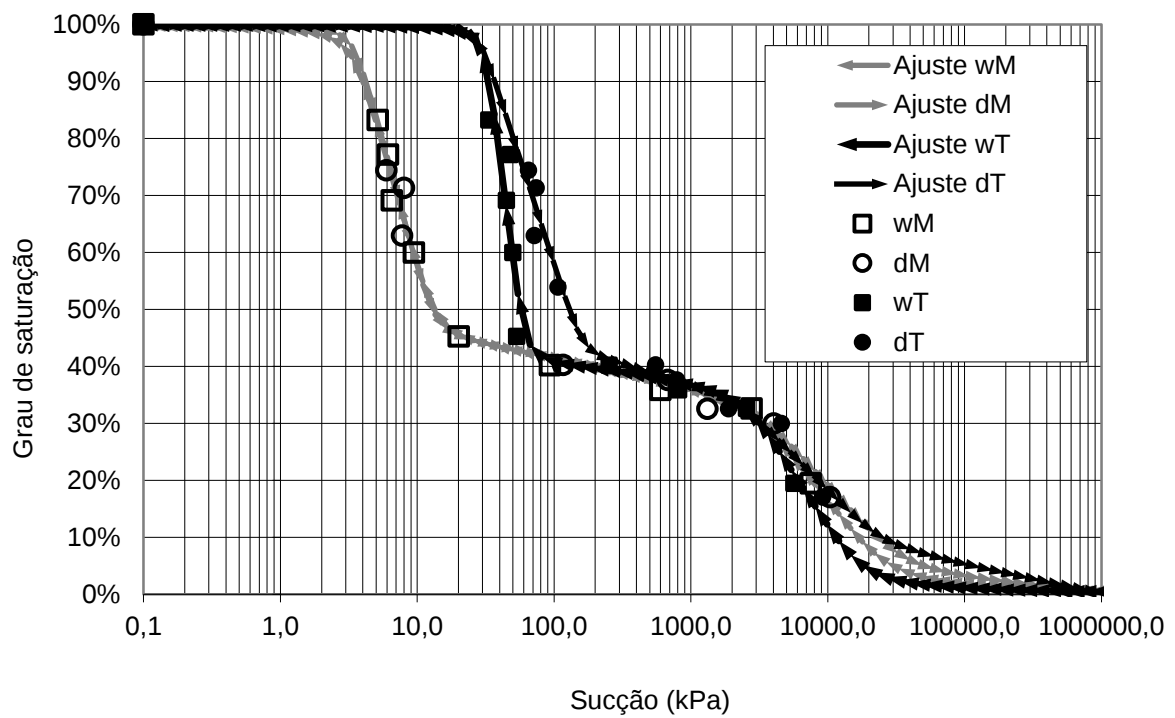


Figura 2.13: Curvas características solo-água para a profundidade de 1,00 a 1,50 m

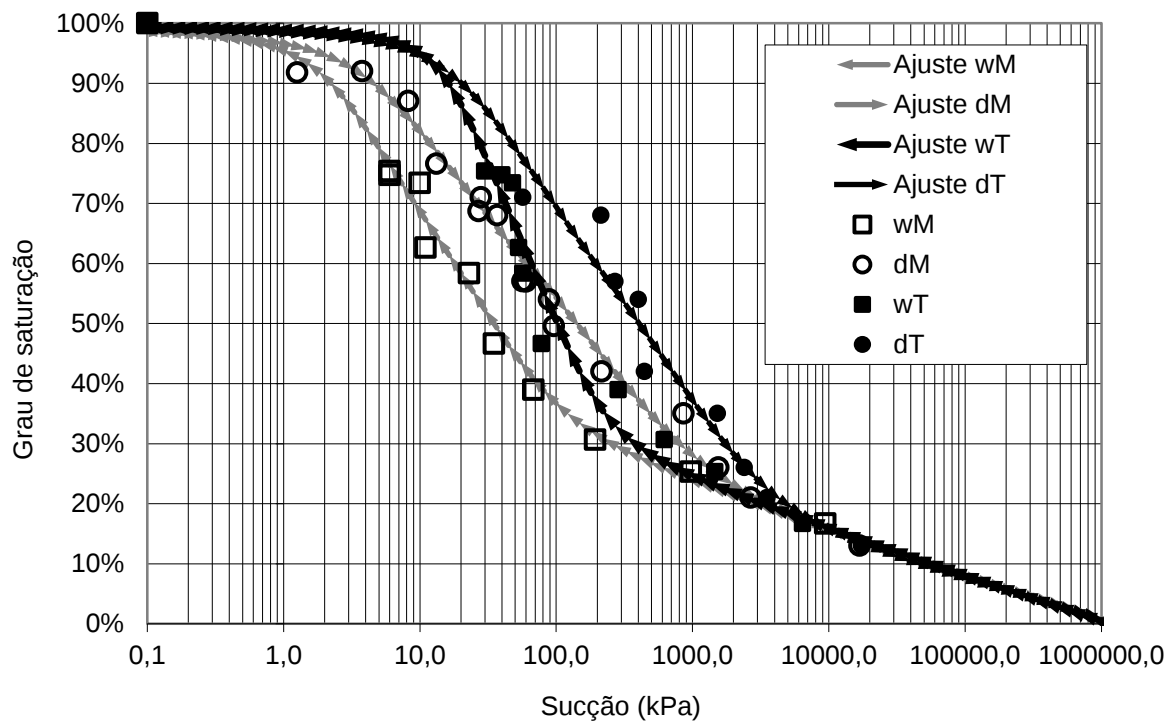


Figura 2.14: Curvas características solo-água para a profundidade de 2,00 a 2,40 m

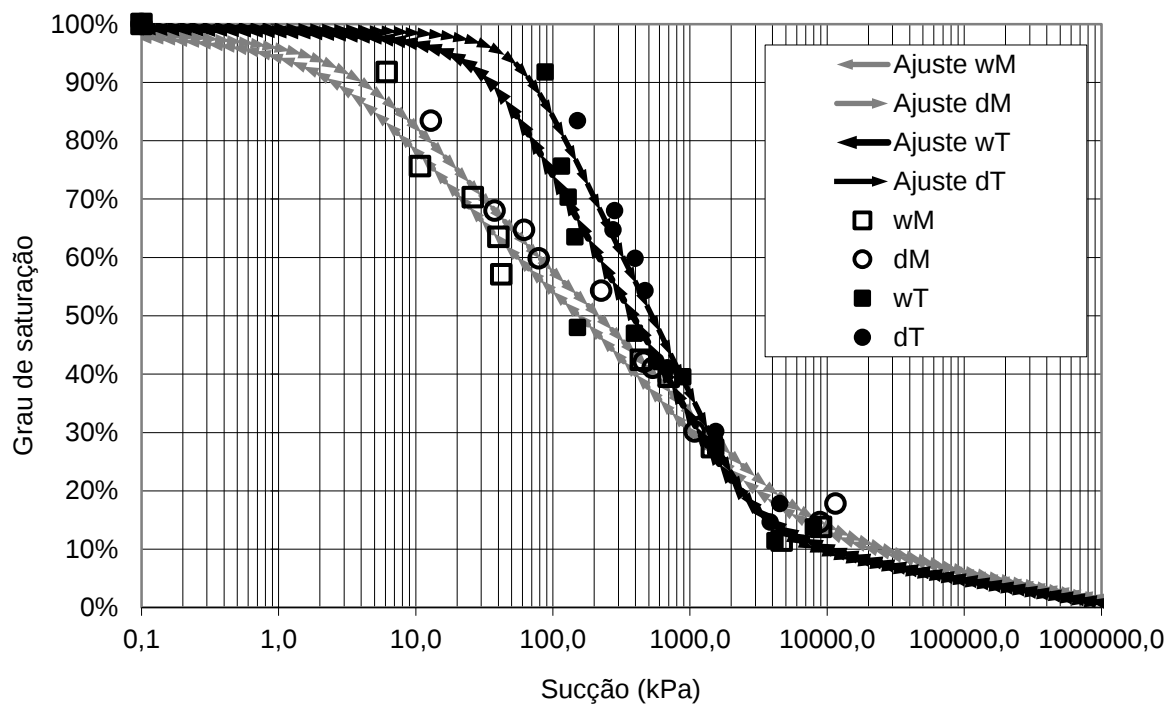


Figura 2.15: Curvas características solo-água para a profundidade de 3,00 a 3,30 m

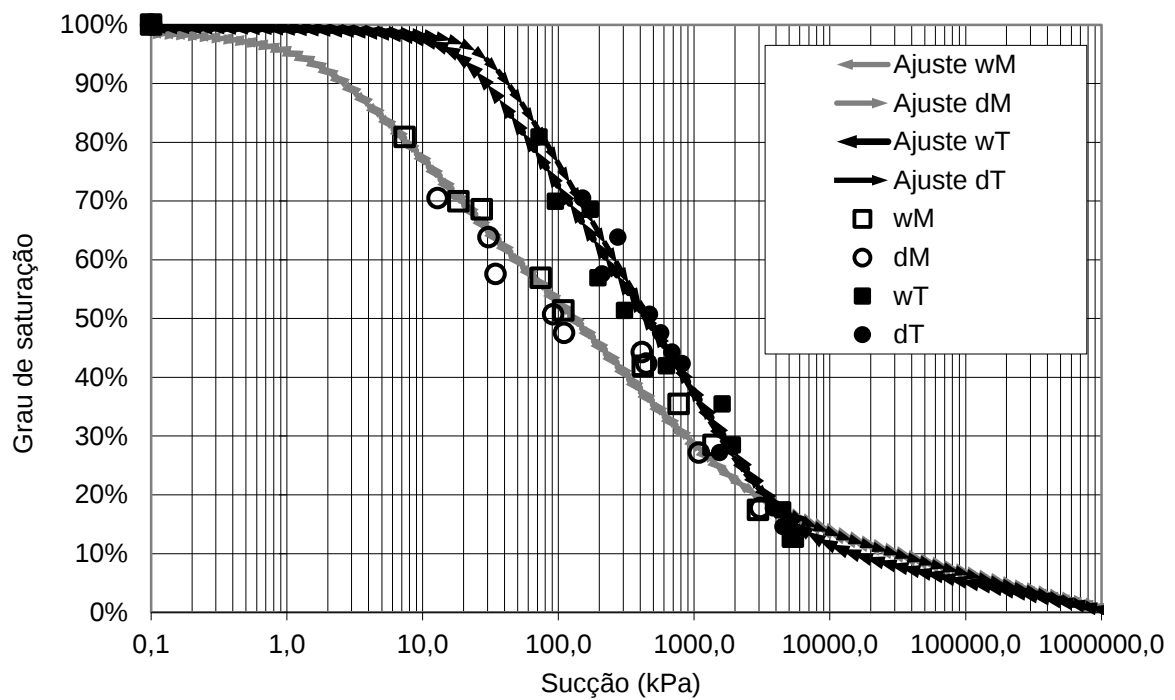


Figura 2.16: Curvas características solo-água para a profundidade de 3,90 a 4,30 m

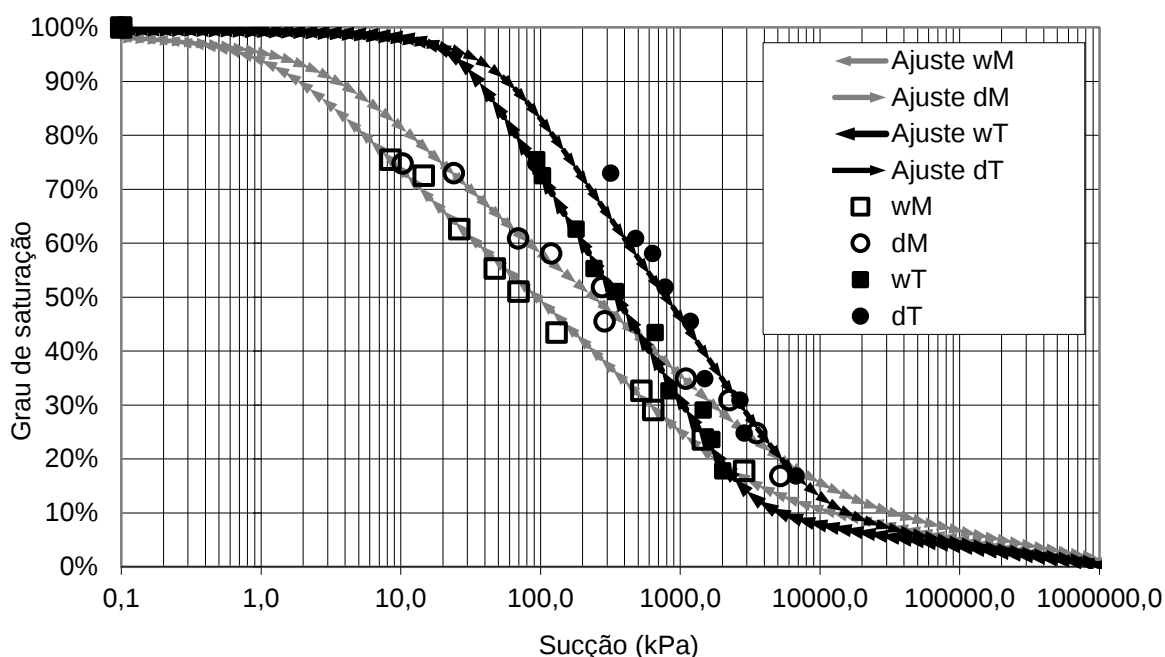


Figura 2.17: Curvas características solo-água para a profundidade de 4,60 a 4,90 m

2.2 PERFIL DE SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNB (CAMAPUM DE CARVALHO, 2005)

O segundo perfil de solo estudado está localizado no campo experimental do programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. O perfil de solo do campo experimental da UnB é descrito por Camapum de Carvalho (2005) como sendo um solo estruturado, poroso e colapsível, com transição de material residual maduro a jovem conforme se aproxima da rocha mãe.

A Tabela 2.6 fornece algumas propriedades do solo de Brasília ao longo da profundidade estudada. O valor do índice de vazios se mostra, de maneira geral, decrescente ao longo da profundidade, sendo máximo na profundidade de um metro (1,60) e mínimo na profundidade de oito metros (0,89). O valor da massa específica dos sólidos é praticamente constante ao longo da profundidade.

A Figura 2.18 e a Figura 2.19 ilustram, respectivamente, a curva granulométrica com o uso do defloculante e a curva granulométrica sem o uso do defloculante para o solo de Brasília. O defloculante teve um papel importantíssimo na desestruturação do solo, aumentando as porcentagens de argila, que antes se encontravam próximas a 10%, para valores entre 30% a 50%.

Tabela 2.6: Propriedades do solo de Brasília ao longo da profundidade

Profundidade (m)	$e^{(1)}$	$\rho_s^{(2)}$
1	1,60	2,739
2	1,57	2,731
3	1,27	2,662
4	1,27	2,648
5	1,22	2,747
6	1,15	2,626
7	1,07	2,704
8	0,89	2,677
10	1,08	2,816

(1) Índice de vazios; (2) Massa específica dos sólidos

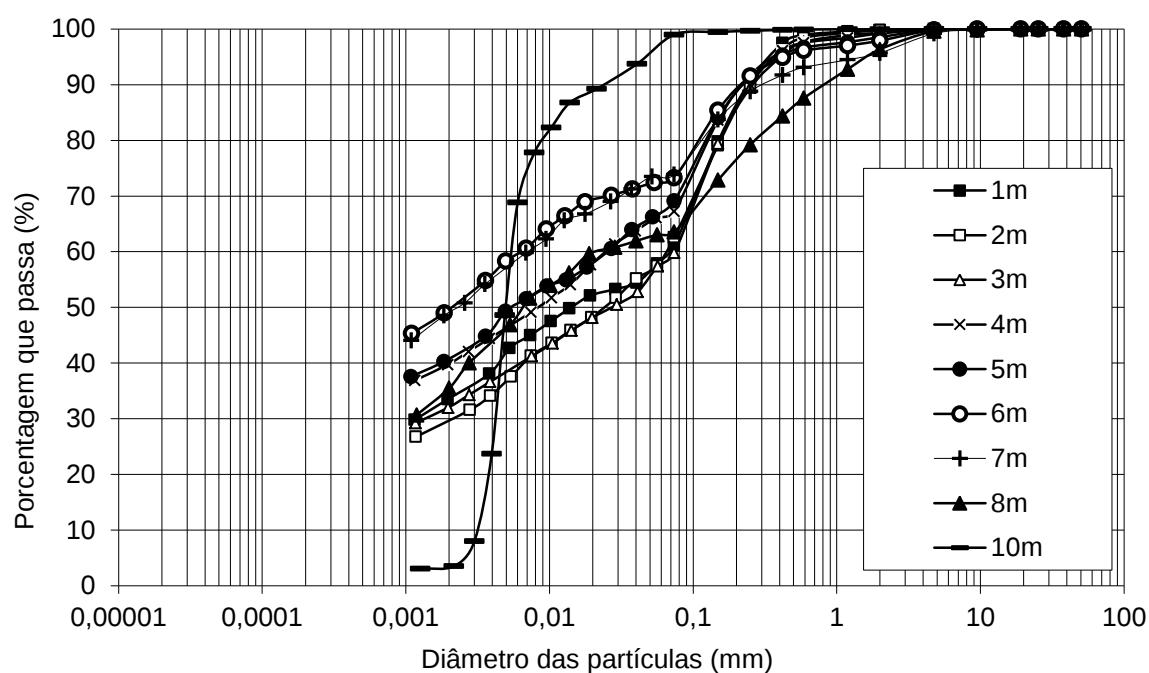


Figura 2.18: Curvas granulométricas obtidas com o uso de defloculante para o solo de Brasília

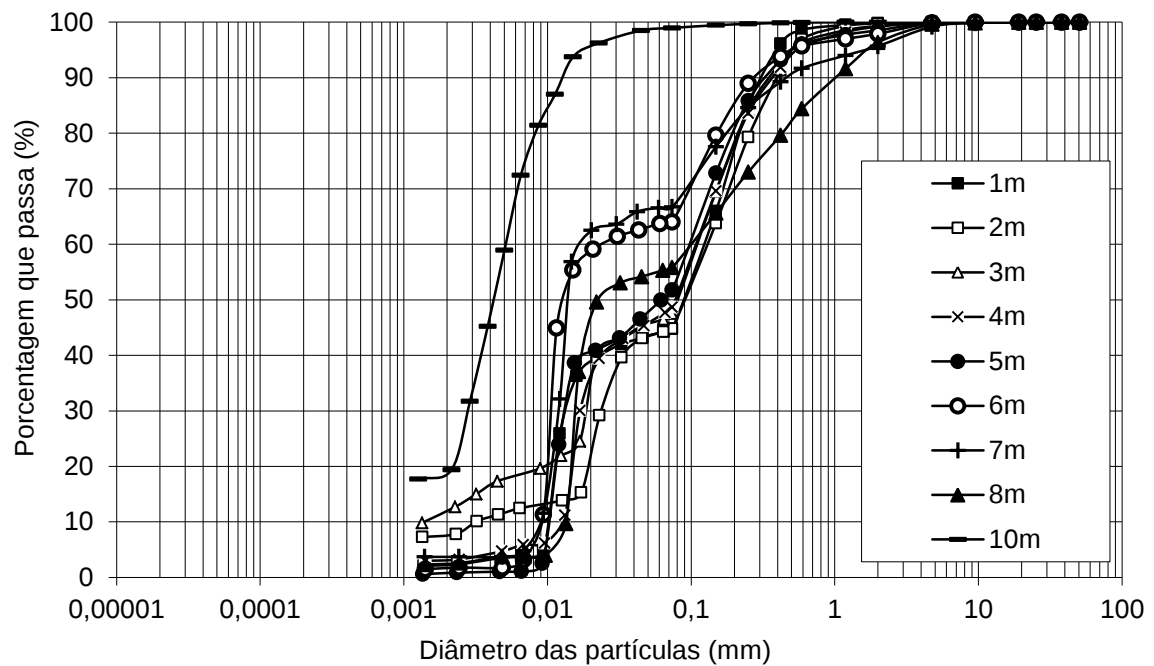


Figura 2.19: Curvas granulométricas obtidas sem o uso de defloculante para o solo de Brasília

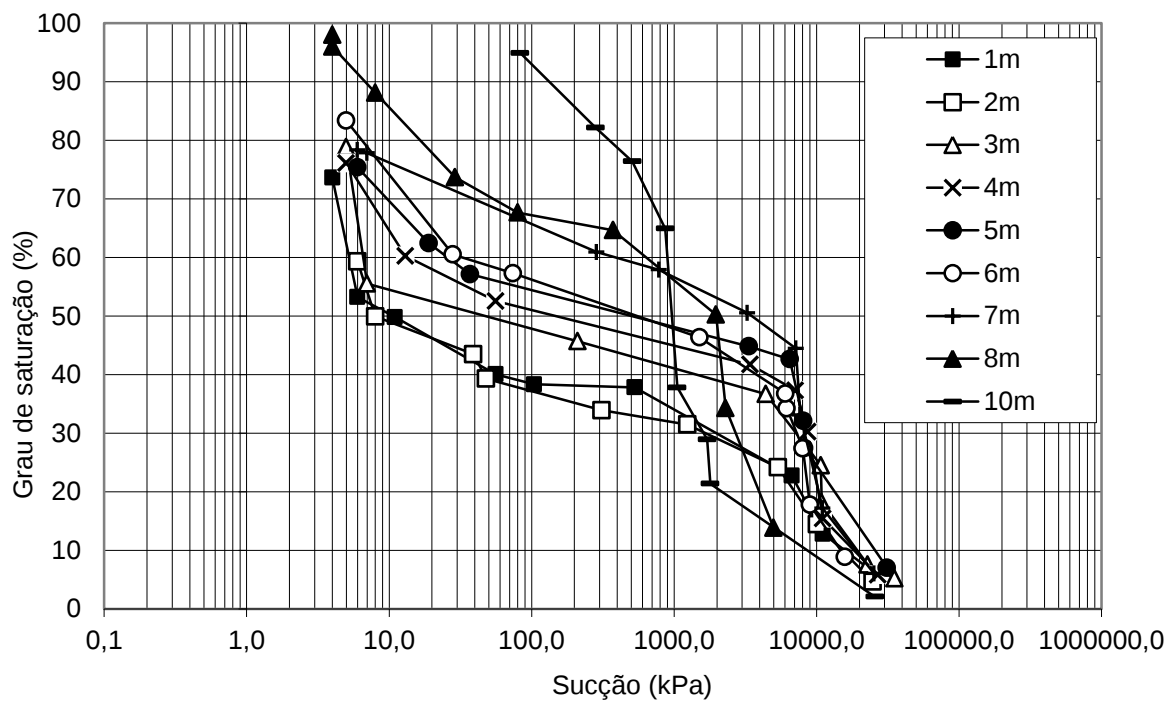


Figura 2.20: Curvas características solo-água obtidas pelo método do papel filtro para o solo de Brasília

2.3 SOLOS DE CLIMA TEMPERADO SELECIONADOS

Os solos do campo experimental de Aparecida de Goiânia e de Brasília são denominados solos tropicais por estarem presentes em regiões intertropicais de clima tropical, com duas estações bem definidas (uma seca e outra chuvosa), com médias de temperatura geralmente altas. As condições climáticas, na qual estão submetidos os solos tropicais, intensificam o processo de intemperismo causando intensa perda de sílica, e o acúmulo de óxidos insolúveis de ferro e alumínio (UEHARA, 1988). Os óxidos por sua vez, favorecem a aglomeração de partículas, resultando na estruturação dos solos. Os solos tropicais são geralmente de cor avermelhada dada a alta concentração de óxido de ferro. O processo de intemperismo, porém, não é tão intenso em regiões de clima temperado, formando perfis de solos mais rasos e sem estruturação. Com o objetivo de confrontar os solos tropicais, citados anteriormente, com solos com particularidades diferentes, foram selecionados três solos de clima temperado: uma areia, um silte e uma argila.

A areia foi selecionada do trabalho de Wilson (1990) é denominada areia de Beaver Creek. A areia foi obtida de um depósito natural de areia localizada no sudoeste de Saskatoon, estado de Saskatchewan, Canadá. O silte, também da região de Saskatchewan, e por isto chamado de silte de Saskatchewan, foi selecionado do trabalho de Pham (2005). A argila selecionada foi obtida do trabalho de Fredlund (1964) e é chamada de argila de Regina por ter sido obtido de um depósito de argila localizado em Regina, capital de Saskatchewan. Sobre os solos citados acima, a Tabela 2.7 fornece suas propriedades, a Figura 2.21 fornece suas curvas granulométricas e a Figura 2.22 fornece suas respectivas curvas características solo-água.

Tabela 2.7: Propriedades dos solos de clima temperado

Solo	$e^{(1)}$	$\rho_s^{(2)}$
Argila de Regina	2,02	2,83
Silte de Saskatchewan	0,69	2,67
Areia de Beaver Creek	0,55	2,67

(1) Índice de vazios; (2) Massa específica dos sólidos (g/cm³)

A curva granulométrica da areia possui uma brusca queda, o que mostra a uniformidade de seus grãos, sendo que mais de 80% dos grãos do solo possui diâmetros localizados na estreita faixa de 0,1 a 0,3 mm. O silte de Saskatchewan e a argila de Regina possuem curvas granulométricas com uma queda mais amena, possuindo frações de areia, silte e

argila em sua composição. É possível notar uma semelhança bem clara entre as curvas granulométricas e as curvas características solo-água.

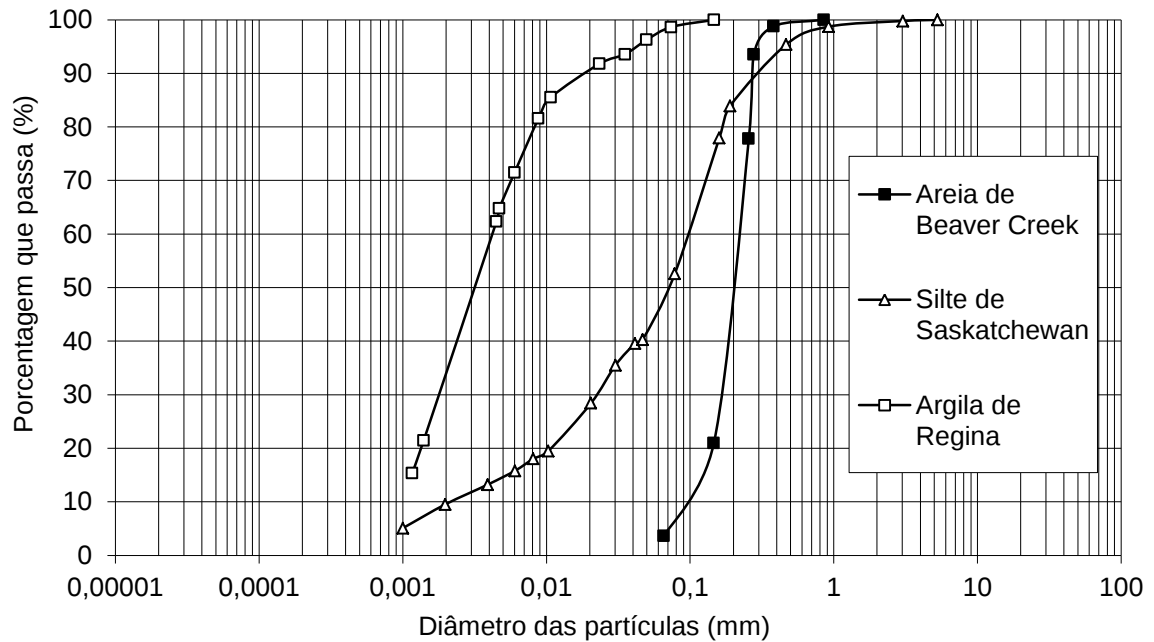


Figura 2.21: Curvas granulométricas dos solos de clima temperado

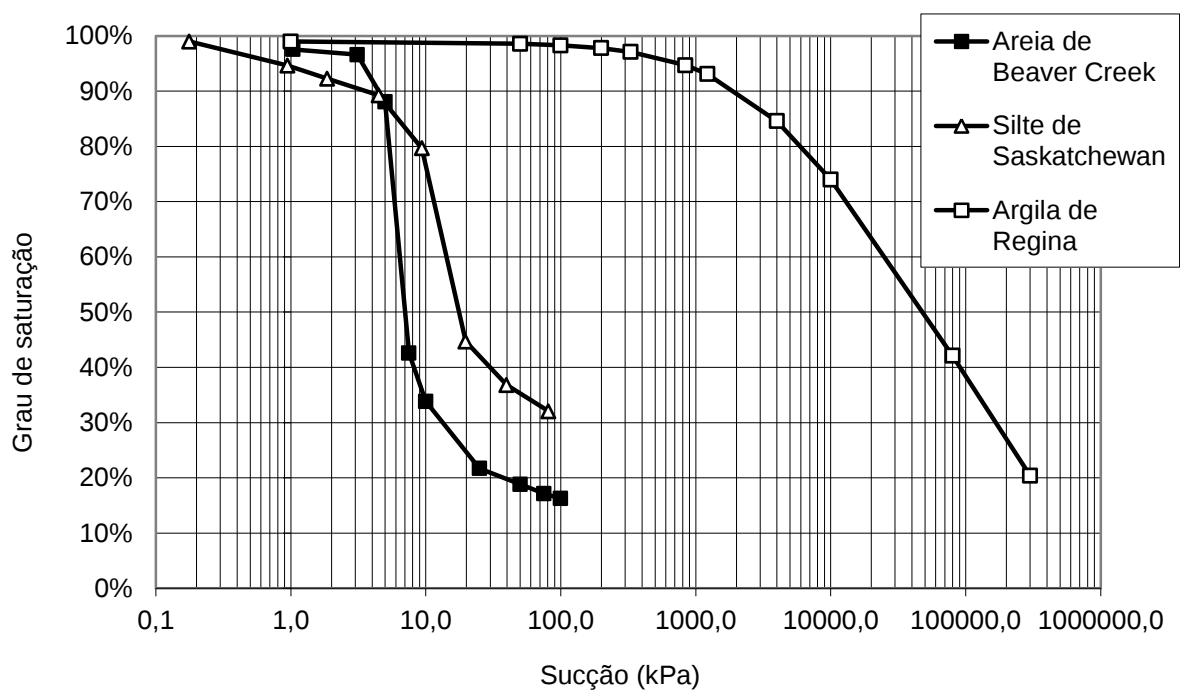


Figura 2.22: Curvas características solo-água dos solos de clima temperado

3 PREVISÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA

A abordagem mecanística para análise da interação solo-atmosfera e cálculo da sucção e umidade em campo pressupõe o conhecimento da curva característica solo-água do material. Infelizmente, a determinação experimental da CCSA exige ensaios laboriosos, relativamente complexos e demorados. Por isso, este tipo de análise tem sido confinado ao ambiente acadêmico ou à consultoria de “alto nível” em obras e problemas de grande vulto.

Devido às dificuldades encontradas nos ensaios em laboratório e em campo, a obtenção da CCSA por um método de previsão se torna bastante interessante. A disponibilidade de um método de previsão baseado em dados do solo de simples obtenção viabiliza a aplicação da mecânica dos solos não saturados na prática. No entanto, duas perguntas precisam ser respondidas, para que a aplicação de métodos aproximados de previsão seja recomendável:

- 1) Qual o nível de acurácia dos métodos de previsão?
- 2) Qual o impacto das possíveis inacurácias existentes nos resultados das análises, utilizando modelos mecanístico?

Este capítulo tem por finalidade contribuir para a resposta da primeira pergunta. Será realizada uma breve revisão bibliográfica dos métodos de previsão disponíveis na literatura. Em seguida alguns modelos selecionados, baseados na granulometria do material e outras propriedades índice, serão aplicados na previsão das CCSA do solo do campo experimental de Furnas, do campo experimental da UnB e aos solos de clima temperado de referência, citados no capítulo anterior.

Será apresentado também um novo modelo de previsão alternativo, que será aplicado aos mesmos solos citados acima. Os resultados obtidos serão analisados e discutidos, considerando medições diretas em laboratório da CCSA disponíveis.

3.1 REVISÃO DE ALGUNS DOS MÉTODOS DE PREVISÃO BASEADOS NA GRANULOMETRIA DISPONÍVEIS NA LITERATURA

Vários métodos de previsão de CCSA são encontrados na literatura. Em geral, esses métodos são baseados na distribuição do tamanho dos grãos e outras propriedades índice

do solo. Segundo Johari e Javadi (2010) estes métodos podem ser classificados em quatro grandes grupos:

- 1) No primeiro grupo, a quantidade de água para uma dada sucção é correlacionada com as propriedades dos solos tais como a distribuição do tamanho dos grãos e porosimetria. Geralmente, este processo envolve uma análise de regressão seguida de procedimento de ajuste de curva.
- 2) Métodos do segundo grupo propõem a correlação entre parâmetros de uma equação empírica assumida para CCSA e propriedades do solo básicas, tais como distribuição do tamanho dos poros e densidade seca utilizando uma análise de regressão.
- 3) O terceiro grupo abrange os modelos empírico-físicos para CCSA. Nestes métodos a distribuição do tamanho dos grãos é utilizada na determinação da distribuição do tamanho dos poros, que é então relacionada com a distribuição de quantidade de água para as diversas pressões nos poros.
- 4) Métodos de inteligência artificial tais como rede neural, programação genética e outros métodos com aprendizagem automática tem formado recentemente um quarto grupo.

Serão apresentados e discutidos três métodos de previsão de CCSA, todos baseados na granulometria do solo e suas propriedades tais como: massa específica dos grãos, massa específica seca do solo e limite de liquidez. Os três métodos são: Arya e Paris (1981), Arya e Dierolf (1989) e Aubertin *et al.* (2003). Por fim, o autor propõe e descreve um novo método de previsão de CCSA.

3.1.1 Modelo de Arya e Paris (1981)

O modelo de previsão de Arya e Paris se baseou nas similaridades encontradas entre a forma da curva granulométrica e a curva característica. O método parte do princípio que a curva acumulada de distribuição granulométrica pode ser dividida em n frações, cada uma possuindo uma determinada quantidade de solo que corresponde a um diâmetro médio do poro e uma curva característica idealizada (Figura 3.1). A curva característica idealizada para cada fração é definida utilizando o modelo de capilaridade e o equilíbrio hidrostático que resultam no valor de sucção necessário para drenar a água de cada fração de solo. A cada nova fração drenada uma percentagem dos vazios do solo é drenada.

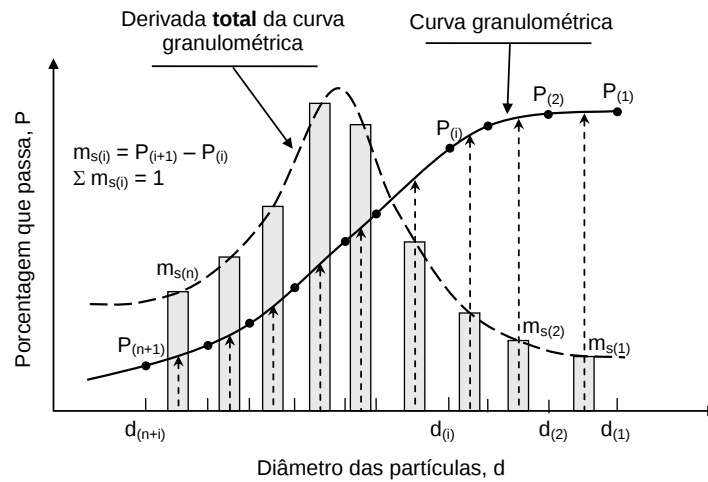


Figura 3.1: Esquema analítico para fracionamento da curva granulométrica (GITIRANA JR., CAMAPUM DE CARVALHO E CORDÃO NETO, 2006)

O volume de vazios associado com cada tamanho de fração pode ser definido como:

$$V_{v_i} = \frac{m_{s_i}}{\rho_s} e \quad (3.1)$$

onde: V_{v_i} é o volume de vazios da fração i ; m_{s_i} é a massa das partículas da fração i ; ρ_s é a massa específica dos sólidos; e é o índice de vazios.

O índice de vazios é dado pela seguinte equação:

$$e = \frac{(\rho_s - \rho_d)}{\rho_d} \quad (3.2)$$

onde: ρ_d é a massa específica natural seca.

Os volumes de vazios presentes em cada fração são progressivamente acumulados e considerados preenchidos com água. A umidade volumétrica do solo pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\theta_i = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{V_{v_i}}{V_t} \quad (3.3)$$

onde: θ_i é a umidade volumétrica da fração i ; $V_t = 1/\rho_d$ é o volume total de vazios.

A umidade volumétrica pode então ser reescrita da seguinte forma:

$$\theta_i = \sum_{j=1}^{j=1} V_{v_i} \rho_s \quad (3.4)$$

A média de umidade volumétrica correspondente ao ponto médio de cada fração de solo é dada por:

$$\theta_i^* = \left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \right) \quad (3.5)$$

onde: θ_i^* é a umidade volumétrica média.

Tem-se, desta forma, como calcular a progressiva diminuição na umidade volumétrica do solo, conforme os poros maiores vão dessaturando. Está embutida neste cálculo a hipótese de que não existem volumes isolados de poros com ar ocluso. Pode-se afirmar, de fato, que a hipótese de cálculo presente aqui é compatível com curvas de secagem partindo do solo completamente saturado.

O próximo passo do modelo de Arya e Paris (1981) é determinar os valores de sucção correspondentes à cada estágio de dessaturação. Para isso, os autores lançam mão da equação de capilaridade e tecem várias considerações teóricas com relação à geometria dos grãos e poros do solo. Arya e Paris (1981) consideram os grãos de solo como partículas esféricas e o volume de vazios como um poro cilíndrico, conforme ilustra a Figura 3.2.

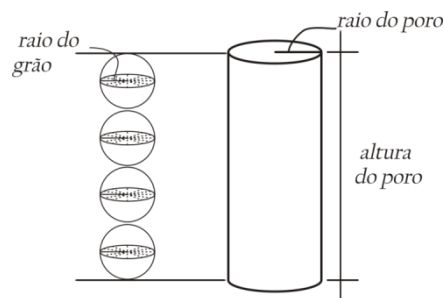


Figura 3.2: Grão de solo e volume de vazios

O volume do grão e o volume de vazios podem ser definidos pelas seguintes equações.

$$V_g = \frac{4}{3} \pi r_g^3 \quad (3.6)$$

onde: V_g é o volume do grão de solo; r_g é o raio do grão de solo.

$$V_{v_i} = \pi r_p^2 h_p \quad (3.7)$$

onde: V_{v_i} é o volume de vazios da fração i (volume do poro); r_p é o raio do poro; h_p é a altura do poro.

O volume total de solo para cada fração i pode ser definido pelo volume de um único grão de solo multiplicado pela quantidade de grãos de solo pertencentes a esta fração, segundo a seguinte equação:

$$V_s = \frac{4}{3} \pi r_g^3 n_i \quad (3.8)$$

onde: V_s é o volume de solo; n_i é o número de grãos da fração i .

A altura do poro pode ser obtida pelo alinhamento dos grãos de solo ao longo do poro como ilustra a Figura 3.2. Define-se então a altura do poro pela seguinte equação:

$$h_p = 2r_g n_i \quad (3.9)$$

Arya e Paris (1981) sugerem a inclusão de um fator de não esfericidade da partícula, α , que é inserido na formulação da seguinte forma:

$$h_p = 2r_g n_i^\alpha \quad (3.10)$$

O volume total de vazios no solo pode ser então obtido pela seguinte equação:

$$V_v = \pi r_p^2 2r_g n_i^\alpha \quad (3.11)$$

Considerando o conceito de índice de vazios, V_v/V_s , e substituindo os valores de V_v e V_s pelas equações 3.8 e 3.11, respectivamente, obtém-se:

$$r_p = r_g \sqrt{\frac{2e n_i^{1-\alpha}}{3}} \quad (3.12)$$

Finalmente, lança-se mão da equação de capilaridade, para determinar a sucção correspondente ao raio do poro:

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s \cos \phi}{r_p} \quad (3.13)$$

onde: $(u_a - u_w)$ é sucção; T_s é a tensão superficial; ϕ é o ângulo de aplicação da tensão superficial.

É importante ressaltar que a sucção assim determinada corresponde à sucção matricial, uma vez que apenas tensão de capilaridade é considerada.

3.1.2 Modelo de Arya e Dierolf (1989)

O modelo proposto por Arya e Dierolf (1989) consiste em uma alteração na forma como o parâmetro de não esfericidade das partículas é introduzido no modelo. Arya e Dierolf substituíram o parâmetro α utilizado por Arya e Paris (1981) pelo parâmetro α^* . É importante sublinhar que parâmetro α , originalmente proposto, gera uma situação física insustentável: o raio do poro depende não apenas do raio da partícula, mas também do número de partículas na amostra. A alteração procura remover esta característica do modelo.

O parâmetro α^* representa o comprimento efetivo do poro associado com cada partícula. Arya e Dierolf (1989) propõem que o comprimento total do poro seja calculado pela seguinte equação:

$$h_p = n_i \alpha^* \quad (3.14)$$

Uma nova relação entre o raio do poro e o raio da partícula é então obtida:

$$r_p = \sqrt{\frac{4 e r_g^3}{3 \alpha^*}} \quad (3.15)$$

A nova equação para o tamanho do raio do poro é utilizada para a determinação da sucção matricial, utilizando a equação da capilaridade (Equação 3.13). A umidade volumétrica correspondente a esta sucção é calculada da forma proposta por Arya e Paris (1981).

3.1.3 Albertin *et al.* (2003)

O método proposto por Aubertin *et al.* (2003) estima a curva característica baseado em algumas características físicas do solo. Este método é uma modificação do modelo proposto por Kovács (1981), e é chamado de modelo MK (Modified Kovács). Aubertin *et al.* (2003) consideram que a sucção matricial no solo é a resultante da sucção capilar (S_c) e da sucção adesiva (S_a) existentes entre as partículas. O modelo MK introduz uma modificação para generalizar a função estatística utilizada por Kovács (1981), para definir a distribuição dos poros. Neste método a curva de característica solo-água é definida pela umidade volumétrica θ e sucção total, ψ .

A altura capilar é dada pela equação:

$$h_c = \frac{4T_s \cos \phi}{\gamma_w d} \quad (3.16)$$

onde: h_c é a altura capilar; γ_w é o peso específico do líquido; d é o diâmetro.

A equação 3.16, explica a razão da altura de ascensão capilar ser maior em solos finos onde os vazios possuem um menor diâmetro. No entanto, como o tamanho dos poros não é espacialmente uniforme, a altura de ascensão capilar não é tão perfeitamente definida quando utilizada a pela equação 3.16.

O sistema de poros pode ser substituído por um sistema de canais regulares com o diâmetro expresso como sendo o diâmetro hidráulico equivalente dos poros (d_{eq}), definido como:

$$d_{eq} = \frac{4V_v}{A_v} \quad (3.17)$$

onde: V_v é o volume de vazios; A_v é a superfície de vazios.

Na prática, A_v corresponde aproximadamente a área superficial, A_G , dos grãos dos sólidos. Pela relação entre A_G e a massa de sólidos (m) pode-se obter a massa específica ($S_m = A_G/m$). Após simples manipulação da equação 3.16, obtém-se a seguinte relação:

$$d_{eq} = \frac{4 e}{\rho_s S_m} \quad (3.18)$$

A altura de capilaridade modificada, h_{co} , é obtida trocando d por d_{eq} :

$$h_{co} = \frac{T_s \cos \phi \rho_s S_m}{\gamma_w e} \quad (3.19)$$

Embora S_m possa ser medido diretamente por várias técnicas, o valor de S_m frequentemente não está disponível para aplicação da equação 3.19. No entanto, para grãos graúdos, a superfície específica pode ser estimada pela distribuição granulométrica usando a seguinte expressão de Kovács (1981):

$$S_m = \frac{\alpha_K}{\rho_s D_H} \quad (3.20)$$

onde: α_K é o fator de forma ($6 \leq \alpha_K \leq 18$; $\alpha = 10$ é usado em KOVÁCS,1981); D_H é o diâmetro equivalente da partícula para uma mistura homogênea. Ele pode ser obtido pela seguinte equação: $D_H = [1 + 1,17 \cdot \log(C_U)] D_{10}$ (onde: $C_U = D_{60}/D_{10}$ é o coeficiente de uniformidade; D_{10} é o diâmetro correspondente a 10% de material passante; D_{60} é o diâmetro correspondente a 60% de material passante).

A equação 3.19 pode ser, desta forma, assim reescrita:

$$h_{co,G} = \frac{T_s \cos \phi \alpha_K}{\gamma_w e D_H} \quad (3.21)$$

O índice G foi inserido no símbolo de altura capilar (h_{co}) para referenciar as partículas graúdas (baixa plasticidade e baixa coesão).

Aubertin *et al.* (2003) sugerem que para solos plástico-coesivos, S_m pode ser estimado usando a relação que existe entre a superfície específica e o limite de liquidez (w_L) proposta por Mbonimpa *et al.* (2002):

$$S_m = \lambda w_L^\chi \quad (3.22)$$

onde: χ e λ são parâmetros do material. $\chi = 1,45$ (adimensional) e $\lambda = 0,2m^2/g$ para: $22m^2/g \leq S_m \leq 433m^2/g$ e $18\% \leq w_L \leq 127\%$

Finalmente, a altura capilar para solos plástico-coesivo pode ser então calculada pela seguinte fórmula:

$$h_{co,P} = \frac{\xi}{e} w_L^{1,45} \quad (3.23)$$

O índice P foi inserido no símbolo de altura capilar (h_{co}) para referenciar os materiais plástico-coesivos. O parâmetro ξ pode ser expresso como:

$$\xi = \frac{T_s \cos \phi \lambda \cdot \rho_s}{\gamma_w} \quad (3.24)$$

Com isso, ficam definidos os valores de sucção em função da granulometria do material e de outros parâmetros índice. A próxima etapa do modelo de Aubertin *et al.* (2003) consiste no cálculo do grau de saturação para variados valores de sucção. Os autores propõem o cálculo do grau de saturação, S_r , pela seguinte equação:

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (3.25)$$

onde: S_c é a parcela de grau de saturação resultante da sucção capilar; $S_a^* = 0,5(S_a + |S_a|)$ para $S_a \geq 1$, e $S_a^* = S_a$ para $S_a < 1$; n é a porosidade; S_a é a parcela de grau de saturação resultante de sucção adesiva.

O componente truncado de sucção resultante da força adesiva, S_a^* , foi introduzido no lugar do valor original, S_a , para evitar que o componente adesivo não exceda a 100%.

A contribuição do componente de capilaridade para o grau de saturação total é definida em função de h_{co} e ψ da seguinte forma:

$$S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m \exp[-m(h_{co}/\psi)^2] \quad (3.26)$$

onde: m é o fator de influência da distribuição dos poros, definido como sendo $m = 1/C_U$ para solos granulares, e $m = 3 \cdot 10^{-5}$ para solos plástico-coesivos.

A contribuição do componente de adesão para o grau de saturação total é definida da seguinte forma:

$$S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3} (\psi/\psi_n)^{1/6}} \quad (3.27)$$

onde: a_c é o coeficiente de adesão, igual a 0,01 para solos granulares e igual a $7 \cdot 10^{-4}$ para o solos plástico-coesivos; ψ_n é um parâmetro de normalização.

A função C_ψ , proposta originalmente por Fredlund e Xing (1994), induz que a umidade receba valor zero quando S_a se aproxima do equilíbrio termodinâmico.

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_n)}{\ln(1 + \psi_0/\psi_r)} \quad (3.28)$$

Finalmente, a sucção residual (ψ_r), equivalente ao valor de entrada de água, pode ser calculada respectivamente para solos granulares e para solos plástico-coesivos, conforme as equações a seguir:

$$\psi_r = 0,86 \cdot h_{co,G}^{1,2} \quad (3.29)$$

$$\psi_r = 0,86 \cdot \left(\frac{\xi}{e}\right)^{1,2} w_L^{1,74} \quad (3.30)$$

3.2 UM NOVO MÉTODO DE PREVISÃO PARA A CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA

Um novo método de previsão de curva característica solo-água é proposto a seguir. A previsão é baseada em pontos de referência da CCSA, que possuem significado físico relevante. São adotadas equações de ajuste que possibilitam a geração de uma curva contínua a partir dos pontos de referência determinados. O modelo propõe a adoção da equação de ajuste de Gitirana Jr. e Fredlund (2004), para a curva unimodal com dois pontos de curvatura. Os parâmetros da curva são os seguintes: valor de entrada de ar (ψ_b), sucção residual do solo (ψ_{res}), grau de saturação (S_{res}) e um quarto parâmetro, denominado “ a ”, que define a suavidade dos pontos de curvatura da curva.

O modelo de previsão proposto consiste na determinação, a partir da curva granulométrica e propriedades do solo, dos três primeiros parâmetros da curva proposta por Gitirana Jr. e Fredlund (2004). O parâmetro “ a ” é considerado uma constante de valor igual a 0,09.

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

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propuseram três equações de ajuste denominadas: equação unimodal com um ponto de curvatura, equação unimodal com dois pontos de curvatura e equação bimodal. As três equações são baseadas na equação geral da hipérbole, rotacionada e inserida no sistema de coordenadas $\log(\psi) \times S$. A equação utilizada no presente trabalho é a equação unimodal com dois pontos de curvatura.

São necessárias duas hipérboles transladadas e rotacionadas para definir a CCSA com dois pontos de curvatura. Três linhas fixas definidas pelas coordenadas $(0,1)$, $(\psi_b,1)$, (ψ_{res}, S_{res}) , e $(10^6,0)$ definem as assíntotas da hipérbole. As duas hipérboles são ligadas por uma equação, resultando em uma curva contínua com uma transição suave. A equação proposta é apresentada a seguir:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_b \psi_{res}})^d} - S_2 \quad (3.31)$$

Os valores de S_1 e S_2 são definidos pela equação a seguir:

$$S_i = \frac{\tan \theta_i (1 + r_i^2) \ln(\psi/\psi_i^a)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} + (-1)^i \times \frac{(1 + \tan^2 \theta_i)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \sqrt{r_i^2 \ln^2 \left(\frac{\psi}{\psi_i^a} \right) + \frac{a^2 (1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1 + \tan^2 \theta_i)}} + S_i^a \quad (3.32)$$

onde: $i = 1,2$; $\theta_i = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2$ = 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 $d = 2^{1/\ln(\psi_{res}/\psi_b)}$ = fator de ponderação para S_1 e S_2 .

3.2.2 Obtenção do valor de entrada de ar

A eficiência do método de previsão dependerá diretamente da precisão das equações que tentam estimar os parâmetros da curva característica. Propõe-se aqui que o valor de entrada de ar pode ser obtido de forma empírica, com base na semelhança entre a curva granulométrica e a curva característica solo-água. Para tal, considera-se a parte inclinada da curva granulométrica como sendo uma reta de equação representativa igual a $y = xi + b$,

conforme ilustra a Figura 3.3. A inclinação da curva (i) pode ser calculada tomando como pontos de referência os valores de D_{80} e D_{30} , assim definidos:

$$i = \frac{50}{\log(D_{80}/D_{30})} \quad (3.33)$$

onde: D_{80} é o diâmetro correspondente a 80% de material passante; D_{30} é o diâmetro correspondente a 30% de material passante.

Os pontos de referência dos valores de D_{80} e D_{30} foram adotados por representar satisfatoriamente os extremos da curva granulométrica. A constante b pode ser obtida a partir da equação da reta que define o trecho retilíneo inicial da curva granulométrica e a partir da inclinação definida anteriormente. Desta forma, obtém-se a seguinte equação:

$$b = 80 - \frac{\log(D_{80}).50}{\log D_{80}/D_{30}} \quad (3.34)$$

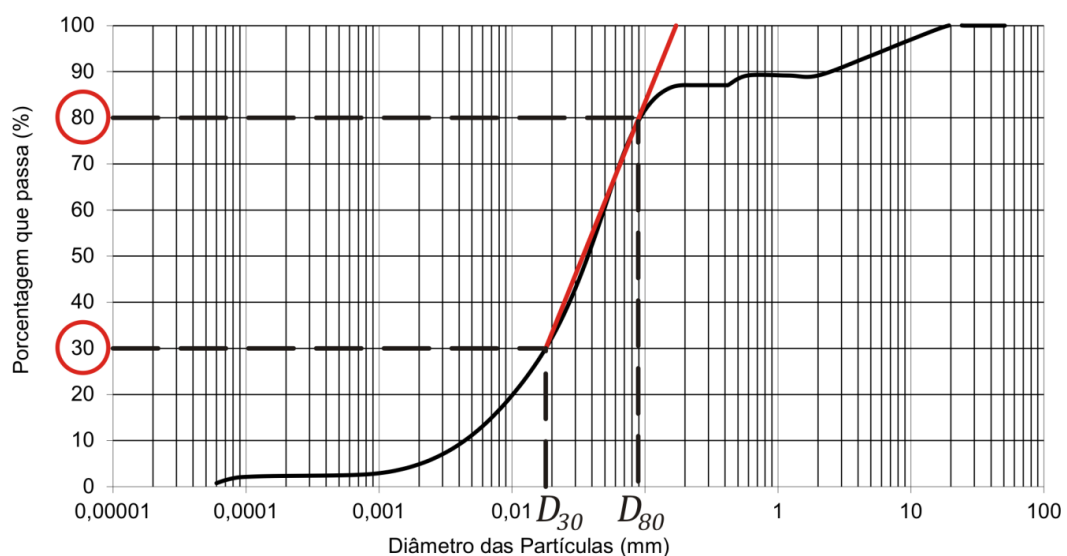


Figura 3.3: Inclinação da curva granulométrica

O termo x , correspondente ao raio do grão de solo equivalente ao primeiro ponto de curvatura da curva granulométrica (r_g), pode ser então calculado da seguinte forma:

$$r_g = 10^{(100-b)/i} \quad (3.35)$$

O raio do poro (r_p) equivalente ao raio do grão de solo pode ser obtido seguindo a proposta de Arya e Dierolf (1989), reproduzida a seguir:

$$r_p = \sqrt{\frac{4 e r_g^3}{3 \alpha^*}} \quad (3.36)$$

Por fim, calcula-se o valor de sucção, equivalente ao raio do poro, pela equação de capilaridade:

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s \cos \phi}{r_p} \quad (3.37)$$

O valor de entrada de ar é então obtido multiplicando o valor de sucção por um coeficiente de correção (p_b) igual a 0,91.

3.2.3 Obtenção do grau de saturação e sucção residuais

A sucção residual do solo pode ser obtida pelas seguintes equações, propostas por Aubertin *et al.* (2003), multiplicadas por um coeficiente de correção (p_r) igual a 1,33:

$$\psi_r = 0,86. h_{co,G}^{1,2} \quad (3.38)$$

$$\psi_r = 0,86. \left(\frac{\xi}{e}\right)^{1,2} w_L^{1,74} \quad (3.39)$$

O grau de saturação residual é obtido pelo método de previsão de Aubertin *et al.* (2003) tomando como base a sucção residual do solo obtida anteriormente e multiplicando este valor por um valor de correção (p_s) igual a 1,68.

Os valores de correção sugeridos (p_b , p_p , p_s) foram calculados para otimizar a aproximação entre a curva prevista e os pontos experimentais. Eles funcionam como uma correção pela utilização de vários métodos integrados, e foram determinados a partir do banco de dados de solo do presente trabalho utilizando a ferramenta solver do Microsoft Excel. Após a

determinação dos quatro dados de entrada, aplica-se a equação de ajuste e obtém-se a CCSA.

3.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVISÃO AO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de previsão de curva característica solo-água obtidos pelos três métodos já existentes (ARYA E PARIS, 1981; ARYA E DIEROLF, 1989; E AUBERTIN *et al.*, 2003) e pelo novo método proposto pelo autor (citado como Silva Júnior). Os solos analisados serão os solos de Aparecida de Goiânia, Brasília, e Canadá apresentados no segundo capítulo. A planilha eletrônica Microsoft Excel foi utilizada na aplicação dos métodos.

Primeiramente se preocupou em selecionar qual método de ensaio de granulometria resultaria em melhores resultados de previsão. Pressupõe-se que os diversos métodos de determinação da curva granulométrica resultam em variados nível de agregação das amostras. Questiona-se qual nível de agregação melhor representa o solo. Obviamente que o julgamento de qual nível de agregação é mais adequado não pode ser desvinculado de eventuais imperfeições nos modelos de previsão em si. Tais imperfeições são relacionadas com as simplificações de cada modelo.

Da Figura 3.4 a Figura 3.9 são apresentados os resultados de previsão para o solo de Aparecida de Goiânia a partir dos diversos métodos de ensaio de granulometria, considerando apenas o material mais raso do perfil. Pode-se observar que as granulometrias obtidas pelo granulômetro a laser, apesar de abrangerem uma faixa maior de diâmetros e possuir uma maior quantidade de pontos, resultaram em piores resultados de previsão se comparados aos resultados de previsão que tiveram como dados de entrada as granulometria obtidas pelos métodos convencionais.

Comparando os resultados de previsão obtidos a partir de granulometrias convencionais, a granulometria com defloculante resultou em curvas mais próximas dos dados experimentais. A Figura 3.4 apresenta as curvas citadas. Ainda analisando a Figura 3.4, é possível notar que os métodos de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989) forneceram curvas com formato bimodal se aproximando bem dos resultados experimentais, diferente das curvas obtidas pelos métodos de Aubertin *et al.* (2003) e Silva Júnior (2011), que resultaram em curvas unimodais. A curva obtida pelo método proposto pelo autor se aproxima mais dos pontos experimentais do que a outra curva unimodal. Este comportamento unimodal das

curvas obtidas pelo método proposto pelo autor já era esperado, já que o método é baseado em uma curva de ajuste unimodal com dois pontos de curvatura.

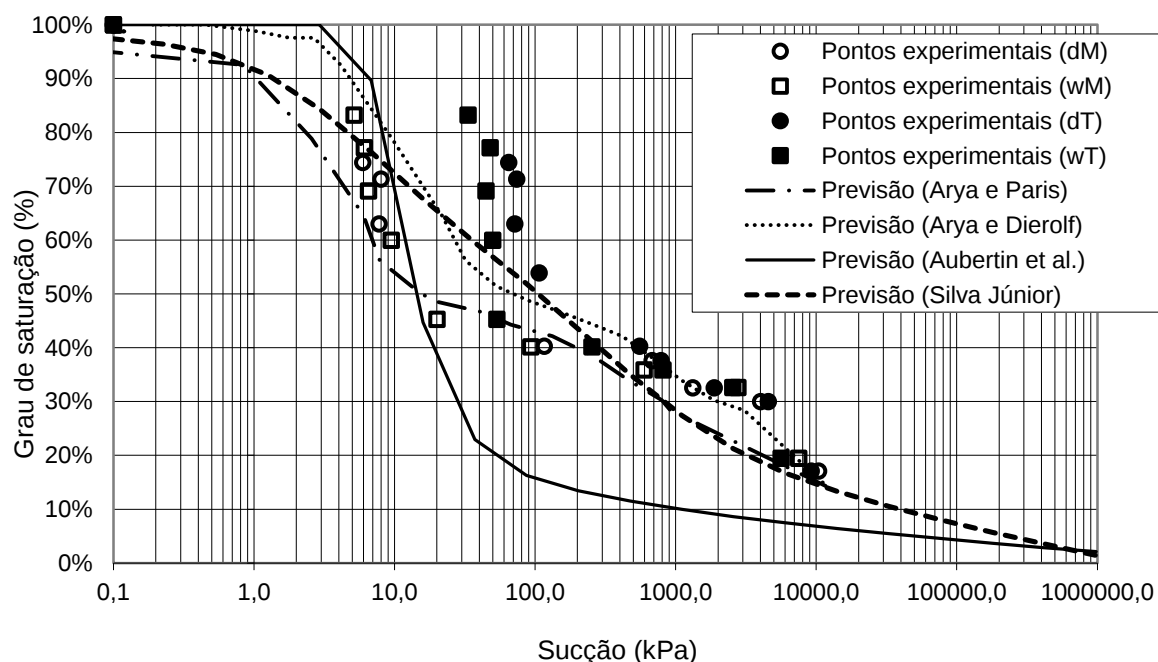


Figura 3.4: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica "ABNT wncd" do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)

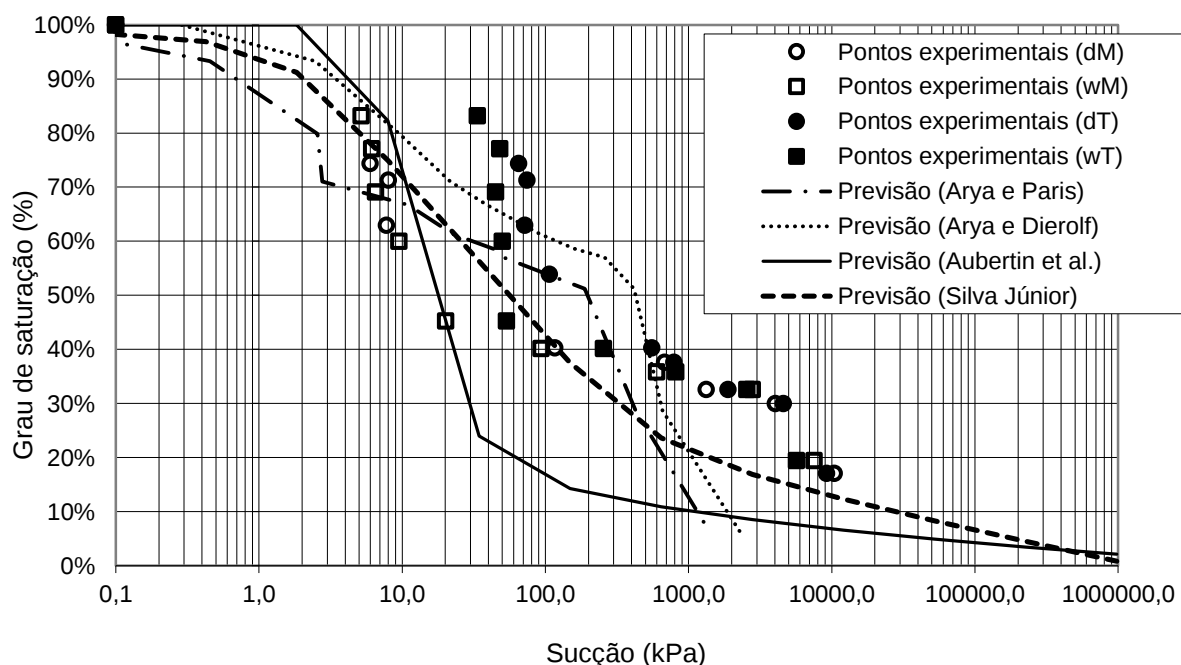


Figura 3.5: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica "ABNT wnsd" do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)

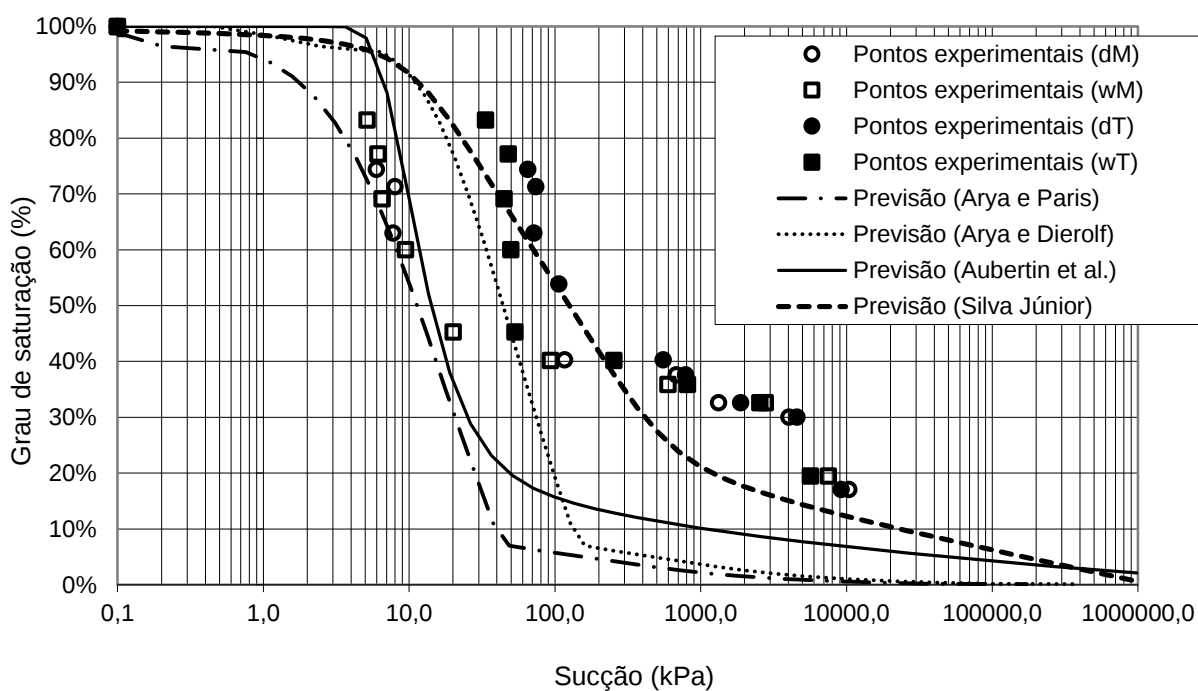


Figura 3.6: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “GL wncdcu” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)

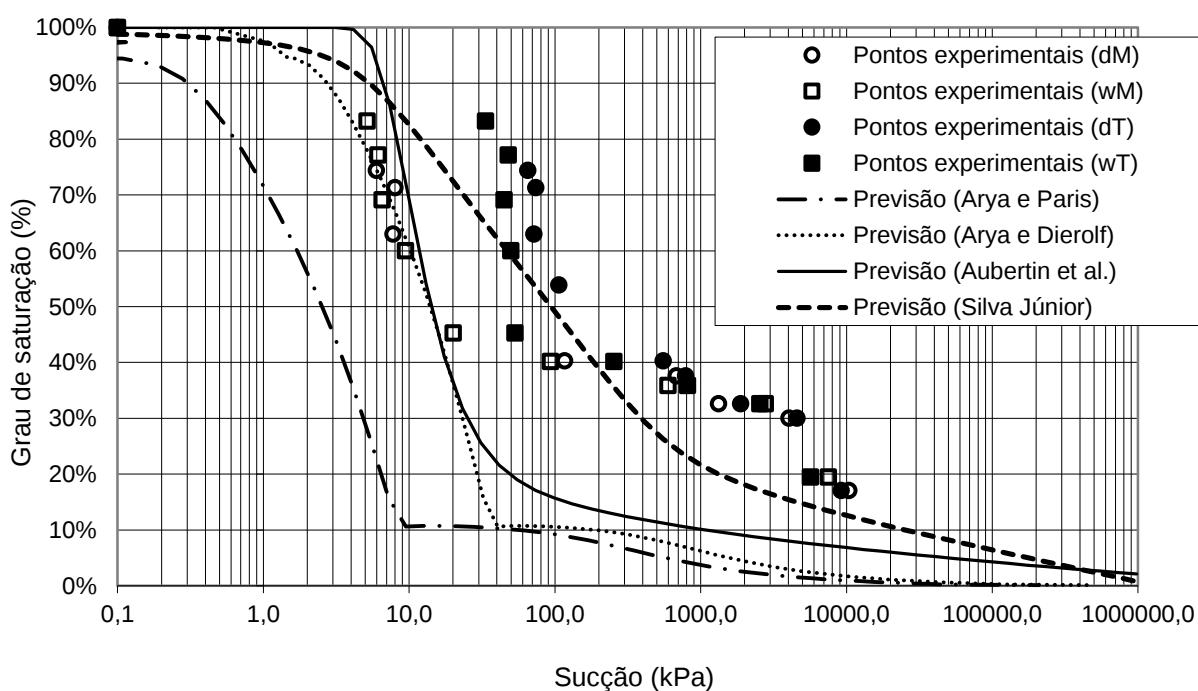


Figura 3.7: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica “GL wncdsu” do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)

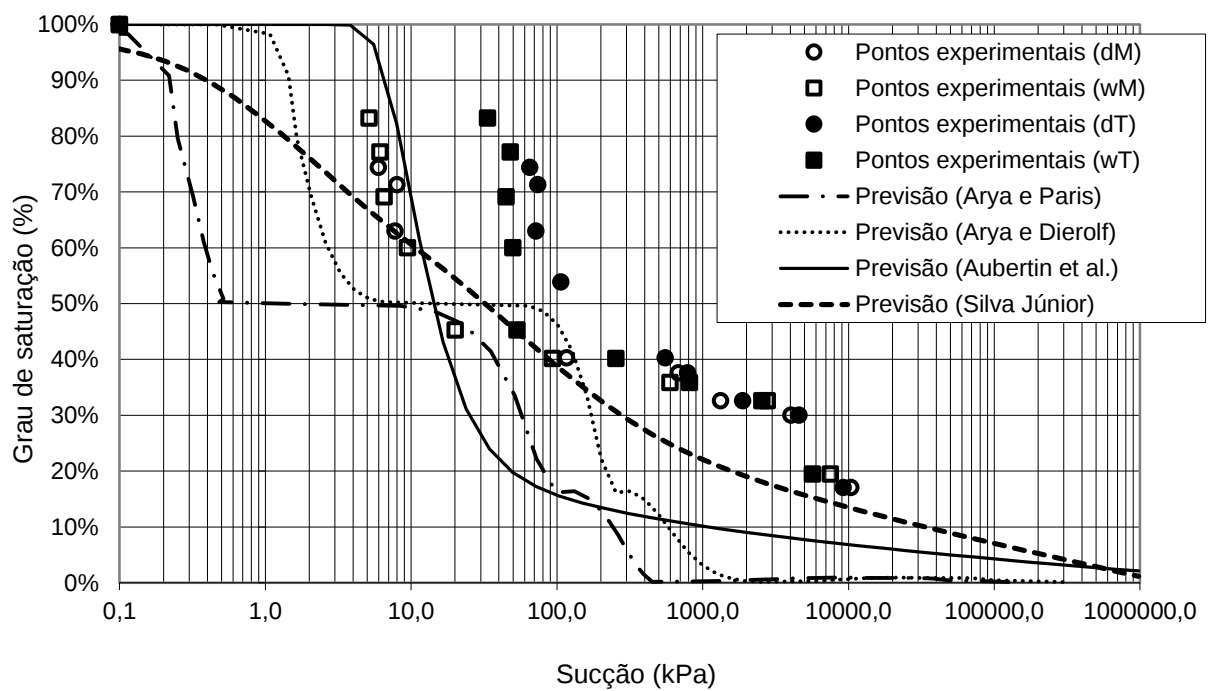


Figura 3.8: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica "GL wnsdcu" do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)

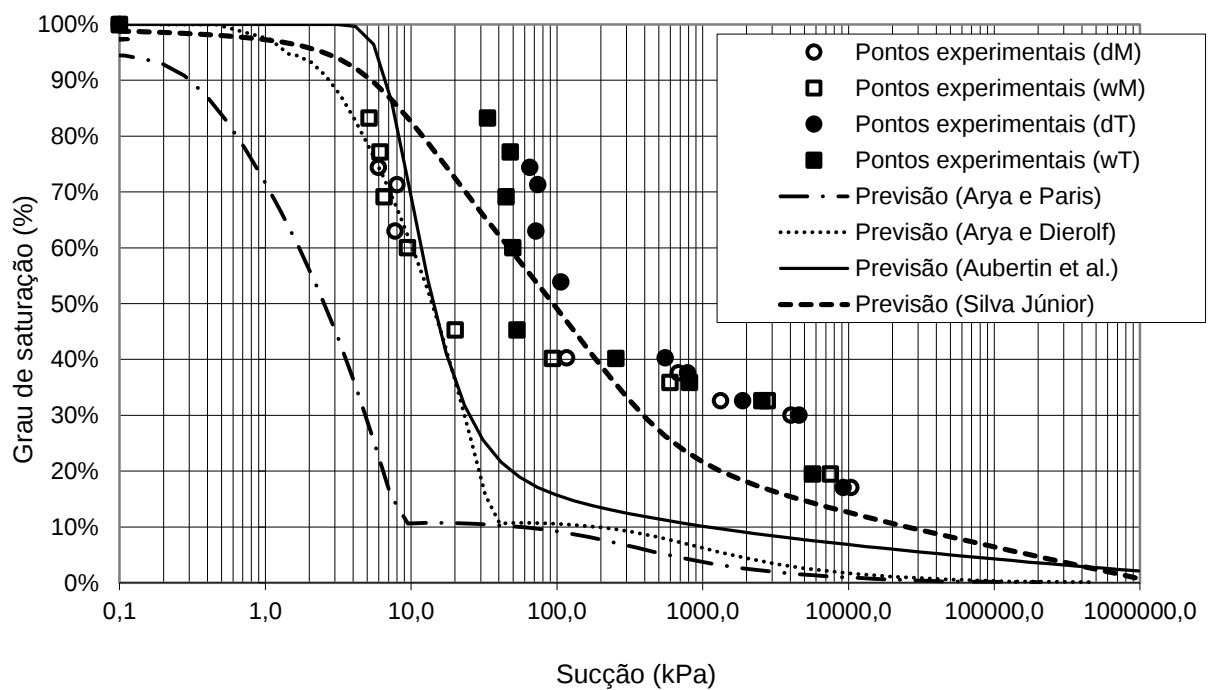


Figura 3.9: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica "GL wnsdsu" do solo de Aparecida de Goiânia (1,0 a 1,5m)

Também foi observado para o solo de Brasília, granulometrias convencionais com defloculante resultando em melhores curvas de previsão, se comparadas às obtidas pelas granulometrias convencionais sem defloculante. Devido tais resultados, o presente trabalho focará nas curvas previstas através de granulometrias convencionais com defloculante.

Da Figura 3.10 a Figura 3.13 são apresentadas as curvas características solo-água obtidas pelos quatro métodos de previsão, para quatro profundidades do perfil de solo de Aparecida de Goiânia. O método de previsão proposto pelo autor apresentou as melhores curvas em todas as profundidades, tendo como base os dados experimentais de sucção matricial. Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989) apresentaram também previsões próximas aos dados experimentais de sucção matricial. O método de Aubertin *et al.* (2003) resultou em curvas dispersas dos pontos experimentais, sendo mais representativas em regiões de baixo valor de sucção.

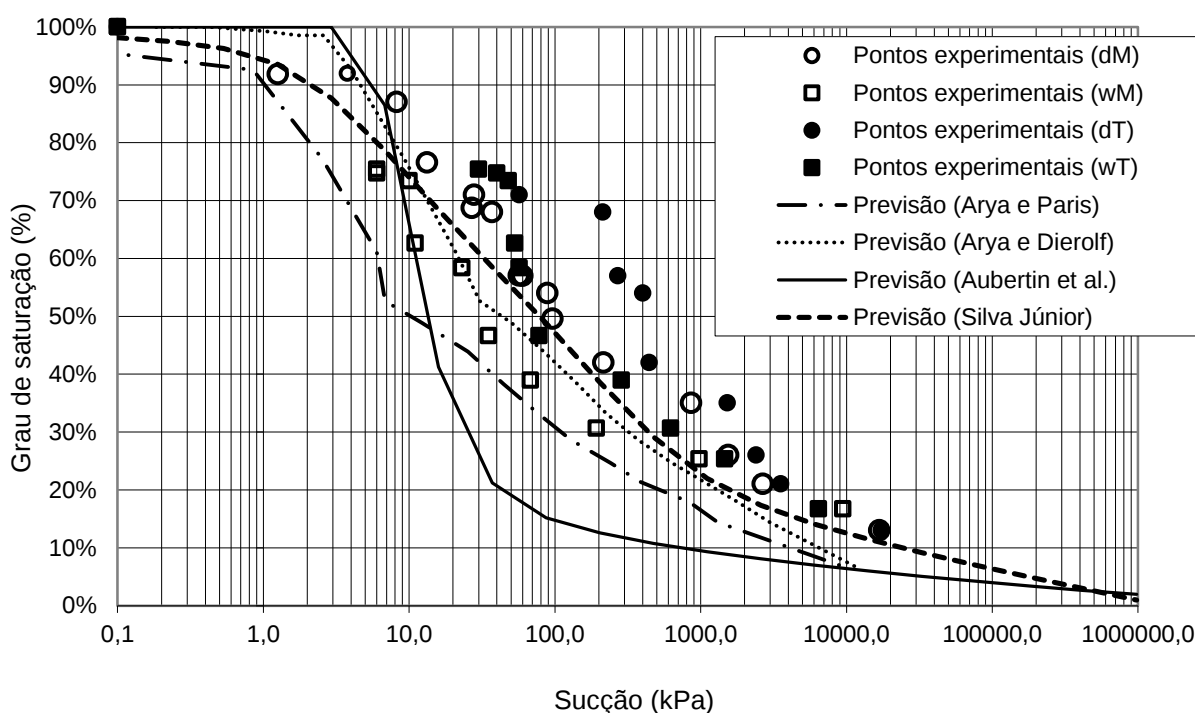


Figura 3.10: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (2,0 a 2,4m)

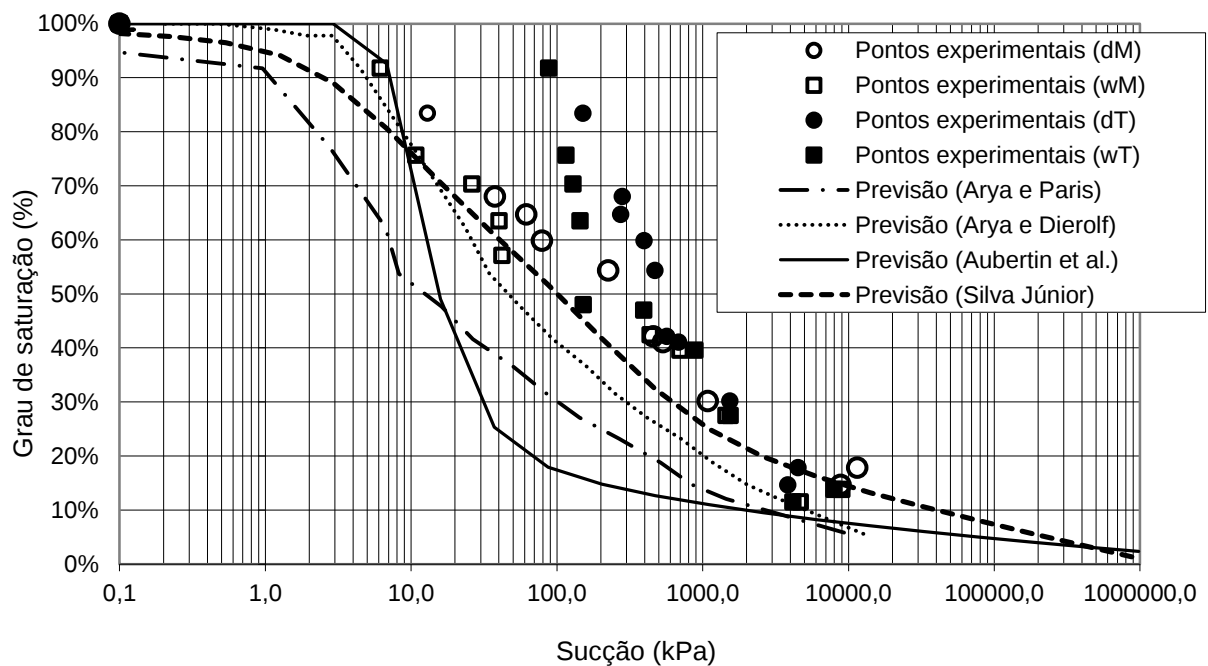


Figura 3.11: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (3,0 a 3,3m)

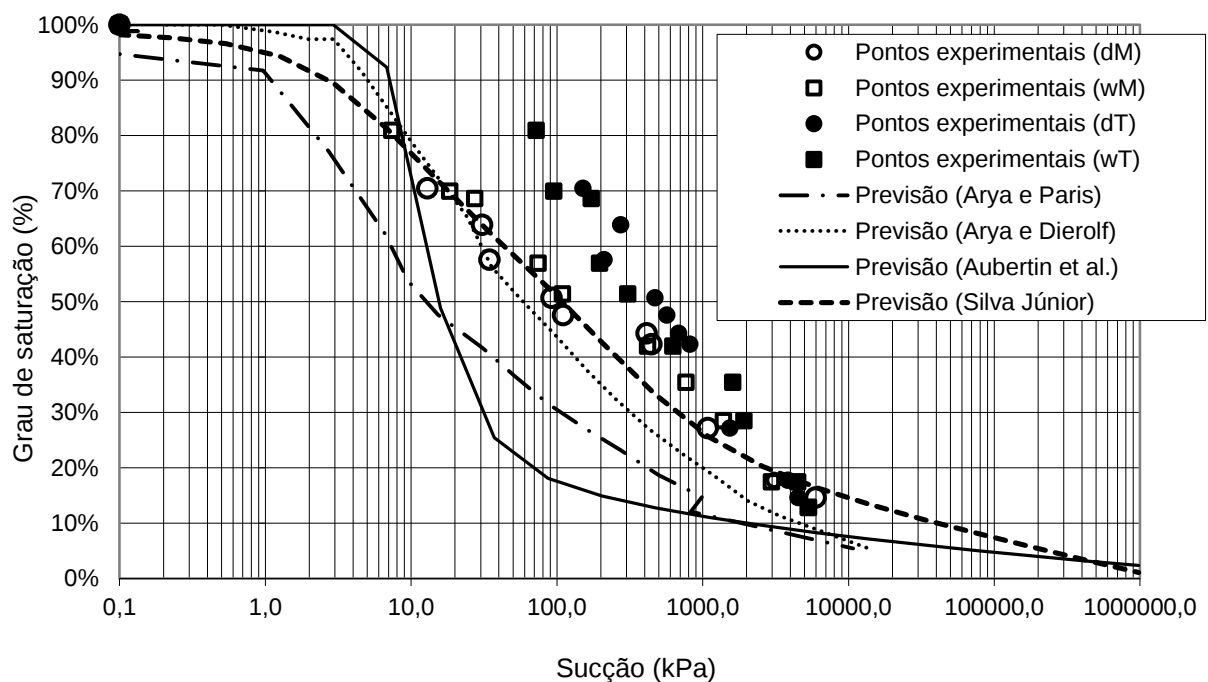


Figura 3.12: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (3,9 a 4,3m)

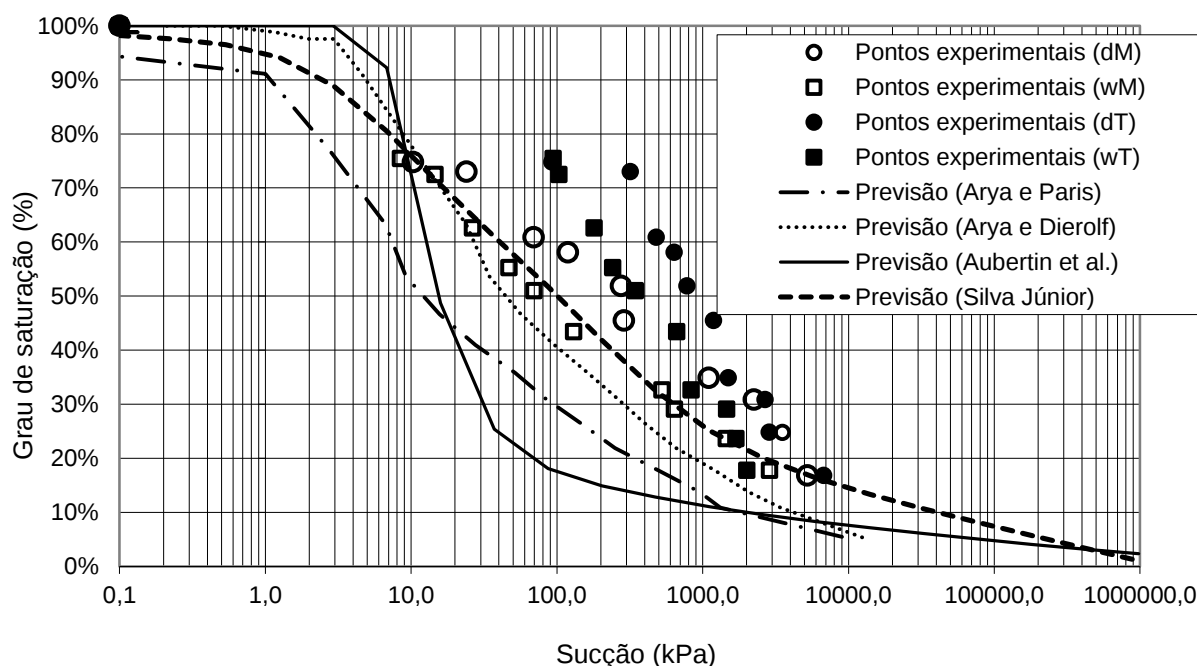


Figura 3.13: Previsão de curva característica solo-água a partir da curva granulométrica com defloculante do solo de Aparecida de Goiânia (4,6 a 4,9m)

3.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVISÃO AO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNB

As previsões de CCSA para nove profundidades diferentes do perfil de solo de Brasília são mostradas da Figura 3.14 a Figura 3.22. Aubertin *et al.* (2003) apesar de ser o método que mais se aproxima dos valores de entrada de ar sugeridos pelos dados experimentais, é o método que resultou em piores previsões analisando todo conjunto de pontos experimentais. Os outros três métodos resultaram em curvas de previsões que se aproximam muito bem dos dados experimentais.

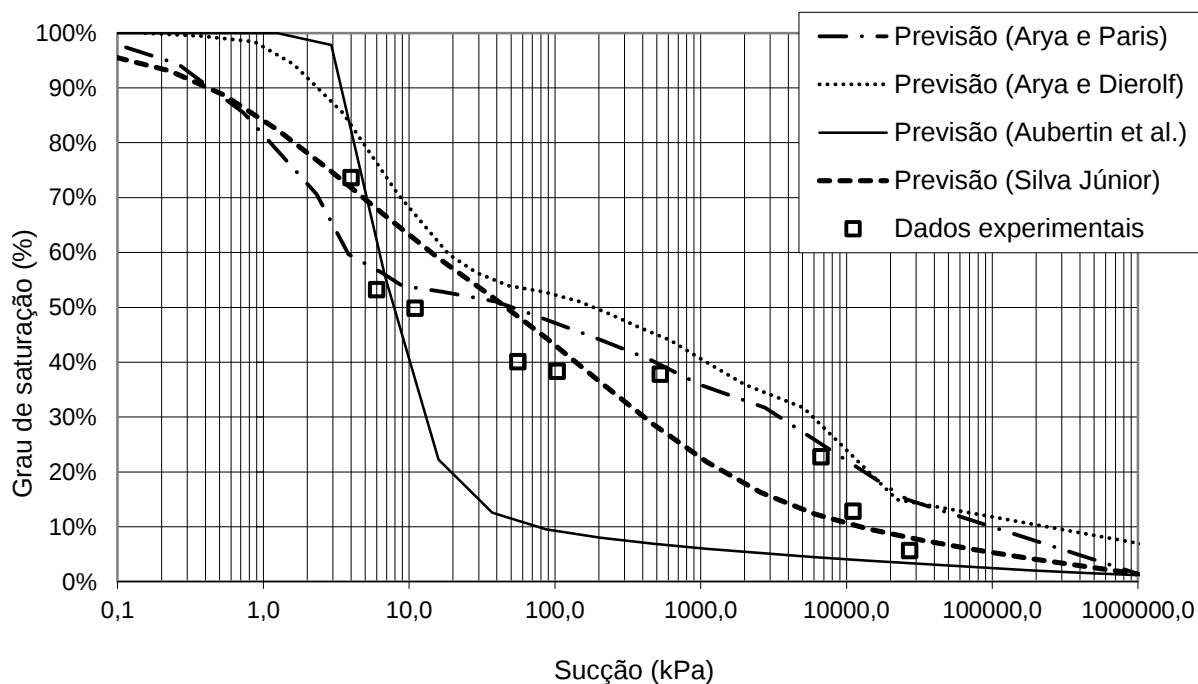


Figura 3.14: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (1m)

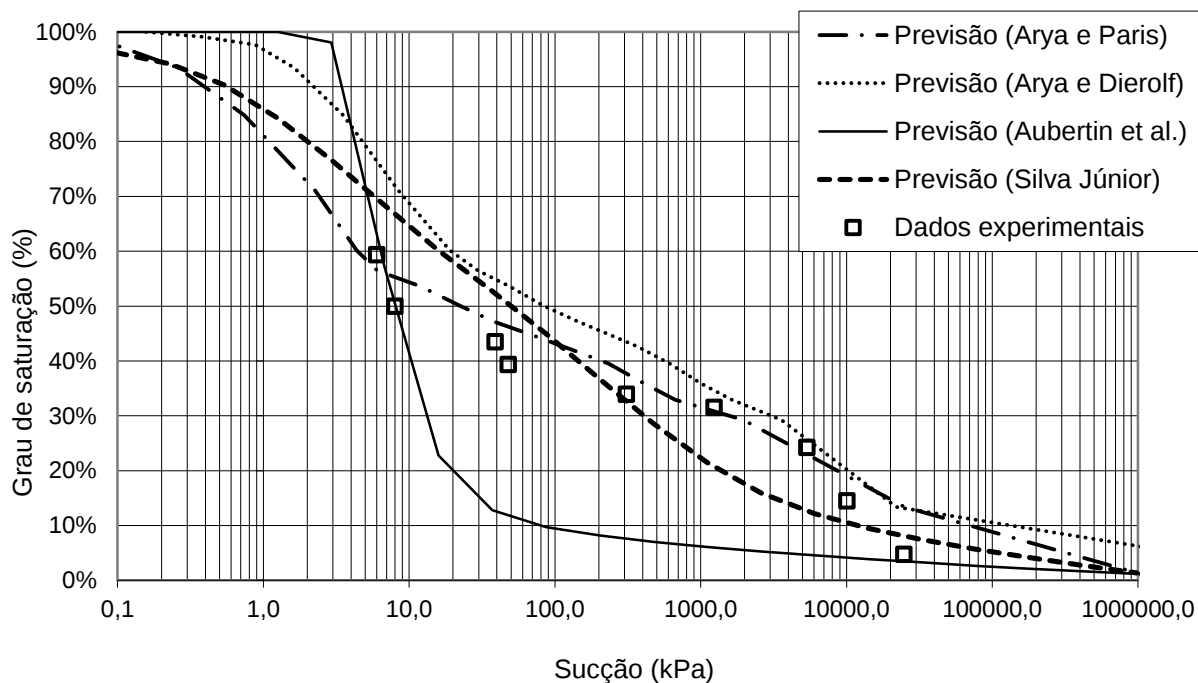


Figura 3.15: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (2m)

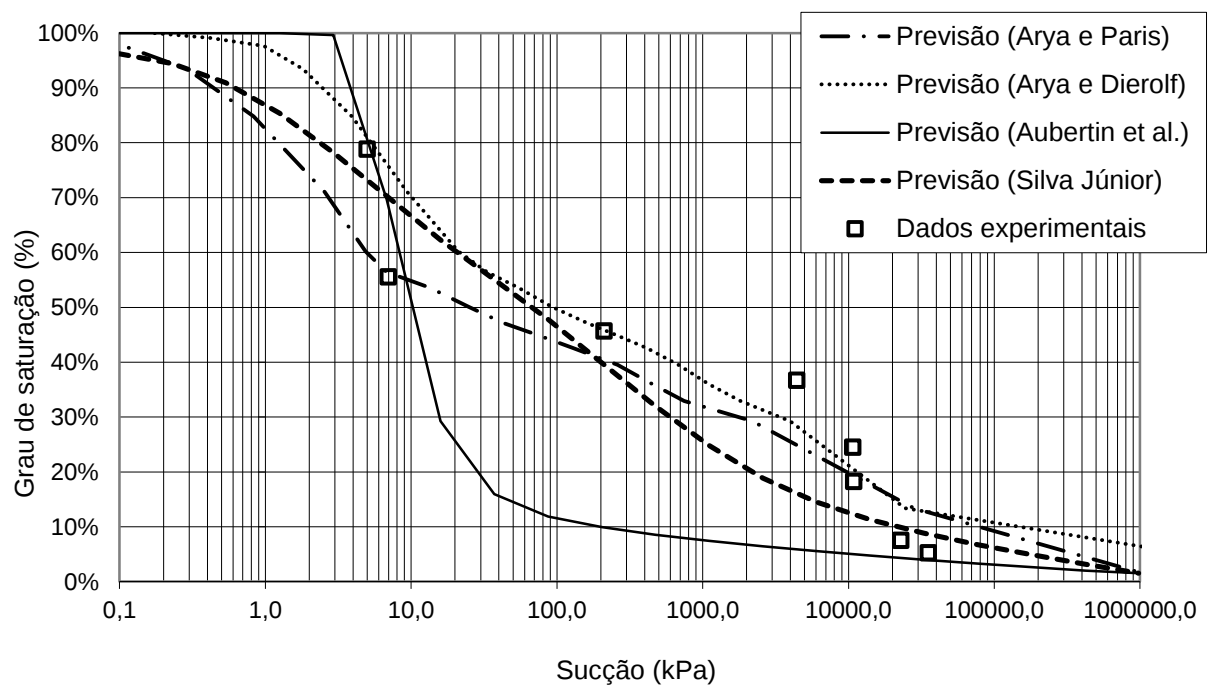


Figura 3.16: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (3m)

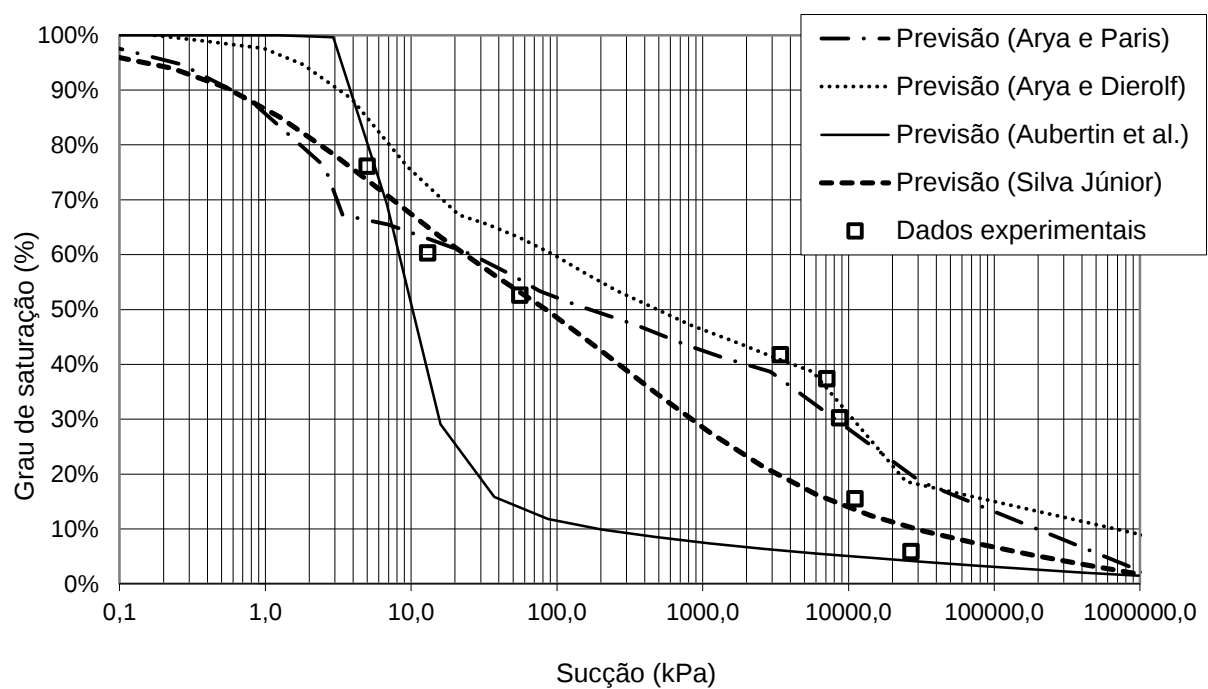


Figura 3.17: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (4m)

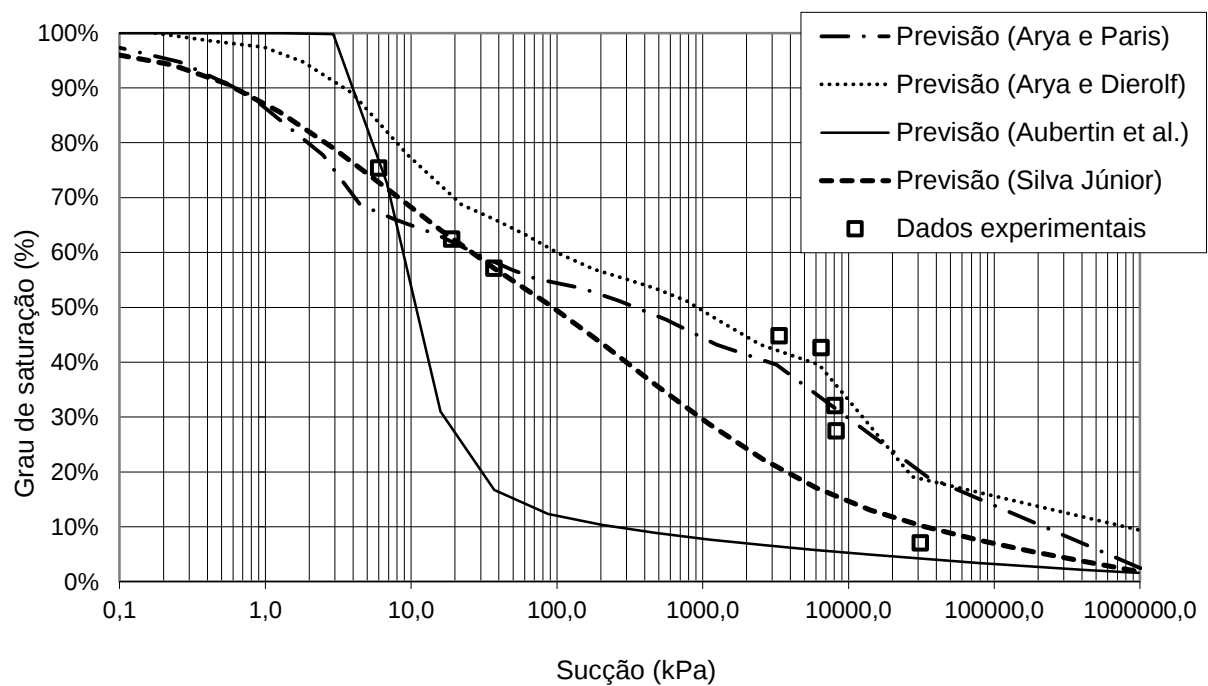


Figura 3.18: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (5m)

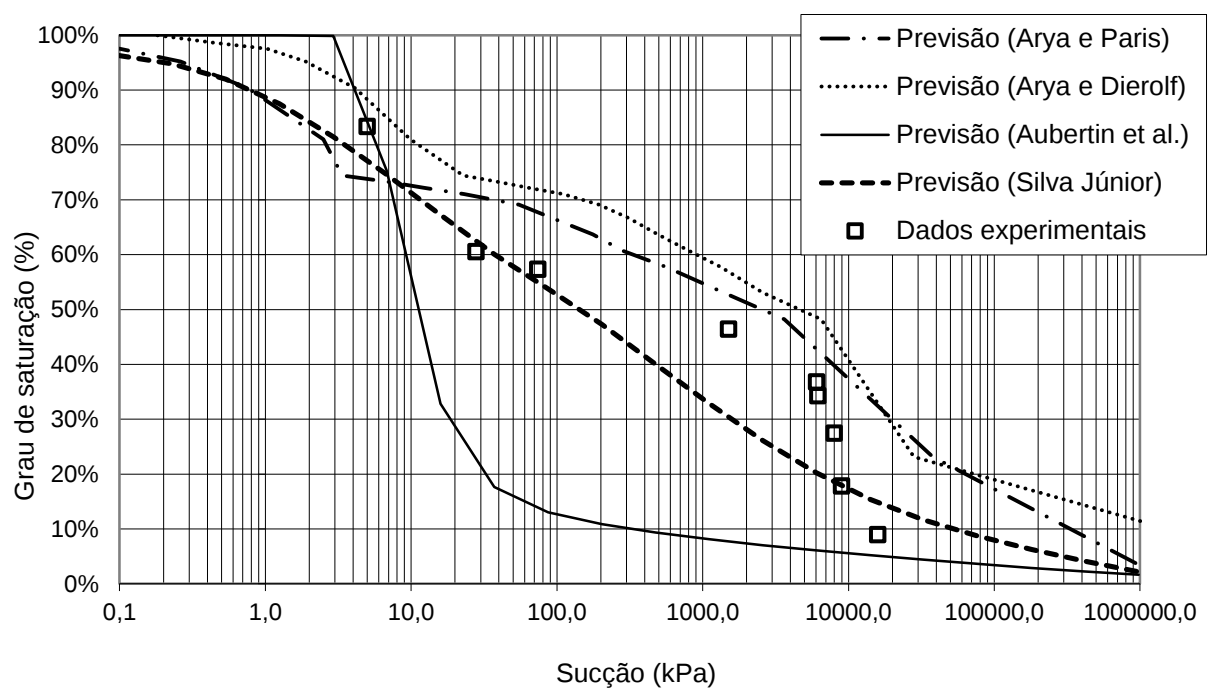


Figura 3.19: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (6m)

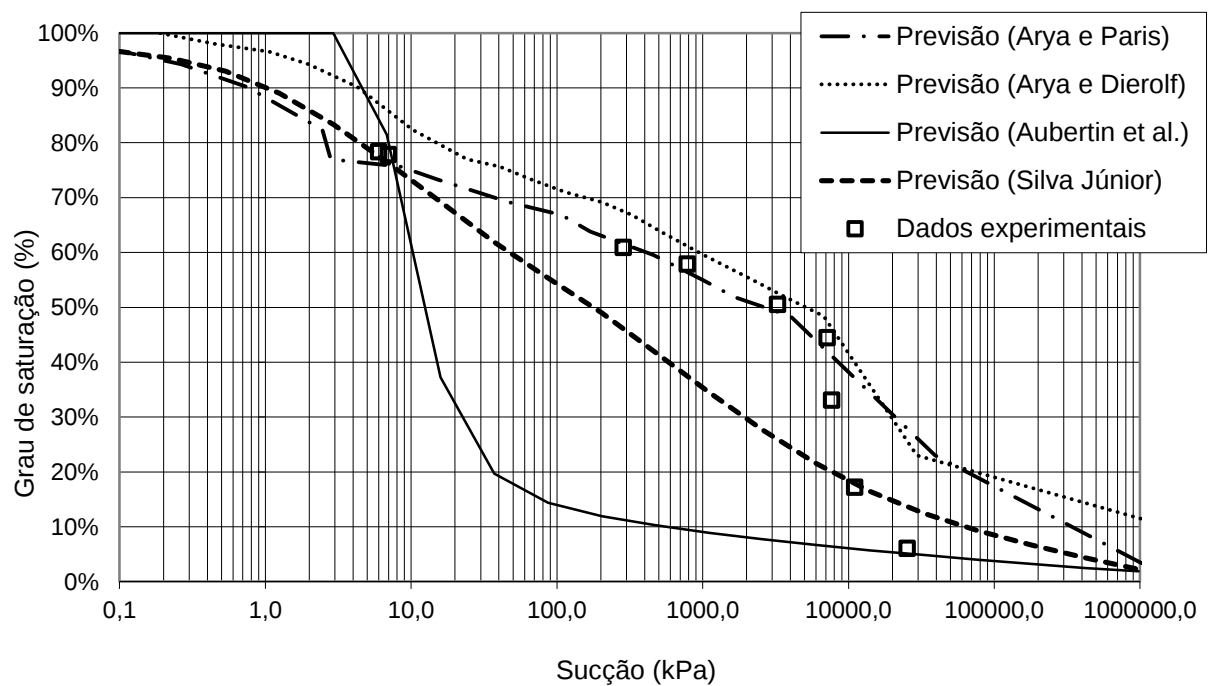


Figura 3.20: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (7m)

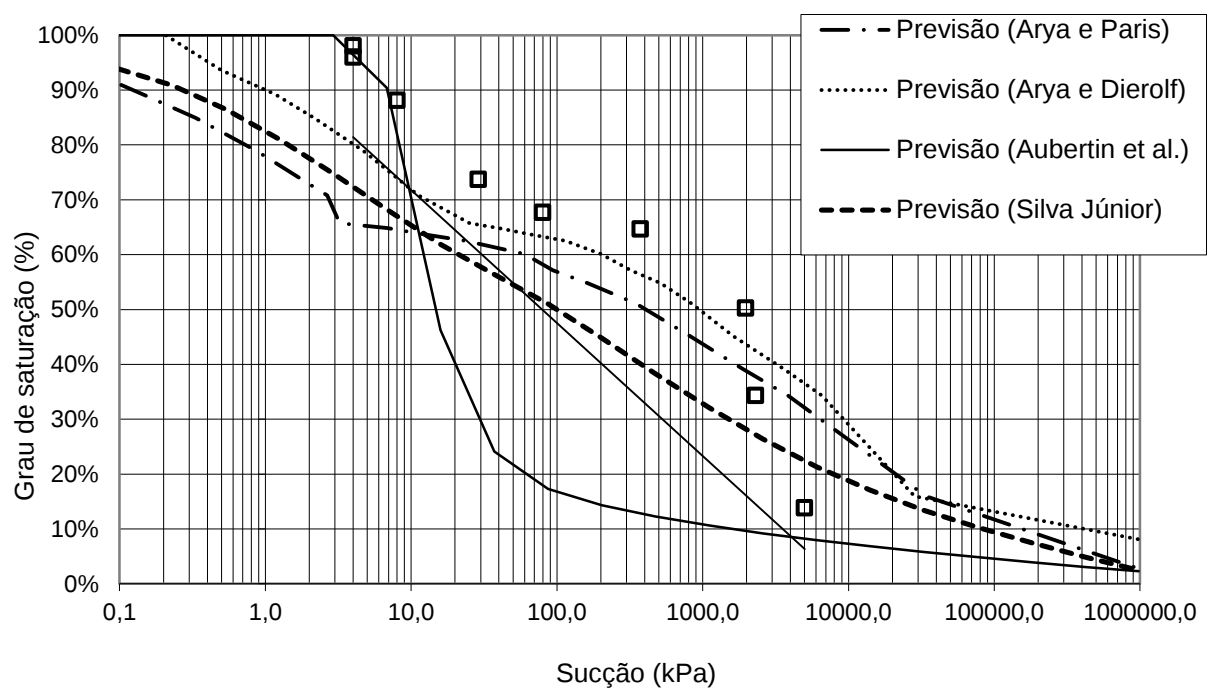


Figura 3.21: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (8m)

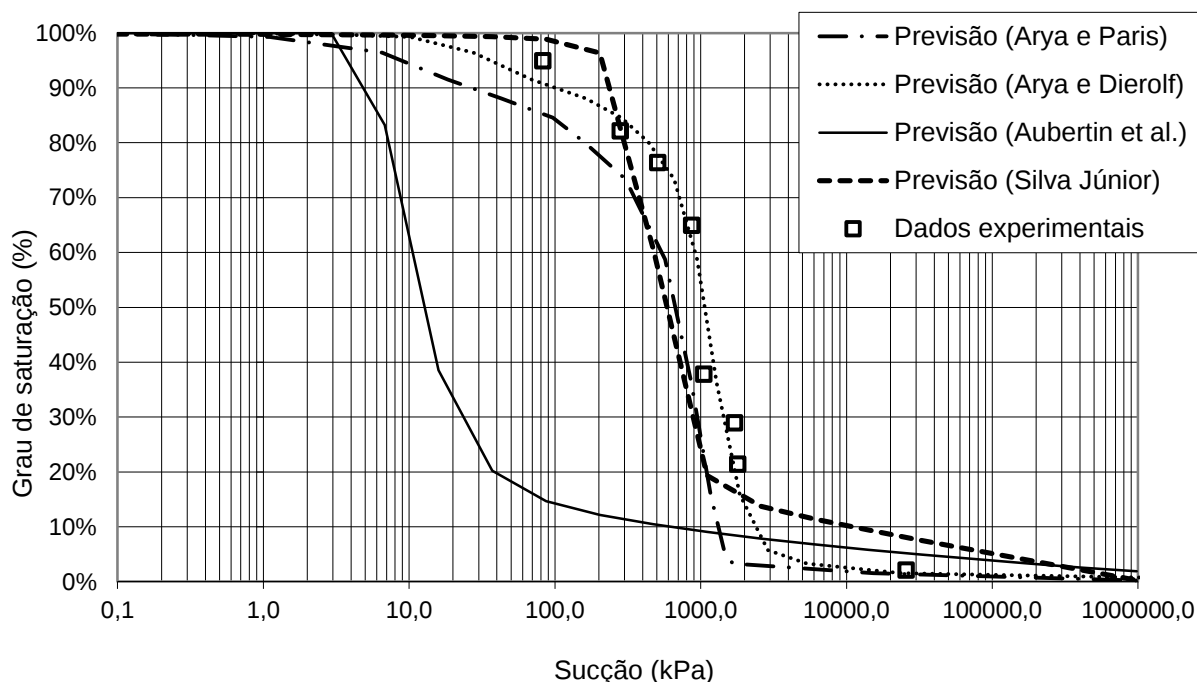


Figura 3.22: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do solo de Brasília (10m)

São apresentadas da Figura 3.23 a Figura 3.25 as previsões de CCSA dos solos canadenses utilizando os quatro métodos. Para a areia de Breaver Creek, os quatro métodos apresentaram previsões razoáveis. O método de Arya e Paris (1981) foi o método que resultou na pior previsão. As previsões de CCSA para a argila de Regina foram pouco precisas. Todas as curvas previstas apresentaram um formato semelhante a uma curva imaginária plotada sobre os pontos experimentais, porém os valores de entrada de ar foram muito menores ao valor real indicado pelos dados experimentais. Para o silte de Saskatchewan, a melhor previsão foi obtida pelo método de Arya e Dierolf (1989). A curva de previsão obtida pelo método proposto pelo autor acompanhou inicialmente os pontos experimentais com baixa sucção, porém mostrou uma deficiência para acompanhar os pontos experimentais com sucções maiores do que 10 kPa.

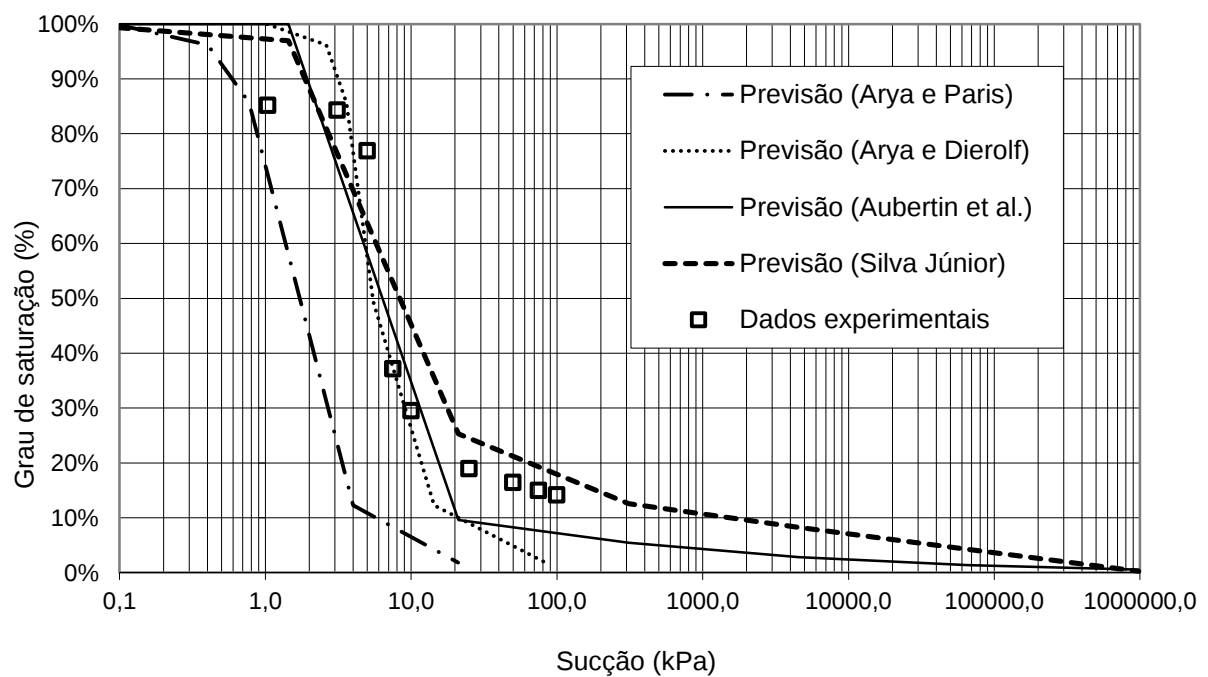


Figura 3.23: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante da areia de Breaver Creek

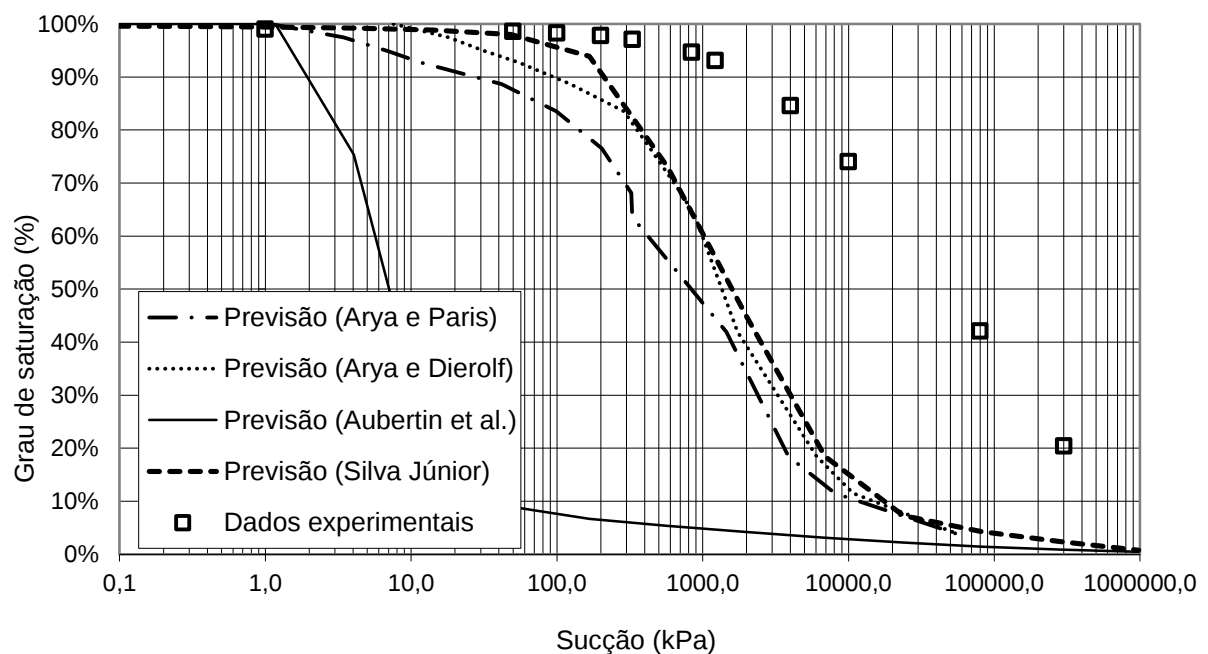


Figura 3.24: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante da argila de Regina

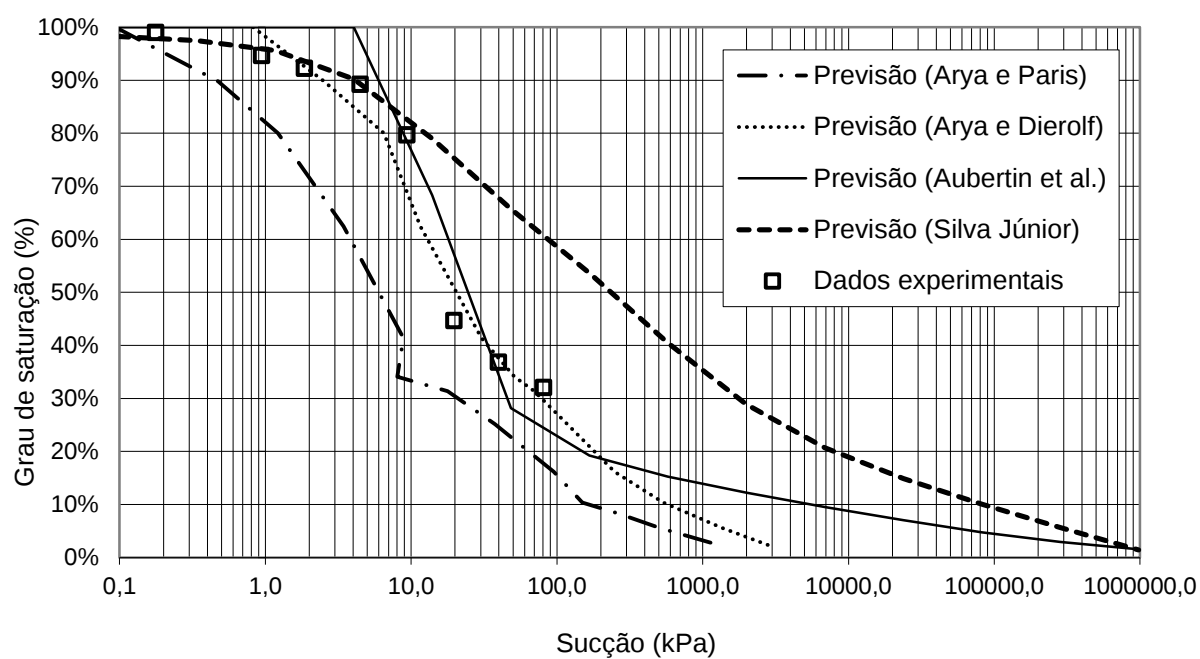


Figura 3.25: Previsão de curva característica solo-água a partir da granulometria com defloculante do silte de Saskatchewan

4 MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DO SOLO E ATMOSFÉRICAS NO CAMPO EXPERIMENTAL DE FURNAS

Com o objetivo de avaliar a interação solo-atmosfera e seus impactos nas condições de sucção e umidade ao longo da profundidade, foi estabelecido um campo experimental nas dependências do Departamento de Apoio Técnico e Controle de Furnas. Além do monitoramento das condições de campo, o estudo teve foco especial na avaliação do desempenho de diversas técnicas de medição de sucção.

Será apresentada inicialmente uma revisão de literatura acerca dos principais métodos de medição de sucção. Em seguida, será apresentada a metodologia desenvolvida nesta pesquisa para o monitoramento das condições de campo. Finalmente, serão apresentados e discutidos os dados obtidos durante o período de monitoramento. Por fim, será realizada a comparação entre as diversas técnicas de medição de sucção adotadas. Os dados são interpretados e relacionados com as condições atmosféricas. Serão apresentadas considerações acerca das flutuações de sucção e umidade observadas.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DOS MÉTODOS DISPONÍVEIS PARA MONITORAMENTO DA SUCÇÃO EM CAMPO

A medição de sucção no campo representa um grande desafio para a engenharia geotécnica devido à variedade de limitações nos procedimentos de ensaio, necessidade de recursos laboratoriais e o alto custo para execução da maioria dos métodos existentes. Os principais métodos de medição de sucção e suas respectivas faixas de medição estão apresentados na Figura 4.1. Os principais métodos de medição de sucção total são: papel filtro e psicrômetro. Os principais métodos de medição de sucção matricial são: tensiômetro, sensor de condutividade térmica, e papel filtro. O método que abrange uma maior faixa de sucção é o método do papel filtro; porém para baixas sucções sua precisão é pequena.

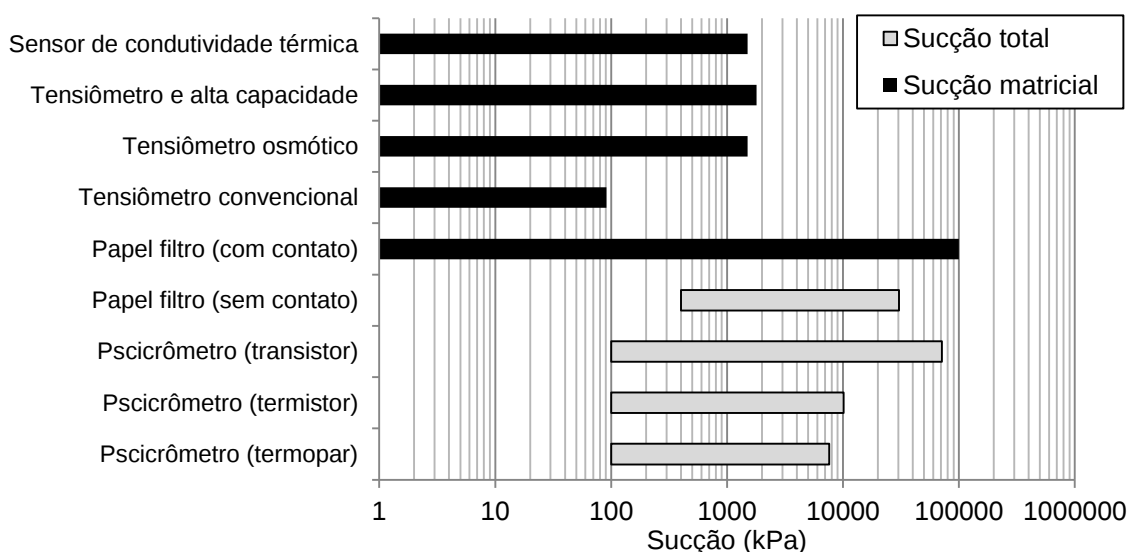


Figura 4.1: Métodos de medição de sucção total e matricial

4.1.1 Papel filtro

O método do papel filtro constitui um meio indireto para medição de sucção. Segundo Leong, He e Raharjo (2002), dentre as principais vantagens da técnica, pode-se citar a simplicidade, o baixo custo e a possibilidade de medir um grande intervalo de sucção. Este método pode ser utilizado tanto em laboratório como em campo.

O método baseia-se no princípio que um papel filtro quando colocado em um mesmo ambiente que um solo, com alguma umidade e sucção, atinge após um determinado período de tempo um estado de equilíbrio de sucção com o solo. O fluxo de umidade entre o papel e o solo pode ocorrer através de fluxo capilar ou fluxo de vapor. O fluxo capilar surge através do contato direto dos poros do solo com as fibras de papel, sem que a água perca sua continuidade. A sucção medida, neste caso, é a parcela matricial. O fluxo de vapor ocorre quando as moléculas de água precisam vencer as forças osmótica e capilar para sair dos poros. Para que ocorra este fluxo, é preciso que não exista contato direto entre o papel filtro e o solo, o que impede o fluxo de sais presentes na água. Neste outro caso é medida a sucção total.

Ensaio com o papel filtro no laboratório são mais comuns do que ensaios no campo. Isto aparentemente acontece devido à maior dificuldade de controle das condições de manuseio do papel filtro em campo e um tempo de equilíbrio de sucção, entre o papel filtro e o solo, relativamente alto considerando as constantes mudanças climáticas.

Fredlund (1989) comparou resultados entre a sucção medida pelo método do papel filtro e pelos psicrômetros. A proposta de Fredlund (1989) para medição *in situ* de sucção total no subsolo é mostrada na Figura 4.2. De acordo com a metodologia proposta pelo autor os papéis filtro devem ser retirados da cápsula após uma semana e então secos para medição de umidade. Novos papéis filtro podem ser instalados para equalização por uma semana. Fredlund (1989) não oferece detalhes sobre a forma de instalação e acomodação dos papéis filtro ou sobre cuidados no manuseio dos papéis.

De acordo com Fredlund (1989), os resultados obtidos com o papel filtro sem contato direto com o solo, se aproximaram bem dos resultados obtidos pelo psicrômetro, indicando que a sucção total foi medida. Porém, os resultados obtidos com o papel filtro em contato direto com solo, não foram consistentes quando comparados com os resultados de sucção total. Isto indica um pobre contato entre o papel filtro e a amostra de solo o que resulta na medição de sucção total ao contrário da sucção matricial. O autor ressalta a possibilidade de que tenha havido pobre contato entre o papel filtro e o solo, resultando na medição de sucção total ao invés de sucção matricial.

Existe, de fato, dificuldade em obter um bom contato entre o solo e o papel filtro. Por esta razão, a técnica do papel filtro é frequentemente utilizada para medir apenas a sucção total. Vários autores, tais como Fredlund e Rahardjo (1993) e Marinho e Oliveira (2006), relatam as dificuldades de obter um efetivo contato entre o papel filtro e o solo em ensaios de laboratório. No campo as dificuldades são ainda maiores.

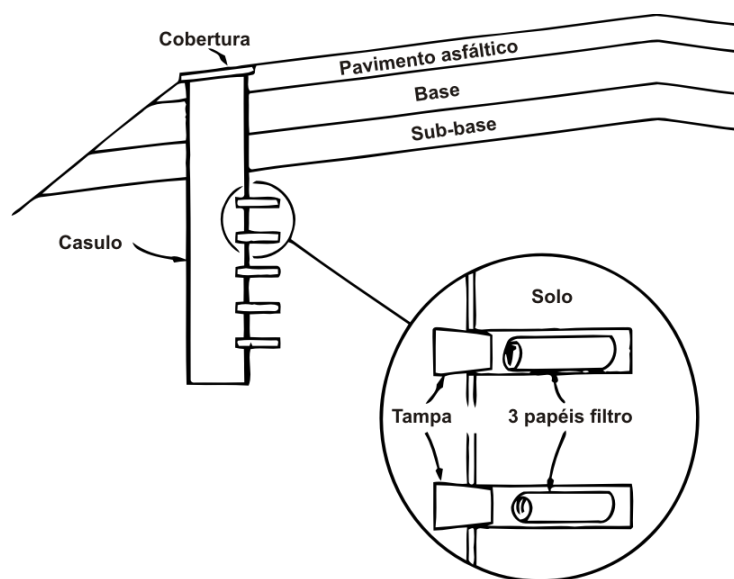


Figura 4.2: Medição de sucção total *in situ* (Fredlund, 1989)

Crilly, Schreiner e Gourley (1991) também realizaram medições de sucção em campo, utilizando a técnica do papel filtro. Os autores descrevem três protótipos de instalação e duas instalações de monitoramento de estradas, que foram utilizados no Quênia (África). Os pontos que foram considerados centrais para o desenvolvimento de um novo sistema de medição de sucção foram:

- 1) O sistema deve ser barato, e possuir sensores descartáveis evitando gastos com segurança;
- 2) O sistema deve ser simples;
- 3) A célula do papel filtro deve ser lacrada para se evitar a perda de umidade. Segundo Chandler e Gutierrez (1986), em condições laboratoriais, o papel filtro úmido seca a uma velocidade de 1% por minuto;
- 4) Deve-se evitar excessivas variações de temperatura

O equipamento desenvolvido por Crilly, Schreiner e Gourley (1991) para instalação em campo do papel filtro é mostrado na Figura 4.3. A seção externa do equipamento abrange um tubo (A) inserido em um soquete (B). O soquete se encaixa sobre um tubo de pequeno diâmetro (C), cuja extensão (D) é perfurada e envolta com uma fina malha de aço inoxidável (E). Esta fina malha de aço serve para manter a câmara de medição limpa. O equipamento permite a utilização do papel filtro sem contato direto com o solo, sendo medida portanto a sucção total.

No centro da unidade interna há um tubo (F), que contém os papéis filtro, envolto por um eixo guia de alumínio (G), e seguro por um pequeno o-ring. A tampa do tubo (F), (H), é apoiada por uma tampa final removível, (I), protegido por um cano perfurado (J), e por dois pinos de metal (K). Este cano perfurado (J) se encaixa dentro de um reduzido soquete, L, que se modifica pela redução de dois o-ring ao redor da pequena seção, que se encaixa dentro de um cano principal mais largo, M. Este cano principal é usado para posicionar a unidade principal ao longo da parte externa. A posição do tubo de vidro é definida pelo cano de pequeno diâmetro, N, que percorre através do eixo guia, O, e é conectado a um soquete contendo dois o-rings, P, que mantém o tubo (F) em posição.

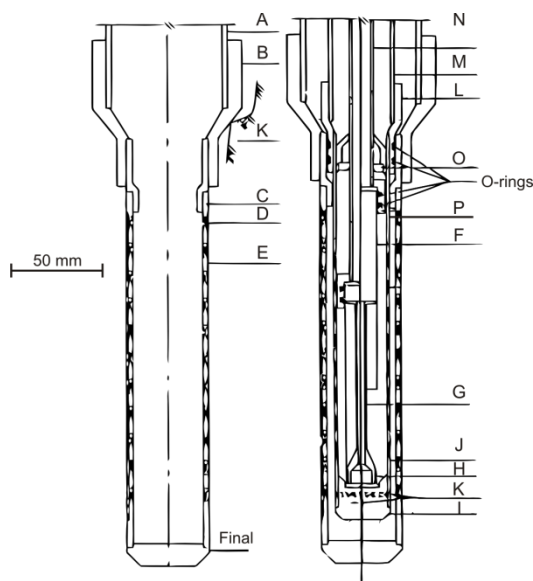


Figura 4.3: Equipamento para medição de sucção pelo método do papel filtro em campo (CRILLY, SCHREINER E GOURLEY, 1991)

Para operar o equipamento, a unidade interna é inserida em um orifício feito no solo e um selo é formado entre os o-rings da unidade interna e a parede interna da seção reduzida do buraco. O tubo F é mantido aberto enquanto a sucção do papel filtro se equaliza com a sucção da face de solo. Quando a unidade interna está pronta para ser removida, o tubo F é fechado e empurrado pelo pistão. Segundo os autores, um bom isolamento entre o anel da seção externa e o solo é crucial para a boa operação do equipamento. Os resultados de algumas medições obtidas são mostrados como sucção versus tempo na Figura 4.4. As sucções medidas em pontos diferentes mostram-se próximas uma das outras, e revelam uma tendência de aumento da sucção ao longo do tempo.

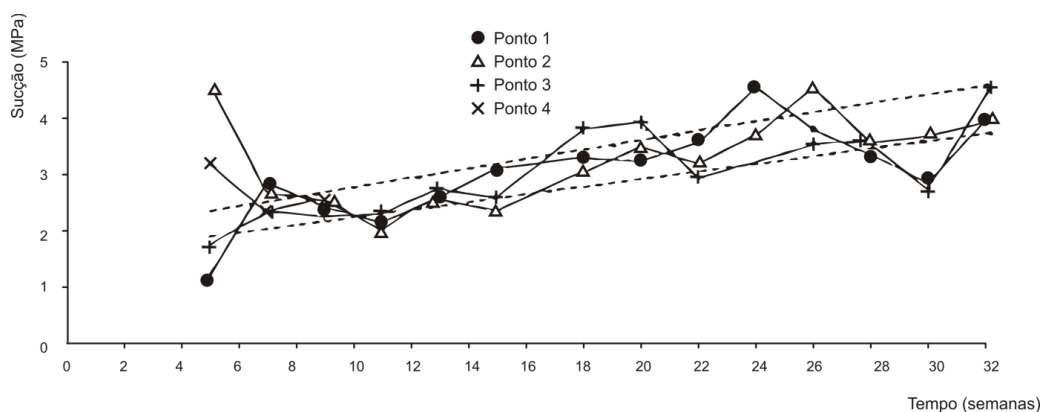


Figura 4.4: Resultados da medição de sucção pela técnica do papel filtro (CRILLY, SCHREINER E GOURLEY, 1991)

Gourley e Schreiner (1995) também utilizaram a técnica do papel filtro para medições de sucção em campo. O equipamento utilizado (Figura 4.5) foi baseado em Crilly, Schreiner e Gourley (1991). O papel filtro utilizado foi o Whatman nº 42.

A unidade de acesso externa inserida no solo utilizando a técnica baseada no penetrômetro (cone). Quando o cone guia é deslocado com relação ao cilindro perfurado, a seção de solo é exposta onde o papel filtro está localizado. Os papéis filtro são colocados em posição dentro de uma unidade interna recuperável que se encaixa na unidade externa. A unidade interna é colocada em posição aberta e os papéis filtro são expostos próximos à face do solo medindo-se assim a sucção total. Os autores observaram que o tempo de equilíbrio depende da sucção total presente no solo e a umidade inicial do papel filtro. A umidade do papel filtro, que inicialmente se encontra seco, aumenta até alcançar o equilíbrio com a umidade natural do solo próximo à câmara de medição.

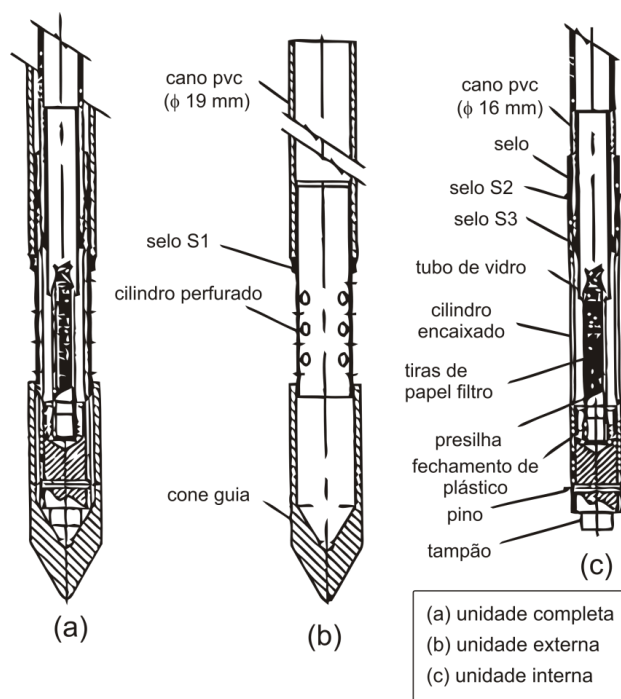


Figura 4.5: Equipamento desenvolvido para medição de sucção pelo método do papel filtro em campo
(GOURLEY E SCHREINER, 1995)

A Figura 4.6 mostra os resultados do ensaio de papel filtro realizado por Gourley e Schreiner (1995), para três tempos de equilíbrio: 3, 14 e 82 dias. A temperatura média de ensaio foi de 15°C. Segundo o presente autor os resultados confirmam a importância do tempo de exposição nos ensaios com papel filtro. Para três dias de equilíbrio, a umidade máxima atingida foi de 24% enquanto para 82 dias de calibração a faixa de umidade alcançada foi bem maior. O período de 82 dias, no entanto, aumenta muito o tempo total de ensaio sendo

pouco representativo, pois relaciona um único valor de sucção a um grande espaço de tempo. Um tempo de equilíbrio coerente seriam 14 dias, pois abrange uma grande faixa de umidade com um tempo relativamente menor.

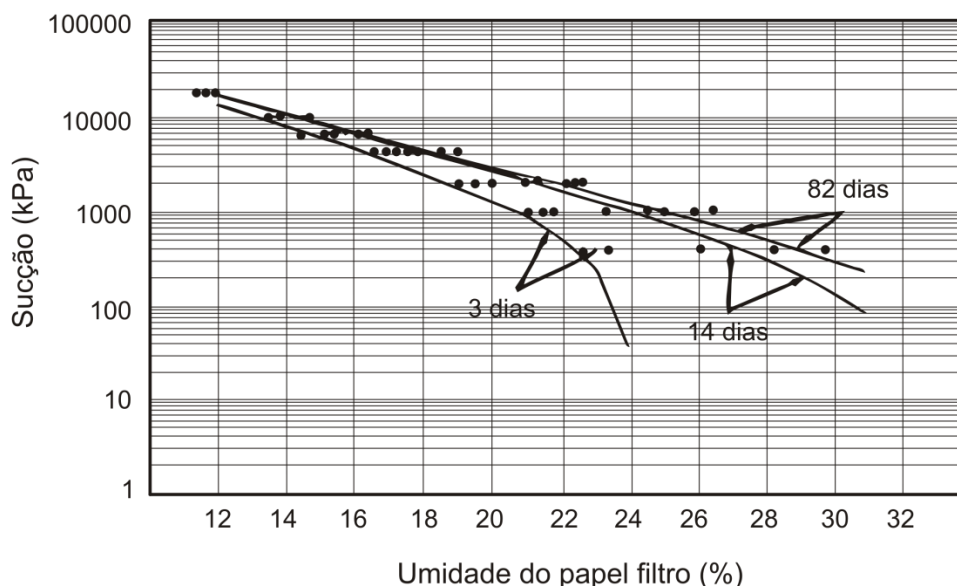


Figura 4.6: Resultados do ensaio de papel filtro para vários tempos de equilíbrio (GOURLEY E SCHREINER, 1995)

Wang e Lao (2002) mediram a sucção matricial de um solo colapsível encontrado na província de Shanxi na China utilizando a técnica do papel filtro. A província de Shanxi é localizada em uma área de clima árido à semi-árido, onde o solo se encontra em condição não-saturada. A curva característica solo-água deste solo foi obtida utilizando tensiômetro e sensor de sucção baseado em dissipação de calor. Um simples equipamento feito de um tubo interno de borracha com pressão de 60 kPa foi utilizado para criar um perfeito contato entre o papel filtro e a face de solo, e assim medir a sucção matricial de um poço escavado. A visão geral do equipamento é mostrada na Figura 4.7.

O equipamento compreende duas chapas de aço inoxidável (6 e 9), e duas conexões parafusadas (3). O diâmetro da chapa de aço superior é 80 mm e da chapa de aço inferior é 60 mm. O equipamento foi inserido em poços com diâmetro de 70 mm. A bolsa de borracha (5), com a válvula de ar (2) e pressão de gás (1), permitem gerar uma pressão interna de até 300 kPa, permitindo que o pedaço de papel filtro (8) esteja em contato com a face de solo exposto. O papel filtro com diâmetro de 50 mm foi incluído entre duas redes de alumínio (7) com aberturas quadrangulares de 10 mm. Externo às redes de alumínio e ao papel filtro existem dois anéis de borracha que separam o papel filtro da superfície interna do poço escavado.

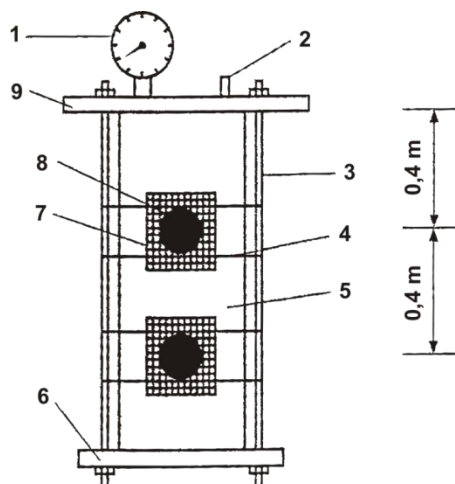


Figura 4.7: Equipamento utilizado para medição de sucção matricial pela técnica do papel filtro (WANG E LAO, 2002)

O equipamento descrito acima foi inserido pelos autores em um poço pré-escavado, ficando submetido a uma pressão de 60 kPa durante dez dias. Dois papéis filtro colocados em posições opostas foram localizados a uma profundidade de 0,4 m e outros dois, segundo a mesma configuração, a uma profundidade de 0,8 m. Dois tensiômetros foram colocados em idênticas profundidades para comparação.

Após dez dias a pressão de ar foi diminuída a zero e o equipamento foi retirado do poço. Os papéis filtro úmidos foram colocados o mais rapidamente possível em sacos plásticos. Os sacos contendo os papéis filtro foram levados a um laboratório com temperatura controlada para medição da umidade utilizando uma balança com precisão de 0,0001 g. Foi utilizado o papel filtro de Shuangquan nº 203, fabricado na China. Wang, An e Kuang (1998) fornece a curva de calibração para o papel citado.

Os resultados das medições são mostrados na Tabela 4.1, incluindo peso específico seco (γ_d) e umidade do papel filtro (w_{pf}). As sucções apresentadas são resultados do papel filtro, tensiômetros e na medição de umidade associada ao ajuste da curva característica solo-água por Fredlund e Xing (1994), respectivamente.

Os valores de sucção obtidos pelo papel filtro foram um pouco inferiores aos demais valores, que por sua vez apresentaram valores próximos. Segundo os autores uma das possíveis causas é a contaminação do papel filtro por solo. Apesar do esforço de Wang e Lao em forçar o contato entre o papel filtro e o solo este contato não pode ser garantido.

Tabela 4.1: Resultados de Wang e Lao (2002)

Profundidade (m)	$\gamma_d^{(1)}$ (kN/m ³)	$w_{pf}^{(2)}$ (%)	$\psi_p^{(3)}$ (kPa)	$\psi_T^{(4)}$ (kPa)	$\psi_{CCSA}^{(5)}$ (kPa)
0,4	1,238	134,0	7,2	10,9	11,3
0,8	1,313	145,0	5,3	9,6	9,9

(1) Peso específico seco; (2) Umidade do papel filtro; (3) Sucção medida pelo método do papel filtro; (4) Sucção medida pelo tensiômetro; (5) Sucção da curva de ajuste

Existe uma quantidade limitada de estudos publicados acerca da utilização de papel filtro em campo. A maioria dos estudos encoraja o uso do papel filtro sem contato e poucas tentativas de uso do papel filtro com contato foi encontrada na literatura. Grande parte dos estudos foca em acessórios projetados para a inserção e proteção do papel filtro no solo. Acessórios estes que possuem um complicado processo de fabricação o que contrasta com proposta de simplicidade pelo princípio do método. Pouca ênfase é apresentada na literatura às possíveis formas de controle e cuidado com a manipulação de papéis filtro no campo. Fatores como o tempo de exposição durante a remoção do papel e forma de acomodação fora do solo não são pouco citados. Alguns autores questionam a confiabilidade dos dados, citando influências de flutuações de temperatura e a necessidade de tempo de equilíbrio prolongado.

4.1.2 Tensiômetro

O tensiômetro é um instrumento de medição direta da poro pressão negativa da água do solo, e pode ser usado tanto no laboratório quanto no campo. Os principais componentes de um tensiômetro, ilustrados na Figura 4.8, são: copo cerâmico poroso, corpo plástico, dispositivo de medição de pressão e cabo para transferência de dados.

Ao contrário da técnica papel filtro, que tem um princípio simples e uma metodologia ainda cercada de grandes dúvidas, o uso do tensiômetro envolve a aquisição de um equipamento relativamente mais caro, mas uma metodologia bastante simples e confiável.

O copo cerâmico poroso é responsável por promover a interface entre a água, nele contido, e o solo funcionando como pedra porosa. A permeabilidade do copo cerâmico depende da granulometria do tamanho dos seus poros. Quanto mais permeável for o copo cerâmico, menor será o valor de entrada de ar. Isto indica que quanto maior for a capacidade do copo cerâmico de manter o ar fora do sistema de medição maior será o tempo para equilibrar a sucção interna com a sucção externa. O corpo do tensiômetro é geralmente feito de plástico devido a sua baixa capacidade de condução de calor e por ser não corrosivo. O

diâmetro do tubo é tipicamente de 20 milímetros e seu comprimento pode chegar a 1,50 metros.

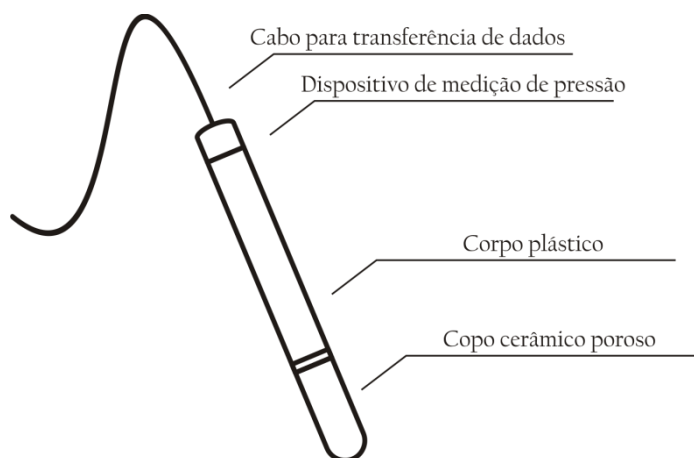


Figura 4.8: Tensiômetro e seus componentes

Segundo Fredlund (1993), o dispositivo de medição de pressão pode ser de três tipos: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo e transdutor elétrico de pressão (Figura 4.9). Para Marinho (1995) a vantagem do manômetro de mercúrio é que não existe necessidade de calibração, porém a correção da densidade deve ser feita evitando erros de até 0,25% na leitura. Os manômetros de vácuo podem medir tensões de 0 a 100 kPa. Segundo Marinho (1995), estes sensores são de fácil manutenção, porém apresentam baixa acurácia. Os transdutores elétricos de pressão, diferentemente dos dois tipos de dispositivos citados anteriormente, permitem uma aquisição de dados automática. O princípio do seu funcionamento está no deslocamento de uma membrana e de resistores que colados a mesma, induzindo assim uma variação de resistência do sistema e consequentemente uma variação de tensão. Segundo Marinho (1995), estes transdutores possuem elevada acurácia e precisão quando bem calibrados, e requerem pouco fluxo de água para entrar em equilíbrio com o solo possibilitando um menor tempo de equilíbrio.

Uma vez que o equilíbrio entre o solo e o tensiômetro é alcançado, a água presente no reservatório do tensiômetro terá a mesma pressão que a poro pressão do solo. A poro pressão negativa medida é numericamente igual a sucção matricial quando a pressão de ar for a atmosférica. Quando a pressão de ar for maior do que a pressão atmosférica a leitura do tensiômetro deve ser somada com a pressão de ar no solo para se obter a sucção matricial. A leitura também deve ser corrigida devido à elevação de água presente no tubo plástico. Uma maior elevação de água resultará em uma maior correção. Por exemplo, para um tubo plástico de 30 cm, preenchido com água, a correção corresponderá a uma sucção de 3 kPa que deve ser descontada no valor da leitura. A sucção matricial medida não deve

exceder o valor de entrada de ar do copo cerâmico. A componente osmótica da sucção não é medida pelos tensiômetros devido a livre passagem dos sais solúveis através do copo cerâmico.

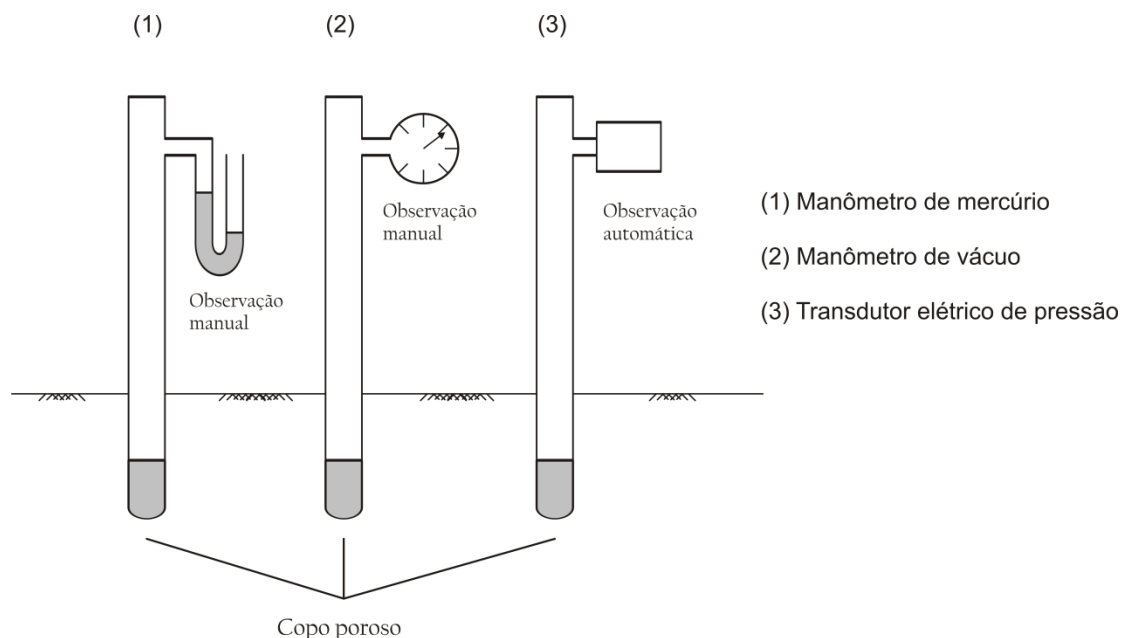


Figura 4.9: Tipos de dispositivos de medição de pressão

A grande limitação do tensiômetro convencional é sua capacidade de medição, que em geral, vai somente de 0 a 90 kPa (STANNARD, 1992). Este patamar máximo (90 kPa) é devido a expansão de microbolhas de ar que acontecem dentro do sistema, quando a água passa repentinamente da fase líquida para a fase gás devido queda de pressão. Fenômeno este conhecido como cavitação.

Segundo Marinho e Chandler (1994) a cavitação pode ser evitada usando água deaerada e evitando a saturação da água por ar. Ferver a água é um método apropriado, no entanto o contato da água com o ar pode em minutos saturar a água com ar. Jones, Overton e Trevena (1981) recomendam que o sistema deva ser submetido a vácuo para que seja removida a maior quantidade de ar possível aprisionado nas microcavidades, mas os próprios autores reconhecem que dificilmente todo ar será removido por este processo.

A limitação de medição do tensiômetro convencional foi superada por Ridley (1993), que desenvolveu o primeiro tensiômetro capaz de medir poro pressões negativas abaixo de -1500 kPa. Este trabalho criou uma nova classe de tensiômetros, conhecidos como tensiômetros de alta capacidade (HTC). Eles têm a vantagem de trabalhar com cerâmicas com valores de entrada de ar maiores (0,3; 0,55; 1,5 MPa) e foram projetados para permitir

que o reservatório do dispositivo medisse pressões reais. Segundo Marinho, Take e Tarantino (2008), o tensiômetro de alta capacidade de Ridley (1993) e posteriores foram projetados para retardar a cavitação heterogênea da água nos reservatórios. Isto envolve minimizar o volume e a área superficial do reservatório interno de água para diminuir os locais de nucleação, evitando assim, um colapso repentino.

Um novo tensiômetro foi projetado pelo Imperial College para superar os problemas do projeto de Ridley (1993). Ridley e Burland (1995) propuseram uma modificação no tensiômetro de Ridley (1993) que envolve a eliminação de qualquer material que tenha a particularidade de favorecer com locais para nucleação, do projeto do tensiômetro, tais como o-rings e elastômeros. Como ilustrado na Figura 4.10 (a), o corpo do tensiômetro é formado por duas seções de aço inoxidável e na seção superior por um diafragma plano e um medidor de tensão. A cerâmica de entrada de ar de 1,5 MPa é colada na seção superior e posicionada para permitir uma abertura de 0,1 mm entre o filtro e o diafragma. A tensão medida pelo diafragma melhora o desempenho mecânico e permite a redução do tamanho do reservatório de água. Além disso, um procedimento diferente foi adotado para a saturação inicial do tensiômetro. O filtro cerâmico montado seco na seção superior é primeiro submetido a vácuo e então inundado com água de arada (RIDLEY E BURLAND, 1999). Antes de se iniciar a medição de sucção, o tensiômetro é pressurizado pela aplicação de 4000 kPa de pressão positiva por um período mínimo de 24 horas. Para medição de sucção, uma pasta de solo saturada pode ser usada para melhorar o contato entre o filtro cerâmico e a massa de solo. O novo modelo e o diferente procedimento de saturação permitiram ao tensiômetro medir maiores níveis de sucção em um menor espaço de tempo, durante um maior período.

O tensiômetro desenvolvido pela Universidade de Saskatchewan (GUAN E FREDLUND, 1997) é similar ao primeiro modelo desenvolvido pelo Imperial College. Seu modelo é ilustrado Figura 4.10 (b). Ele consiste em um transdutor envolvido por um aço inoxidável, e uma cerâmica de alto valor de entrada de ar (1,5 MPa). A saturação inicial da cerâmica porosa e a pré-pressurização possuem uma diferença significativa da apresentada por Ridley e Burland (1999). A cerâmica porosa é primeiramente saturada com água de arada e em seguida unida ao transdutor. A pré-pressurização é obtida pela aplicação de seis ciclos de uma pressão positiva de 12000 kPa por uma hora, seguida de uma negativa de 85 kPa por uma hora. Este procedimento é definido com base nos estudos de Guan, Fredlund e Gan (1998). Este tensiômetro possibilitou medidas de sucção de até 1250 kPa, e períodos de medições de até três dias. Um fato notável no tensiômetro de Saskatchewan é que a tensão de água medida foi bem abaixo do valor nominal de entrada de ar da cerâmica, em

contraste com o primeiro tensiômetro onde a tensão de água de 1500 kPa poderia ser obtido. Isto seria devido à inadequada saturação da cerâmica porosa.

Alguns tensiômetro foram desenvolvidos também no Instituto de Tecnologia de Massachusets. Um dos principais projetos foi desenvolvido por Toker, Germaine e Culligan (2003) e é apresentado na Figura 4.10 (c). Semelhantemente ao primeiro tensiômetro desenvolvido pelo Imperial College, uma manta envolve o transdutor de pressão. Uma vedação de cobre foi usada para selar a manta ao transdutor. O tensiômetro de Massachusets troca a cerâmica porosa comercial por uma cerâmica desenvolvida e fabricada em laboratório. Esta cerâmica possui uma distribuição de poros mais fina e interconectada. Segundo Tarantino (2004) a vantagem desta cerâmica é que ela não requer um alto valor de pré-pressurização para sustentar uma alta tensão na água; e as desvantagens seriam a baixa durabilidade e a variedade de suas características. O tensiômetro desenvolvido por Toker, Germaine e Culligan (2003) pode medir sucções de até 1300 kPa.

O tensiômetro desenvolvido na Universidade de Trento (Tarantino e Mongiovi, 2002) é muito similar ao desenvolvido no Imperial College embora possua algumas modificações no seu modelo, conforme apresentado na Figura 4.10 (d). A seção superior do tensiômetro foi prolongada e o diafragma é posicionado a meia altura do corpo de aço inoxidável. Isto garante uma quase simetria geométrica, que pode ser mais desejável se a calibração é executada em uma faixa positiva e extrapolada para faixa negativa. A seção inferior, ao contrário de ser colada na seção superior, é parafusada, tornando o instrumento mais robusto. Segundo Tarantino (2004), o desempenho do tensiômetro da Universidade de Trento é similar ao tensiômetro do Imperial College.

Pôde-se observar, com base na revisão de literatura realizada, que diferentemente da técnica do papel filtro, o emprego de tensiômetro em campo é considerado comum. A maioria dos estudos que apresentam medições de campo adota o uso de tensiômetro, não existindo questionamentos significantes quanto à sua utilização. Variados tempos de equilíbrio são reportados na literatura, uma vez que existem diferentes modelos de tensiômetro. A maioria dos novos estudos acerca de tensiômetro tem focado no desenvolvimento de instrumentos mais robustos e que possuam maiores faixas de medição.

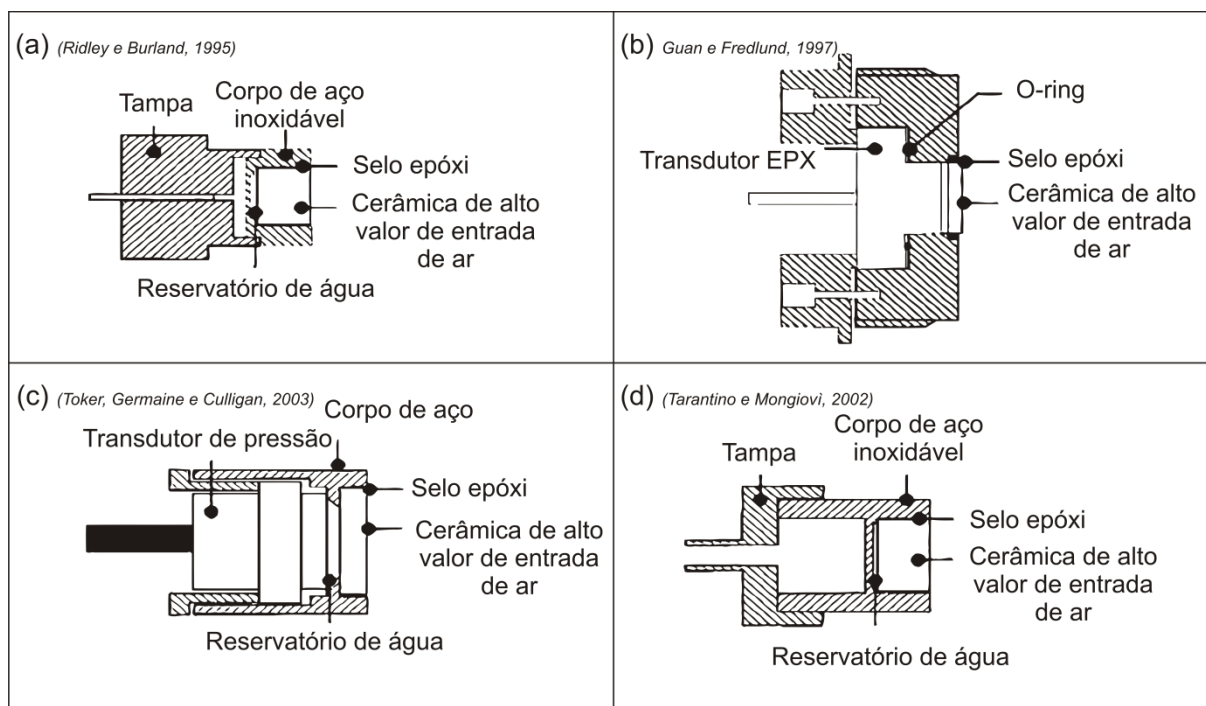


Figura 4.10: Modelos e especificações de vários tensiômetros (Adaptada de Marinho *et al.*, 2008)

4.2 DESCRIÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL E DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE CAMPO

As atividades de monitoramento no campo experimental foram realizadas de junho de 2010 a março de 2011. Estas atividades foram precedidas por uma bateria de testes em campo na qual foram avaliados os procedimentos de monitoramento desenvolvidos. A etapa preliminar de testes foi iniciada em março e concluída em julho.

Foram monitorados dados atmosféricos e do perfil do solo. As condições atmosféricas foram monitoradas utilizando uma mini-estação meteorológica instalada no campo experimental. As seguintes variáveis atmosféricas foram monitoradas: precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento. O perfil do solo foi instrumentado por meio de um poço de monitoramento revestido em manilha de concreto pré-moldado (Figura 4.11).



Figura 4.11: Poço de monitoramento

A Figura 4.12 apresenta o projeto elaborado para o sistema de acesso ao poço de monitoramento. O sistema de acesso é composto por plataformas com alçapões, dispostas ao lado da escada, elementos esses que serão protegidos contra corrosão. Estas plataformas são móveis, estando apoiadas nos pilares da escada e em uma haste metálica, localizada no lado oposto da escada. A haste é protegida contra corrosão e fixada no fundo. O acesso ao solo é conseguido por meio de furos existentes nas manilhas pré-moldadas (Figura 4.13).

Os dados do perfil do solo, monitorados nesta pesquisa, foram: umidade, sucção e nível do lençol freático. A umidade foi obtida através da retirada de amostras do solo seguida de secagem em estufa. A sucção foi obtida por dois métodos de medição: papel filtro e tensiômetro. O lençol freático foi monitorado utilizando dois piezômetros instalados próximos ao poço de monitoramento.

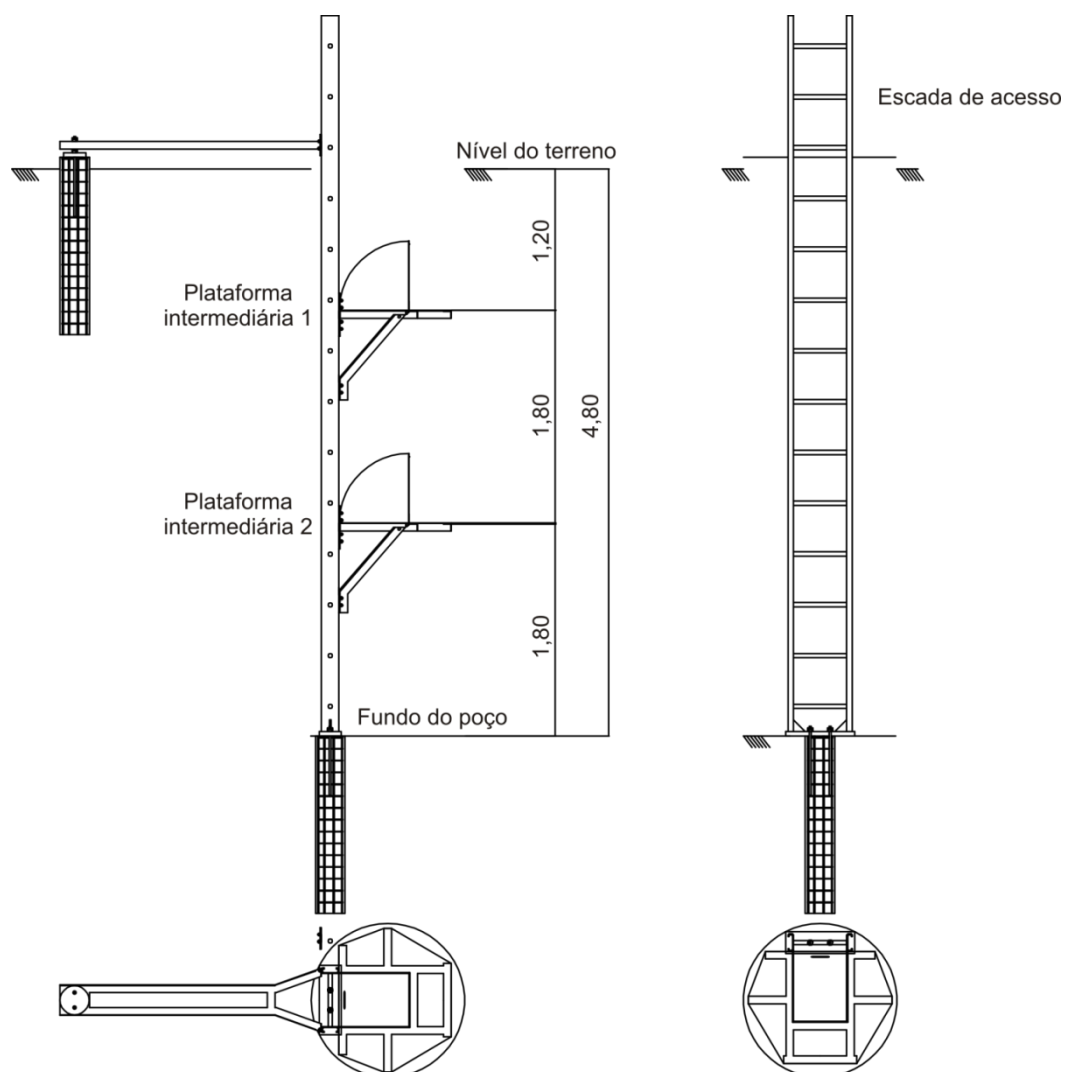


Figura 4.12: Sistema de acesso ao poço de monitoramento (Desenhista: Marlos J. R. Guimarães)

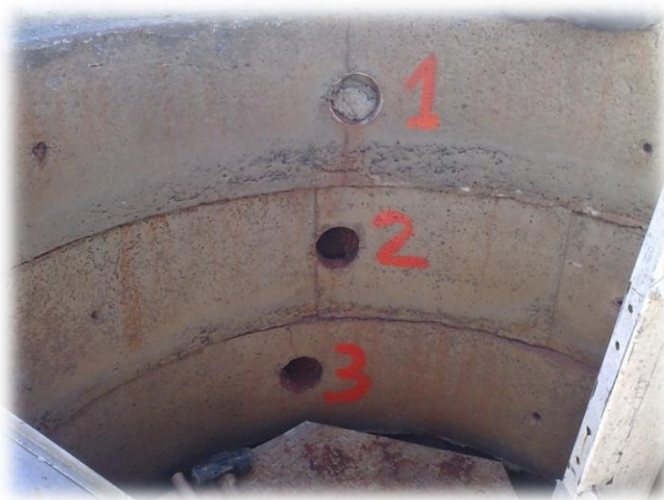


Figura 4.13: Detalhe dos furos nas manilhas pré-moldadas

A Figura 4.14 e a Tabela 4.2 apresentam a disposição dos instrumentos e dos pontos de coleta do solo em campo. Os furos, representados no plano horizontal pelos pontos A, B, C e D, possuem aproximadamente 5 cm de diâmetro. Os furos foram realizados utilizando brocas. Estes furos permaneceram sempre ocupados e vedados utilizando “esperas” confeccionadas utilizando tubos de PVC. As esperas foram removidas apenas quando os furos eram utilizados nas medições.

Tabela 4.2: Disposição dos equipamentos ao longo da profundidade

Nível	Profundidade (m)	Umidade (A)	Tensiômetro (C)	Papel filtro (D)
1	0,17			
2	0,48	X	X	X
3	0,82	X		
4	1,14	X		X
5	1,45	X	X	X
6	1,82	X		X
7	2,13	X	X	
8	2,42	X		X
9	2,79			
10	3,10	X	X	X
11	3,45			
12	3,77	X	X	X
13	4,06			
14	4,38			

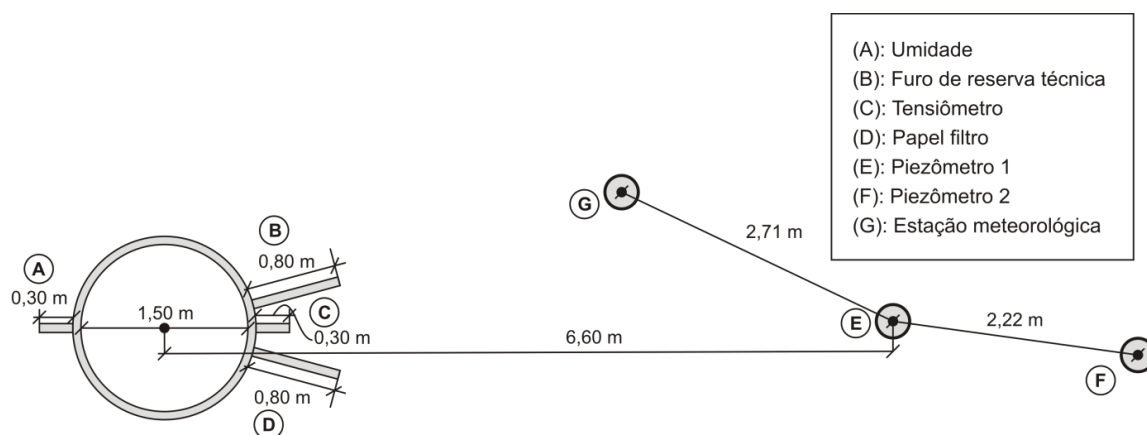


Figura 4.14: Disposição dos equipamentos em campo (plano horizontal)

Os piezômetros (pontos E e F) são constituídos por um cano PVC inteiriço de 10 metros de comprimento, e uma tampão. O nível d'água foi medido utilizando os dois piezômetros com o auxílio de um medidor de nível d'água, popularmente conhecido como "piu".

As frequências de leitura variaram ao longo do período de monitoramento, pois inicialmente foram realizados testes e adequações, com intuito de aprimorar as técnicas de medição. De acordo com o resultado de medições preliminares e em função da conveniência foi selecionada a frequência de 14 dias para a medição de umidade e sucção. O nível do lençol foi medido também a cada 14 dias. O monitoramento realizado pela estação meteorológica foi realizado de forma automática, com frequência de cinco minutos.

4.2.1 Metodologia de emprego da técnica do papel filtro

A técnica do papel filtro tem se mostrado bastante útil para medição da sucção em laboratório (MARINHO, 1994). Sua utilização no campo é ainda incipiente e as maiorias das poucas tentativas foram limitadas à medição de sucção total, devido à dificuldade de promover o contato entre o papel e o solo. Como não há normatização para o método do papel filtro em campo, uma metodologia foi especialmente desenvolvida neste trabalho.

Foi utilizada nesta pesquisa papel filtro Whatman nº 42, marca que já vem sendo utilizada em laboratório por diversos pesquisadores, entre eles, Hamblin (1981), Chandler e Gutierrez (1986), e Marinho (1994). Além do próprio papel filtro, os principais materiais utilizados na aplicação método do papel filtro em campo foram: balança com resolução de 0,0001g; estufa; pinça; luvas; estilete; tesoura e dispositivo para instalação e abrigo do papel filtro no solo.

O dispositivo, desenvolvido neste trabalho para instalação e abrigo do papel filtro, é ilustrado na Figura 4.15. O dispositivo consiste em dois canos PVC, um interno e outro externo. O tubo interno, com 20 mm de diâmetro, possui em sua extremidade um prendedor para fixação do papel filtro e é a parte removível do sistema. O tubo externo, com 25 mm de diâmetro, é utilizado como proteção, e uma vez instalado deve permanecer no furo.

O método de ensaio compreende os seguintes passos:

- 1) Cortar o papel filtro em pedaços retangulares de 3 x 1 cm. Todo manuseio do papel filtro deve ser realizado com luvas e pinças evitando assim a contaminação do papel;

- 2) Fixar dois papéis filtro no prendedor do dispositivo para instalação do papel filtro. Recomenda-se utilizar dois papéis para se ter duas medidas de sucção que servem como verificação de erros grosseiros;
- 3) Inserir o tubo interno no tubo externo, e colocar o dispositivo (posição fechada) no canal aberto no solo, conforme ilustrado na Figura 4.15 (c) e na Figura 4.15 (d); com o cano externo fixo, girar o cano interno de modo a expor os papéis filtro ao contato indireto com o solo, conforme a Figura 4.15 (e). Como existe um espaço entre o papel filtro e o solo, a sucção medida será a sucção total. O tubo interno só deve ser retirado para a colocação e remoção de papéis filtro;

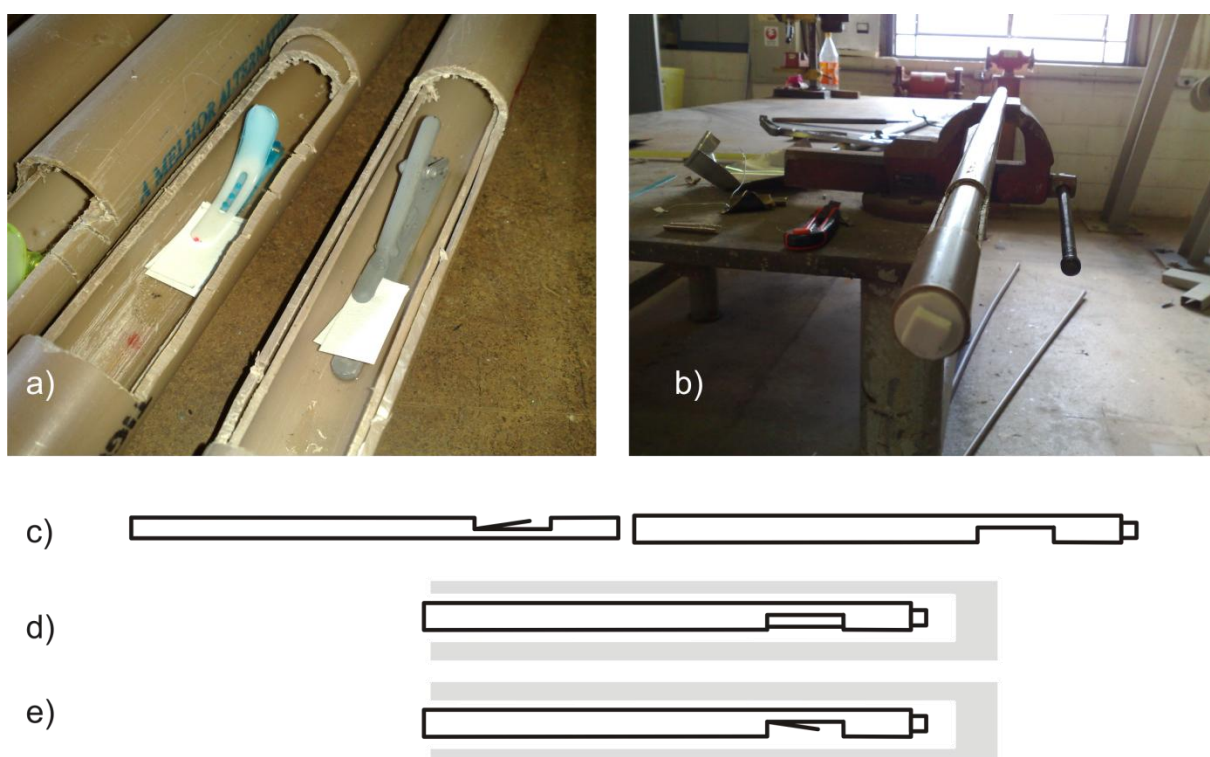


Figura 4.15: (a): Dispositivo para instalação do papel filtro; (b) Fabricação do dispositivo para instalação do papel filtro; (c): Tubo externo e tubo interno; (d): Posição fechada; (e): Posição aberta

- 4) Aguardar para que os papéis filtro e o solo alcancem o equilíbrio de sucção. Foi utilizado nesta pesquisa um tempo de equilíbrio de 14 dias;
- 5) Atingido o tempo de equilíbrio, realizar o procedimento de retirada dos dois papéis filtro, descrito a seguir. O cano interno é girado, voltando a posição fechada, e removido. Com luvas e pinça, os papéis filtro devem ser retirados e colocados cada um sobre um recorte de papel alumínio quadrado com 10 cm de lado, previamente identificado com fita adesiva e caneta e previamente pesado

utilizando balança com resolução de 0,0001 g. Os papéis alumínio devem ser dobrados com cuidado de modo a isolar bem os papéis filtro. Os dois conjuntos, papel filtro e papel alumínio, são acondicionados cada um em um recipiente hermeticamente fechado e então levados ao laboratório, onde são pesados utilizando a balança com resolução 0,0001 g. Todo este processo deve ser executado de forma rápida, de modo que a quantidade de água presente no papel filtro não sofra variação significativa por interferência da umidade do ar da atmosfera. A diferença entre peso do conjunto e o peso do papel alumínio é igual ao peso do papel filtro;

- 6) Após a pesagem do papel filtro, este deve ser colocado em uma cápsula com devida identificação. A cápsula é então inserida em uma estufa à 60 °C, para secagem do papel filtro;
- 7) O papel filtro deve permanecer na estufa por um período mínimo de seis horas. Passado este período, o papel filtro é novamente pesado, e a sua umidade calculada;
- 8) A partir da umidade do papel filtro é possível obter o valor de sucção correspondente, através da curva de calibração do papel. Neste trabalho foi utilizada a curva de calibração obtida por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992) para o papel Whatman nº 42:

$$\text{Para umidade do papel filtro} > 47\%, \psi = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log w_{pf})} \quad (4.1)$$

$$\text{Para umidade do papel filtro} \leq 47\%, \psi = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot \log w_{pf})} \quad (4.2)$$

onde: ψ é a sucção do solo (kPa); w_{pf} é a umidade do papel filtro (%).

- 9) O valor de sucção final será igual à média dos valores obtidos por cada papel filtro.

4.2.2 Metodologia de emprego dos tensiômetros

A aplicação do tensiômetro no campo compreende as seguintes etapas: saturação, instalação e aquisição de dados. Antes de se iniciar a saturação o copo cerâmico poroso deve ser desconectado do corpo do tensiômetro. A saturação do tensiômetro é realizada com a aplicação de vácuo de aproximadamente 80 kPa no copo cerâmico poroso imerso parcialmente em água. Foi utilizada nesta pesquisa uma bomba de vácuo para aplicação da pressão, conforme ilustrado na Figura 4.16. Esta etapa remove as bolhas de ar que estão presentes no copo cerâmico e nas imperfeições da parede do tubo. O copo cerâmico deve ser novamente conectado ao corpo do tensiômetro, com cuidado, procurando manter a ponta cerâmica saturada com água. Feita a conexão o copo cerâmico deve permanecer imerso em uma cápsula com água até sua instalação no campo. Se ocorrerem bolhas no tensiômetro antes da sua instalação, todo o processo de saturação deve ser repetido. O procedimento de saturação foi sempre realizado no dia anterior de sua instalação em campo. A obtenção de bons resultados com o tensiômetro está fortemente relacionada com a obtenção de uma eficiente saturação.



Figura 4.16: Saturação do tensiômetro

O tensiômetro saturado pode ser instalado no campo segundo a disposição prevista na Tabela 4.2 (Figura 4.17). Foram utilizados, nesta pesquisa, cinco tensiômetros da marca

Eijkelkam. Os dados medidos pelos dispositivos de medição de pressão de cada tensiômetro são transmitidos por meio de cabos até um receptor (Datalogger), onde os dados são armazenados. Os tensiômetros, nesta pesquisa, foram mantidos instalados por um período de 18 a 24 horas. Após o fim do ensaio os dados armazenados no receptor são transmitidos a um computador onde são visualizados e analisados.



Figura 4.17: Instalação dos tensiômetros no campo

4.2.3 Metodologia de determinação de umidade gravimétrica

A umidade do solo foi obtida por meio do método da estufa, e portanto exigiu a retirada de amostras de solo. As profundidades de onde foram retiradas as amostras de solo estão detalhadas na Tabela 4.2. O procedimento constitui-se dos seguintes passos:

- 1) Descida ao poço de monitoramento, remoção do tubo de espera que isola do furo e retirada de uma quantidade de solo de aproximadamente 100 g. A retirada é realizada com o auxílio de um tubo metálico amostrador, conforme ilustrado na Figura 4.18;
- 2) A amostra de solo retirada é colocada rapidamente em um saco plástico, o qual deve ser identificado e lacrado;
- 3) A amostra é então dividida em três cápsulas, que são pesadas e levadas para uma estufa à 105 °C;
- 4) Após um período mínimo de 24 horas, as cápsulas são retiradas da estufa e novamente pesadas;

- 5) Pela diferença dos pesos das cápsulas, antes e depois de sua secagem na estufa, é obtido o teor de umidade gravimétrica para a correspondente profundidade, realizando a média dos três teores de umidade medidos.



Figura 4.18: Obtenção de amostras de umidade

4.2.4 Metodologia de coleta de dados meteorológicos

As condições atmosféricas foram monitoradas utilizando uma mini-estação meteorológica instalada no campo experimental. O modelo da mini-estação meteorológica é o Vantage Pro2 fabricada pela Davis Instruments.

Foram monitoradas as seguintes variáveis atmosféricas: precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento e direção do vento. A aquisição dos dados é feita remotamente, transmitida por sinal de rádio do console da mini-estação até um computador conectado a um dispositivo que recebe o sinal. A frequência de leitura utilizada foi de cinco minutos.

É necessário que a mini-estação seja regularmente limpa, a fim de garantir seu perfeito funcionamento. Os dados medidos devem ser sempre acompanhados por uma equipe técnica, permitindo assim, que qualquer inconstância ou incoerência na leitura seja o mais breve possível verificado e solucionado.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no monitoramento de campo. Os resultados incluem nível d'água, sucção e umidade do solo, e dados meteorológicos. Serão discutidos o desempenho dos instrumentos, e metodologias de monitoramento desenvolvidas. Será discutida também a qualidade dos dados obtidos. As distribuições espacial e temporal da umidade e sucção do solo serão analisadas. Finalmente, serão comparados os resultados obtidos pelos diversos instrumentos.

4.3.1 Desempenho dos instrumentos de medição de sucção

Como o método de papel filtro em laboratório é bastante simples, procurou-se neste trabalho simplificar também sua aplicação no campo. A utilização de canos em PVC, em diâmetros convencionais, e utilização de materiais de fácil acesso (cola instantânea e prendedor de cabelo) possibilitou a produção do dispositivo de apoio do papel filtro de maneira rápida e barata. A instalação do dispositivo em campo é também bem simples, necessitando apenas que furos horizontais, com diâmetro compatível com o diâmetro do dispositivo, sejam previamente executados. As maiores dificuldades encontradas aconteceram na etapa de retirada do papel filtro. A agilidade exigida nesta etapa foi comprometida devido ao pequeno espaço disponível e a dificuldade de manter os materiais utilizados limpos. Algumas amostras de papel filtro receberam eventuais acréscimos na quantidade de água, devido a pingos de água formados na estrutura metálica, e contato com regiões de percolação de água.

A qualidade dos dados pode ser avaliada comparando os teores de umidade obtidos pelos dois papéis filtro usados em conjunto, num mesmo dispositivo de instalação. A Figura 4.19 mostra a comparação. Os resultados são satisfatórios visto que os papéis filtro usados em conjunto tiveram resultados de teores de umidade bem próximos. Apenas dois pontos foram considerados insatisfatórios e foram desconsiderados nas análises.

A qualidade dos dados pode também ser avaliada comparando os dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro com os outros dados. Esta avaliação será considerada mais adiante.

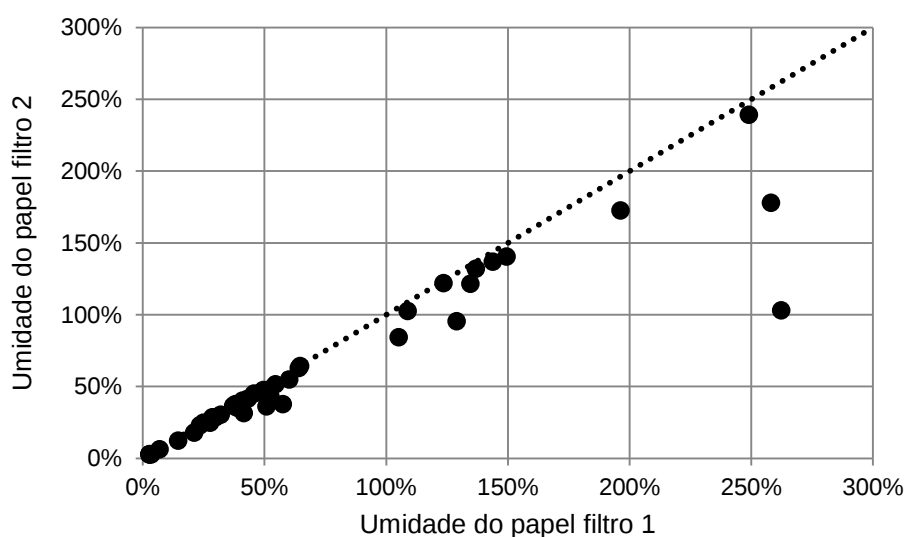


Figura 4.19: Comparação entre teores de umidade dos papéis filtro

Os tensiômetros foram sempre saturados antes de sua utilização no campo. O processo de saturação de um tensiômetro tem duração aproximada de 40 minutos. A bomba a vácuo se mostrou um método eficiente para saturação dos tensiômetros. Os tensiômetros foram instalados nos furos previamente citados na Tabela 4.2, e um melhor contato entre o copo cerâmico poroso e o solo foi observado principalmente nas profundidades mais úmidas.

A Figura 4.20 apresenta exemplos de leituras de cinco tensiômetros ao longo de um dia de medição. Estas leituras foram iniciadas no dia 15 de setembro de 2010 às 16:30 e encerradas no dia 16 de setembro às 14:20. Vale ressaltar que estes dados foram colhidos durante o período de estiagem. A legenda indica a descrição de cada tensiômetro, instalados respectivamente nos furos 2, 5, 7, 10 e 12, identificados na Tabela 4.2.

Nos três tensiômetros mais profundos (2610, 2611 e 2612) o equilíbrio de sucção, entre o tensiômetro e o solo, aconteceu em poucas horas e o valor de sucção medido se manteve praticamente constante para as horas seguintes. Os valores de sucção medidos por estes tensiômetros foram 41 kPa, 44 kPa e 50 kPa, respectivamente.

Nos dois tensiômetros mais rasos (2608 e 2609), não se observa de forma clara o equilíbrio de sucção. Para, estas situações o valor de sucção adotado foi a média das últimas medidas. No entanto, devido à proximidade dos valores medidos do limite de medição do tensiômetro, este tipo de medida pode indicar que a sucção real é superior ao valor medido. É notável o fato de que a pressão negativa não é perdida, mesmo após um período prolongado. Isso indica a qualidade do tensiômetro utilizado. Um período prolongado sem

cavitação ou entrada de ar é atingido por meio de uma boa saturação do sistema e pouco volume de água interno.

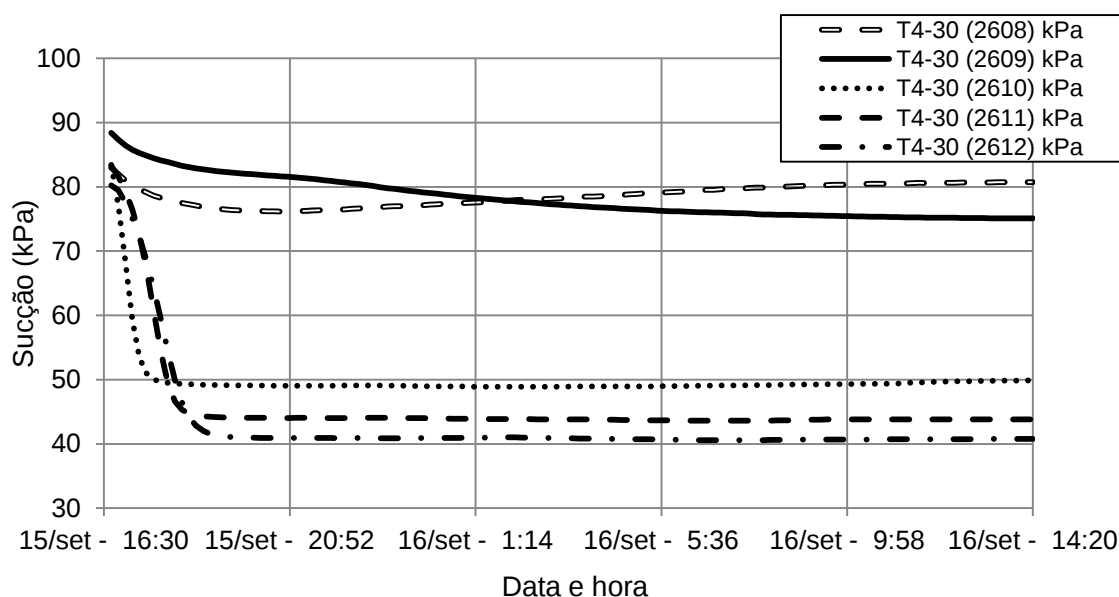


Figura 4.20: Leitura dos tensiômetros

4.3.2 Variação temporal e espacial das condições de umidade e sucção do solo

O Centro-Oeste brasileiro tem clima marcado por estações chuvosas e de estiagem bem definidas. No caso de Goiás, a estiagem é prolongada, geralmente iniciando-se em abril e terminado em setembro. Devem-se esperar, portanto, significantes variações de sucção e umidade do solo. As variações são também claramente observadas pela variação das características da vegetação.

A Figura 4.21 apresenta imagens do campo experimental em diversas épocas, de 22 de setembro de 2010 a 9 de dezembro de 2010. A imagem do dia 22 de setembro ilustra o final do período de estiagem com a vegetação seca e o céu sem nuvens. A partir do dia 14 de outubro é possível observar o início do período de chuvas e seus reflexos: as primeiras vegetações em tom de verde que surgiram próximas ao poço de monitoramento. A vegetação se apresenta, para os dias subsequentes, cada vez mais densa. Logo antes do dia 11 de novembro foi realizado serviço de capina e limpeza, notado pela vegetação mais baixa observada neste dia. Todos estes fatores são importantíssimos para análise de fluxo de água no solo, pois o tamanho e densidade da vegetação interferem diretamente na quantidade de água que irá infiltrar no solo.

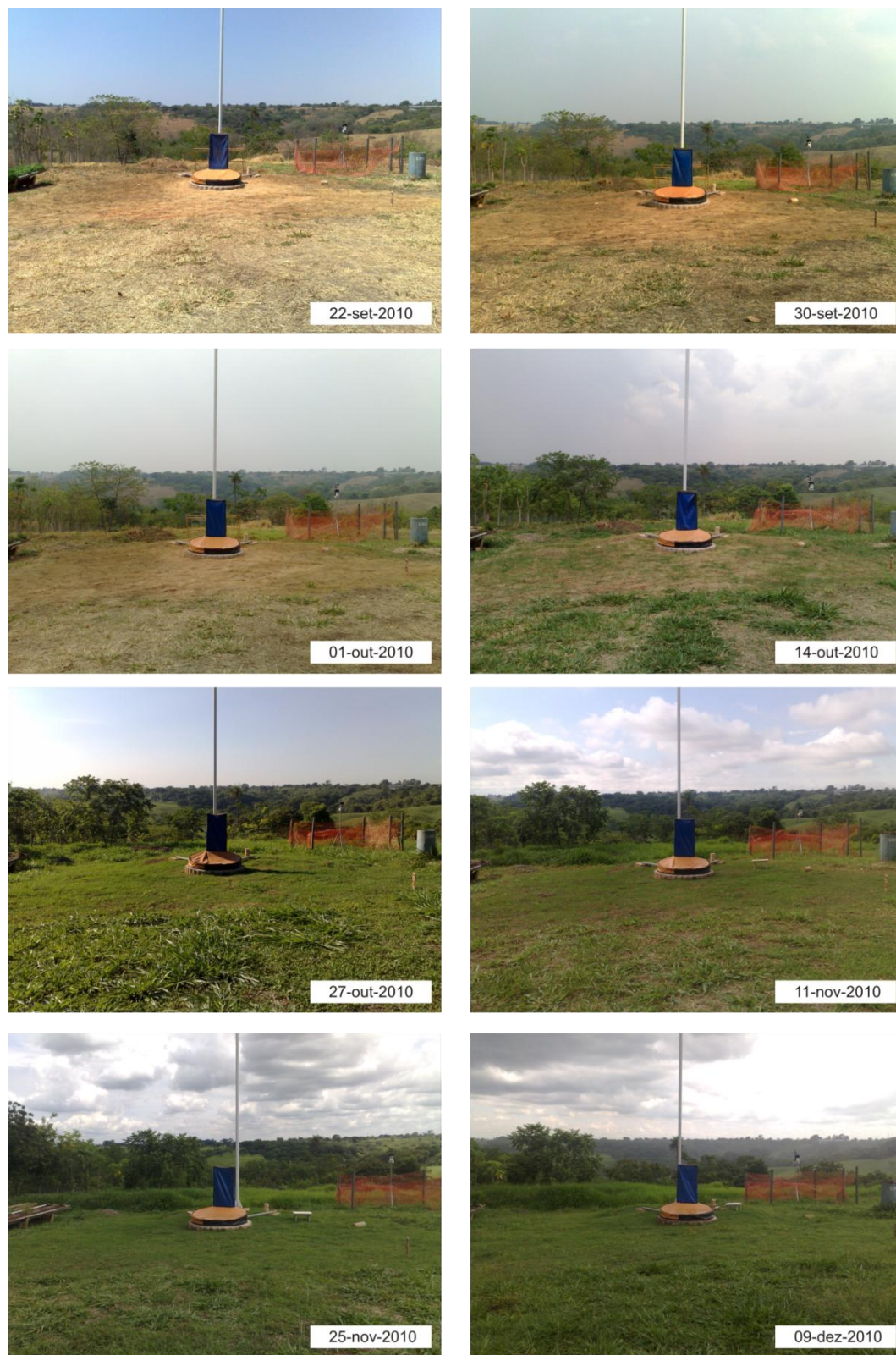


Figura 4.21: Imagens do campo experimental em diversas épocas

profundidade de 0,48 metros, o teor de umidade variou de 1,8% (15 de outubro de 2010) a 14,8% (12 de novembro de 2010), enquanto que para a profundidade de 3,77 metros, o teor de umidade variou de 21,8% (12 de novembro de 2010) a 29,7% (22 de dezembro de 2010). A Tabela 4.4 fornece a quantidade de água em termo de grau de saturação.

A partir dos dados de umidade gravimétrica, foi possível calcular a umidade volumétrica (relação entre o volume de água e volume total de solo) e consequentemente sua variação ao longo do tempo. A Figura 4.23 apresenta os resultados obtidos. Fica claramente evidenciada a grande variação na quantidade de água armazenada no solo para os primeiros metros (0,48 a 1,14 metros) e o comportamento mais estável da curva correspondente às posições mais profundas (2,42 a 3,77 metros). Enquanto de junho a outubro de 2010 os cálculos de umidade volumétrica indicam a perda de água do solo, de outubro de 2010 a março de 2011 existe em geral um ganho de água do solo. Durante o mês de janeiro de 2011 houve o maior aumento de volume da água armazenada no solo.

Tabela 4.3: Teores de umidade gravimétrica ao longo do perfil em várias datas ao longo do ano

Data	Profundidade (m)								
	0,48	0,82	1,14	1,45	1,82	2,13	2,42	3,10	3,77
26/mar/10	9,6%	10,1%	15,1%	16,0%	27,3%	-	27,3%	-	-
21/abr/10	12,3%	12,9%	13,4%	20,0%	26,6%	-	28,0%	-	-
12/mai/10	3,0%	11,8%	14,2%	26,5%	24,6%	23,6%	26,5%	25,1%	24,7%
18/jun/10	2,6%	8,7%	14,1%	24,8%	23,5%	-	25,6%	24,5%	27,6%
11/ago/10	2,3%	5,8%	11,2%	19,7%	22,4%	-	23,3%	22,5%	27,1%
17/set/10	2,2%	5,7%	8,8%	19,4%	23,7%	21,7%	25,1%	20,7%	26,8%
15/out/10	1,8%	4,5%	8,8%	7,9%	20,2%	21,1%	23,8%	20,4%	24,8%
27/out/10	3,0%	6,3%	7,4%	11,7%	17,0%	18,6%	22,2%	18,3%	23,2%
12/nov/10	14,8%	6,6%	17,3%	15,4%	21,7%	21,2%	24,4%	23,5%	21,8%
25/nov/10	11,8%	10,5%	12,2%	19,6%	23,3%	22,1%	23,1%	23,8%	22,0%
8/dez/10	11,6%	14,4%	14,2%	24,2%	25,7%	25,2%	26,8%	25,4%	23,7%
22/dez/10	12,2%	15,7%	16,2%	27,1%	26,3%	24,5%	29,0%	28,6%	29,7%
5/jan/11	13,7%	15,9%	17,4%	30,3%	30,5%	37,2%	39,3%	INUNDADO	INUNDADO
18/jan/11	10,0%	15,8%	14,3%	26,6%	30,0%	32,2%	32,4%	INUNDADO	INUNDADO
2/fev/11	12,8%	14,6%	16,9%	27,1%	23,2%	28,4%	30,9%	INUNDADO	INUNDADO
15/fev/11	13,0%	15,2%	13,9%	26,2%	23,4%	27,3%	28,3%	30,7%	INUNDADO
3/mar/11	14,5%	16,1%	16,5%	35,1%	33,0%	29,0%	29,0%	INUNDADO	INUNDADO
"-": dados não medidos									

Tabela 4.4: Grau de saturação ao longo do perfil em várias datas ao longo do ano

Data	Profundidade (m)								
	0,48	0,82	1,14	1,45	1,82	2,13	2,42	3,10	3,77
26/mar/10	24,1%	25,6%	38,0%	40,4%	66,7%	-	66,7%	-	-
21/abr/10	31,0%	32,7%	33,8%	50,6%	65,0%	-	68,3%	-	-
12/mai/10	7,5%	29,7%	35,8%	66,8%	59,9%	57,5%	64,7%	74,6%	77,7%
18/jun/10	6,6%	21,9%	35,5%	62,5%	57,3%	-	62,5%	72,9%	86,8%
11/ago/10	5,7%	14,7%	28,2%	49,7%	54,6%	-	56,9%	66,7%	85,3%
17/set/10	5,6%	14,5%	22,2%	48,9%	57,8%	53,1%	61,2%	61,6%	84,4%
15/out/10	4,5%	11,3%	22,3%	19,8%	49,4%	51,5%	58,1%	60,7%	78,2%
27/out/10	7,6%	15,9%	18,7%	29,5%	41,5%	45,4%	54,2%	54,4%	73,1%
12/nov/10	37,3%	16,7%	43,7%	38,9%	53,0%	51,7%	59,5%	69,8%	68,7%
25/nov/10	29,8%	26,5%	30,8%	49,5%	56,9%	53,9%	56,4%	70,7%	69,3%
8/dez/10	29,3%	36,3%	35,8%	61,1%	62,7%	61,5%	65,4%	75,5%	74,6%
22/dez/10	30,8%	39,6%	40,9%	68,4%	64,2%	59,8%	70,8%	85,0%	93,5%
5/jan/11	34,6%	40,2%	44,0%	76,5%	74,5%	90,9%	95,9%	INUNDADO	INUNDADO
18/jan/11	25,3%	39,8%	36,1%	67,2%	73,3%	78,6%	79,2%	INUNDADO	INUNDADO
2/fev/11	32,2%	36,8%	42,6%	68,4%	56,5%	69,2%	75,4%	INUNDADO	INUNDADO
15/fev/11	32,7%	38,3%	35,1%	66,2%	57,0%	66,6%	69,0%	91,3%	INUNDADO
3/mar/11	36,7%	40,6%	41,6%	88,6%	80,5%	70,9%	70,7%	INUNDADO	INUNDADO

“-”: dados não medidos

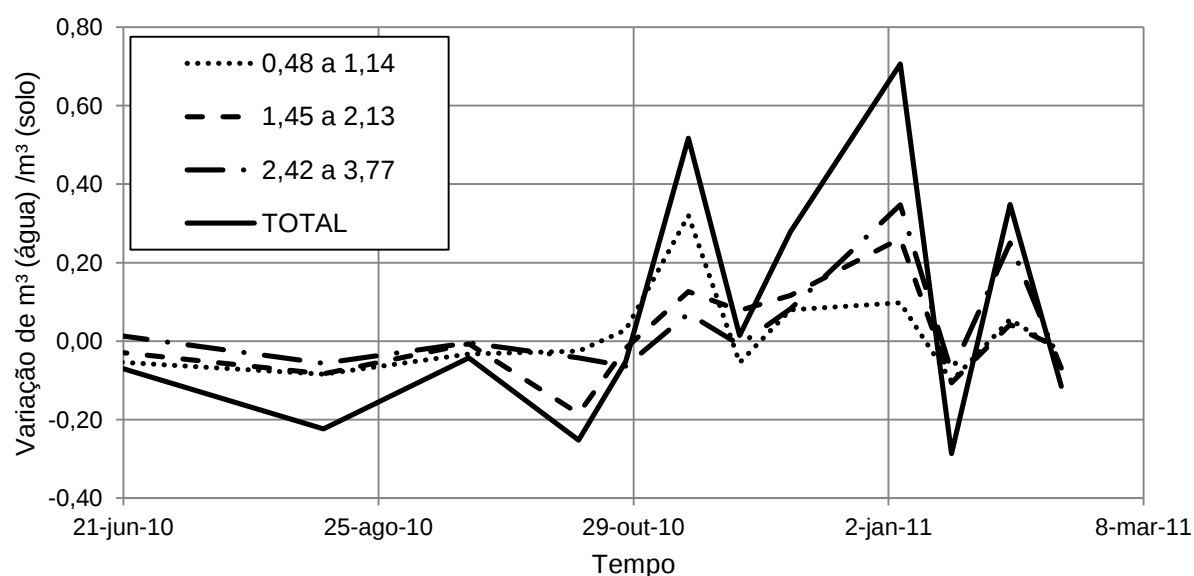


Figura 4.23: Variação da quantidade de água armazenada no solo (umidade volumétrica)

A medição de sucção no campo foi baseada nos dados dos tensiômetros e no uso do papel filtro. A Tabela 4.5 fornece os resultados de sucção obtidos com os tensiômetros e a Tabela 4.6 os resultados obtidos com o método do papel filtro. Os dados de sucção obtidos pelos

tensiômetros foram limitados pela própria capacidade do equipamento, que é capaz de medir sucções até aproximadamente 90 kPa.

Para a profundidade de 0,48, os valores de sucção até o dia 16 de outubro de 2010 mostraram-se bem abaixo do esperado para um solo em um estado que visualmente indicava ser próximo ao completamente seco. Para as profundidades de 3,10 e 3,77 metros, os valores sucção que se encontravam próximos a 30 kPa, no dia 16 de outubro de 2010, sofreram queda e no dia 6 de janeiro de 2011 os furos correspondentes às duas profundidades citadas foram inundados pelo aumento do nível do lençol freático.

Os valores de sucção obtidos pelo método do papel filtro variaram bastante ao longo do perfil do solo. A maior sucção medida, igual a 31.257,5 kPa, aconteceu para a profundidade mais rasa. A partir do dia 22 de dezembro de 2010 foram observados os menores valores de sucção.

Tabela 4.5: Dados de sucção (kPa) obtidos pelos tensiômetros

Data	Profundidade (m)							
	0,48	1,14	1,45	1,82	2,13	2,42	3,10	3,77
24/jun/10	74,56	27,90	-	33,86	31,38	-	-	-
5/ago/10	79,34	58,30	-	37,70	38,99	37,07	-	-
11/ago/10	79,91	61,79	-	42,44	40,17	37,81	-	-
16/ago/10	81,62	64,59	-	44,61	41,10	38,56	-	-
27/ago/10	80,16	63,46	-	47,47	39,71	38,38	-	-
2/set/10	78,48	58,47	-	47,99	35,11	39,71	-	-
10/set/10	81,91	76,05	-	45,96	41,18	40,67	-	-
17/set/10	80,75	75,11	-	49,86	43,80	40,78	-	-
23/set/10	77,49	68,24	-	46,17	41,60		-	-
1/out/10	80,23	69,20	-	52,24	44,45	42,45	-	-
16/out/10	74,01	-	66,05	-	46,88	-	36,31	32,02
27/out/10	4,34	-	70,85	-	47,58	-	48,72	33,15
12/nov/10	4,70	-	5,73	-	39,86	-	35,72	30,19
25/nov/10	4,72	-	4,04	-	27,74	-	27,50	21,69
9/dez/10	2,23	-	4,60	-	16,07	-	13,73	9,25
23/dez/10	3,54	-	4,03	-	14,24	-	9,75	5,52
6/jan/11	1,63	-	2,33	-	4,76	-	INUNDADO	INUNDADO
18/jan/11	4,50	-	4,08	-	11,26	-	INUNDADO	INUNDADO
2/fev/11	8,23	-	5,07	-	15,53	-	INUNDADO	INUNDADO
15/fev/11	3,72	-	4,58	-	19,42	-	12,46	6,96
3/mar/11	3,71	-	6,27	-	2,47	-	INUNDADO	INUNDADO
"-": dados não medidos								

Tabela 4.6: Dados de sucção (kPa) obtidos pelo método do papel filtro

Data	Profundidade (m)						
	0,48	1,14	1,45	1,82	2,42	3,10	3,77
27/ago/10	10095,5	344,3	-	48,3	36,4	369,9	14,0
17/set/10	31257,5	-	-	904,0	559,4	45,7	-
16/out/10	26901,6	4234,9	-	1944,1	1247,1	-	1047,0
12/nov/10	348,5	37,9	6,7	1149,8	158,8	10,7	135,8
25/nov/10	1610,1	2,8	7,4	784,9	206,6	93,1	77,1
8/dez/10	2480,1	4,9	5,9	69,5	9,2	59,2	77,4
22/dez/10	5,3	302,9	76,5	300,0	1,8	74,1	103,3
5/jan/11	2,7	291,7	74,8	327,2	1,3	INUNDADO	INUNDADO
18/jan/11	32,8	247,1	7,1	51,8	INUNDADO	INUNDADO	INUNDADO
2/fev/11	60,4	646,6	5,2	142,8	1,7	INUNDADO	INUNDADO
15/fev/11	484,8	599,4	28,7	839,3	1,3	INUNDADO	INUNDADO
3/mar/11	4,5	141,6	7,6	336,9	1,0	INUNDADO	INUNDADO
"-": dados não medidos							

4.3.3 Comparação entre as diversas técnicas de medição de sucção

Além da sucção medida pelo tensiômetro e pela técnica do papel filtro, pode obter uma terceira avaliação da sucção em campo, a partir da umidade do solo e da medição da curva característica solo-água. Cada valor de umidade medido fornece indiretamente um correspondente valor de sucção pela relação contida nas curvas características solo-água obtidas em laboratório. Estes dados podem ser comparados aos dados de sucção medidos em campo para datas coincidentes. Deve-se, no entanto, levar em conta que a histerese da curva característica impede a determinação de um valor absoluto de sucção. Tem-se, na verdade, uma faixa de valores possíveis de sucção, definidos pela curva principal de secagem e pela curva principal de molhagem.

A Figura 4.24 e a Figura 4.25 comparam os dados de sucção obtidos pelo tensiômetros com dados de sucção matricial da curva de secagem e molhagem, respectivamente. Os dados indicam que para as sucções maiores que 60 kPa, medidas pelo tensiômetros, o equipamento não é eficiente. Alguns pontos abaixo de 10 kPa também se dispersaram bastante dos dados de sucção matricial (laboratório). Essa dispersão pode ser explicada pela falta de um bom contato entre o tensiômetro e o solo, já que a maioria dos pontos citados se apresenta na profundidade mais rasa (0,48 m), onde o solo geralmente se apresenta mais seco e com presença de cascalho, dificultando que copo cerâmico poroso

seja envolvido pelo solo. É possível observar uma boa correlação para o intervalo de 10 a 60 kPa entre a sucção matricial medida pelo tensiômetro e a obtida pela CCSA.

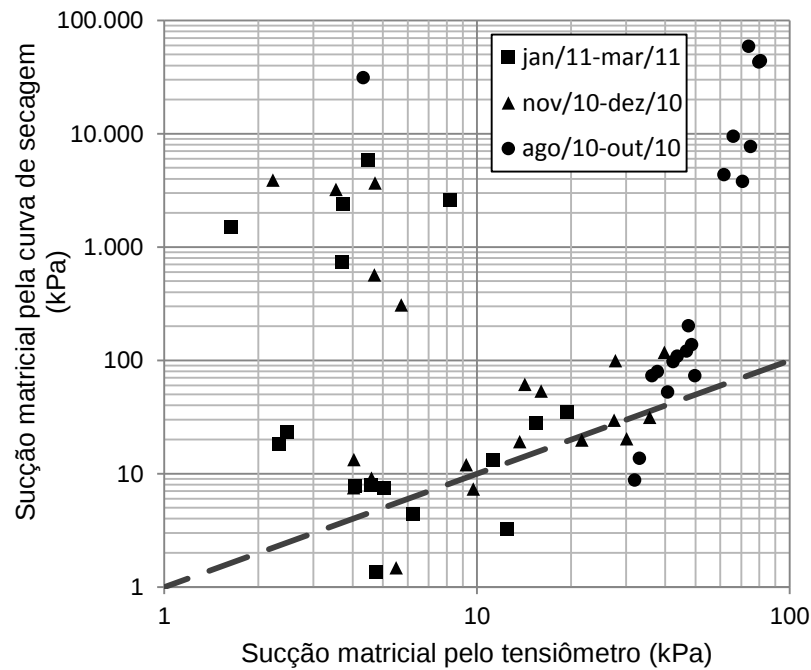


Figura 4.24: “Sucção matricial (tensiômetro)” versus “Sucção matricial (curva de secagem)”

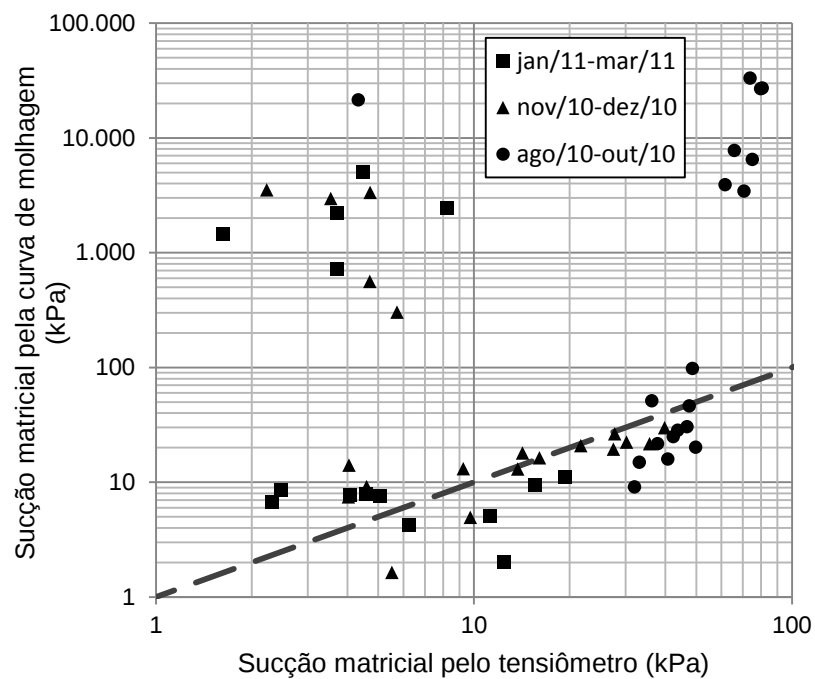


Figura 4.25: “Sucção matricial (tensiômetro)” versus “Sucção matricial (curva de molhagem)”

A Figura 4.26 e a Figura 4.27 comparam os resultados de sucção obtidos pelo método do papel filtro com dados de sucção matricial da curva de secagem e molhagem, respectivamente. Alguns pontos, correspondentes a valores de sucção total medidos pelo método do papel filtro abaixo de 10 kPa, se distanciaram bastante dos valores previstos pelas curvas total de secagem e molhagem. Estes pontos coincidem com valores de sucção obtidos por papéis filtro encontrados encharcados, devido a fatores já comentados anteriormente.

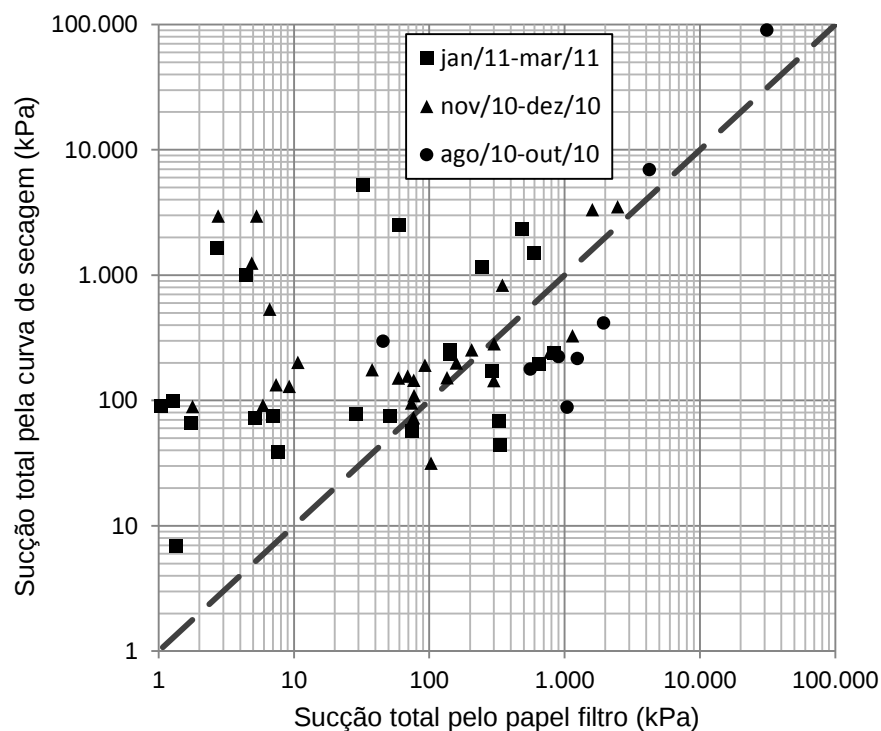


Figura 4.26: “Sucção total (papel filtro)” versus “Sucção total (curva de secagem)”

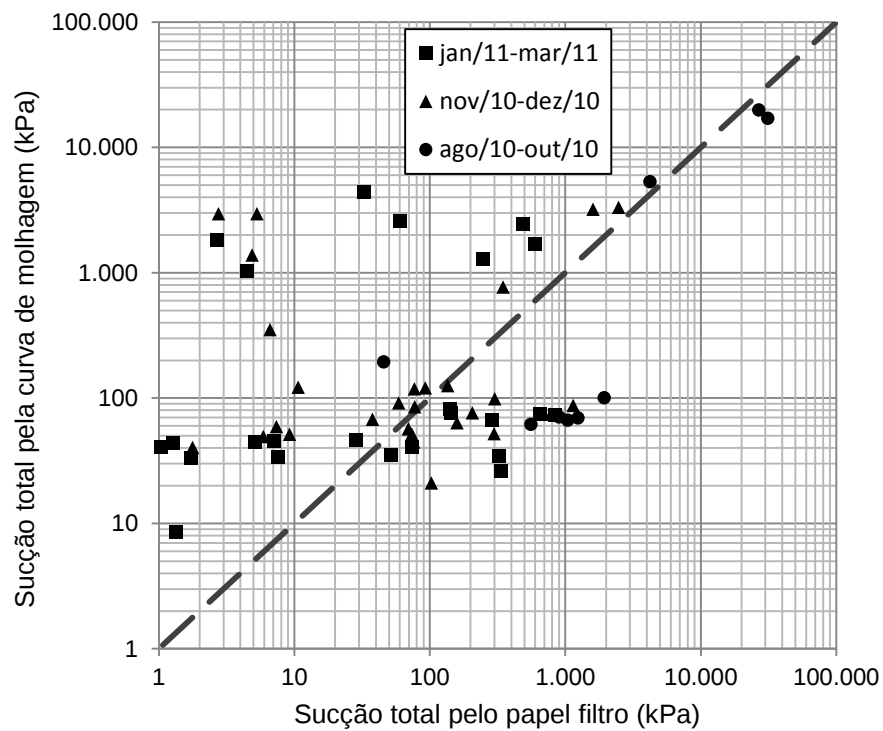


Figura 4.27: “Sucção total (papel filtro)” versus “ Sucção total (curva de molhagem)”

Na Figura 4.28 foram comparados também os resultados de sucção obtidos pelos tensiômetros e pelo método do papel filtro. Enquanto o método do papel filtro mede a sucção total e possui um tempo de equilíbrio de 14 dias, os tensiômetros medem a sucção matricial e possuem tempo de equilíbrio igual a um dia. Estas diferenças justificam o fracasso em tentar relacionar os resultados obtidos pelos dois métodos.

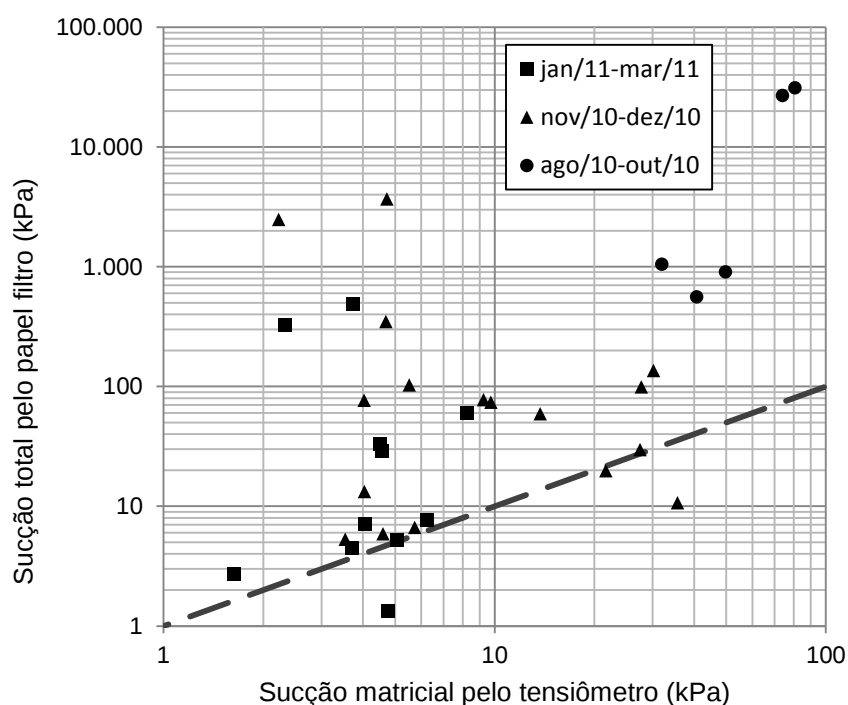


Figura 4.28: “Sucção matricial (tensiômetro)” versus “Sucção total (papel filtro)”

Os pares de dados, sucção (papel filtro e tensiômetro) e umidade, obtidos no campo, foram plotados juntamente com as correspondentes curvas características solo-água obtidas em laboratório (Figura 4.29 a Figura 4.31). Para o conjunto correspondente a profundidade de 1,0 a 1,5 metros (Figura 4.29) os dados de sucção obtidos pelo tensiômetros não acompanharam as curvas obtidas em laboratório. Este comportamento, já comentado anteriormente, se dá pela falta de contato entre o tensiômetro e o solo. Para as demais profundidades (Figura 4.30 e Figura 4.31), os dados de sucção obtidos pelos tensiômetros se localizam entre as curvas matriciais de molhagem e secagem mostrando boa correspondência com as curvas obtidas em laboratório. Os dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro se aproximaram muito bem das curvas totais obtidas no laboratório para a profundidade mais rasa. Os pontos com altas sucções (maiores que 100 kPa) tiveram uma correspondência quase exata com as curvas totais experimentais. Para as demais profundidades, os resultados de sucção (método do papel filtro) tiveram um desempenho irregular com alguns pontos se aproximando bem das curvas totais experimentais e outros se distanciando consideravelmente das mesmas.

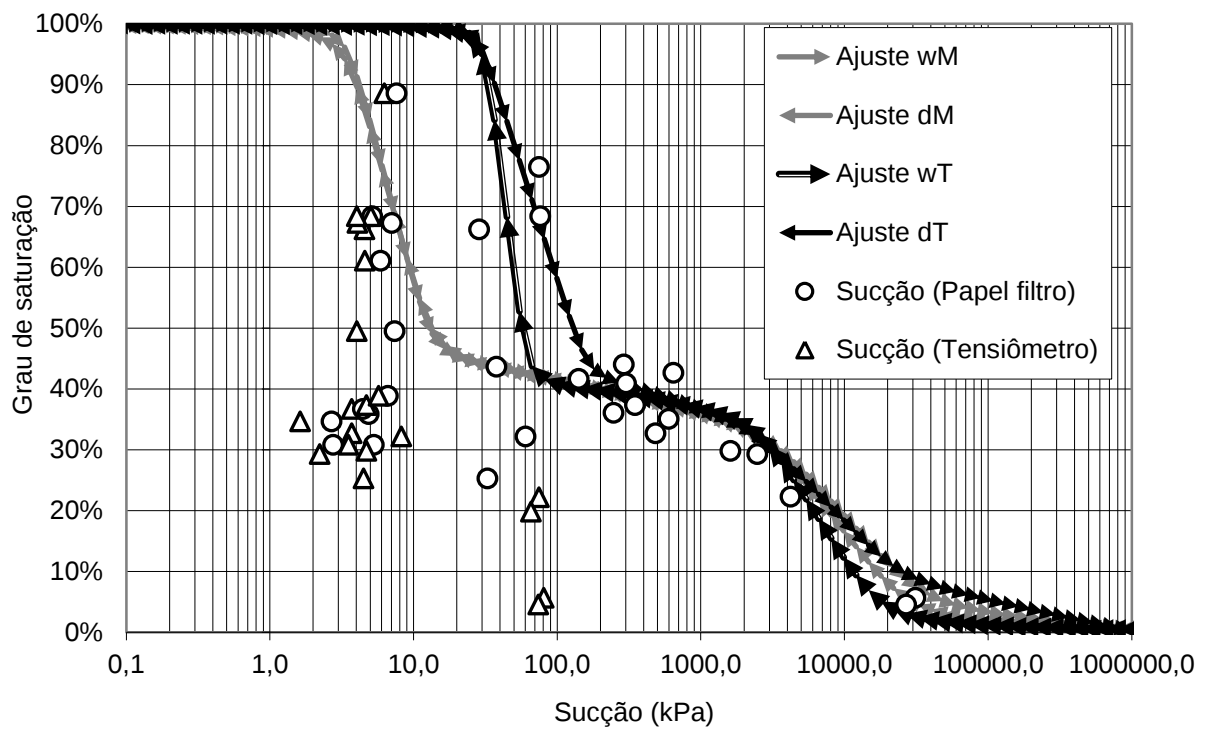


Figura 4.29: Curvas características solo-água (laboratório) e pontos experimentais (campo) – 1,0 a 1,5m

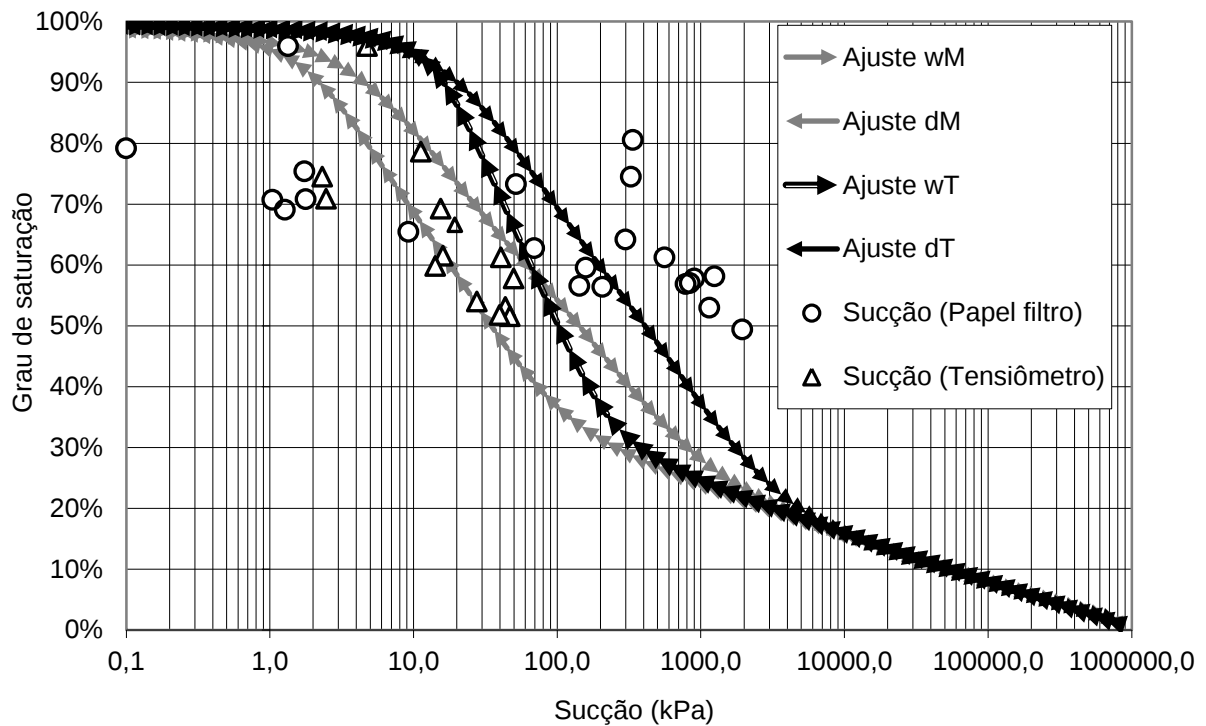


Figura 4.30: Curvas características solo-água (laboratório) e pontos experimentais (campo) – 2,0 a 2,4m

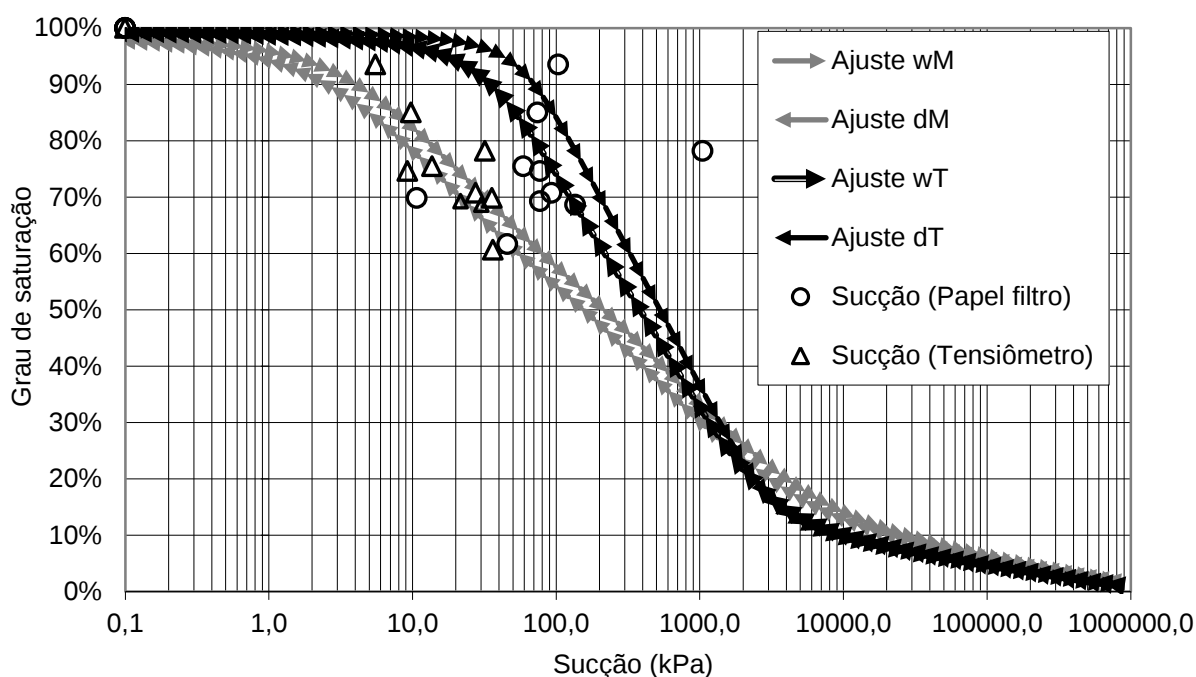


Figura 4.31: Curvas características solo-água (laboratório) e pontos experimentais (campo) – 3,0 a 4,3m

4.3.4 Dados meteorológicos

Foram encontradas dificuldades para a obtenção regular de dados atmosféricos. Tais dificuldades envolveram em um momento inicial a não familiaridade do pessoal técnico do DCT.C de Furnas com o equipamento utilizado. Foram encontrados também problemas operacionais por parte de Furnas com relação à disponibilidade de pessoal técnico de forma regular. Dados atmosféricos começaram a ser coletados a partir de 3 de janeiro de 2010 e interrompidos em 28 de fevereiro de 2010, para ajustes nos procedimentos de aquisição de dados. O monitoramento foi retomado em 14 de agosto de 2010, após a execução de manutenção na estação meteorológica por pessoal especializado contratado por Furnas. Foi instalada uma nova central de aquisição de dados e tomadas medidas para proteção desta unidade. Infelizmente, mesmo após as medidas tomadas, ocorreram interrupções nas leituras, sendo três interrupções mais prolongadas (Figura 4.32 a Figura 4.35)

Apesar da melhora na regularidade de obtenção dos dados, a verificação dos dados que vem sendo realizada continuamente revela inconsistências entre os dados medidos e a observação visual das condições atmosféricas. O principal problema consiste em diversas ocasiões ao longo dos meses de novembro e dezembro em que foi verificada a ausência do registro de chuvas torrenciais (Figura 4.32).

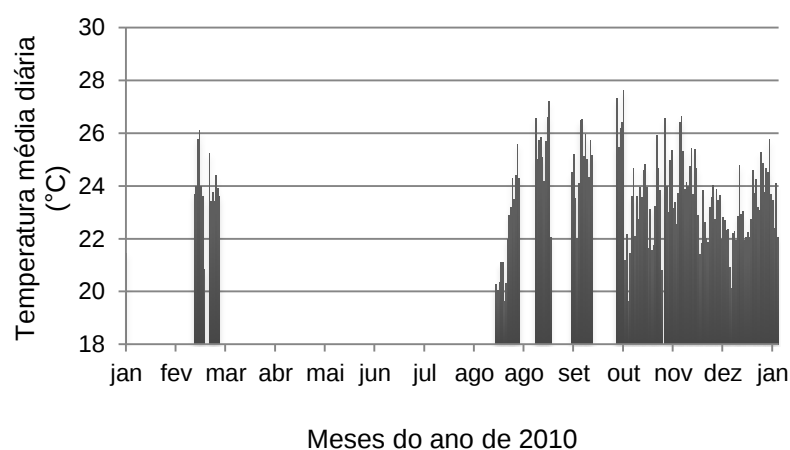


Figura 4.32: Dados de temperatura obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas

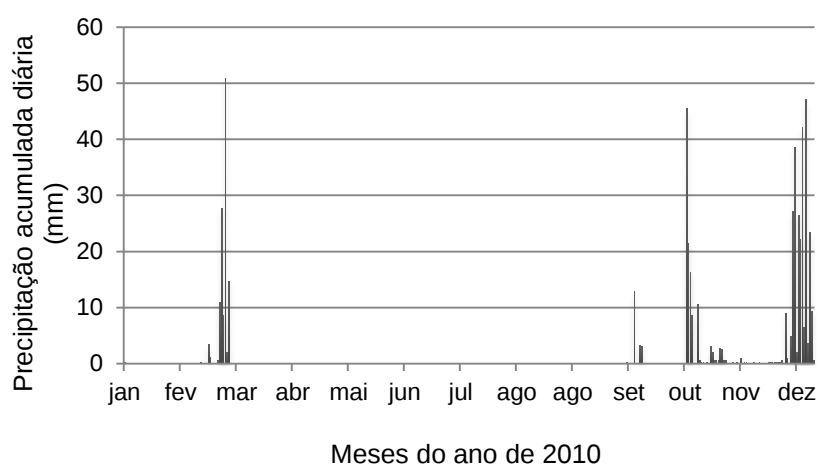


Figura 4.33: Dados de precipitação obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas

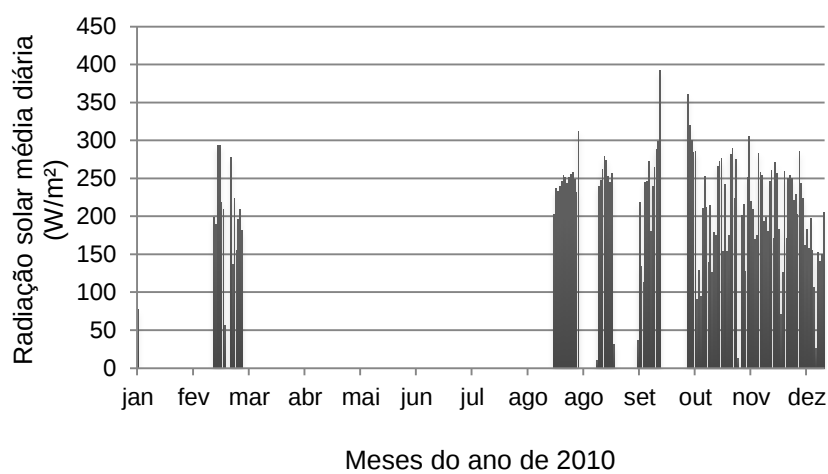


Figura 4.34: Dados de radiação solar obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas

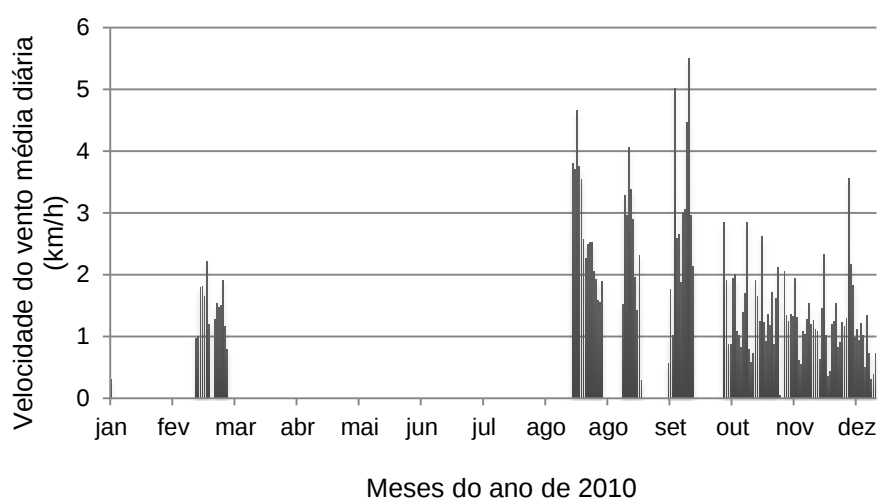


Figura 4.35: Dados de velocidade do vento obtidos pela mini-estação meteorológica instalada em Furnas

5 ANÁLISE NUMÉRICA DA FLUTUAÇÃO DE SUCÇÃO E UMIDADE

A Figura 5.1 fornece uma visão geral sobre a metodologia para a previsão de sucção e umidade, utilizando a análise numérica. Será considerado para a análise o campo experimental de Furnas em Aparecida de Goiânia. O modelo mecanístico abrange as equações diferenciais de fluxo de água e ar em solos não saturados. Serão consideradas as propriedades do solo medidas em laboratório e propriedades previstas. Para os dados meteorológicos, serão consideradas as médias históricas, devido aos problemas encontrados na aquisição de dados na estação meteorológica do campo experimental.

Serão comparados os dados previstos (IV-a e IV-b) com os obtidos em campo (I-b). Os dados previstos serão obtidos por dois caminhos. O primeiro (IV-a) utilizando os dados meteorológicos monitorados (I-a), o modelo mecanístico (II) e as propriedades do solo obtidas em laboratório. O segundo (IV-b) utilizando os dados meteorológicos monitorados (I-a), o modelo mecanístico (II) e as propriedades do solo estimadas.

A ferramenta computacional utilizada na análise será o programa FlexPDE versão 6.15.

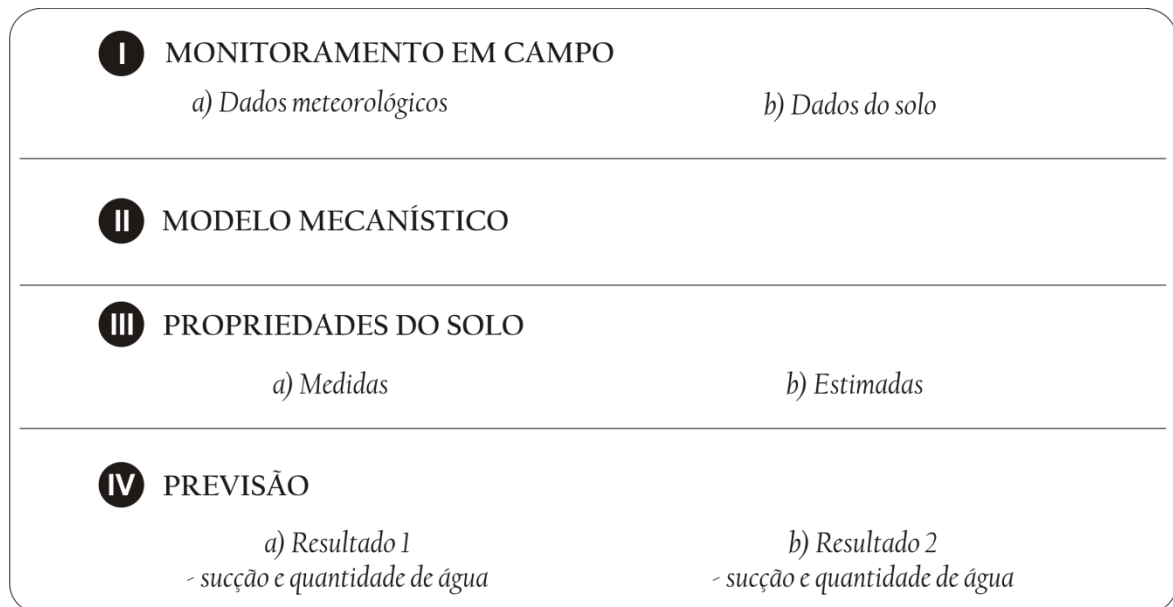


Figura 5.1: Metodologia para a previsão de sucção e umidade

5.1 GEOMETRIA, CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Para a elaboração da geometria utilizada nas análises numéricas, foi considerado o perfil do campo experimental de Furnas em Aparecida de Goiânia. Foram consideradas duas camadas de solo. A primeira camada possui um solo unimodal, com cota inicial igual 0 e cota final igual 7 metros. A segunda camada possui um solo bimodal, com cota inicial igual a 7 metros e cota final igual a 10 metros. Foi considerada para as condições de solo inicial, a data coincidente com a primeira medição de umidade no campo que aconteceu no dia 26 de março de 2010. O lençol freático considerado se encontra na cota de 6 metros e a cota 0 é considerada impermeável.

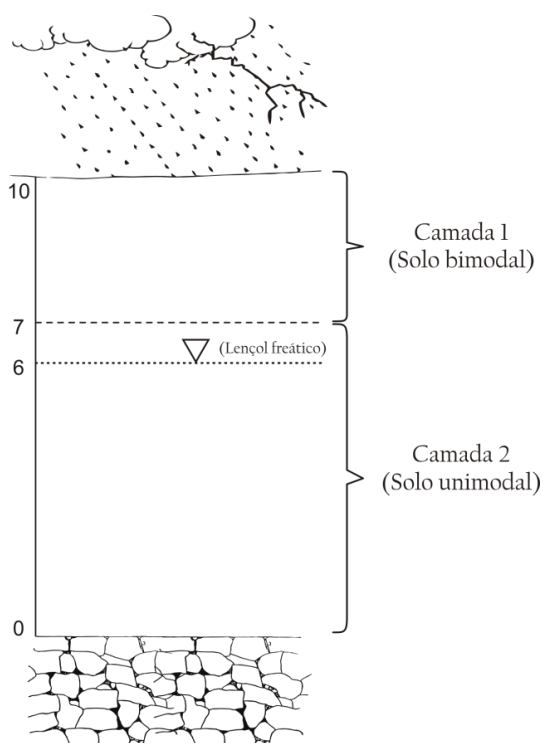


Figura 5.2: Geometria considerada para análise numérica

Para a região de solo acima do nível d'água foi considerada a poro pressão negativa relativa às sucções obtidas pela CCSA experimental, com os pontos de umidade medidos no campo. Foi considerada uma linha de tendência exponencial representativa para todos os pontos (Figura 5.3).

Como as condições climáticas variam muito no tempo e no espaço, o mais correto seria utilizar os dados da estação meteorológico, instalada próximo ao poço experimental, medindo dados para cada intervalo de tempo considerado. Mas como aconteceram problemas na aquisição de dados, estes não foram utilizados nas análises. Considerou-se

então as médias históricas de precipitação e evapotranspiração considerando uma condição climática representativa da região metropolitana de Goiânia. O INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) forneceu os dados de precipitação (Figura 5.4) e o EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) forneceu os dados de evapotranspiração (Figura 5.5). Esta consideração é razoável pelo fato de que as médias históricas, de pontos não tão próximos do perfil considerado, são geralmente os únicos dados que estarão disponíveis para o engenheiro geotécnico realizar suas análises. Médias históricas são também utilizadas para previsões futuras. As médias mensais de precipitação e evapotranspiração foram consideradas distribuídas ao longo do tempo, ou seja, intensidades pontuais de precipitação e evapotranspiração foram desconsideradas.

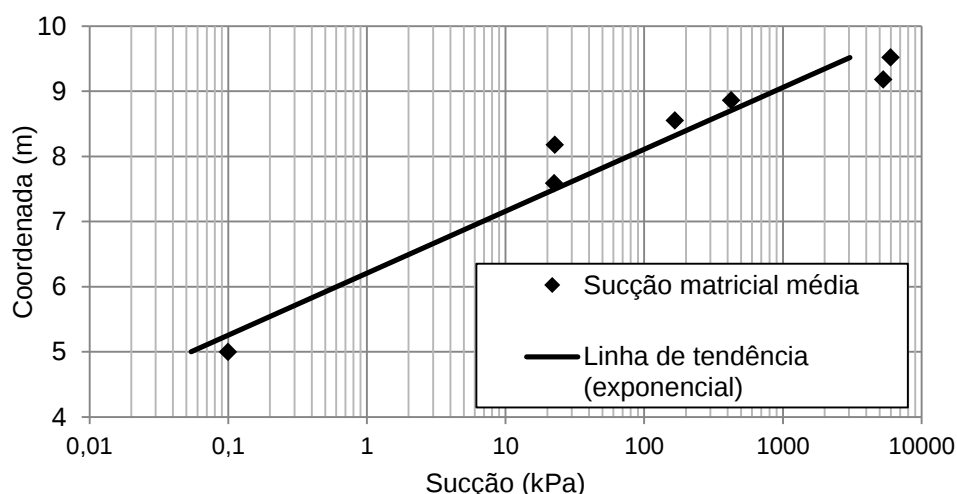


Figura 5.3: Condição inicial de poro pressão negativa

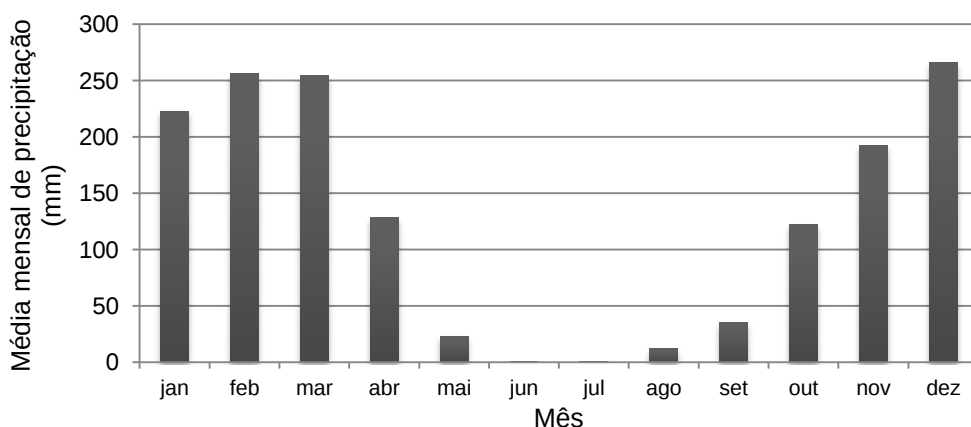


Figura 5.4: Médias mensais históricas de precipitação para o período de 2001 a 2009 (INMET – Instituto Nacional de Meteorologia)

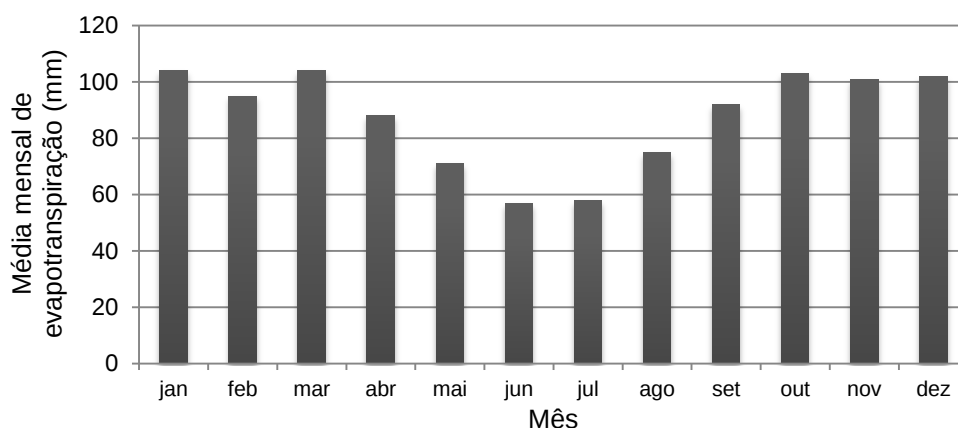


Figura 5.5: Médias mensais históricas de evapotranspiração para o período de 1961 a 1990 (EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)

5.2 PROPRIEDADES DO SOLO

As propriedades gerais do solo analisado se apresentam na Tabela 5.1. Para a mesma geometria proposta, foram considerados três conjuntos de curvas características solo-água. A primeira obtida experimentalmente, a segunda obtida pelo método de previsão de Arya e Dierolf (1989) e o terceiro obtido pelo método de previsão proposto nesta pesquisa. Os pontos de referência, para as três curvas citadas, estão mostrados na Tabela 5.2. Para a CCSA obtida experimentalmente foram considerados os valores médios referentes a curva de molhagem e secagem (sucção matricial).

Tabela 5.1: Propriedades gerais do solo analisado

Propriedade	Solo bimodal	Solo unimodal
$\rho_s^{(1)}$	2,742	2,736
$\rho_d^{(2)}$	1,338	1,292
$e_0^{(3)}$	1,083	0,913

(1) Massa específica dos sólidos (g/cm³); (2) Peso específico natural seca (g/cm³); (3) Índice de vazios inicial

Tabela 5.2: Pontos de referência para a curva característica solo-água

	CCSA Experimental		CCSA Arya e Dierolf		CCSA Silva Júnior	
	Solo bimodal	Solo unimodal	Solo bimodal	Solo unimodal	Solo bimodal	Solo unimodal
$\psi_{b1}^{(1)}$	3,50	3,00	3,00	5,00	0,50	5,00
$\psi_{res1}^{(2)}$	13,00	490,00	60,00	50,00	100,00	50,00
$S_{res1}^{(3)}$	0,445	0,250	0,480	0,370	0,480	0,370
$\psi_{b2}^{(4)}$	3500,00	-	4000,00	-	800,00	-
$S_b^{(5)}$	0,355	-	0,300	-	0,320	-
$\psi_{res2}^{(6)}$	25950,00	-	20000,00	-	20000,00	-
$S_{res2}^{(7)}$	0,018	-	0,030	-	0,02	-
$\alpha^{(8)}$	0,06	0,09	0,03	0,09	0,03	0,090

(1) Primeiro valor de entrada de ar; (2) Primeiro valor de sucção residual; (3) Grau de saturação correspondente ao primeiro valor de sucção residual; (4) Segundo valor de entrada de ar; (5) Grau de saturação correspondente ao primeiro valor de entrada de ar; (6) Segundo valor de sucção residual; (7) Grau de saturação correspondente ao segundo; (8) Parâmetro de ajuste valor de sucção residual

Foram consideradas três valores de permeabilidade, para o solo saturado, indicados por Borges (2010). Para a região menor que 5,05 metros foi considerado o valor de $1,3 \cdot 10^{-7}$ m/s, para região entre 5,05 e 7,30 foi considerado o valor de $2,8 \cdot 10^{-8}$ m/s, e para região maior que 7,30 foi considerado o valor de $1,1 \cdot 10^{-6}$ m/s. A permeabilidade para o solo não saturado foi calculada utilizando Brook & Corey (1964).

5.3 MODELO DE ANÁLISE

A lei de Darcy (1856) é uma das primeiras equações propostas para descrever o fluxo de água no solo saturado. Mas foi Buckingham (1907) quem estendeu a equação de Darcy para a condição de solo não saturada. Depois Richards (1928) reescreveu a equação de Buckingham utilizando carga total como potencial de condução. Richards (1931) combinou a equação de conservação de massa de água e a lei de fluxo, obtendo uma equação que governa o transiente unidimensional do fluxo de água no solo saturado ou não saturado. A equação, conhecida com equação Richard, foi utilizado no modelo de análise e é escrita a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5.1)$$

onde: $\partial/\partial y$ é a derivada em relação a direção y ; k é o coeficiente de permeabilidade; $h = u_w/\gamma_w + y$ é a carga total; y é a elevação em relação a um determinado referencial; u_w é a poro pressão de água; γ_w é o peso específico do líquido; θ é a umidade volumétrica; $\partial/\partial t$ é a derivada em relação ao tempo.

A análise numérica foi desenvolvida no programa computacional FlexPDE versão 6.15. O programa FlexPDE é uma ferramenta que oferece um ambiente de solução integrada, incluindo a linguagem para a descrição do problema, a modelagem numérica e a saída gráfica das soluções. O programa não tem uma lista definida de equações. A escolha das equações diferenciais parciais utilizadas no programa é de responsabilidade total do usuário, como também as condições iniciais, condições de fronteira e propriedades que representam o problema analisado. A Figura 5.6 mostra a tela de edição numérica do FlexPDE. Maiores detalhes podem ser encontrados no Manual do Usuário do FlexPDE disponível na internet (<http://www.pdesolutions.com>).

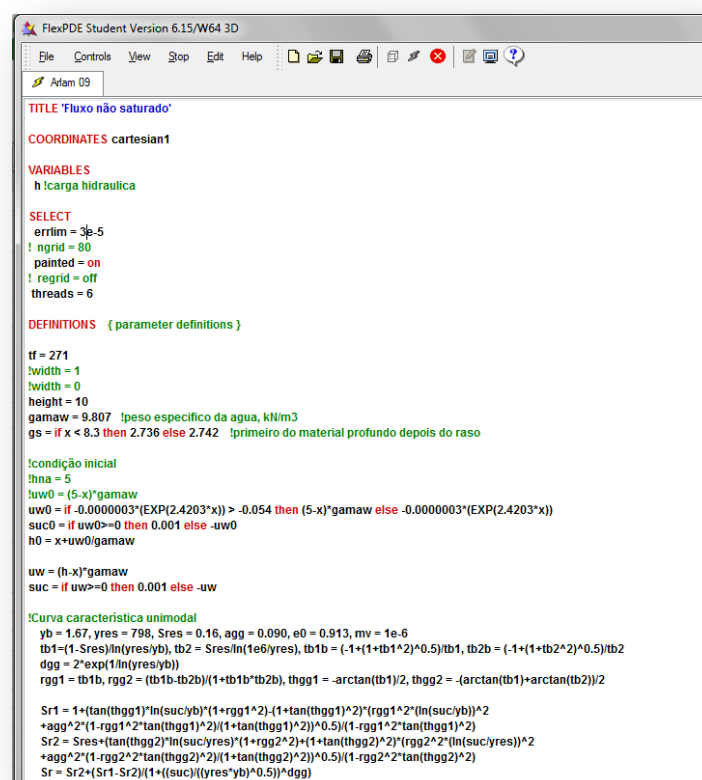


Figura 5.6: Editor do FlexPDE

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas três análises numéricas para a previsão de umidade gravimétrica e sucção. A primeira análise numérica (AN1) considerou a média entre as curvas características solo-água de molhagem e secagem referentes a sucção matricial, obtidas experimentalmente. A segunda análise numérica (AN2) considerou a CCSA prevista pelo método de Arya e Dierolf (1989), e a terceira análise numérica (AN3) considerou a CCSA prevista pelo método proposto nesta pesquisa. A data inicial considerada foi de 26 de março de 2010. Os seguintes passos de tempo foram considerados na saída gráfica: 24 de junho de 2010, 17 de setembro de 2010, 15 de outubro de 2010 e 22 de dezembro de 2010. Estas datas coincidem com datas de monitoramento em campo.

Os modelos numéricos foram rodados no software FlexPDE em um computador com processador “Quad Core Intel Core I7-720QM 1.73 GHz” com memória interna de 6GB. A duração média, gasta para o processamento de cada modelo, foi de uma hora.

Os resultados de previsão de umidade são mostrados da Figura 5.7 a Figura 5.9. Os dados experimentais de umidade gravimétrica (DE) são plotados como pontos para comparação. As três análises realizadas fornecem resultados razoáveis para o perfil com coordenada menor que nove metros, onde as variações experimentais foram menores ao longo do tempo. Para a região entre a coordenada de nove e dez os resultados foram discrepantes.

Os resultados de previsão de sucção são mostrados da Figura 5.10 a Figura 5.12. Considerando somente as sucções obtidas dos dados de umidade, relacionadas nas CCSA experimentais, os resultados de previsão de sucção foram semelhantes aos resultados de previsão de umidade, sendo considerado razoável até a coordenada de 9 metros e discrepante para a profundidade mais rasa. É importante notar que as sucções no topo do perfil (coordenada igual a 10 metros) foram sempre positivas, indicando poro-pressão de água negativa e conseqüentemente ausência de água empoçada. Pela análise da tendência da curva de sucção se aproximar de zero, nota-se que o nível d'água pouco variou ao longo do tempo, mantendo-se próximo de 6 metros.

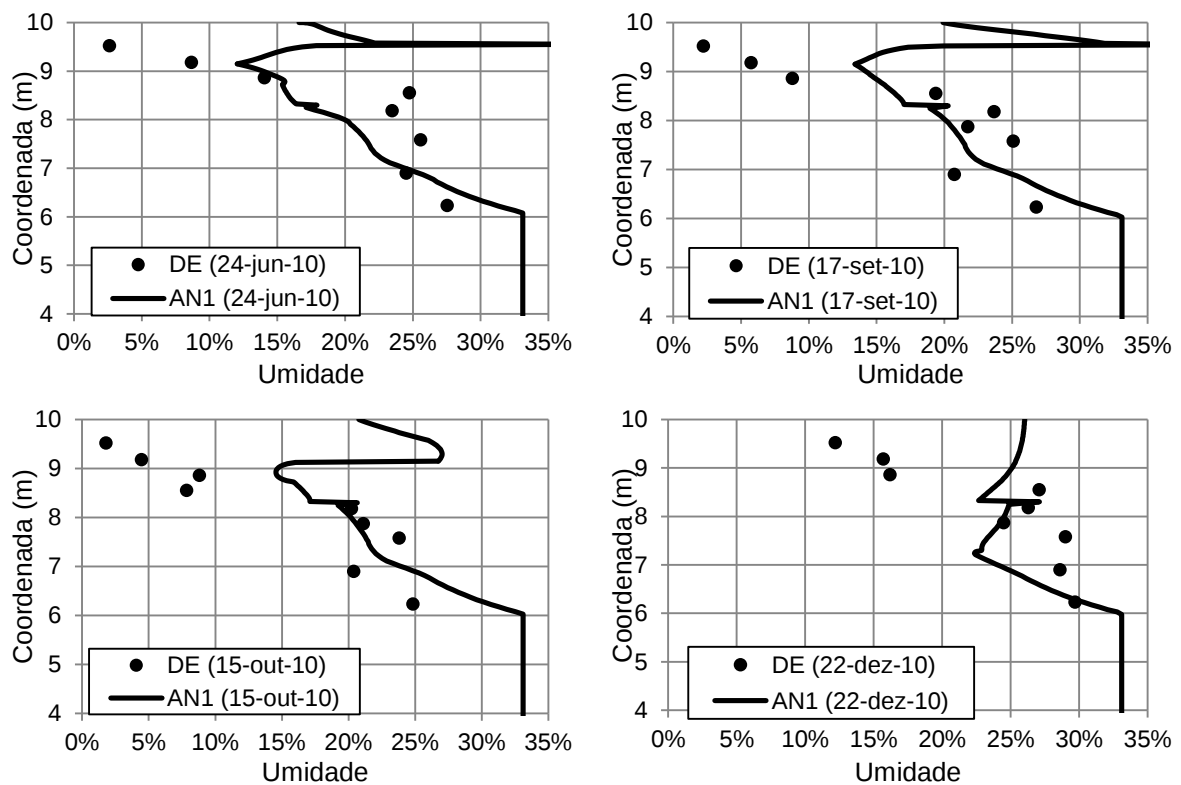


Figura 5.7: Previsão de umidade gravimétrica ao longo do perfil (Análise numérica 1)

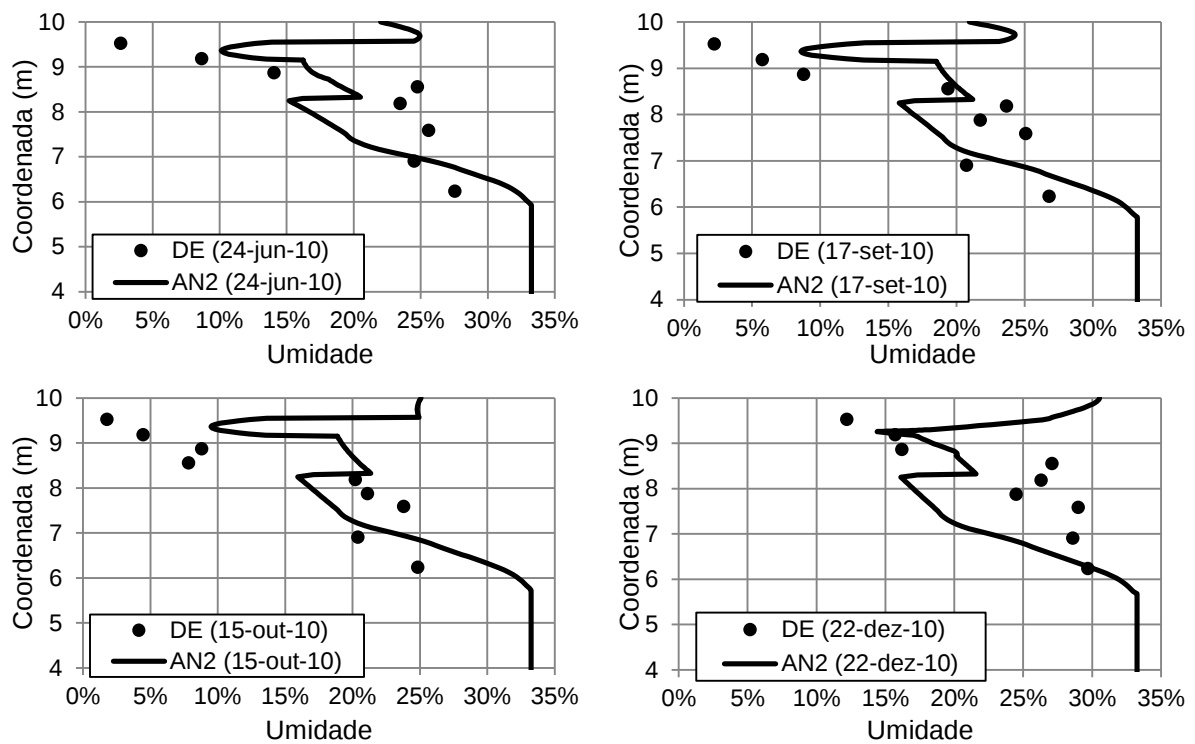


Figura 5.8: Previsão de umidade gravimétrica ao longo do perfil (Análise numérica 2)

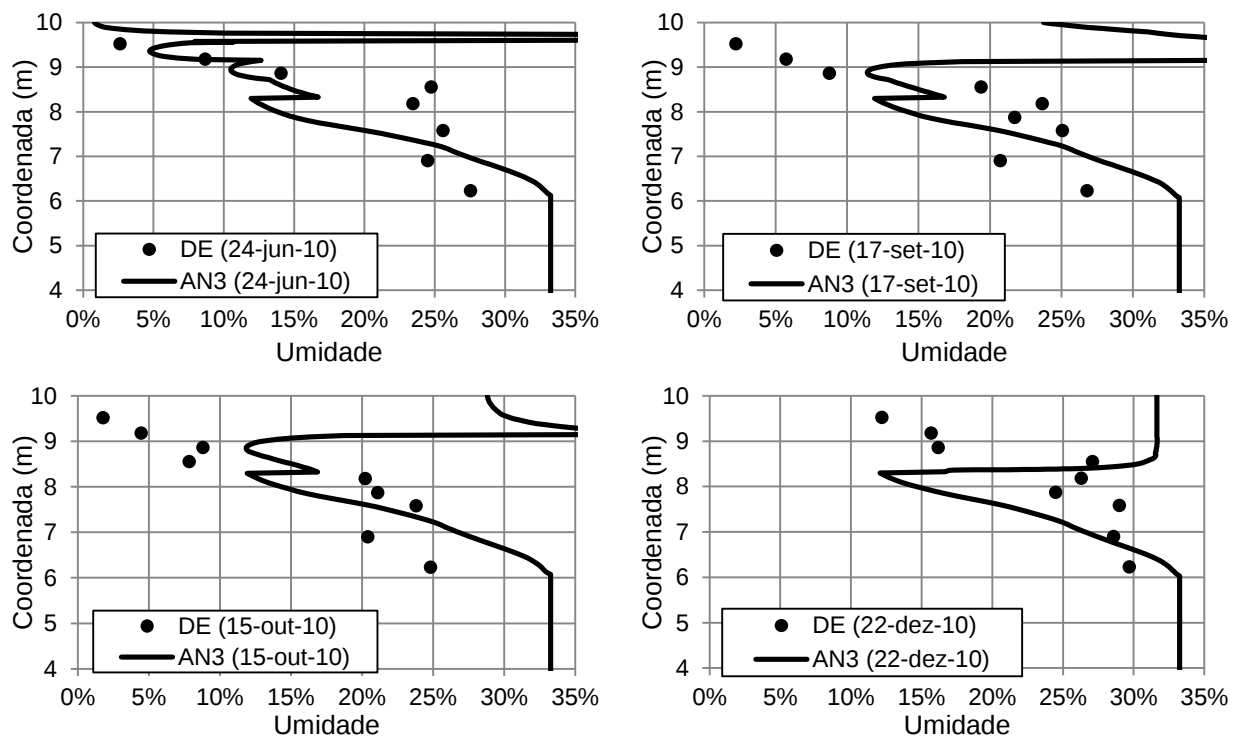


Figura 5.9: Previsão de umidade gravimétrica ao longo do perfil (Análise numérica 3)

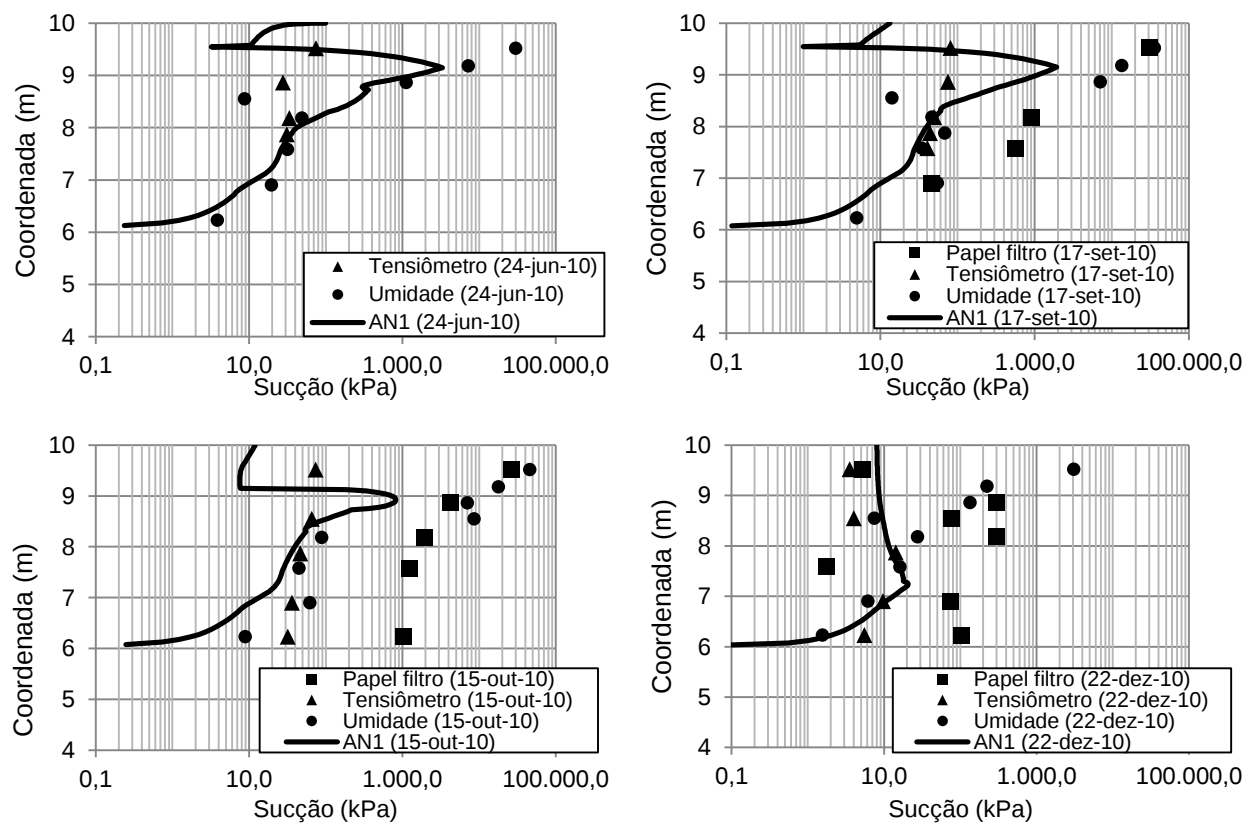


Figura 5.10: Previsão de sucção ao longo do perfil (Análise numérica 1)

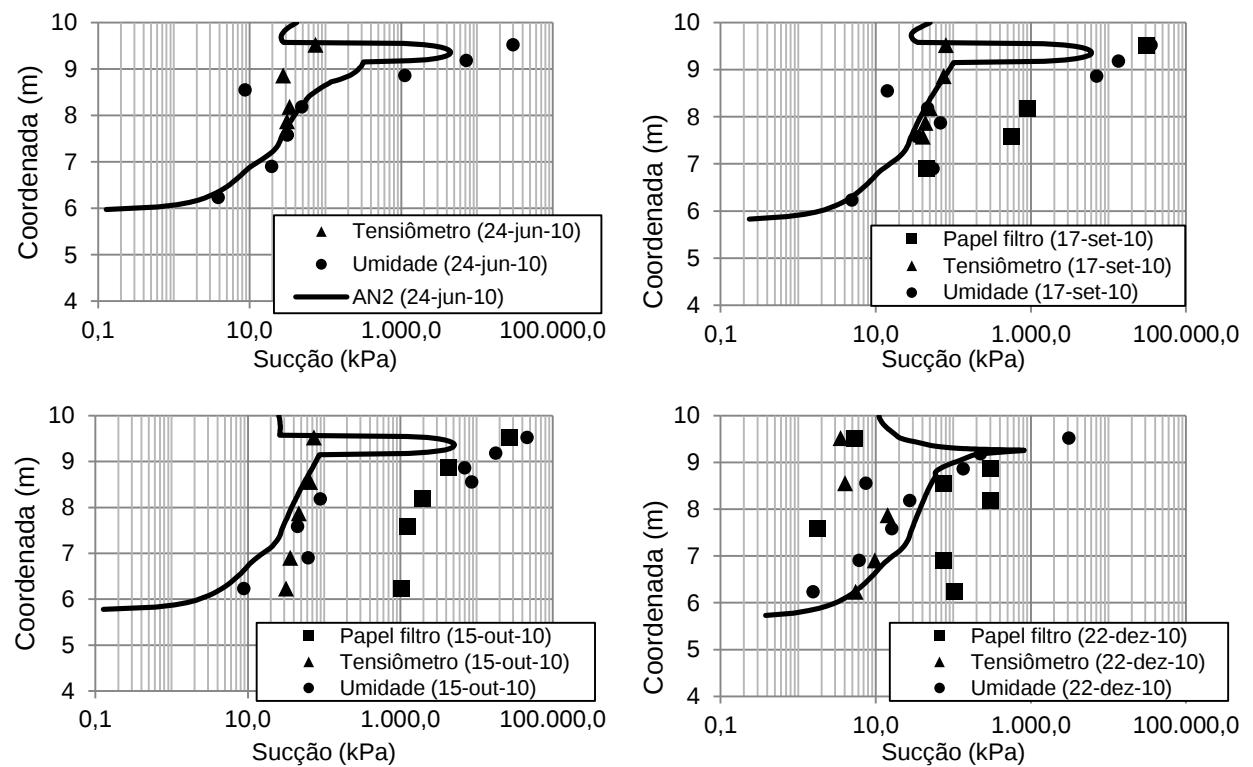


Figura 5.11: Previsão de sucção ao longo do perfil (Análise numérica 2)

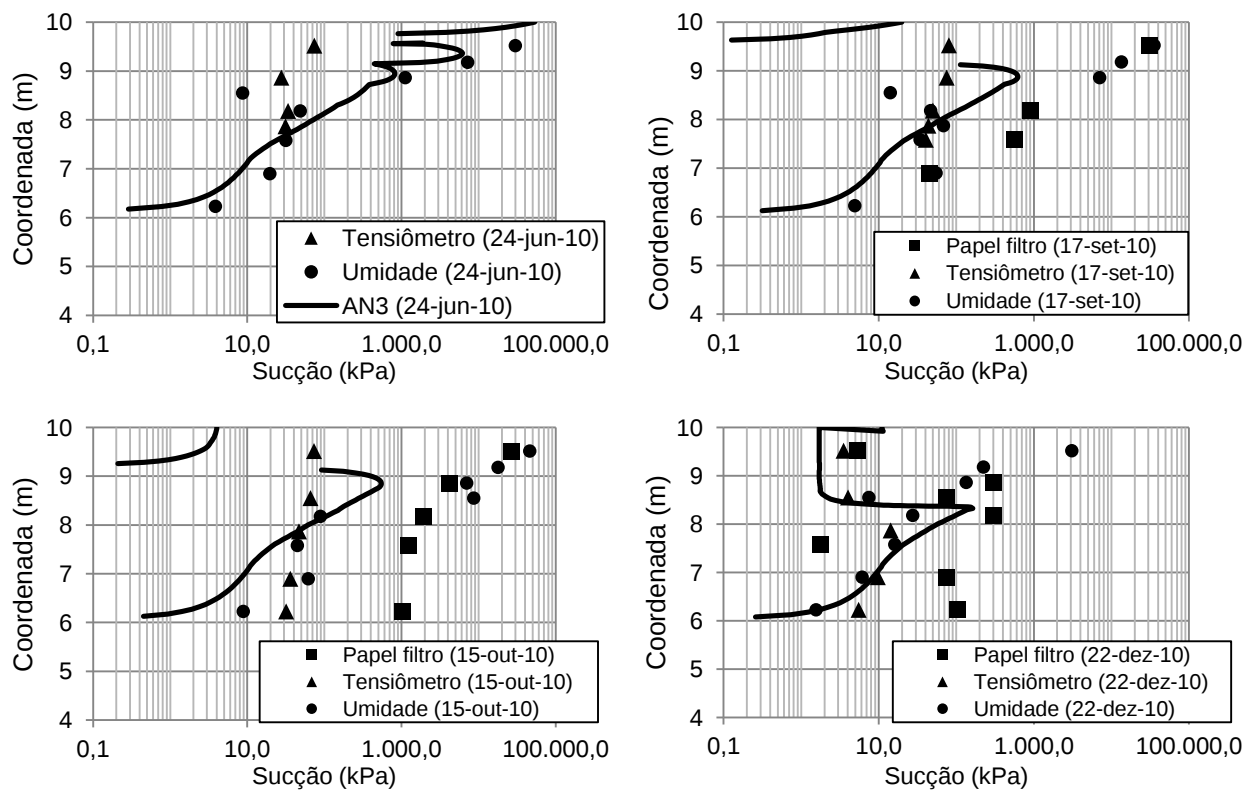


Figura 5.12: Previsão de sucção ao longo do perfil (Análise numérica 3)

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar e aperfeiçoar a abordagem mecânica de previsão das variações das condições de sucção e umidade, de um perfil de solo não saturado. Condições de umidade, sucção e condições atmosféricas foram monitoradas e comparadas. A curva característica solo-água experimental foi comparada com as curvas características solo-água previstas por três métodos já existentes e um outro método proposto pelo autor.

Em relação às características e propriedades dos perfis de solo analisados, conclui-se que:

- O campo experimental implantado em Furnas encontra-se próximo aos limites de dois tipos de solo: o latossolo vermelho e o cambissolo háplico.
- Os resultados dos ensaios de granulometria utilizando o granulômetro a laser se diferenciaram muito dos resultados dos ensaios de granulometria pelo método convencional, quando comparados as quantidades de materiais resultantes.

Em relação aos métodos de previsão analisados, conclui-se que:

- A granulometria convencional com defloculante resultou em curvas características solo-água mais próximas dos dados experimentais, quando comparada a outras granulometrias. Este comportamento foi observado tanto para o solo do campo experimental de Furnas como para o campo experimental da Universidade de Brasília.
- Considerando o perfil do campo experimental de Furnas, o método de previsão proposto pelo autor apresentou as curvas mais próximas dos dados experimentais de sucção matricial, em todas as profundidades. Porém o formato das curvas se limitou ao formato unimodal, visto que, somente os parâmetros da curva unimodal foram considerados no desenvolvimento do método.
- Os métodos de previsão de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989) resultaram em curvas bimodais bem próximas das curvas bimodais mais rasas. Este desempenho foi obtido utilizando a granulometria convencional com defloculante.

- O método de Aubertin *et al.* (2003) resultou em curvas dispersas dos pontos experimentais considerados, sendo mais representativas em regiões de baixo valor de sucção.

Em relação ao monitoramento das condições do solo e atmosféricas no campo experimental de Furnas, conclui-se que:

- O método de papel filtro pode ser aplicado no campo utilizando-se equipamentos simples e baratos.
- A utilização de dois papéis filtro em conjunto resultou em dados de umidade bem próximos, e conseqüentemente de sucção.
- A saturação do tensiômetro utilizado nesta pesquisa tem duração aproximada de 40 minutos.
- As variações de sucção e umidade do solo são acompanhadas pelas variações das características da vegetação local.
- A variação do nível do lençol freático do campo experimental de Furnas chegou a 5 metros.
- O tensiômetro utilizado obteve bons resultados para o intervalo de sucção de 10 a 60 kPas.
- Os dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro se aproximaram muito bem das curvas características solo-água (sucção total) para a profundidade mais rasa considerada.

Em relação as análises numéricas, conclui-se que:

- As três análises realizadas para previsão de sucção e umidade obtiveram resultados razoáveis considerando o perfil mais profundo. Para o metro mais raso os resultados foram discrepantes.

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir do presente trabalho é possível sugerir os seguintes temas para pesquisas futuras:

- Relacionar com mais detalhes as curvas granulométricas obtidas por ensaios convencionais e as curvas granulométricas obtidas pelo granulômetro a laser.
- Obter em campo outras propriedades do solo de Furnas e relacionar com os dados de sucção e umidade apresentados no presente trabalho.
- Aplicar os métodos de previsão de curva característica solo-água em solos tropicais de outras regiões.
- Desenvolver uma curva de calibração, para o papel filtro, específica para ensaios em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT _____. **NBR 7181: SOLO – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**. SÃO PAULO, SP, 13p., 1984.

ARYA, L. M.; DIEROLF, T. S. Predicting soil moisture characteristics by particle-size distributions: an improved method to calculate pore radii from particle radii. *In: **Proceedings of the Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils***, p. 115-124, 1989.

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Soc. Am. Journal**, v.45, p. 1023-1030, 1981.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIERE, B.; CHAPUIS, R.P. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, nº 6, p. 1104-1122, 2003.

BORGES, C. R. **Comportamento hidro-mecânico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia-GO**. 2010. 2 volumes. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2010.

BROOKS, R.H. & COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrol. Fort Collins, Colo. State University. 27p.,1964.

BUCKINGHAM, E. Studies of the movement of soil moisture. **U.S.D.A. Bur. Soils Bull**, nº 38, 1907.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. Relato: Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. *In: 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, 2005, São Carlos, SP, **Anais...**, 2005.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The Filter-paper Method of Suction Measurement. **Géotechnique**, v. 36, nº 2, p. 265-268, 1986.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A Low-cost Method of Assessing Clay Desiccation for Lowrise Buildings. **Proceedings...**, Institute of Civil Engineering, v. 92, nº 2, p. 82-89, 1992.

CRILLY, M. S., SCHREINER, H. D. and GOURLEY, C. S. A Simple Field Suction Measurement Probe, *Geotechnics in the African Environment*, **Proceedings of 10th Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering / 3rd Int. Conf. on Tropical and Residual Soils**, v. 1, p. 291-298, 1991.

FREDLUND, D. G. **Comparison of soil suction and one-dimensional consolidation characteristics of a highly plastic clay**. M.Sc. Thesis, University of Alberta, Edmonton Alta., Canada: 116p., 1964.

FREDLUND, D. G. Soil suction monitoring for roads and airfields, *In: Symposium on the State-of-the-Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields*, **Proceedings...**, Hanover, Alemanha, Março, 1989.

FREDLUND, D.G.; RAHARJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soil**. John Wiley & Sons, New York, United States of America: 517p., 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 533-546, 1994.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-water characteristic curve equation with independent properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v. 130, nº 2, 2004.

GITIRANA JR., G. F. N. **Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability**. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada: 316p., 2005.

GITIRANA JR., G. F. N; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CORDÃO NETO, M. P. Previsão de Curvas Características de um Perfil de Solo Colapsível de Brasília Utilizando Curvas Granulométricas. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Curitiba, Paraná, **Anais...**, 2006.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G; LIMA, M.C.G. **Fluxo em Solos Não Saturados e o Processo Erosivo**. *In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. 1ª ed., Brasília: FINATEC, v. 1, p. 285-317, 2006.

GOURLEY, C.S., SCHREINER, H.D. Field measurement of soil suction. *In: ALONSO, E. E; DELAGE, P. G. Unsaturated soils. **Proceedings of 1st International Conference on Unsaturated soils***, v. 2, Balkema, Paris, Rotterdam, p. 601-607, 1995.

GUAN, Y.; FREDLUND D. G. Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 34, p. 604-614, 1997.

GUAN, Y.; FREDLUND D. G.; GAN J. K. M. Behaviour of water subjected to high tensile stress. **Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated soils**, Beijing, China, p. 356-361, 1998.

HAMBLIN, A. P. Filter paper method for routine measurement of field water potencial. **Journal Hydrol**, v. 53, p. 355-360, 1981.

JOHARI, A.; JAVADI, A. A. Prediction of soil-water characteristic curve using neural network. **Proceedings of the 5nd International Conference on Unsaturated soils**, Barcelona, Espanha, p. 461-466, 2010.

JONES, W. M.; OVERTON, G. D. N.; TREVENA; Tensile strength experiments with water using a new type of Berthlot tube. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 14, p. 1283-1291, 1981.

KOVÁCS, G. **Seepage hydraulics**. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 730p. 1981.

LEONG, E. C.; HE., L.; RAHARDJO, H. Factors Affecting the Filters Paper Method for Total Suction Measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, nº 3, p. 322-333, 2002.

LIMA, M. C.; SOUZA, N. M.; CAMAPUM de CARVALHO, J.; SANTOS, P. M. Jr. Obtenção da curva granulométrica utilizando o granulômetro a laser. *In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 2002. São Paulo, SP, **Anais...**, v. 1, p. 457-465, 2002.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. *In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação*, Foz de Iguaçu, Paraná, **Anais...**, v. 2, p. 515-522, 1994.

MARINHO, F. A. M; CHANDLER, R. J. On the relationship between suction and degree of saturation of soils. *In: 2º Simpósio sobre solos não saturados*. Recife, Pernambuco, **Anais...**, p. 37-44, 1994.

MARINHO, F. A. M. **Mecânica dos Solos não Saturados - Parte 1.** (Notas de aula para o curso de Mecânica dos Solos não Saturados), 167p., 1995.

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O.M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29 nº 3, p. 1-9, 2006.

MARINHO F. A. M.; TAKE A.; TARANTINO, A. Tensiometric and axis translation techniques for suction measurement. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26 nº 6, p. 615-631, 2008.

MBONIMPA, M.; AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R. P.; BUSSIÈRE, B. Pratical pedotransfer funtions for estimationg the saturated hydraulic conductivity. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 20, 235-259, 2002.

MUALEN, Y. A new model for predicting the hydraulix conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, p. 513-522, 1976.

PHAM, H. Q., **A volume-mass constitutive model for unsaturated soils.** Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada: 411p., 2005.

RICHARDS, L. A. The usefulness of capillary potencial to soil moisture and plant investigators. **J. Agriculture**, nº 37, p. 719-742, 1928.

RICHARDS. L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, nº1, 1931.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Géotechnique**, v. 43, nº 2, p. 321-324, 1993.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. Measurement of suction in materials which swell. **Appl Mech Rev**, v. 48, nº 9, p. 727-732, 1995.

RIDLEY A. M.; BURLAND J. B. Discussion: Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. **Canadian Geotechnical Journal** v. 36, p. 178-180, 1999.

ROSENO, J. L.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser. *In: III Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no Centro-Oeste*, 2007. Cuiabá, MT, **Anais...**, p. 137-147, 2007.

STANNARD, D.I. Tensiometers – theory, construction, and use. **Geotechnical Testing Journal**, v.15, nº 1, p. 48-50, 1992.

TARANTINO, A.; MONGIOVÌ, L. Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction. **Géotechnique**, v. 53, nº 1, p. 137-141, 2003.

TARANTINO, A. Panel Lecture: Direct measurement of soil water tension. **Proceedings. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils**, Recife, Brazil (ed. JUCÁ, J. F. T., DE CAMPOS, T. M. P.; MARINHO, F. A. M.), v. 3, p. 1005-1017, 2004.

UEHARA, G. Acric properties and their significance to soil classification. **Proceedings of the International soil classification workshop**, Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNLCS, p. 19-22, 1988.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 510p, 1943.

TOKER, N.K., GERMAINE, J.T. and CULLIGAN, P.J. Comment on ‘Cavitation during desaturation of porous media under tension’ by Dani Or and Markus Tuller, **Water Resources Research**, v. 39, nº 11, p. 1-1, 2003.

WANG, Z.; AN, J. Y.; KUANG, J. J. The precision of filter paper method for matric suction measurement. **Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated soils**, v. 2, Beijing, China, p. 239-242, 1998.

WANG, Z.; LAO, Y. D. Measurement of matric suction of loess in Shanxi Province. Unsaturated Soils. **Proceedings. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils**, Recife, Brazil (ed. JUCÁ, J. F. T., DE CAMPOS, T. M. P.; MARINHO, F. A. M.), Lisse: Swets & Zeitlinger, v. 1, p. 347-350, 2002.

WILSON, G. W., **Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems**. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada: 464p., 1990.