



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA PARA DESCREVER O
COMPORTAMENTO DE UM SOLO EXPANSIVO**

WILLIAM DE PAIVA

RECIFE, 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA PARA DESCREVER O
COMPORTAMENTO DE UM SOLO EXPANSIVO**

Tese submetida ao Corpo Docente da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: Prof. José Maria Justino da Silva, D.Sc.

RECIFE, 2009

P149a

Paiva, William de.

Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo / William de Paiva. – Recife: O Autor, 2009.
xxi, 193 folhas, il : grafs., tabs., figs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2009.

Inclui Bibliografia e Anexos

1. Engenharia Civil. 2. Análise Estatística. 3. Argila Expansiva. 3. Variação Volumétrica. I. Título

UFPE

624

CDD (22. ed.)

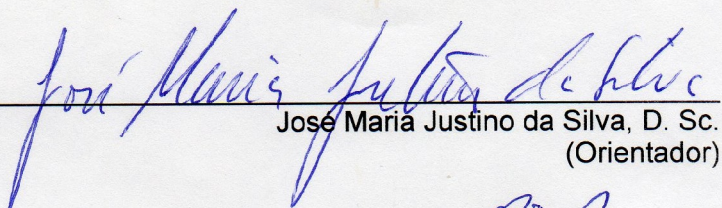
BCTG/2009- 129

**APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA PARA DESCREVER O
COMPORTAMENTO DE UM SOLO EXPANSIVO**

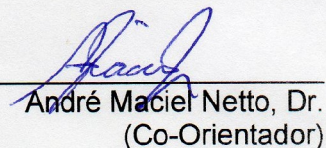
William de Paiva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO
PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU
DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL

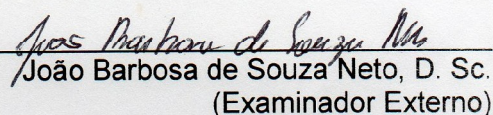
Aprovada por:



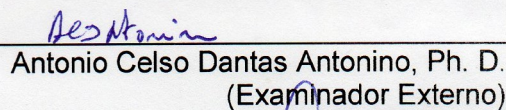
José Maria Justino da Silva, D. Sc.
(Orientador)



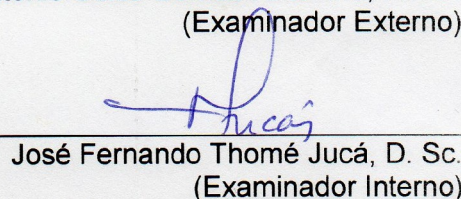
André Maciel Netto, Dr.
(Co-Orientador)



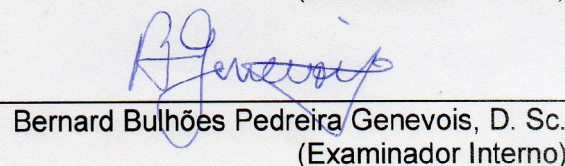
João Barbosa de Souza Neto, D. Sc.
(Examinador Externo)



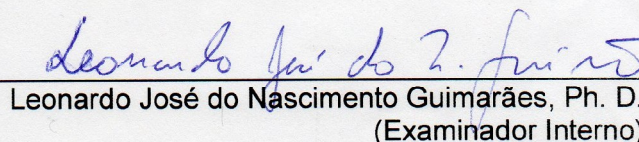
Antonio Celso Dantas Antonino, Ph. D.
(Examinador Externo)



José Fernando Thomé Jucá, D. Sc.
(Examinador Interno)



Bernard Bulhões Pedreira Genevois, D. Sc.
(Examinador Interno)



Leonardo José do Nascimento Guimarães, Ph. D.
(Examinador Interno)

Recife, PE – Brasil
Janeiro de 2009

DEDICATÓRIA

**A meu pai/avô José Benício
Sobrinho pelo seu exemplo de
vida e ensinamentos na formação
do meu caráter.**

Muito se tem falado sobre as curas de Jesus, mas não há como negar que, por trás de todas elas, há um grande ensinamento moral. O corpo é apenas o estágio final de uma doença que começou na alma.

(Djalma Santos)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, senhor supremo e pai de todos, espírito extremamente elevado que transmite a nós todo o conforto, paz e coragem para cumprir com nossa missão aqui na terra nessa passagem efêmera até a próxima existência.

A meu pai-avô José Benício Sobrinho pelos ensinamentos da vida, instrumento que Deus colocou na minha existência para ensinar e vigiar meus passos no caminho da moral, honestidade e bom caráter.

A Minha filha Lais Paiva, luz do meu caminho e reconforto para as lutas do dia.

A Minha noiva Roberta Raphaela Fraga Oliveira, pelo companheirismo e ajuda nos momentos mais difíceis, inclusive nas debilidades de saúde, pois exerce sua profissão de enfermeira com muito amor e dedicação.

A Minha irmã/tia Maria José Benício sua filha Catarine Michele Benício pelo companheirismo e acolhida a minha pessoa por longo período.

Ao meu orientador José Maria Justino, pela dedicação e luta para me colocar no caminho certo.

Ao meu co-orientador André Maciel Netto pela atenção e dedicação durante todo esse trabalho;

Ao Professor Bernard Genevois que foi um instrumento utilizado por Deus para possibilitar a apresentação pública deste trabalho, disponibilizando seu conhecimento de estatística para esse trabalho.

Ao Departamento de Matemática, Estatística e Computação (DMEC) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) pela liberação por dois anos para realizar os estudos desta pesquisa.

Ao meu amigo/irmão Gerson Marques Santos, pelo companheirismo e amizade por esses longos cinco anos de trabalho conjunto.

Aos Laboratoristas de solos e Instrumentação Antônio Brito e o Sr. Severino, que sempre esteve auxiliando com o seu conhecimento e amizade.

A funcionária administrativa Andréa, a quem admiro pela competência e seriedade com que realiza seu trabalho e pela amizade a nós alunos da pós-graduação.

Aos amigos: Jean, Ricardo, Eduardo, Frank, Roberto, Henrique, Marcio e todos que de forma direta e indireta contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Ao corpo docente da pós-graduação de Geociências da UFPE, pela colaboração na transferência de conhecimento e qualificação a todos nós alunos.

Ao CNPQ pelo financiamento financeiro desta pesquisa, sem o qual seria impossível realizá-la.

Ao corpo diretivo da COMPESA (Companhia de água e esgoto de Pernambuco), por ceder o local para construção do campo experimental e execução dos ensaios de campo.

RESUMO

Esta tese apresenta estudos realizados em uma área do município de Paulista, litoral norte do estado de Pernambuco. A maior parte dos solos é proveniente da ação do intemperismo sobre o calcário margoso da Formação Maria Farinha. Os estudos estão relacionados à variação volumétrica e de umidade de uma argila expansiva não saturada para três condições distintas de cobertura (área sem vegetação, área coberta com uma placa de concreto asfalto e área com vegetação). Foram desenvolvidas investigações experimentais de campo e de laboratório. Observou-se que o nível do lençol freático flutuou entre 1,0m e 3,3 m de profundidade em relação à superfície do terreno. O trabalho de campo consistiu na obtenção de amostras indeformadas tipo "shelby"; verificação da temperatura do solo através de termopar a cada três meses; determinação da umidade gravimétrica, volumétrica e do grau de saturação com a sonda de nêutrons; medidas de deslocamento vertical utilizando placas superficiais; definição do nível de água através de piezômetros tipo Casagrande. Em laboratório fez-se a caracterização física do solo de cada célula imaginária geostatística, mineralogia da fração argila, expansão livre, permeabilidade, peso específico aparente natural, sucção matricial, determinação dos demais índices físicos e da curva de retenção. Através das leituras com a sonda de nêutrons, verifica-se como ocorre a variação de umidade e grau de saturação, entre as áreas, em um período de quinze meses e a uma profundidade que variou de 0,1m a 2,5 m. Para a interpretação dos resultados utilizou-se da estatística clássica, sendo usados os parâmetros descritivos para um conhecimento inicial dos dados. Em seguida foi aplicada à inferência estatística por meio da análise de variância para um e dois fatores, regressão linear simples, análise multivariada em componentes principais (A.C.P). A Geoestatística foi utilizada para determinação da dependência espacial entre as variáveis e geração de mapas de comportamento das variáveis no tempo. As análises realizadas indicaram que devido à diferença de cobertura há uma variação de umidade, sucção, temperatura e volume diferente entre as três áreas e ocorre uma menor flutuação de umidade no centro da placa, se acentuando na área das bordas. Portanto, movimentos diferenciais e, conseqüentemente, processos de fissura na placa.

Palavras-chave: Análise estatística, Argila expansiva não saturada e Variação volumétrica.

ABSTRACT

This thesis shows studies accomplished in an area of Paulista borough, located in the north coast of Pernambuco state, Brazil. The biggest part of the soils is originated from the intemperism action upon the clayey limestone of Maria Farinha formation. The studies are related to volumetric and moisture variation of an unsaturated expansive clay for three distinctive conditions of covering (area without vegetation, area covered by concrete asphalt plate and area with vegetation). Field and laboratory experimental investigations were developed. It was observed that the level of the freatic sheet fluctuated between 1,0 m and 3,3 m depth in relation to the land surface. The field investigations consisted of the acquisition of undeformed samples of shelly type; verification of the soil temperature through thermopair on a three months basis; volumetric and gravimetric moisture determination and of the saturation level with a neutrons research equipment, vertical displacement measurements using superficial plates; definition of the water level through Casagrande type piezometers. The physical characterization of the soil of each geostatistic imaginary cell, mineralogy of clay fraction, free expansion, permeability, natural apparent specific weight, matric suction, determination of the other physical indexes and of the retention curve were accomplished in laboratory. It is observed, through readings with a neutrons research equipment, how the moisture variation and saturation level occur, between areas, in a fifteen months period of time and in a depth that varied from 0, 1m to 0,5m. The classical statistics was used for the results interpretations and the descriptive parameters were used for an initial knowledge of the data. After that, it was applied to statistic inference through variance analysis for one and two factors, simple linear regression, multivaried analysis in main components. Geostatistics was used for the determination of the spatial dependence between the variables and behavior maps generation of variables in time. The accomplished analyses showed that due to the covering difference there is a different moisture, suction, temperature and volume variation between the three areas and a smaller moisture fluctuation occur in the center of the plate, becoming pronounced in the edges. Therefore, differential movements occur and consequently the crack of the plate.

Key Words: Statistic Analysis, Unsaturated Expansive Clay and Volumetric Variation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
RESUMO	
ABSTRACT	
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	4
1.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Organização da Tese.....	5
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Principais Argilominerais Formadores dos Solos Expansivos.....	7
2.1.1 Calinita.....	7
2.1.2 Ilita.....	7
2.1.3 Montmorilonita.....	7
2.2 Identificação e Classificação dos Solos Expansivos.....	9
2.2.1 Ensaio mineralógico.....	9
2.2.2 Métodos indiretos.....	9
2.2.3 Métodos diretos.....	10
2.3 Mecanismos de Expansão de Acordo com as Propriedades dos Argilominerais.....	11
2.4 Fatores que Influenciam na Expansão dos Solos.....	14
2.5 Contração dos Solos Expansivos.....	17
2.6 Sucção dos Solos.....	18
2.6.1 Sucção matricial.....	19
2.6.2 Sucção osmótica.....	19
2.7 Aspectos Relevantes de Estudos de Campo em Solos Expansivos.....	21
2.8 Curvas de Retenção.....	21
2.8.1 Histerese da curva característica de um solo não saturado.....	23
2.8.2 Modelos de ajuste das curvas de retenção.....	25
2.9 Movimento de Água em Solos não Saturados.....	27
2.9.1 Condutividade hidráulica dos solos não saturados...	27
2.9.2 Medidas de condutividade hidráulica de campo.....	29
2.9.3 Análise física dos processos de transporte da água e do calor no solo.....	31
2.10 Perfil de Sucção, Vegetação e Água Capilar.....	32
2.11 Evaporação e Infiltração.....	36
2.11.1 Evaporação.....	36
2.11.2 Infiltração.....	42
2.11.3 Interação atmosfera solo.....	45

2.12	Zona Vadosa.....	46
2.13	Instrumentação de medidas (umidade e temperatura) e técnica do papel de filtro.....	47
	2.13.1 Sonda de nêutrons.....	47
	2.13.2 Termopar.....	48
	2.13.3 Técnica do papel de filtro.....	49
2.14	Estudo estatístico.....	52
	2.14.1 Estatística Clássica.....	55
	2.14.2 Geoestatística.....	55
	2.14.3 Análise em componentes principais (A. C. P.).....	69
	2.14.4 Análise de variância (ANOVA).....	73
	2.14.5 Teste HSD de Tukey.....	74
	2.14.6 Teste Qui-Quadrado(χ^2).....	75
3.0	MATERIAIS E MÉTODOS.....	76
3.1	Aspectos Geológicos e Climáticos.....	76
3.2	Vegetação predominante.....	77
3.3	Campo experimental.....	79
3.4	Investigação de Campo.....	84
	3.4.1 Perfil geotécnico.....	85
	3.4.2 Amostragem Indeformada.....	87
	3.4.2.1 Aferição do processo de amostragem indeformada tipo “shelby”.....	87
	3.4.2.2 Extração das amostras indeformadas.....	89
3.4.3	Instrumentação de Campo.....	90
	3.4.3.1 Sonda de nêutrons.....	90
	3.4.4 Piezômetro tipo Casagrande.....	93
	3.4.5 Medidor temperatura.....	94
	3.4.6 Referência de nível profunda (R.N).....	95
	3.4.7 Placa de deslocamento vertical superficial.....	97
3.5	Atividades de Laboratório.....	98
	3.5.1 Caracterização mineralógica.....	98
	3.5.2 Caracterização física do solo.....	99
	3.5.3 Sucção matricial e curva de retenção.....	100
	3.5.3.1 Sucção matricial.....	101
	3.5.3.2 Curvas de retenção.....	101
	3.5.4 Permeabilidade da argila siltosa.....	102
	3.5.5 Ensaio de expansão livre.....	104
	3.5.6 Análise estatística.....	105
4.0	RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS.....	106
4.1	Caracterizações Física e Mineralógica do Solo.....	106
	4.1.1 Caracterização mineralógica.....	106
	4.1.2 Caracterização física.....	108
	4.1.3 Expansão livre.....	111
4.2	Curvas de Retenção.....	112
4.3	Umidade do Solo através da Sonda de Nêutrons.....	114
	4.3.1 Umidade volumétrica.....	114
	4.3.2 Umidade gravimétrica.....	114
4.4	Umidade Volumétrica e Sucção Matricial através do Índices Físicos.....	117
	4.4.1 Umidade volumétrica a partir de amostras	

	indeformadas.....	117
4.4.2	Sucção matricial a partir de amostras indeformadas.....	121
4.5	Temperatura.....	126
4.6	Análise em Componentes Principais (A.C.P).....	130
4.7	Comportamento da Umidade e Grau de Saturação entre as Áreas por Período.....	133
4.7.1	Fatores Climáticos.....	133
4.7.2	Área sem Vegetação.....	135
4.7.3	Área da Placa.....	137
4.7.4	Área com Vegetação.....	139
4.7.5	Troca de umidade entre as áreas.....	140
4.7.5.1	Área sem Vegetação/Área da Placa.....	140
4.7.5.2	Área com Vegetação/Área da Placa.....	141
4.7.6	Intensidade da Variação da Umidade Volumétrica por profundidade em toda a área.....	142
4.8	Análise Estatística do Comportamento da Umidade Gravimétrica e Sucção Matricial no plano localizado a 1,50 metros de Profundidade (amostragem Shelby).....	144
4.8.1	Análise Estatística do Comportamento da Umidade Gravimétrica.....	144
4.8.1.1	Qualidade da análise Geoestatística dos valores da umidade gravimétrica.....	150
4.8.1.2	Considerações sobre o estudo realizado.....	152
4.8.2	Análise Estatística do Comportamento da Sucção Matricial.....	153
4.8.2.1	Verificação do gradiente de sucção matricial em todo campo nos períodos úmido e seco.....	156
4.8.3	Análise do valor mediana da Sucção Matricial por Campanha de Ensaio.....	158
4.9	Variações Volumétricas.....	159
4.9.1	Deslocamento vertical superficial por toda a área.....	159
4.9.1.1	Análise da qualidade do estudo geoestatístico.....	164
4.10	Distância de Dependência Espacial.....	168
4.10.1	Dependência espacial da umidade gravimétrica (Barreira de proteção horizontal).....	168
5.0	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	169
5.1	Conclusões.....	169
5.1.1	Metodologia de trabalho.....	169
5.1.2	Caracterização física e mineralógica.....	170
5.1.3	Sucção matricial.....	171
5.1.4	Curva de retenção.....	171
5.1.5	Temperatura.....	171
5.1.6	Sonda de nêutrons.....	172
5.1.7	Análise em componentes principais (A.C. P).....	172
5.1.8	Deslocamento Vertical.....	172
5.1.9	Comportamento da umidade e grau de saturação no tempo.....	173
5.1.10	Comportamento da umidade e sucção no plano a 1,5	

	metros de profundidade.....	174
5.1.11	Distância de dependência horizontal.....	174
5.2	Recomendações para Futuras Pesquisas.....	175
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	176
	ANEXOS.....	184
	Anexo A-(DIFRATOGRAMA).....	184
	Anexo B – (CURVAS GRANULOMÉTRICAS).....	188
	Anexo C – (CURVAS DE RETENÇÃO).....	189
	Anexo D – (VALIDAÇÃO CRUZADA).....	191
	Anexo E - (TABELAS ESTATÍSTICAS).....	192

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Paredes de uma residência com fissuras (JUSTINO da SILVA, 2001).....	2
Figura 1.2	Validação cruzada.....	4
Figura 2.1	Principais estruturas argilominerais (CARVALHO, 1997).....	8
Figura 2.2	Diferentes tipos de água associada com a expansão cristalina (VELDES, 1992 apud PEREIRA,2004).....	13
Figura 2.3	Absorção de água por argilominerais: a) adsorção intercristalina de água num argilomineral do tipo 2:1 não expansivo(ilita); b) absorção intracristalina de água num argilomineral do tipo 2:1 expansivo (motmorilonita) (GILLOTT,1987 apud PEREIRA, 2004).....	14
Figura 2.4	Contração versus porcentagem de colóides (TEMPANY, 1917).....	17
Figura 2.5	Curva de contração dos solos (HAINES, 1923).....	18
Figura 2.6	Zonas da curva de retenção em função do grau de saturação (FREDLUND et al, 1996).....	23
Figura 2.7	Curvas características experimentais de um corpo poroso rígido (POULOVASSILIS, 1962 apud SANTOS, 2008).....	25
Figura 2.8	Variáveis de ajuste da curva de retenção (FREDLUND et al., 1994).....	26
Figura 2.9	Varição do Coeficiente de Condutividade Hidráulica em função do Grau de Saturação (MARINHO, 1998).....	28
Figura 2.10	Meniscos de uma ponte de líquido formado entre dois grãos. (LEAL, 2003).....	32
Figura 2.11	Perfil de Sucção (FREDLUND; RAHARDJO,1993).....	33
Figura 2.12	Perfil de Sucção representado pelo efeito da variação do nível do lençol freático (BLIGHT; LYELL, 1984).....	34
Figura 2.13	Tipos de água no solo e as sucções matriciais correspondentes(MARINHO,1998 apud COULT,1973).....	35
Figura 2.14	Perfis de ascensão capilar relacionados ao histórico do nível d'água, (PINTO,2000).....	36
Figura 2.15	Razão entre a evaporação real e a evaporação potencial em função da sucção matricial (HOLMES, 1961, apud WILSON, 1997).....	38
Figura 2.16	Razão entre a evaporação real e a evaporação potencial em função da sucção matricial (WILSON, 1997).....	39
Figura 2.17	Razão entre a evaporação real e a evaporação potencial em função da sucção matricial (UBALDO; BORMA; BARBOSA, 2006 apud WILSON, 1997).....	40
Figura 2.18	Perfil de solo para umidade gravimétrica e sucção matricial inicialmente saturado após o processo de umidificação.....	43
Figura 2.19	Medidas de Infiltração e Evaporação em função do tempo (WILSON,1990).....	44
Figura 2.20	Fluxo unidimensional de água entre o terreno e a atmosfera	

	(WILSON,1997).....	45
Figura 2.21	Perfil da zona vadoza.....	47
Figura 2.22	Circuito de medição do potencial “Seebeck” (MOREIRA, 2002)..	49
Figura 2.23	Determinação da sucção(a) Total(b)Matricial, utilizando o papel de filtro (MARINHO,1995).....	51
Figura 2.24	Representação gráfica da amplitude interquartilica.....	52
Figura 2.25	Semivariograma experimental.....	62
Figura 2.26	Modelos teóricos de semivariogramas.....	64
Figura 2.27	Direções convencionais de estudos.....	64
Figura 2.28	Modelo teórico: (a) anisotropia e (b) isotropia.....	65
Figura 2.29	Matriz de dimensão nxm.....	70
Figura 2.30	Representação gráfica do <i>screet plot</i> (REIS, 2001).....	72
Figura 3.1	Precipitação e evaporação mensal de dezembro de 2005 a fevereiro de 2007 (Estação Recife Curado).....	77
Figura 3.2	Vegetação local (<i>Brachiaria humidicola</i>).....	78
Figura 3.3	Placa de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).....	79
Figura 3.4	Planta baixa do campo experimental.....	80
Figura 3.5	Planta de locação das células geoestatísticas e pontos de observação.....	81
Figura 3.6	Levantamento plano-altimétrico do local.....	82
Figura 3.7	Corte \overline{AB}	83
Figura 3.8	Corte \overline{CD}	83
Figura 3.9	Perfil geotécnico tipo.....	86
Figura 3.10	Variação média do nível do lençol freático na área estudada.....	87
Figura 3.11	Viga de reação para cravação quasi-estática do amostrador tipo shelby (JUSTINO DA SILVA, 2001).....	88
Figura 3.12	Retirada de amostras tipo shelby.....	89
Figura 3.13	Equipamento de cravação e extração da amostra tipo “shelby”: (a) sistema de cravação (b) processo de extração.....	90
Figura 3.14	Sonda de nêutrons: (a) leitura na água; (b) medição no campo	91
Figura 3.15	Tubo de acesso da sonda de nêutrons.....	91
Figura 3.16	Calibração da umidade gravimétrica.....	92
Figura 3.17	Calibração da umidade volumétrica.....	92
Figura 3.18	Calibração do grau de saturação.....	92
Figura 3.19	Piezômetro tipo Casagrande: (a) 3.00 m (b) 6.00m.....	93
Figura 3.20	Medidas de temperatura: (a) equipamento (b) execução da medição.....	94
Figura 3.21	Equação de calibração do termômetro elétrico.....	95
Figura 3.22	Execução da referência de nível profunda.....	95
Figura 3.23	Perfil de nível de referência.....	96
Figura 3.24	Placa de deslocamento vertical superficial.....	97
Figura 3.25	Curva Granulométrica.....	100
Figura 3.26	Corpos de prova para determinação de índices físicos e sucção matricial.....	100
Figura 3.27	Corpo de prova moldado e câmara de ensaio.....	103
Figura 3.28	Permeâmetro de parede flexível (TRIFLEX).....	103
Figura 3.29	Corpo de prova (a) antes da colocação na estufa; (b) após a retirada da estufa a 110 C°.....	104
Figura 4.1	Argila Natural (1,5 m de profundidade).....	107

Figura 4.2	Argila aquecida a 500 C ^o (1,5 m de profundidade).....	108
Figura 4.3	Argila tratada com magnésio e glicerol (1,5 m de profundidade).....	108
Figura 4.4	Desempenho da expansão durante o ensaio.....	111
Figura 4.5	Curva de retenção do modelo de van Genutchten (1980) – Mualem (1976) nas trajetórias de secagem e umedecimento para a profundidade de 1,5 m.....	113
Figura 4.6	Dispersão dos valores da umidade gravimétrica.....	116
Figura 4.7	Valores de umidade volumétrica da área sem vegetação a 1,5 m de profundidade.....	118
Figura 4.8	Valores de umidade volumétrica da área da placa a 1,5 m de profundidade.....	119
Figura 4.9	Valores de umidade volumétrica da área com vegetação a 1,5 de profundade.....	119
Figura 4.10	Gráfico de dispersão da média da sucção matricial por área.....	124
Figura 4.11	Valores de Temperatura por Células e Campanha (entre 1,0 e 1,5 m).....	126
Figura 4.12	Gradiente de temperaturas a 1,5 m de profundidade (maior para menor).....	128
Figura 4.13	Valores médios da temperatura ao longo da amostragem.....	129
Figura 4.14	Dispersão da média da temperatura por área.....	129
Figura 4.15	Solo apresentando sinais de grande contração no período seco jan/06.....	130
Figura 4.16	Gráfico dos autovalores.....	131
Figura 4.17	Análise em componentes principais das variáveis estudadas (A. C. P.).....	132
Figura 4.18	Fatores Climáticos.....	135
Figura 4.19	Solo fissurado no início do monitoramento (dez/05).....	136
Figura 4.20	Perfil de umidade volumétrica na área sem vegetação.....	136
Figura 4.21	Estiva da permeabilidade com uso da equação de van Genuchten (1980), para uma profundidade de 0,3m.....	137
Figura 4.22	Perfil de umidade volumétrica na área da placa.....	138
Figura 4.23	Estimativa da permeabilidade com uso da equação de van Genuchten (1980), para uma profundidade de 0,3m.....	138
Figura 4.24	Perfil de umidade volumétrica na área com vegetação.....	139
Figura 4.25	Estimativa da permeabilidade com uso da equação van Genuchten (1980), para uma profundidade de 0,3m.....	140
Figura 4.26	Varição volumétrica no limite Área descoberta/Placa.....	140
Figura 4.27	Perfil de umidade volumétrica limite área com vegetação/placa.....	141
Figura 4.28	Fissuras causadas no limite placa/área com vegetação, causadas pela retirada de umidade das raízes do solo.....	142
Figura 4.29	Coeficiente de variação para umidade volumétrica.....	143
Figura 4.30	Limites entre as áreas: (A) – Placa/Área sem vegetação; (B) Placa/área com vegetação.....	144
Figura 4.31	Umidade gravimétrica por todo o campo experimental (no	

	primeiro período seco, dez/05 e mar/06).....	146
Figura 4.32	Gráfico de dispersão da umidade gravimétrica por área (no primeiro período seco).....	146
Figura 4.33	Umidade gravimétrica por todo o campo experimental (período úmido, jul/06).....	148
Figura 4.34	Gráfico de dispersão da umidade gravimétrica por área (período úmido, jul/06).....	148
Figura 4.35	Umidade gravimétrica por todo o campo experimental (segundo período seco, set/06 e dez/06).....	149
Figura 4.36	Gráfico de dispersão da umidade gravimétrica por área (segundo período seco set/06 e dez/06).....	150
Figura 4.37	Semivariograma experimental para a umidade gravimétrica.....	151
Figura 4.38	Mapa das variâncias em toda a área para a umidade gravimétrica.....	151
Figura 4.39	Validação cruzada para os valores da umidade gravimétrica.....	152
Figura 4.40	Valores médios da sucção matricial no primeiro período (seco)..	154
Figura 4.41	Valores médios da sucção matricial no segundo período (úmido).....	155
Figura 4.42	Valores médios da sucção matricial no terceiro período (seco)...	155
Figura 4.43	Gradiente de sucção para o período úmido (jul/06).....	157
Figura 4.44	Valores da sucção matricial por período.....	157
Figura 4.45	Valores da sucção matricial por período	159
Figura 4.46	Fissuras: (a) limite placa-área com vegetação, (b) limite placa-área sem vegetação.....	159
Figura 4.47	Variação volumétrica média em função da localização da placa.....	160
Figura 4.48	Deslocamentos verticais superficiais medidos.....	161
Figura 4.49	Dispersão dos valores médios de variação do deslocamento vertical.....	163
Figura 4.50	Curvas de contorno da variação de deslocamento vertical obtido.....	164
Figura 4.51	Semivariograma experimental para os deslocamentos médios...	165
Figura 4.52	Mapa das variâncias em toda a área para os deslocamentos médios.....	165
Figura 4.53	Deslocamentos verticais em todo o plano do campo experimental.....	167
Figura 4.54	Semivariograma para a umidade gravimétrica.....	168
Figura A.1	Saturada com potássio a 25 C° (prof. 0,25 m).....	184
Figura A.2	Saturada com potássio a 550 C° (prof. 0,25 m).....	184

Figura A.3	Saturada com magnésio e glicerol (prof. 0,25 m).....	184
Figura A.4	Saturada com potássio a 25 C° (prof. 0,50 m).....	185
Figura A.5	Saturada com potássio a 550 C° (prof. 0,50 m).....	185
Figura A.6	Saturada com magnésio e glicerol (prof. 0,50 m).....	185
Figura A.7	Saturada com potássio a 25 C° (prof. 1,00 m).....	186
Figura A.8	Saturada com potássio a 550 C° (prof. 1,00 m).....	186
Figura A.9	Saturada com magnésio e glicerol (prof. 1,00m).....	186
Figura A.10	Saturada com potássio a 25 C° (prof. 3,50 m).....	187
Figura A.11	Saturada com potássio a 550 C° (prof. 3,50 m).....	187
Figura A.12	Saturada com magnésio e glicerol C° (prof. 3,50 m).....	187
Figura B.1	Distribuição granulométrica (Célula J; 1,5 m).....	188
Figura B.2	Distribuição granulométrica (Célula A3; 1,5 m).....	188
Figura C.1	Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980)- Mualem (1976), (trajetória de secagem prof. 0.25).....	189
Figura C.2	Ajuste ao modelo Genuchte(1980)- Mualem(1976),(trajetória de secagem 0.50m).....	189
Figura C.3	Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980) segundo as hipótese de Mualem (1976), (prof. 1.00).....	190
Figura C.4	Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980) segundo as hipótese de Mualem (1976), (prof. 2.00).....	190
Figura C.5	Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980) segundo as hipótese de Mualem (1976), (prof. 2.50).....	190
Figura D.1	Comportamento da umidade volumétrica 20 cm de profundidade.....	191
Figura D.2	Comportamento da umidade volumétrica 20 cm de profundidade.....	191
Figura D.3	Comportamento da umidade volumétrica 20 cm de profundidade.....	192
Figura D4	Comportamento da umidade volumétrica 20 cm de profundidade.....	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Processo de identificação indireta (ALTMAYER, 1955).....	10
Tabela 2.2	Processo de identificação indireta (CHEN,1965).....	10
Tabela 2.3	Identificação de solos expansivos (FERREIRA, 1995, apud JUSTINO DA SILVA, 2005).....	11
Tabela 2.4	Fatores que influenciam na expansão dos solos. (NELSON; MILLER, 1992).....	15
Tabela 2.5	Propriedades do solo que influenciam na expansão (NELSON; MILLER, 1992).....	16
Tabela 2.6	Principais métodos para a determinação da sucção no solo (BASTOS, 1994).....	20
Tabela 2.7	Modelos matemáticos para ajuste de uma curva de retenção (SILLERS; FREDLUND, 2001).....	27
Tabela 2.8	Ensaio de permeabilidade em Campo (LIMA,1983).....	30
Tabela 2.9	Técnicas usadas para a calibração do Papel de Filtro (MARINHO, 1995).....	50
Tabela 3.1	Características da Vegetação Adaptado (BRITO; RODELLA, 2006).....	78
Tabela 3.2	Descrição das atividades de campo.....	85
Tabela 3.3	Análise de variância para a validação do sistema de cravação com relação ao peso específico aparente natural.....	89
Tabela 3.4	Ensaio de laboratório.....	98
Tabela 3.5	Identificação de argilo- minerais, adaptado de Santos (1973).....	99
Tabela 4.1	Características físicas da área experimental.....	109
Tabela 4.2	Valores descritivos para o índice de plasticidade das áreas.....	110
Tabela 4.3	Valores descritivos para o índice de atividade das áreas.....	110
Tabela 4.4	Análise de variância (ANOVA) para o índice de plasticidade.....	111
Tabela 4.5	Análise de variância (ANOVA) para o índice de atividade.....	111
Tabela 4.6	Teste Qui-Quadrado para dados experimentais e simulados.....	113
Tabela 4.7	Valores descritivos da umidade gravimétrica por tubo de acesso	114
Tabela 4.8	Valores estatísticos descritivos da umidade gravimétrica.....	116
Tabela 4.9	Análise de variância para umidade gravimétrica.....	116
Tabela 4.10	Valores da umidade volumétrica obtida nas campanhas de ensaio.....	118
Tabela 4.11	Análise de variância com fator duplo e repetição para a umidade volumétrica.....	121
Tabela 4.12	Valores descritivos da sucção matricial por área.....	123
Tabela 4.13	Análise de variância para valores da Sucção Matricial.....	123
Tabela 4.14	Teste TUKEY para médias das sucções matriciais por áreas.....	124
Tabela 4.15	Análise de variância com fator duplo e repetição para a sucção matricial.....	125
Tabela 4.16	Valores descritivos da temperatura por área.....	128
Tabela 4.17	Análise de variância para a temperatura.....	128
Tabela 4.18	Teste Tukey para valores da temperatura a 1,5 m.....	128

Tabela 4.19	Matriz de correlação das variáveis estudadas.....	131
Tabela 4.20	Análise de variância para a umidade gravimétrica	145
Tabela 4.21	Análise de variância (ANOVA) para umidade gravimétrica.....	147
Tabela 4.22	Análise de variância para umidade gravimétrica.....	149
Tabela 4.23	Valores médios das variações dos deslocamentos verticais obtidos.....	162
Tabela 4.24	Análise de variância para os deslocamentos verticais medidos.....	162
Tabela 4.25	Teste Tukey para a variação de deslocamento vertical.....	163
Tabela E.1	Parâmetros descritivos da umidade gravimétrica.....	192
Tabela E.2	Parâmetros descritivos da umidade volumétrica.....	192
Tabela E.3	Parâmetros descritivos do deslocamento médio.....	192
Tabela E.4	Parâmetros descritivos da sucção matricial.....	192
Tabela E.5	Estudo Estatístico.....	193

LISTA DE SÍMBOLOS

ψ	Sucção matricial
SQR	Soma dos quadrados dos resíduos
R^2	Coefficiente de determinação
θ_r	Umidade residual
θ_s	Umidade de saturação
Θ	Normalização de água
λ	Condutividade térmica aparente
θ_s, θ_r	Umidade volumétrica saturada e residual
aev	Ponto de entrada de ar
a	Parâmetros de ajuste
n	Parâmetros de ajuste
m	Parâmetros de ajuste
$\theta_f(\psi)$	Função matemática.
K	Condutividade hidráulica
η	Parâmetros de ajuste
$Z_{\text{máx}}$	Altura máxima do trecho saturado
$Z_{\text{mín}}$	Altura mínima do trecho saturado
ψ_b	Sucções no ponto de entrada de ar
K_{Sat}	Permeabilidade
$K(\psi)$	Função de permeabilidade
v	Velocidade de percolação
K	Coefficiente de permeabilidade
h	Altura de coluna de água
x	Comprimento de solo percolado
i	Gradiente hidráulico
ER	Evaporação real
EP	Evaporação potencial
θ	Umidade volumétrica
h_w	Carga hidráulica
z	Cota vertical
t	Tempo
k_w	Coefficiente de permeabilidade
A_{INT}	Distância interquartilica
Q_S	Quartil superior
Q_I	Quartil inferior
L_I	Limite crítico inferior
L_S	Limite crítico superior
$2\gamma(h)$	Semivariograma estimado
$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$	Valores da i-ésima observação da variável regionalizada
n	Número de pares de valores $Z(x)$ e $Z(x+h)$, separados por um vetor distância h
a	Alcance
C	Patamar
C_o	Efeito Pepita

C_i	Contribuição
$C(x_i, x_j)$	Semivariância
$m(x_i)$	Tendência principal
$C(h)$	Função de covariância
$Var(x)$	Variância de x
$E(x)$	Esperança matemática
λ_o	Multiplicador de Lagrange
(σ^2_{ko})	Variância de krigagem ordinária
\bar{d}_i	Valores médios
S_j	Variância amostral
X_{ab}	Distância Euclidiana
Z_{ij}	Escalonamento
HSD	Valor crítico positivo
q	Valor tecnicamente conhecido
MQ_{dentro}	Quadrado da média usual para a variabilidade dentro do grupo
n	Tamanho da amostra em cada grupo
χ^2	Qui-Quadrado
F	Distribuição de probabilidade de Fischer
α	Nível de significância
F_o	Valor observado
F_{e_i}	Valor esperado
H_o	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
F_{cal}	F calculado
F_{cri}	F crítico
K_{Sat}	Coefficiente de permeabilidade
V_a	Volume de água percolado no corpo de prova
A_c	Área da base amostrada
Δt	Variação de tempo
S	Grau de saturação
θ	Umidade volumétrica
e	Índice de vazios
w	Umidade gravimétrica
ψ	Sucção matricial
γ_d	Peso específico aparente seco
Δh	Deslocamento
Arg.	Argila
Ar.	Areia
Silt.	Silte
Ia	Índice de atividade
LP	Limite de plasticidade
LL	Limite de liquidez
Δp	Variação de pressão
IP	Índice de plasticidade

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.0 – INTRODUÇÃO

Estruturas apoiadas sobre solos potencialmente expansivos poderão sofrer movimentos de levantamento e de recalque devido à mudança da umidade e, conseqüentemente da sucção resultante dos processos de infiltração e evaporação da água no solo.

Quando se estuda solo expansivo a variação de sucção passa a ser um fator de vital importância no comportamento do mesmo.

A mudança de umidade pode ocorrer devido aos seguintes fatores: infiltração de água no solo, evaporação, diferenças de temperatura e de sucção entre áreas vizinhas, e através da retirada de água do solo pelas raízes das plantas. Parte da água que se encontra no solo pode sofrer uma mudança de estado físico passando da fase líquida para a fase de vapor e se deslocando de uma área de maior temperatura para uma de menor temperatura do solo. Isso pode ocorrer em áreas cobertas por elementos impermeáveis.

Alguns pesquisadores, dentre eles citem-se: Johnson et al (1973) e Wilson (1997), têm observado que sob áreas cobertas, tipo residência, pavimentos e etc., existe uma tendência de estabilização da umidade no centro e variação na área próximo das bordas da superfície impermeabilizada, causando, desta forma, movimentos diferenciais.

O movimento se dá de forma sazonal. Deste modo, a área próxima à borda fica exposta a um ciclo de aumento e diminuição de umidade e por conseqüente a variação volumétrica, provoca deformações diferenciais na estrutura apoiada no solo. A Figura 1.1 mostra fissuras em paredes de uma residência existente na área onde está localizado o solo expansivo estudado.

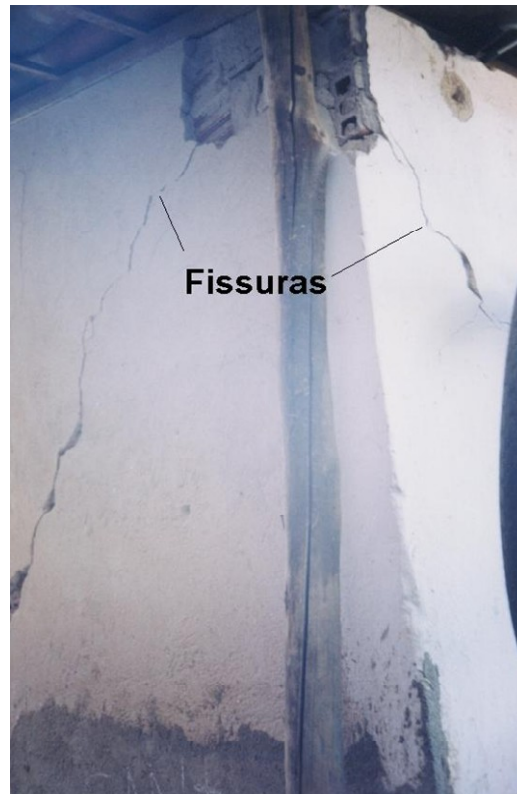


Figura 1.1 - Paredes de uma residência com fissuras (Justino da Silva, 2001).

O estudo experimental requer a coleta de dados no campo e verificação da dependência espacial entre as variáveis, a análise das variáveis envolvida no processo de expansão e contração necessita de uma ferramenta para estimativa dos valores nos locais não amostrados.

O uso da interpolação ou estimativa de valores nos locais não amostrados é uma alternativa para o estudo da variação de temperatura e de sucção, da mudança de umidade e da variação volumétrica. Essa técnica permite representar em mapas, de forma contínua, o comportamento de uma variável amostrada pontualmente. São

conhecidos vários métodos de geração de malhas “grid”, a melhor malha é aquela mais adequada à pesquisa em desenvolvimento.

As técnicas da geoestatística podem ser usadas para descrever e modelar padrões espaciais (variografia); para prever valores em locais não amostrados (krigagem); para reduzir a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar malhas de amostragem. No caso específico de otimização de malhas de amostragem é oportuno salientar que o erro cometido, ao fazer uma avaliação com malhas de amostragem, diminui com o detalhamento da malha, mas, esse crescimento não é linear (ANDRIOTI, 2003).

O ponto inicial para uma estimativa geoestatística é a construção dos semivariogramas, que expressam o comportamento espacial da variável em estudo. Nesse gráfico podem ser observadas características como:

- i) tamanho da zona de influência em torno de uma amostra;
- ii) anisotropia;
- iii) continuidade, pela forma do semivariograma.

De posse do semivariograma experimental, é necessário ajustá-lo a um modelo teórico, para seguir a estimativa dos valores não amostrados.

Uma alternativa que pode ser utilizada para aferir o nível da estimativa é a validação cruzada que consiste em um gráfico de linha onde nos eixos coordenados são colocados os valores conhecidos e os estimados e por meio de uma regressão linear simples verifica-se o grau de aproximação com uma reta que faz um ângulo de 45° . A Figura 1.2 mostra um gráfico de validação cruzada.

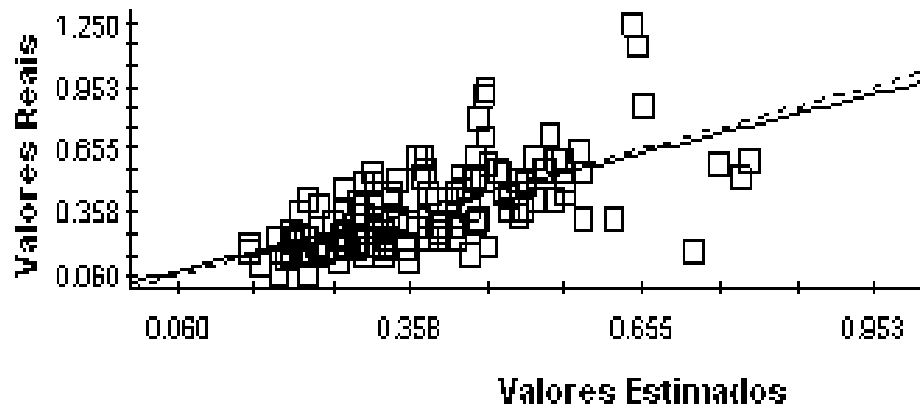


Figura 1.2 – Validação cruzada

Esta tese consiste na análise estatística da mudança de umidade, sucção e da variação volumétrica de uma argila expansiva não saturada com três tipos distintos de cobertura: área sem vegetação, área coberta com uma placa impermeável de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), e área com vegetação de pequeno porte. Para a interpretação dos dados utilizou-se da estatística clássica, sendo usados os parâmetros descritivos para um conhecimento inicial dos dados, em seguida foi aplicada à inferência estatística por meio da análise de variância para um e dois fatores: regressão linear simples; e análise multivariada em componentes principais (A. C. P.). A Geoestatística foi utilizada para determinação da dependência espacial entre as variáveis e geração de mapas de comportamento das variáveis no tempo.

1.1 - Objetivo Geral

Analisar estatisticamente a mudança de umidade, sucção e variação de volume de um depósito de argila potencialmente expansiva com três tipos distintos de cobertura, utilizando como ferramenta a estatística clássica e a Geoestatística.

1.2 - Objetivos Específicos

- Fazer a Caracterização granulométrica de todas as células geoestatísticas;
- Construir curvas de retenção para as profundidades ensaiadas;

- Analisar o comportamento das variáveis do solo sob os três tipos de cobertura com o uso da estatística clássica (descritiva e inferencial);
- Verificar a distribuição espacial da temperatura do solo e da variação volumétrica no campo de estudo, através da Geoestatística;
- Usar a estatística descritiva e inferencial nos parâmetros do solo estudado;
- Verificação da troca de umidade entre as áreas sem vegetação, com vegetação e a placa de asfalto;
- Avaliar a variação de umidade e da sucção matricial em três períodos distintos, utilizando a estatística descritiva, inferencial e a Geoestatística;
- Estimar a dependência espacial da umidade gravimétrica, possibilitando a estimativa da dimensão da barreira de proteção horizontal com o uso da Geoestatística;
- Verificar através da Análise de Variância (ANOVA) com dois fatores quais das condições: tipo de cobertura e tamanho da área exercem maior influência nas variáveis umidade volumétrica e sucção matricial e se há interação entre elas;
- Usar a Análise em Componentes Principais (A. C. P.), para verificar quais as variáveis que mais contribuem para a variação de volume;

1.3 – Organização da Tese

Esta tese é composta de cinco capítulos e sua organização está descrita conforme apresentado a seguir:

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre solo expansivo, curvas de retenção, movimento de água nos solos, evaporação e infiltração, estatística clássica e Geoestatística.

O Capítulo 3 apresenta os aspectos geológicos e climáticos da área de estudo; o campo experimental envolvendo as células geoestatísticas e a instrumentação utilizada; os locais de ensaios; a investigação de campo utilizada; as atividades de laboratório desenvolvidas e análise estatística dos parâmetros.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das análises correspondentes às atividades de campo e de laboratório desenvolvidas no período de observação. Os resultados estão dispostos em tabelas de análise descritiva e inferencial, figuras apresentando o estudo estimativo para as principais variáveis (Geoestatística), gráficos que estimam a distância de dependência espacial para a variável umidade gravimétrica. Estudo multivariado em componentes principais (A. C. P.) para classificar em grupos as variáveis de maior interferência no processo de variação volumétrica, são seguidos de comentários críticos e comparativos do comportamento.

As conclusões e as recomendações para futuras pesquisas estão apresentadas no capítulo 5.

São apresentados os seguintes anexos: difratograma (Anexo A); curva granulométrica (Anexo B); curvas de retenção (Anexo C); Umidades Volumétricas no tempo e por camada (Anexo D) tabelas estatísticas (Anexo E).

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Principais Argilominerais Formadores dos Solos Expansivos

Dentre os principais argilominerais formados dos solos destacam-se a caulinita, illita e montmorilonita.

2.1.1 – Calinita

O argilomineral caulinita é formado por camadas 1:1. Cada camada consiste de uma folha de tetraedros de SiO_4 e uma folha de octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, as quais estão ligadas entre si, em uma única camada através do oxigênio das camadas. A fórmula estrutural é representada por $(\text{OH})_8\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}$, a qual em termos percentuais tem a seguinte composição percentual: $\text{SiO}_2=46,5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=39,5\%$ e $\text{H}_2\text{O}=14\%$ (CARVALHO, 1997).

A caulinita é bastante estável possuindo uma estrutura que resiste muito bem à penetração da água nas camadas, sendo considerada não expansiva quando em processo de saturação.

2.1.2 – Illita

As illitas têm uma estrutura cristalina semelhante à da montmorilonita, mas são diferentes em sua composição química, a qual é expressa por: $(\text{OH})_4\text{K}_y(\text{Al}_4\text{Fe}_4\text{Mg}_4)(\text{Si}_{8-y}\text{Al}_y)\text{O}_{20}$, onde y , varia de 1 a 1,5. A estrutura da illita consiste em uma folha octaédrica de gibsite entre duas folhas tetraédricas de silício (CARVALHO, 1997).

2.1.3 – Montmorilonita

A composição química do grupo da montmorilonita é expressa por: $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$, onde n é água interlamelar. Os argilominerais do grupo montmorilonita diferem desta fórmula devido às substituições isomórficas que ocorrem no reticulado cristalino e nos cátions trocáveis. A montmorilonita ou esmectita é formada pelo empilhamento ao acaso de duas folhas tetraédricas de silicato com uma folha octaédrica de alumínio no meio, ligadas entre si pelo oxigênio comum às folhas (CARVALHO, 1997).

A ligação entre as camadas é fraca e com as substituições isomórficas, a montmorilonita tem uma grande tendência em separar as camadas, absorvendo água e causando expansão.

Na família das montmorilonitas, destaca-se a bentonita (nome devido ao grande depósito descoberto no forte Benton, estado de Wyoming, Estados Unidos, em 1888).

A Figura 2.1 mostra um quadro dos principais argilominerais formadores dos solos expansivos.

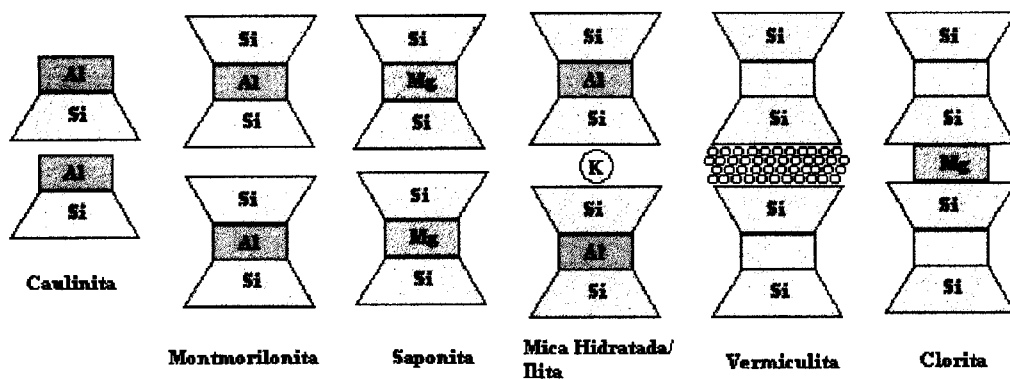


Figura 2.1 – Principais estruturas argilominerais (CARVALHO, 1997).

2.2 – Identificação e Classificação dos Solos Expansivos

A tarefa de identificação e classificação de um solo expansivo pode ser dividida em duas partes: A primeira consiste na obtenção de informações prévias mediante observações superficiais, tais como topografia, vegetação, sinais de contração do solo, fissuras nas edificações e informações junto aos moradores da região. A segunda na interpretação de ensaios de laboratório e no uso de métodos de identificação.

A segunda fase da análise pode ser dividida em três partes:

- i) Ensaios mineralógicos;
- ii) Métodos indiretos;
- iii) Métodos diretos.

2.2.1 – Ensaios mineralógicos

A identificação mineralógica de um solo pode ser realizada através dos seguintes tipos de ensaios: difração de raios-X, análise termo-diferencial, análise química e microscopia eletrônica de varredura. Maiores detalhes sobre tais ensaios podem ser obtidos em bibliografia específica (SANTOS, 1973).

2.2.2 – Métodos indiretos

Normalmente os métodos indiretos têm como base a realização de ensaios de composição granulométrica e limites de Atterberg.

Altmeyer (1955) desenvolveu um método de identificação que observa características de contração para fazer uma avaliação do grau de expansão dos solos. A Tabela 2.1 mostra o critério de identificação desenvolvido.

Tabela 2.1- Processo de identificação indireta (ALTMAYER, 1955).

Contração Linear	Limite de contração(%)	Expansão Provável(%)	Grau de Expansão
<5	>12	<0,5	Não Crítico
5-8	10-12	0,5-1,5	Marginal
>8	<10	<10	Crítico

Chen (1965), sugeriu um outro método para a identificação indireta de expansividade, baseado na granulometria, limite de liquidez e ensaio STP (*Standart Penetration Test*). Classificando o solo de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Processo de identificação indireta (CHEN,1965).

Porcentagem que passa na peneira N. 200	Limite de Liquidez(%)	SPT	Provável Expansão(%)	Grau de Expansão
>95	>60	>30	>10	Muito alto
60-95	40-60	20-30	3-10	Alto
30-60	30-40	10-20	1-5	Média
<30	<30	<10	<1	Baixa

Outros pesquisadores desenvolveram métodos de identificação, dentre eles citem-se: Holtz e Gibbs (1956), Snethen et al (1977).

2.2.3 - Métodos diretos

O ensaio edométrico tem sido muito utilizado na determinação do potencial de expansão e da pressão de expansão.

A Tabela 2.3 apresenta métodos indiretos e diretos usados na geotecnia para identificar solos expansivos.

Tabela 2.3 – Identificação de solos expansivos (FERREIRA, 1995 apud JUSTINO DA SILVA, 2005).

Métodos	Sub-Divisão	Base para a definição do Critério	Referências Bibliográficas
INDIRETOS	Identificativos	Difração de Raio-X Microscopia Eletrônica de varredura Análise termo-Diferencial Físico-químicos	Carcedo et al., (1986) Fink et al., (1971).
	Qualitativos	Granulometria, geomorfologia, pedologia e identificação visual.	Prikloński, (1952); Skempton (1953); Seed et al. (1962); Van Der Merwe (1964); Chen (1965); Vijayveriya; Ghazzaly, (1973); Rodríguez Ortiz, (1975); Cuellar, (1978)
	Orientativos	Geologia, geomorfologia, pedologia e identificação visual.	Patrick e Snethen (1976); Carcedo et al., (1986); Ferreira (1990, e 1993 ^a)
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe	Lambe (1960)
	Quantitativos	Ensaio de Expansão livre e pressão de expansão Ensaio edométrico simples e duplos; Ensaio edométrico com sucção controlada	Seed et al. (1962); Chen (1965); Vijayveriya; Ghazzaly, (1973); Rodríguez Ortiz (1975); Cuellar (1978); Jimenez Salas (1980); Escario (1967 e 1969); Aitchison et al., (1973); Johnson (1978); McKeen, (1980).

2.3 - Mecanismos de Expansão de Acordo com as Propriedades dos Argilominerais

A mudança de volume dos materiais argilosos expansivos é causada pela combinação de vários fatores.

Para Taylor e Smith (1986), os mecanismos de expansão podem ser mecânicos e/ou físico-químicos. A expansão mecânica ocorre em resposta às forças de descompressão elástica e estão relacionadas ao fator tempo; na prática podem ser devidas às escavações feitas pelo homem, à ação dos movimentos tectônicos e a erosão.

Segundo Snethen et al. (1977), os mecanismos físico-químicos que determinam o potencial expansivo de um argilomineral são: atração superficial das partículas, hidratação de cátions e repulsão osmótica.

A atração superficial das partículas dos argilominerais é um mecanismo gerado pela magnitude das forças eletrostáticas provenientes das cargas elétricas negativas nas superfícies das partículas dos argilominerais, que tendem a ser compensadas pela atração de cátions que encontram-se em solução na água livre dos poros e particularmente por moléculas polares, como as da água.

Segundo Presa (1984), a influência deste mecanismo na mudança de volume provêm do esforço desenvolvido para neutralizar o desequilíbrio das cargas. Desta forma, a quantidade de água na dupla camada aumentará até que ocorra uma suficiente mudança de volume na massa do solo.

A hidratação ocorre devido às substituições isomórficas e cátions adsorvidos, que originam uma variação de carga e conseqüentemente aumentam a capacidade de atração de moléculas de água (hidratação), ocasionando variações de volume. Este mecanismo influencia na expansibilidade pelo aumento que o raio iônico dos cátions sofrem à medida que vão sendo hidratados, gerando um aumento de volume na massa de solo (PRESA, 1984).

A repulsão osmótica é um mecanismo importante em condições de umidade e concentração iônica elevadas. Ocorre com a entrada de moléculas de água entre as camadas dos argilominerais, devido às diferenças da concentração iônica dupla na camada. A maior concentração ocorre junto à superfície do argilomineral e diminui à medida que se afasta desta superfície. O contato da água com concentrações iônicas diferentes permite o ingresso de água com a finalidade de equilibrar as diferenças de concentrações, resultando num aumento da dupla camada e conseqüentemente no volume do solo (PEREIRA, 2004).

A propriedade mais importante dos argilominerais expansivos é a capacidade de mudar de volume pela sorção de moléculas de água ou outros íons polares em sua estrutura. Os argilominerais possuem um diâmetro de grãos menores que $2\mu\text{m}$ e uma forma cristalográfica em folhas. Estes fatores dão ao argilomineral uma área superficial muito grande e estas lhe conferem a propriedade de adsorção de água. Todos os argilominerais atraem água para as suas superfícies, mas somente alguns a conduzem para a sua estrutura interna, Figura 2.2, (VELDES, 1992 apud PEREIRA, 2004).

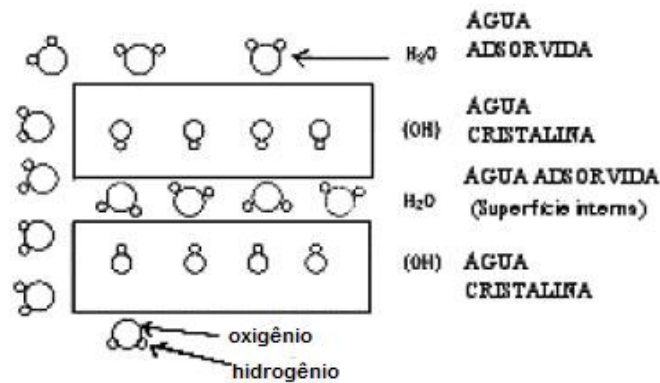


Figura 2.2- Diferentes tipos de água associada com a expansão cristalina (VELDES, 1992 apud PEREIRA, 2004).

Dependendo do nível de interação entre moléculas de água e a superfície do argilomineral, haverá a expansão intercamadas essencialmente osmótica, ou estrutural em nível cristalino. A expansão intracristalina ocorre devido às forças atrativas que ligam as camadas estruturais serem menores que as responsáveis pela absorção de água (GILLOTT, 1993 apud PEREIRA, 2004). Desta forma, a água absorvida forma diversas monocamadas sobre as superfícies dos argilominerais, separando suas partículas ou suas unidades estruturais (Figura 2.3).

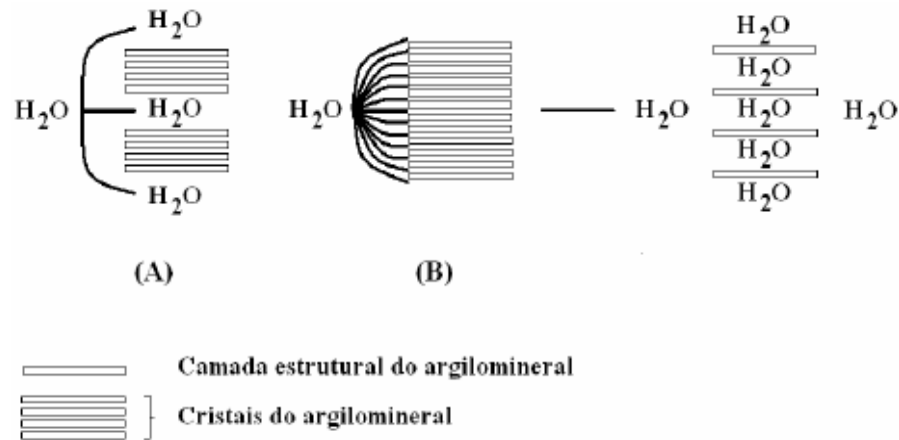


Figura 2.3- Absorção de água por argilominerais: a) adsorção intercrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 não expansivo (ilita); b) absorção intracrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 expansivo (montmorilonita) (GILLOTT, 1987 apud PEREIRA, 2004).

A absorção de água pelas superfícies internas dos argilominerais é influenciada pelo tipo de cátions intercalar, por exemplo, as montmorilonita cálcicas absorvem até duas camadas monomoleculares de água, enquanto as montmorilonitas sódicas, podem absorver um número maior. As esmectitas, vermiculitas, cloritas expansivas, haloisitas e alguns minerais interestificados apresentam expansibilidade intracrystalina (JEREMIAS, 1991 apud PEREIRA, 2004).

A expansão cristalina vai depender, sobretudo da energia livre superficial, ou seja, da afinidade da superfície sólida com a água. Este processo é muito importante nos argilominerais do grupo das esmectitas e praticamente ausentes nas argilas que não apresentam cátions intercamadas, como caulinita, por exemplo, (PEJON; ZUQUETTE, 1996 apud PEREIRA, 2004).

2.4 - Fatores que Influenciam na Expansão dos Solos

Vários fatores influenciam o mecanismo de expansão e contração dos solos expansivos. As tabelas 2.4 e 2.5 apresentam os fatores influentes na expansão dos solos (NELSON; MILLER, 1992).

Tabela 2.4 – Fatores que influenciam na expansão dos solos. (NELSON; MILLER, 1992).

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Mineralogia da argila	Os argilominerais que tipicamente causam variações de volume no solo são: montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Ilitas e caulinitas não são freqüentemente expansivas, mas podem causar variações de volume quando o tamanho das partículas são extremamente pequenos.	Grim,(1968); Mitchell,(1973,1976) Snethen et al.,(1977)
Química da água no solo	A expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátion. Por exemplo, cátions de Mg^{2+} na água do solo resulta em menor expansão do que os cátions de Na^+ .	Mitchell, (1976)
Sucção do solo	A sucção do solo é uma variável independente da tensão efetiva, representada pela pressão negativa em solos não saturados. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas e elétricas das partículas do solo e da água.	Snethen,(1980); Fredlund ; Morgenstern, (1977); Johnson,(1973); Olsen ; Langfelder,(1965) Aitchison et al., (1965)
Plasticidade	Em geral, solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e de contração. Plasticidade é um indicador do potencial de expansão.	Nelson, J.D. et al., (1992)
Estrutura e Textura do solo	Argilas flocculadas tendem ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. A textura e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem.	Johnson; Snethen,(1978); Seed et al.,(1962a)
Densidade Seca	Elevada densidade usualmente indica espaçamento menores entre partículas, o que pode significar grandes forças repulsivas entre elas e elevado potencial de expansão.	Chen, (1973); Komornik; David, (1969); Uppal, (1965).

Tabela 2.5 – Situações ao qual o solo se encontra que influenciam na expansão (NELSON; MILLER, 1992).

Fator	Descrição	Referencia
1.0 - Condições de umidade inicial	Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá a sucção. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido quando exposto à secagem e contrairá mais do que um perfil de solo inicialmente seco.	
2.0 - Variações de umidade	Variações de umidade na parte superior do perfil próximo a zona ativa definem principalmente os levantamentos. É nestas camadas que ocorrerão extensas variações de umidade e volume.	Johnson, (1969)
2.1 – Clima	A quantidade e variação de precipitação e evapotranspiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em climas semi-áridos ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva.	Holland; Lawrence, (1980)
2.2 – Água do subsolo	Lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de águas superficiais contribuem para o aumento da umidade.	
2.3 - Drenagem e fontes de águas superficiais	Estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc., próximas a fundações de casas, podem se tornar uma fonte de água superficial. Vazamento de tubulações pode umidificar o solo até grandes profundidades.	Krazynski, (1980); Donaldson, (1965)
2.4 – Vegetação	Árvores, arbustos e gramas retiram a umidade do solo por transpiração, e tornam diferentemente úmido o solo para os variados tipos de vegetação.	Bucley, (1974)
2.5 – Permeabilidade	Camadas com elevada permeabilidade, particularmente devido a fissuras e rachaduras na massa de solo, permitem uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão.	Wise; Hudson,(1971); Debruijn,(1965)
2.6 – Temperatura	Aumentos de temperatura causam a difusão de umidade para áreas mais frias abaixo de pavimentos e edifícios.	Johnson; Strong, (1976); Hamilton, (1969)
3.0 - Condições de Tensão		
3.1 - História de tensões	Um solo sobreadensado é mais expansivo que um solo com igual índice de vazios, porém normalmente adensado. Pressões de expansão podem aumentar com o envelhecimento de argilas compactas, mas o valor de expansão sob pequenos carregamentos não tem demonstrado ser afetado pelo envelhecimento de argilas compactas. Repetidos ciclos de umedecimento e secagem tendem a reduzir a expansão em amostras de laboratório, mas após um certo número de ciclos, a expansão não é afetada.	Mitchell, (1976); Kassif; Baker, (1971)
3.2 - Condições in situ	O estado de tensão inicial no solo pode ser estimado a fim de avaliar as prováveis conseqüências do carregamento sob a massa de solo e/ou alteração do ambiente inerente a umidade. As tensões efetivas iniciais podem ser grosseiramente determinadas através de amostragem e testes em laboratório, ou por medidas e observações in situ.	
3.3 – Carregamento	A grandeza de sobrecarga aplicada influi quantitativamente na mudança de volume que ocorrerá, para um dado teor de umidade e densidade. Uma carga externa aplicada atua para balanceando das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.	Holtz, (1959)
3.4 - Perfil do solo	A espessura e posição da camada potencialmente expansiva influência consideravelmente no movimento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorrerão se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.	Holland; Lawrence, (1980)

2.5 - Contração dos Solos Expansivos

A contração dos solos é uma característica que vem sendo estudada desde o século XIX. Todavia, apenas no século XX os conceitos foram estudados com maior profundidade.

Os mais importantes estudos sobre a contração do solo ocorreram justamente entre os anos de 1912 e 1925 (MARINHO, 1994).

No início dos estudos, a contração era mais explorada pelos pesquisadores da área de ciências agrárias. Na mecânica dos solos, o primeiro pesquisador a publicar algo sobre o fenômeno de contração foi Tempany, (1917). Este pesquisador estudou a influência entre a percentagem de contração versus a diminuição da umidade em solos com diferentes porcentagens de colóides. A Figura 2.4 mostra que há uma relação positiva e direta entre contração linear e percentagem de colóides, para a faixa de variação de umidade estudada.

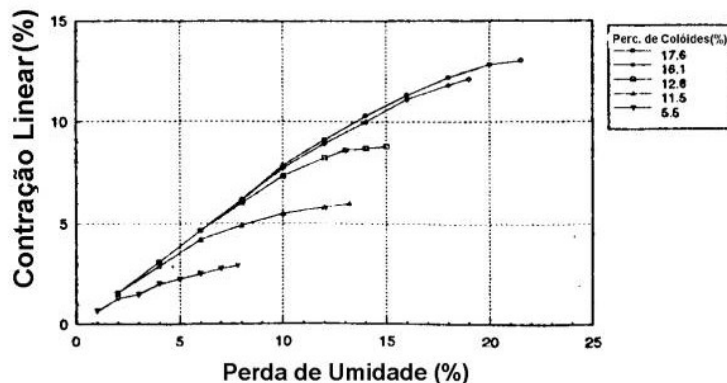


Figura 2.4 – Contração versus percentagem de colóides (TEMPANY, 1917).

Haines (1923) apresenta um estudo relacionado com a contração dos solos. Nesse trabalho o autor mostra o fenômeno físico da contração. A Figura 2.5 apresenta uma curva de contração de um solo relacionada com o volume de água da amostra em função do volume da mesma. A curva de contração é simplificada representada pelas retas CB e BA. O segmento CB é chamado de contração normal e corresponde

ao estágio onde o volume de água evaporado é igual a redução de volume da amostra, portanto, faz um ângulo de 45° com a horizontal. O segmento de reta BA representa a contração residual, onde parte da água evaporada é substituída por ar. O ponto B representa o ponto de entrada de ar.

A capacidade de contração do solo depende do tipo de solo, da mineralogia, da estrutura e dos teores de umidades inicial e final. No campo, a contração é devido à evaporação da água e evapotranspiração das plantas. A redução de volume devido à contração normal é semelhante à redução de volume devido à compressão mecânica (MARINHO, 1994).

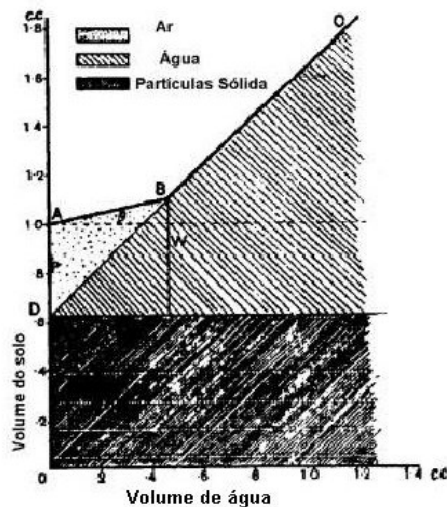


Figura 2.5 – Curva de contração dos solos (HAINES, 1923).

2.6 – Sucção dos Solos

Tensão efetiva em solos não saturados é controlada, entre outras coisas, pela pressão negativa na água intersticial. Essa pressão, não necessariamente de tração, é dada pela diferença entre a pressão atmosférica (ou pressão no ar) e a pressão na água, sucção matricial. A sucção em solos é composta de duas partes, a sucção matricial e a sucção osmótica (MARINHO, 1998).

Uma definição simples para a sucção seria: Sucção é a força com que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. Essa afeição por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção é normalmente expressa como pressão e, portanto as unidades mais utilizadas são kPa, atm, bar (MARINHO, 1998).

2.6.1 – Sucção matricial

O Potencial matricial da água do solo é um potencial de pressão e resulta do efeito da ação de forças capilares e/ou de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas minerais (matriz) que compõem o solo (HILLEL, 1971, apud RÖHM, 1993; BAVER et al., 1972).

Desta forma deve-se substituir o termo potencial capilar por potencial matricial, que é o efeito total da água por toda matriz do solo. A retirada de água desse solo é realizada ao se fornecer energia para o sistema, daí o potencial matricial ser negativo.

A correspondente Sucção Matricial (ψ) é definida como módulo do potencial matricial (MARSHALL; HOLMES, 1981, apud RÖHM, 1993).

Sucção Matricial é a pressão negativa da água que se desenvolve na água intersticial devido à capilaridade e forças de adsorção. É a diferença de pressão através de uma membrana que separa a água intersticial de uma solução idêntica, mas sem solo. A membrana é permeável à solução, mas não é às partículas de solo ou ar (HILLEL, 1971, apud MARINHO, 1998).

O Potencial Matricial é um parâmetro muito importante para o entendimento do comportamento dos solos não saturados (FREDLUND, 1979).

2.6.2 – Sucção osmótica

O potencial osmótico existe porque a água do solo não é pura. A água tende a hidratar as moléculas do soluto, para tanto, se faz necessário realizar um trabalho sobre o sistema para retirá-la desta interação com a molécula. Portanto, o potencial é negativo.

Geralmente, quando os solos estão com teor de umidade alto, este componente mostra-se desprezível. Sua importância cresce quando a concentração salina é significativa, por exemplo, quando o teor de umidade do solo é baixo (REICHARDT, 1985, apud RÖHM, 1993).

A Tabela 2.6 apresenta as principais técnicas e algumas limitações de cada técnica para a determinação da sucção.

Tabela 2.6 – Principais Métodos Para a determinação da Sucção no Solo (BASTOS, 1994).

Método Direto	Placa de Sucção	Baseia-se no estabelecimento de uma diferença de pressão numa placa porosa, mediante a aplicação direta de uma sucção na parte inferior através de uma bomba de vácuo, enquanto a parte superior se mantém a pressão atmosférica.
	Tensiômetro	Permite a determinação da sucção “in situ”. Seu fundamento é o mesmo da placa de sucção. Sua aplicação é limitada em clima árido, pois sua utilização é limitada a profundidades acima de 1,20 m devido ao fenômeno de cavitação da água.
	Membrana de Pressão	Baseia-se no princípio de translação de eixos. A fase líquida sofre um aumento de pressão igual à fase gasosa. A sucção é dada pela diferença de pressão aplicada e a pressão da água em uma base semi-permeável.
	Refletometria no Domínio do Tempo (TDR)	Baseia-se na transmissão e recepção de sinais de microondas, através de “antenas” ou sondas instaladas no solo.
Método Indireto	Dessecador de vácuo	Consiste em manter a amostra, durante o tempo necessário, em um ambiente, cuja umidade relativa permanece constante.
	Psicrômetro	Consiste em determinar a sucção total do solo através de medidas de umidade relativa do ar do solo em equilíbrio com a interface solo-água.
	Papel Filtro	Após trocas termodinâmicas entre a matriz do solo e o papel de filtro o valor da sucção do solo é obtido de forma indireta por meio de uma curva de ajuste estatístico do papel de filtro.

2.7 – Aspectos Relevantes de Estudos de Campo em Solos Expansivo

Johnson et al, (1973) realizaram um estudo experimental do perfil de umidade e do comportamento de variação volumétrica de um solo potencialmente expansivo localizado na cidade de Clinton, estado do Mississippi, USA. O campo experimental consistiu de uma área impermeabilizada de aproximadamente 900 m² na qual foram realizados ensaios de laboratório e de campo. Entre as observações relacionadas com a área coberta, destaca-se o fato de que na porção central da placa impermeabilizada, após, determinado tempo, o perfil de umidade tornou-se estático, enquanto, na região próxima às bordas o perfil de umidade permaneceu dinâmico.

Jucá et al. (1994) fizeram uma investigação de campo e de laboratório em uma argila expansiva do Município de Paulista e concluíram que o mecanismo de expansão e de contração requer, além de um estudo integrado de laboratório e campo, uma análise das variáveis ambientais.

Justino da Silva (2001) observou que a maior variação de volume, de um solo potencialmente expansivo se dá quando ocorre período sazonal com irregularidade na distribuição da precipitação pluviométrica seguido de período sazonal com chuva regular e não quando se tem grandes intensidades pluviométricas.

2.8 – Curva de Retenção

A curva de retenção ou curva característica é uma relação entre a quantidade de água retida nos poros do material e a pressão que é exercida para remover a água. Usualmente tem sido representada através da relação entre a sucção e o teor de umidade (volumétrico ou gravimétrico) ou grau de saturação (MARINHO, 2001).

Através da curva de retenção pode-se obter algumas características importantes do solo. Pode-se citar:

- i) o ponto de entrada de ar;
- ii) o grau de pré-adensamento do solo;
- iii) a faixa de variação da zona capilar;
- iv) o ponto generalizado de entrada de ar;
- v) a capacidade de sucção;
- vi) a umidade residual.

Fredlund et al. (1996) divide a curva de retenção em quatro partes conforme seu grau de saturação ao longo da trajetória de secagem.

- i) Estágio de saturação total ou zona primária: região da curva em que o solo se encontra ainda saturado;
- ii) Estágio de entrada de ar ou zona secundária: região da curva em que o solo começa a apresentar uma terceira fase, a gasosa, onde pode ser determinado o ponto de entrada de ar;
- iii) Estágio de transição ou Zona terciária: região onde a entrada de ar se intensifica;
- iv) Estágio de umidade residual ou Zona quaternária: região onde o grau de saturação se torna muito pequeno e o solo apresenta apenas uma umidade residual, nessa fase para se retirar uma quantidade mínima de água se faz necessário uma sucção elevada.

A Figura 2.6 mostra em detalhes a divisão da curva de retenção de um solo.

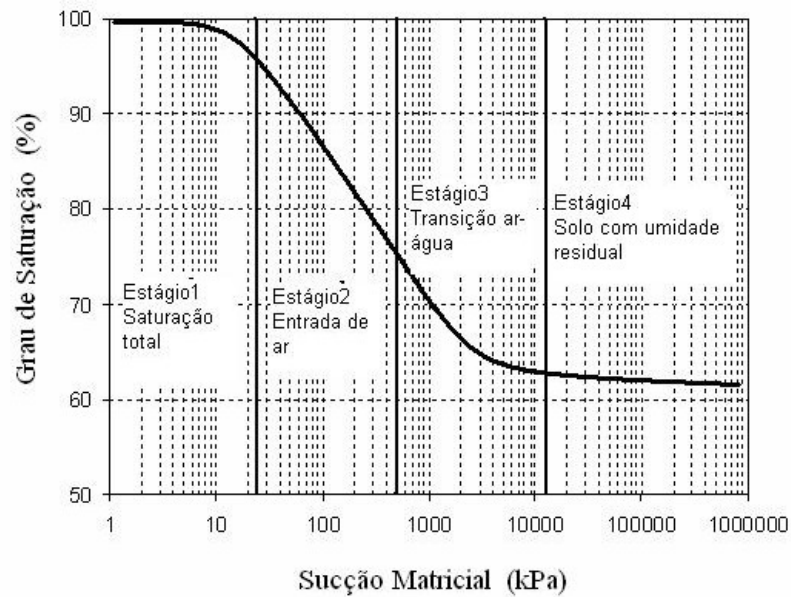


Figura 2.6 – Zonas da curva de retenção em função do grau de saturação (FREDLUND et al, 1996).

2.8.1 – Histerese da curva característica de um solo não saturado

As curvas características obtidas por um solo no caminho de secagem e umedecimento não coincidem, a este fenômeno dá-se o nome de histerese dos solos.

Analisando fisicamente tal fenômeno, pode-se verificar que quando se deseja relação umidade versus sucção no caminho do umedecimento os poros ou vazios maiores do solo são saturados em primeira ordem, enquanto os menores poros ficam vazios, gerando assim, menores níveis de sucção, por outro lado no caminho da secagem ocorrem que os poros maiores perdem com maior facilidade a umidade gerando desta forma maiores níveis de sucção. Todo esse processo gera sucções distintas no caminho do umedecimento e da secagem, formando a área de histerese na curva de retenção (RÖHM, 1993).

Dentre os fatores causadores da histerese dos solos pode-se citar:

- i) A desuniformidade geométrica de cada poro (que são em geral vazios de formas irregulares interconectados por passagens menores) gera o efeito “*ink bottle*”;
- ii) O efeito do ângulo de contacto, que é maior quando ocorre umedecimento do solo e menor na fase de secagem, gerando raios de curvatura diferentes numa e noutra situação;
- iii) Bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante a fase de umedecimento;
- iv) Alteração na estrutura do solo de corrente da expansão ou contração, associadas aos ciclos de umedecimento ou secagem.

Segundo Santos (2008), Pouloussilis (1962) apresenta uma breve descrição das curvas decorrentes da variação da quantidade de água nos poros de um meio poroso estudado. Admitindo que um meio poroso saturado fique submetido a valores crescentes de sucção matricial até um valor denominado de S_{max} , Figura 2.7, a relação entre a quantidade de água contida nos poros do corpo e a sucção matricial é descrita pela curva AB. Durante o umedecimento desse corpo poroso, com o relaxamento da sucção matricial de S_{max} até zero, a mesma relação é representada pela curva BEC. A diferença AC, entre as quantidades de água relativas ao início e o fim do processo (sucção matricial = 0), representa a quantidade de ar ocluído nos vazios durante o umedecimento do corpo. Fredlund (1996) admite que o mesmo comportamento possa vir a ocorrer em alguns solos, de forma que o teor de umidade saturado inicial não seja mais atingido devido ao ar ocluído nos poros. Ao secar o corpo novamente, a relação entre a quantidade de água e a sucção matricial mostra-se como a trajetória CDB. Quando se permite um novo umedecimento obtém-se a mesma curva BEC, conforme o ciclo anterior. Estas respostas, agora, repetem-se quando se varia a sucção matricial da forma relatada, mostrando que o volume de ar ocluído é constante durante o umedecimento. Consequentemente, não se atinge mais a curva AB. As duas trajetórias CDB e BEC do ciclo de histerese são denominadas, respectivamente de curvas de

contorno de secagem e de umedecimento. A região contida por estas curvas é denominada de histerese.

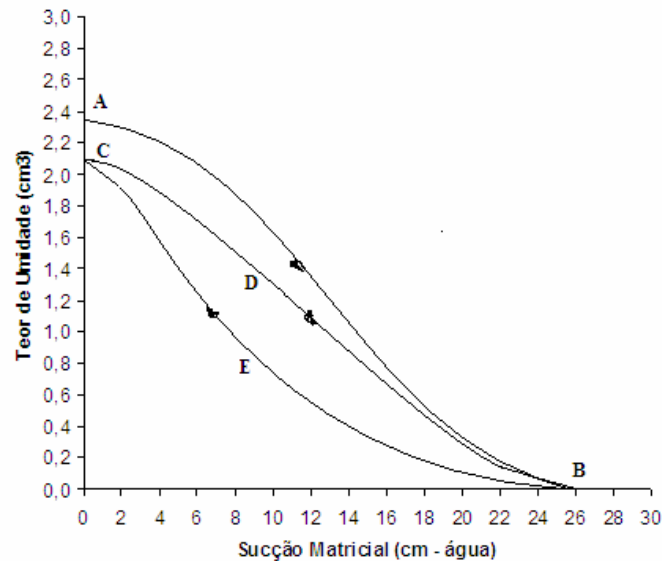


Figura 2.7 – Curvas características experimentais de um corpo poroso rígido (POULOVASSILIS, 1962 apud SANTOS, 2008).

2.8.2 – Modelos de ajuste das curvas de retenção

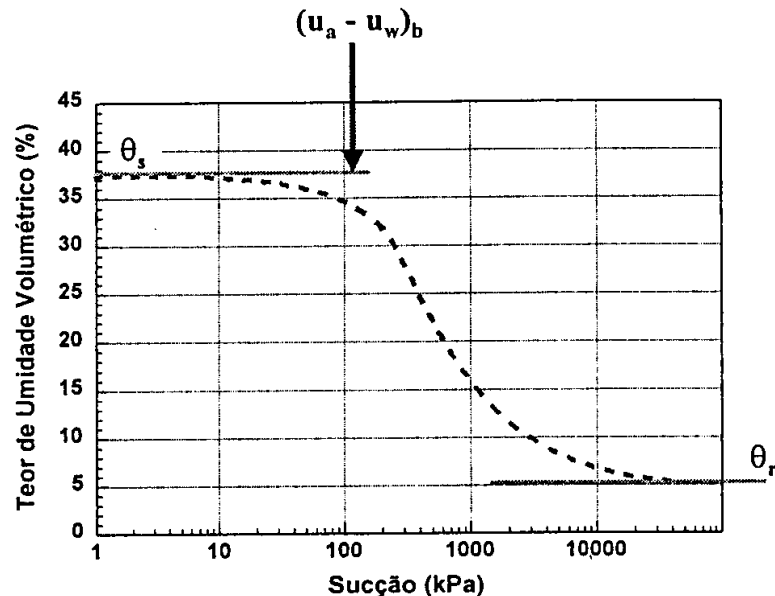
As equações matemáticas que se propõem a modelar os dados experimentais podem ser divididos em duas categorias, os modelos empíricos e os chamados modelos de domínio.

Os modelos empíricos baseiam-se no ajuste de alguns parâmetros da curva de retenção.

Os modelos de domínio assumem os dois estados extremos de umidade do solo: seco e solo saturado (FREDLUND et al., 1994).

Para a escolha do melhor modelo de ajuste de uma curva de retenção, os índices de desempenho mais utilizados são a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o coeficiente de determinação (R^2). No caso do (SQR) escolher aquele que apresentar menor valor, no caso do (R^2) aquele mais próximo da unidade.

Para o ajuste de uma curva de retenção há necessidade da estimativa de alguns valores, entre eles: umidade residual (θ_r), umidade de saturação (θ_s) e a esses valores tentar ajustar os parâmetros de cada modelo. A Figura 2.8 mostra as variáveis utilizadas no ajuste de uma curva retenção.



Figuras 2.8 – Variáveis de ajuste da curva de retenção (FREDLUND et al., 1994).

A Tabela 2.7 mostra um resumo das principais equações matemáticas de ajuste para uma curva de retenção.

Tabela 2.7 - Modelos matemáticos para ajuste de uma curva de retenção (SILLERS; FREDLUND, 2001).

Modelo Matemático	Equação	Obs.
Brooks and Corey(1964)	$\Theta_d = 1$	$\psi < aev$
Brutsaert(1966)	$\Theta_d = (\psi / a_r)^{n_c}$	$\psi > aev$
McKee and Bumb 1984(a Boltzman exponential form)	$\Theta_d = 1$ $\Theta_d = \exp((a_z - \psi) / n_z)$	$\psi < aev$ $\psi > aev$
McKee and Bumb 1987(Fermi)	$\Theta_d = 1 / (1 + \exp((\psi - a_e) / n_z))$	$\psi > aev$
Fredlund and Xing(1994)	$\Theta_d = (1 / \ln(e + (\psi / a_{fz})^{n_f}))^{m_f}$	
Gardner(1956)	$\Theta_d = 1 / (1 + a_g \psi^{n_g})$	
Van Genuchten(1980)	$\Theta_d = (1 / (1 + (a_v \psi)^{n_v}))^{m_v}$	
Van Genuchten(1980)-Burdaine(1953)	$\Theta_d = 1 / (1 + (a_b \psi)^{n_b})^{(1-2/n_b)}$	
Van Genuchten(1980) - Mualem(1976)	$\Theta_d = (1 / (1 + (a_m \psi)^{n_m}))^{(1-1/n_m)}$	
Normalized water content from Fayer and Simmons(1995) correction	$\theta_n = \theta_r + (1 - \theta_r)(\theta_f(\psi))$ $\theta = \theta(1 - \ln(\psi) / \ln(1.000.000) + (\theta_s - \theta_a(1 - \ln(\psi) / \ln(1.000.000))) (\theta_f(\psi))$	
Fredlund and Xing(1994) correction	$\theta = (1 - \ln(1 + \psi / \psi_r) / (1 + 1.000.000 / \psi_r)) (\theta_f(\psi))$	

onde:

ψ :sucção matricial;

Θ : normalização de água;

θ_s, θ_r : umidade volumétrica saturada e residual;

aev: ponto de entrada de ar;

a,n,m: primeiro, segundo e terceiro parâmetros de ajuste, respectivamente;

$\theta_f(\psi)$: função matemática.

2.9 – Movimento de Água em Solos não Saturados

2.9.1 – Condutividade hidráulica dos solos não saturados

Uma tarefa difícil na mecânica dos solos não saturado é a quantificação do valor do coeficiente de condutividade hidráulica (K), visto que, tal parâmetro é influenciado pelo grau de saturação ao qual o solo está submetido. A retenção de água e a possibilidade de transmissão de água através dos poros do solo definem seu comportamento hidráulico.

Considerando em princípio um solo saturado, indeformável e fluido incompressível, a quantidade de água que entra na massa de solo é idêntica a que sai. Com o decréscimo do grau de saturação esse balanço líquido é modificado. O coeficiente de condutividade decresce e pode ser estimado em função da umidade volumétrica e da sucção (função de permeabilidade). A Figura 2.9 mostra a relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica versus o grau de saturação.

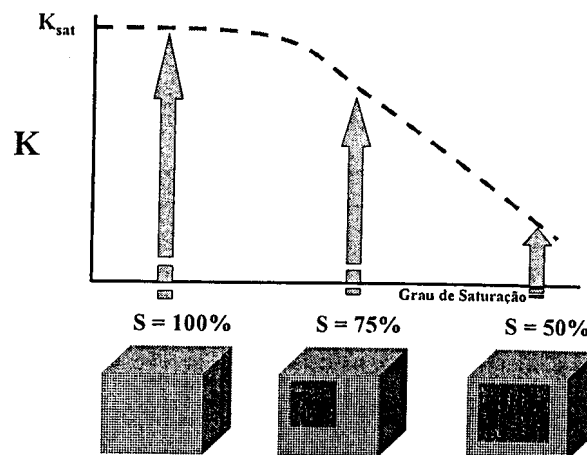


Figura 2.9 – Variação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica em função do Grau de Saturação (MARINHO, 1998).

A determinação experimental da função de permeabilidade é em geral muito onerosa além do tempo de determinação ser longo.

Uma alternativa para a solução do problema é a utilização das equações empíricas para a função de permeabilidade. As mais utilizadas são de Brooks; Corey

(1964) e van Genuchten (1980). As Equações 2.1 e 2.2 referem-se, respectivamente, aos dois modelos.

$$\begin{cases} K(\psi) = K_{Sat} \left[\frac{(\psi_b)}{(\psi)} \right]^\eta, \text{ para } \psi \geq \psi_b \\ K(\psi) = K_{Sat}, \text{ para } \psi \leq \psi_b \end{cases} \quad (2.1)$$

$$K(\psi) = K_{Sat} \cdot \frac{[1 - (\alpha \cdot \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{(m/2)}} \quad (2.2)$$

Onde:

m, n, α e η : são parâmetros de ajuste das equações, obtidos do ajuste da curva de retenção para $\eta = 2 + 3\lambda$ e $m = 1 - \frac{1}{n}$;

ψ_b e ψ : são as sucções no ponto de entrada de ar e de um ponto qualquer, respectivamente;

K_{Sat} e $K(\psi)$: são, respectivamente, a permeabilidade e a função de permeabilidade.

2.9.2 – Medidas de condutividade hidráulica de campo

Para a medida da condutividade hidráulica de um solo não saturado, utiliza-se equipamento que funciona como permeâmetro ou como piezômetro, sendo obtido o coeficiente de permeabilidade, através desses equipamentos.

Na prática é freqüente a execução de um furo de sondagem e instalação de um tubo teste. Conhecido o volume de água necessária para encher o tubo, realizam-se

medidas de tempo e de coluna de água até ser atingida uma constância de perda d' água com o tempo. Supõe-se, então, que a região ensaiada está saturada dando início ao ensaio que pode ser realizado com carga constante ou variável. A Tabela 2.8 contém uma síntese da metodologia utilizada no campo para ensaios de permeabilidade.

A determinação da condutividade hidráulica é feita empiricamente utilizando o coeficiente de permeabilidade obtido.

Tabela 2.8 – Ensaio de permeabilidade em Campo (LIMA,1983).

TIPO DE ENSAIO	METODOLOGIA
Ensaio de Bombeamento	O princípio do método consiste em esgotar-se a água do terreno estabelecendo-se um escoamento uniforme, medir a descarga do poço e observar a variação do nível de água em um piezômetro colocado nas proximidades. (LIMA, 1983).
Ensaio em Furos de Sondagem com carga constante	Nos ensaios de carga e vazão constantes é necessário manter constante a vazão do furo para o solo ou do solo para o furo, até que as condições de escoamento estabilizem e a carga (altura de água no furo) se tornem constante. Nessas condições medem-se a vazão e a carga.(LIMA, 1983).
Ensaio em Furos de Sondagem com carga variável	Nos ensaios de carga variável, deixa-se descer ou subir a água no furo, medindo-se o tempo necessário para uma determinada variação de carga. (LIMA, 1983).
Permeametro Guelf	É um permeâmetro de furo e carga constante que mede a condutividade hidráulica saturada (coeficiente de permeabilidade) de campo acima do lençol freático. É composto de uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante de água dentro do furo, um tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares. Após algum tempo, que dependerá, dentre outros fatores, da umidade antecedente do solo e da sua textura, uma pequena área em torno do furo estará saturada e, então, o fluxo torna-se constante. Este valor de fluxo é utilizado no cálculo da permeabilidade. A recarga de água no furo está submetida a três tipos de fluxo: um de pressão radial ao longo das paredes e dois verticais na base, um de pressão e outro gravitacional. Ao considerar a variação destes fluxos ao longo da base e das paredes do furo, desenvolveu-se um método semi-analítico e numérico para a estimativa das propriedades do solo (permeabilidade saturada e não saturada, potencial matricial e o parâmetro a , que depende das propriedades do solo), (MAHLER; AGUIAR, 2000).

2.9.3 – Análise física dos processos de transporte da água e do calor no solo

O processo físico de transferência de umidade é regido pelo movimento de água na fase líquida, que sofre influência da umidade, da sucção e do potencial gravitacional, pelo fluxo na fase de vapor via difusão, que tem como principal agente o gradiente de temperatura.

A transferência da água entre o solo e a atmosfera é um processo complexo. Em geral, três fatores são determinantes. O primeiro, a disponibilidade de água que é comandada pelos fatores climáticos, como a precipitação, irradiação solar e o vento. O segundo, a capacidade de infiltração da água no solo que é função da permeabilidade, capacidade de retenção e características físico-químicas do solo, e o terceiro, a extração da água através das raízes das plantas que depende de sua densidade e do tipo de cultura (WILSON, 1990).

Na Figura 2.10 observa-se que quando um gradiente de temperatura é aplicado através de um solo, alguma água irá evaporar na extremidade mais quente (lado A) dos poros e se deslocar por difusão em direção a menor densidade de vapor na extremidade mais fria (lado B). As “ilhas de umidade” se distribuem de maneira aleatória pelo solo servindo como válvula de sentido único para o transporte de água. Evaporação, no lado mais quente da “ilha de umidade”, menisco do lado (A), e condensação do lado mais frio, esses fenômenos físicos alteram a curvatura do menisco, originalmente igual, para uma curvatura representada pelas linhas tracejadas. A curvatura do menisco na região mais quente (menisco A) decresce enquanto que na região mais fria a curvatura aumenta (menisco B). Com a continuidade da condensação e da evaporação as diferenças entre as curvaturas aumentam até que o fluxo capilar através das “ilhas de umidade” seja igual à taxa de condensação ou de evaporação. O transporte de água na direção da região mais fria aumenta devido a esse curto ciclo no processo de difusão do vapor (LEAL, 2003).

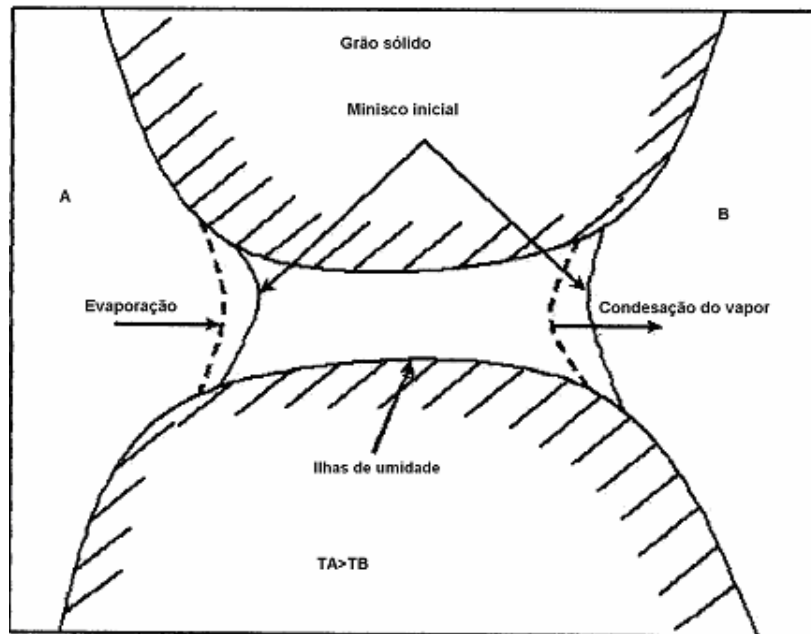


Figura 2.10 – Meniscos de uma ponte de líquido formado entre dois grãos. (LEAL 2003).

2.10 - Perfil de Sucção, Vegetação e Água Capilar

Fredlund; Rahardjo (1993) apresentaram o balanço hídrico como uma ferramenta importante na análise das variações do perfil de sucção em um solo não saturado (Figura 2.11).

Quando não existe infiltração nem evaporação, abaixo de uma área coberta, o solo se encontra em equilíbrio hidrostático e o valor da sucção está associado à altura da coluna de água que o solo pode reter o que representa a capacidade de retenção do solo. O perfil de pressões neutras atingirá o equilíbrio na condição hidrostática não havendo, portanto, o fluxo de água no solo (curva 1).

Ao iniciar a infiltração, com o avanço da frente de umidade irá acontecer uma redução gradual da sucção. Caso haja uma redução da sucção abaixo do valor de equilíbrio o excesso será drenado para o lençol freático (curva 3).

Em épocas secas, a perda de água induz um aumento na sucção e o solo pode apresentar um teor de umidade abaixo da capacidade de retenção e equilíbrio. Desta forma o solo absorve a água disponível no subsolo, até uma umidade de equilíbrio, não havendo alimentação do lençol freático (curva 2).

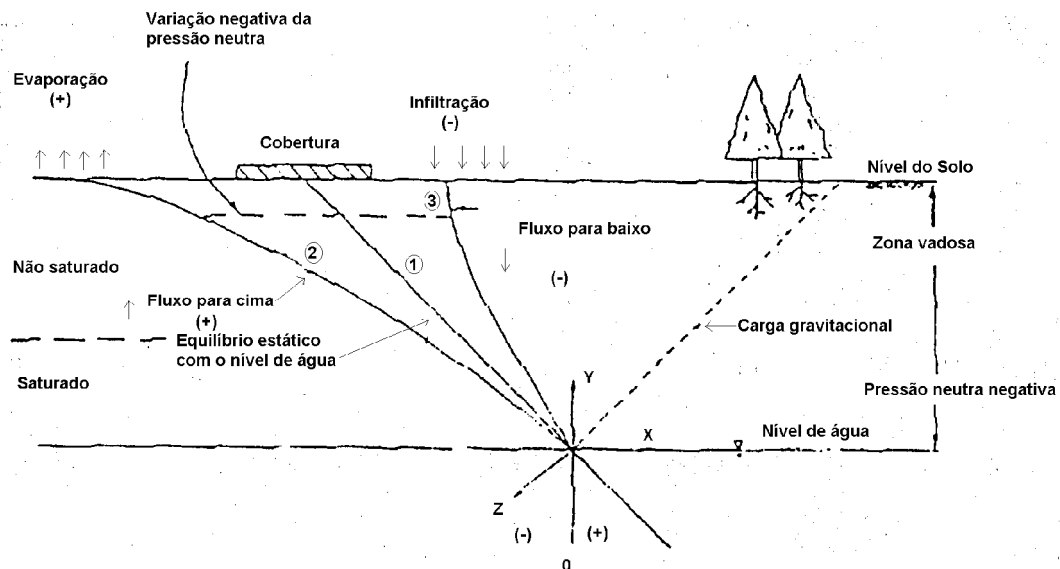


Figura 2.11 – Perfil de Sucção (FREDLUND; RAHARDJO,1993)

Estudos realizados por Blight; Lyell (1984) mostram a influência do tipo de vegetação na flutuação do nível do lençol freático, modificando, assim, o estado de tensões do solo.

Os maiores problemas surgem com a retirada da vegetação, para a implantação de conjuntos habitacionais, hidroelétricas, aeroportos, e etc., onde há uma elevação do lençol freático, e esse efeito associado à precipitação pluviométrica modificam o quadro existente de tensões efetivas abaixo das fundações, na zona ativa, alterando o comportamento de deformação e de resistência ao cisalhamento dos solos dessa zona.

A Figura 2.12 Apresenta um quadro de variação das tensões, onde a sucção das raízes das árvores é representada curva (ad), a pressão de água devido a diminuição

do nível do lençol freático por (bd); o equilíbrio de sucções com a subida do lençol freático por (ce), (BLIGHT; LYELL, 1984).

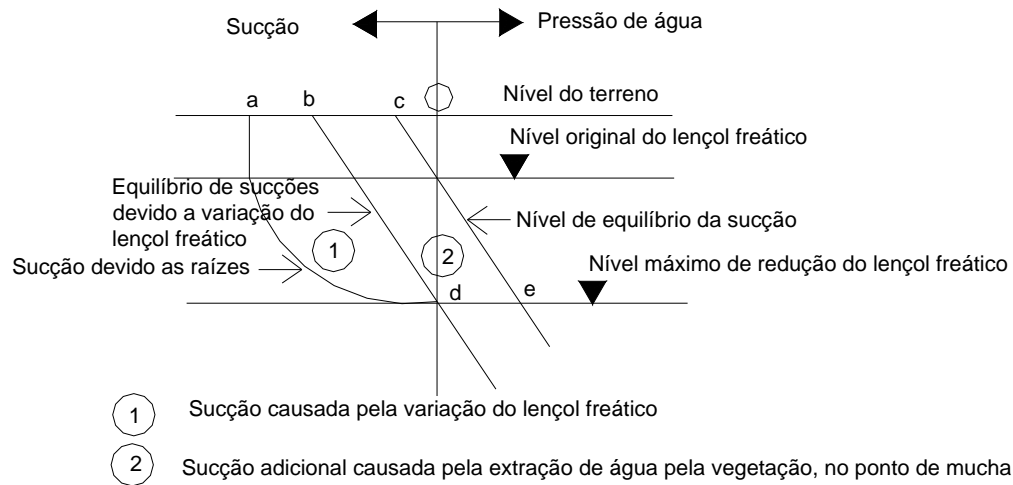


Figura 2.12 – Perfil de Sucção representado pelo efeito da variação do nível do lençol freático (BLIGHT; LYELL, 1984).

A Figura 2.13 mostra uma das classificações dos tipos de água no solo e a sua disponibilidade para as plantas. Observe-se que a classificação se refere à necessidade das plantas em relação à água. O fato da água não estar disponível para as plantas a partir de 1,5MPa não implica que sucções maiores não tenham um papel relevante do ponto de vista de engenharia. (MILLER; DONAHUE, 1995, apud 1995 MARINHO, 1998).

As duas definições mais utilizadas na agronomia talvez sejam o ponto de murchamento e a capacidade de campo. O ponto de murchamento é definido como a sucção acima da qual a planta não consegue retirar água do solo. Este valor não é único, mas depende do tipo de planta. Contudo, esse valor não varia muito, onde 1,5MPa é adotado como sendo o ponto de murchamento (COULT, 1973 apud MARINHO, 1998).

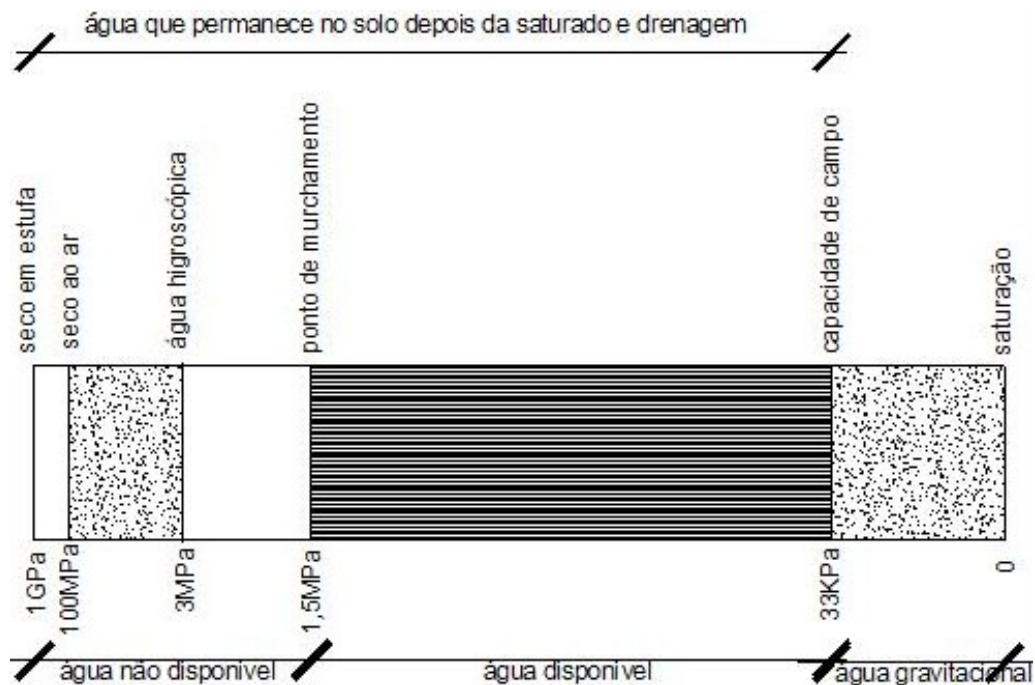


Figura 2.13 – Tipos de água no solo e as sucções matriciais correspondentes (COULT, 1973, apud MARINHO, 1998).

A Figura 2.14 mostra que quando um solo seco é colocado em contato com a água, esta é sugada para o interior do solo. A altura que a água atingirá no interior do solo depende do diâmetro dos vazios. Existe uma altura máxima de ascensão capilar, indicada pelo ponto A, que depende da ordem de grandeza dos vazios, que por sua vez, depende do tamanho das partículas. Mas, os vazios do solo são de dimensão muito irregulares, e, certamente, durante o processo de ascensão, bolhas de ar ficam oclusas no interior do solo. Até uma certa altura, entretanto, indicada pelo ponto B, o grau de saturação é aproximadamente constante, ainda que não seja atingida a saturação (PINTO, 2000).

Caso o solo esteja originalmente abaixo do nível de água, saturado, e esse nível for rebaixado a água dos vazios tenderá a descer. Essa tendência terá como oposição a tensão superficial, resultante dos meniscos capilares. Se o nível de água baixar mais do que a altura de ascensão capilar correspondente a coluna de água se romperá, com parte da água, acima desta cota, ficando nos contatos entre as

partículas. Fixando-se a cota de água no nível inferior indicado, o solo permanecerá saturado até o ponto C. Do ponto C ao ponto D, a água retida nos contatos entre os grãos não mais constitui um filme contínuo de água (PINTO, 2000).

A condição da água acima do lençol freático depende, portanto, da evolução do nível deste lençol. Existirá uma faixa de solo correspondente a uma certa altura, em que a água dos vazios estará em contato com o lençol freático e sua pressão negativa será determinada pela cota em relação ao nível de água livre. Eventualmente, acima dela, ocorrerá água nos vazios, alojada nos contatos entre partículas, mas isolada do lençol freático (PINTO, 2000).

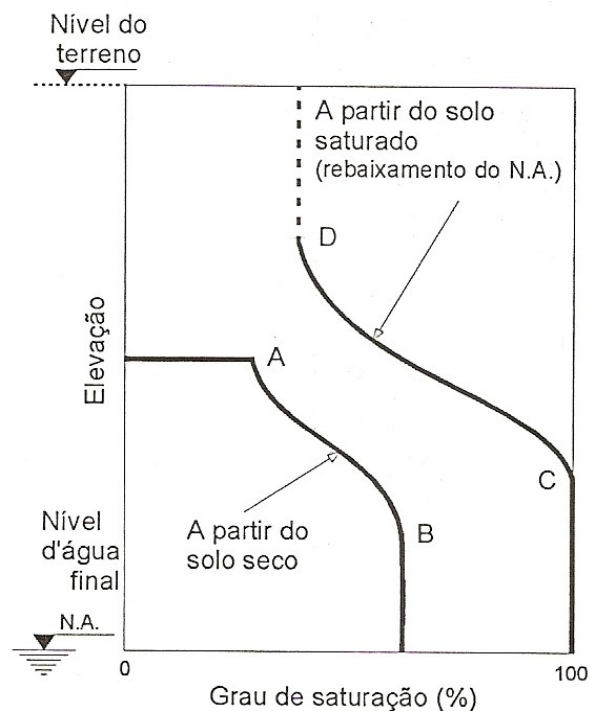


Figura 2.14 – Perfis de ascensão capilar relacionados ao histórico do nível d'água (PINTO, 2000).

2.11 – Evaporação e Infiltração

2.11.1 – Evaporação

Dois processos principais governam a entrada e a saída de água no solo. A água entra no solo sob forma líquida pelo processo de infiltração e sai do solo sob forma de vapor pelo processo de evaporação. O processo de infiltração depende das propriedades do solo como a condutividade hidráulica, já o processo de evaporação é mais difícil de ser avaliado por depender tanto das propriedades do solo como dos fatores climáticos.

O conceito de evaporação pode ser dividido em duas partes: a evaporação potencial e a real. A evaporação potencial é a quantidade de vapor de água que poderia ser emitida por uma superfície de água livre por unidade área da superfície e por unidade de tempo sob determinadas condições atmosféricas (WILSON, 1997). A evaporação real (ER) refere-se à evaporação da água existente no solo por unidade de área e por unidade de tempo.

A evaporação potencial (EP) na superfície do solo é afetada pelos fatores climáticos, dentre eles pode-se citar: a intensidade da radiação solar, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e etc. Alguns pesquisadores estudaram métodos matemáticos para a estimativa da evaporação potencial, cite-se: Thornthwaite, (1948), e Penman, (1948).

A evaporação das superfícies de solo com ou sem vegetação, é considerada igual a evaporação na superfície de água livre. Essa consideração é válida apenas para solo saturado ou próximo a saturação. Para solos não saturados essa comparação superestima a intensidade de evaporação (PENMAN, 1949 apud WILSON, 1997).

Holmes (1961) sugere a relação entre a medida da evaporação real e a da evaporação potencial. A Figura 2.15 apresenta a relação entre a medida da evaporação real e da evaporação potencial para areia e argila, sendo que para a areia analisou-se o comportamento com secagem rápida e lenta. Observa-se que a perda de água por

evaporação na argila é bem definida e suave, devido a perda de umidade ser lenta. Para areia a forma da curva depende da velocidade de secagem da mesma.

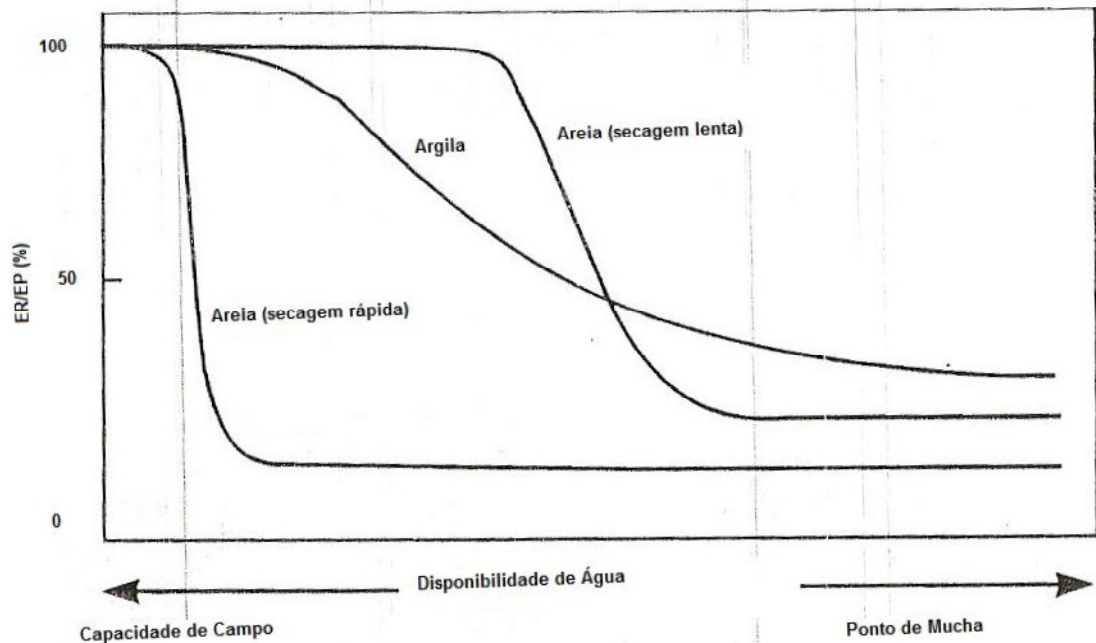


Figura 2.15 – Razão entre a evaporação real e a evaporação potencial em função da sucção matricial (HOLMES, 1961 apud WILSON, 1997).

Wilson et al. (1997) investigou fatores que influenciam na evaporação dos solos e relacionaram entre eles: textura, velocidade de secagem e umidade inicial. Estudos realizados com areia, silte e argila demonstraram que a evaporação real é aproximadamente igual à evaporação potencial até a sucção matricial de aproximadamente 3000 kPa, reduzindo para sucções maiores que essa. A razão para a redução da evaporação é atribuída à redução da pressão de vapor na superfície do solo com o aumento da sucção (Figura 2.16).

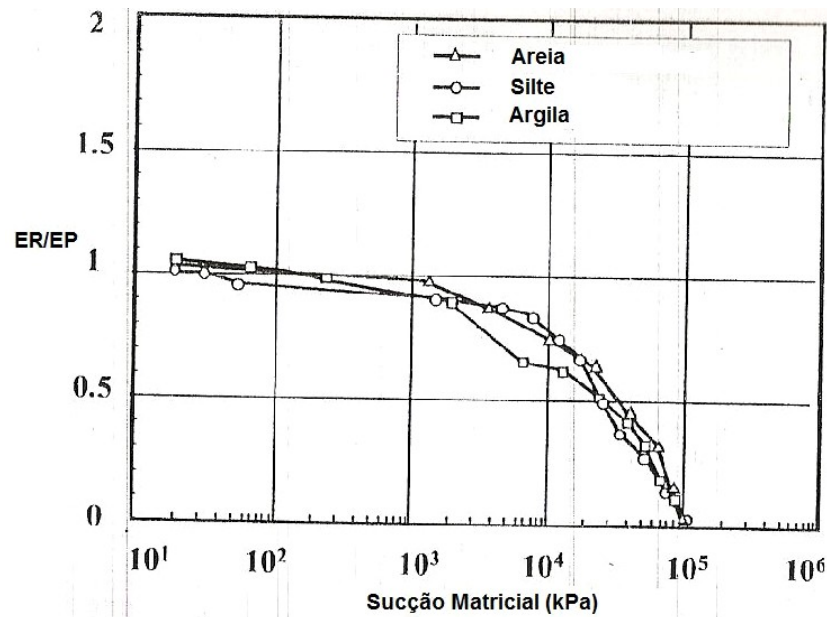


Figura 2.16 – Razão entre a evaporação real e o potencial de evaporação em função da sucção matricial (WILSON, 1997).

Estudo realizado com um solo arenoso mostra a relação para a razão da evaporação real e a evaporação potencial (ER/EP), versus a água disponível na superfície da areia. O valor de (ER/EP =100%) quando a areia está saturada ($\psi \approx 30kPa$), essa relação começa a diminuir quando a areia começa a secar e assume um valor residual quando a sucção assume um valor aproximado ($\psi \approx 3000kPa$).

A Figura 2.17 apresenta outro ponto importante observado é a divisão da secagem em três estágios. O primeiro estágio é o potencial máximo de secagem que ocorre quando o solo está saturado ou bem próximo da saturação, potencial esse determinado pelas condições climáticas; o segundo estágio começa quando as propriedades do solo não permitem um fluxo suficiente para a superfície, para manter o potencial máximo de evaporação. A razão da evaporação continua a declinar durante o segundo estágio até um valor baixo; o terceiro estágio ou valor residual começa após a superfície do solo se tornar suficiente seca, causando assim a descontinuidade da fase líquida da água. O fluxo da água para a superfície cessa e a água só pode migrar para a superfície através do processo de difusão de vapor de água.

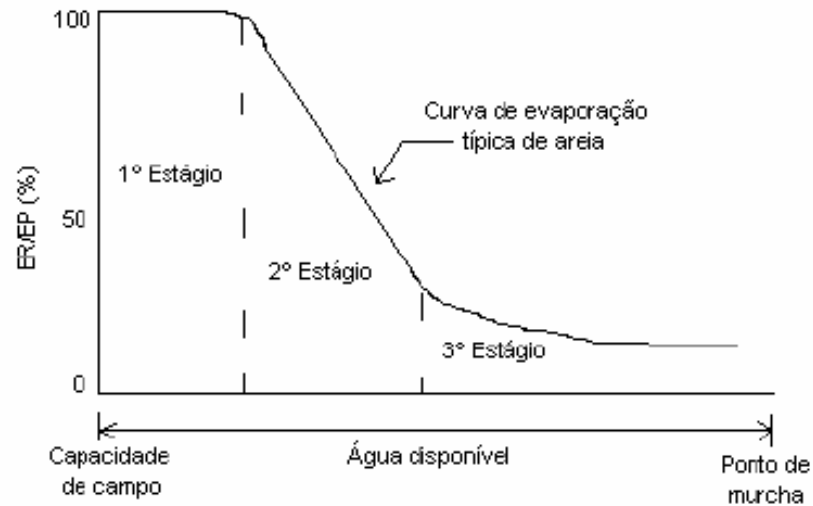


Figura 2.17 – Razão entre a evaporação real e a evaporação potencial para a areia em função da sucção matricial (WILSON, 1997, apud UBALDO; BORMA; BARBOSA, 2006).

Três condições são necessárias para que ocorra a evaporação: A primeira é que ocorra a incidência direta da radiação solar, fornecendo calor latente (aproximadamente 590 cal/g de água evaporada a 15° C). Esse calor pode provir da própria massa de solo, todavia é mais comum que tenha como fonte à irradiação solar; a segunda condição é que a pressão acima da superfície do solo seja maior que a pressão de vapor em seu interior (gradiente de pressão de vapor entre o solo e a atmosfera), onde o vapor é transportado para fora na forma de difusão, convecção ou ambos. Essas duas formas requerem uma fonte externa para remover a umidade e são geralmente influenciadas pelas condições atmosféricas, tais como: temperatura do ar, umidade, velocidade do vento, radiação solar, e outros menos influentes. A terceira condição de evaporação é que exista uma fonte capaz de fornecer umidade para o local a ser evaporado. Com a evaporação da umidade na superfície do solo há um aumento de sucção fazendo com que as umidades nas camadas inferiores subam à superfície e sejam novamente evaporadas. (HILLEL, 1982).

Dentre os muitos fatores para que ocorra a evaporação pode-se citar:

- i) Profundidade do lençol freático, o lençol pode estar profundo e afetar a evaporação devido à elevação da umidade por capilaridade na zona saturada da camada de solo;
- ii) O perfil de solo pode ser uniforme, ou alternar suas propriedades em várias direções com textura e estruturas distintas;
- iii) O fluxo pode ocorrer em condições isotérmicas ou não isotérmicas de acordo com gradientes térmicos;
- iv) O fluxo de umidade pode ser governado pela evaporação, drenagem interna ou ambos os processos;
- v) A superfície pode estar ou não coberta por elementos tipo: asfalto, vegetação, etc. Esses fatores interferem na evaporação, pois modificam as condições iniciais de temperatura e de sucção, alterando as características de permeabilidade e gerando gradientes;
- vi) O solo pode apresentar uma superfície mais densa, devido ao tráfego ou mesmo aos pingos da chuva e a água livre conter sais. Todos esses fatores influenciam diretamente no nível de evaporação do solo;
- vii) Finalmente, a evaporação é um processo contínuo e prolongado que pode ser interrompido por episódios regulares ou periódicos de umedecimento, tipo chuvas intermitentes ou programadas (chuvas geradas artificialmente como ferramenta de pesquisa).

Existe um grande interesse em se evitar a evaporação da umidade superficial, principalmente em regiões semi-áridas. A evaporação pode ser reduzida de três formas. São elas:

- i) Reduzindo a incidência dos raios solares para a área que sofre evaporação;
- ii) Reduzindo a possibilidade da ascensão da água para a superfície, aumentando a profundidade do lençol freático ou gerando um gradiente descendente da umidade (com a colocação de elementos drenantes);
- iii) Reduzindo a condutividade ou difusibilidade do perfil, particularmente da superfície do solo por meio de vegetação ou colocação de solo orgânico.

A transpiração é o fenômeno resultante dos processos fisiológicos dos vegetais que cedem parte da água ao meio ambiente sob forma de vapor. A soma das atuações da transpiração dos vegetais e da evaporação chama-se evapotranspiração.

2.11.2 – Infiltração

A infiltração é o processo de penetração da água através da superfície do terreno, até que a mesma encontre uma camada de solo ou de rocha e seu trajeto seja interrompido podendo ocorrer um processo de acumulação a partir desta profundidade.

Uma visualização da infiltração está apresentada na Figura 2.18, onde se observa o perfil de variação da umidade e da sucção matricial após um determinado tempo de infiltração. A modificação acontecida nos perfis de umidade gravimétrica e sucção matricial podem provocar processos de contração e expansão caso o solo seja expansivo.

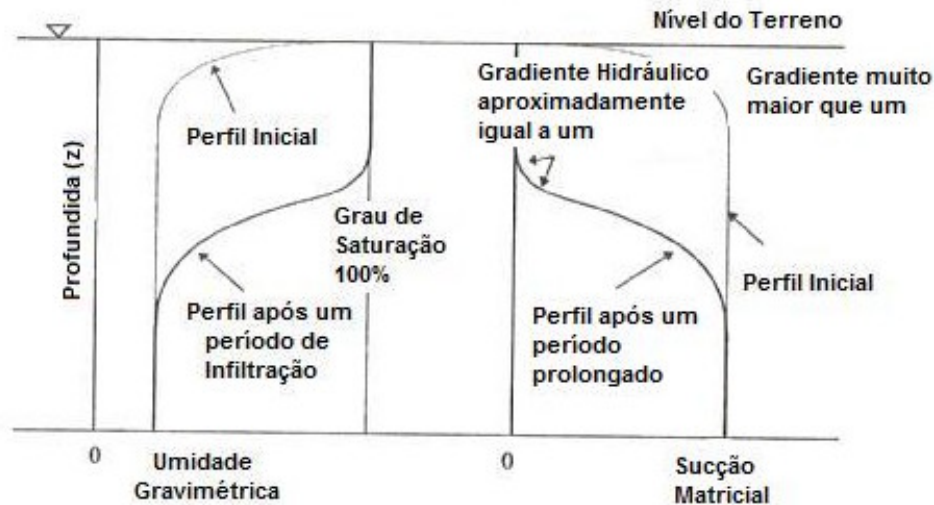


Figura 2.18 – Perfil de solo para umidade gravimétrica e sucção matricial inicialmente não saturado após o processo de umidificação (WILSON, 1997).

A teoria que estuda a infiltração de água em um perfil de solo é baseada na condição isotérmica, portanto, não pode ser utilizada para simular a transferência de água na forma de vapor do solo ou da atmosfera.

Todavia, é interessante notar que as curvas de infiltração e de evaporação são praticamente idênticas do ponto de vista qualitativo.

Os métodos de análise de infiltração e evaporação são bastante diferentes. O método de análise da infiltração considera que os pontos da área de precipitação considerados são igualmente espaçados e apresentam condição isotérmica. Enquanto, os métodos de análise da evaporação adotam que a água é retirada do solo na forma de vapor. A combinação entre esses métodos implica que o fluxo de água no perfil de solo é formado apenas pela água líquida e que o vapor de água existe apenas na atmosfera acima do solo. Isto é correto apenas para os casos de solo saturado, todavia, para solos não saturados a fase líquida e a de vapor estão presentes no interior do mesmo (WILSON, 1990).

A Figura 2.19 mostra o comportamento das curvas de infiltração e evaporação para solos não saturados versus tempo. Com relação à infiltração (parte a), a linha **A**

mostra a condição inicial saturada logo a infiltração é igual a precipitação. Até o limite de saturação, a partir desse momento, o excesso começa a escoar e o perfil topográfico predomina. A curva **B** apresenta o caso de uma precipitação de grande intensidade e curto tempo, devido ao grande valor da sucção inicial praticamente toda a água escoar, tendo uma infiltração muito pequena. Na curva **B** destacam-se os segmentos **C** e **D**, esses segmentos, apresentam a característica de chuvas regulares, que reduzem a sucção matricial progressivamente, com o aumento gradual da permeabilidade inicia-se a infiltração até o ponto de saturação do solo e escoamento superficial predominando os fatores topográficos, depois ocorre um decréscimo progressivo com o tempo. Para a evaporação (parte b), considerando o solo inicialmente saturado, a curva **1** apresenta um elevado potencial de evaporação, característica de um dia quente com grande incidência de raios solares, para um pequeno período de tempo, logo após a evaporação irá reduzindo progressivamente, devido ao aumento da sucção matricial e conseqüente redução da pressão de vapor de água na superfície. As curvas **2,3** e **4** mostram uma característica de um potencial de evaporação inferior ao da primeira, portanto tem-se um potencial menor e com uma redução gradual da evaporação.

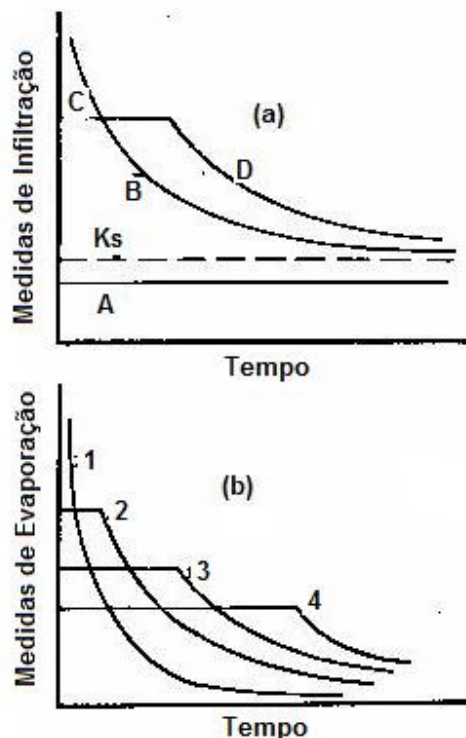


Figura 2.19 – Medidas de Infiltração e Evaporação em função do tempo. (WILSON, 1990)

2.11.3 – Interação atmosfera solo

A Figura 2.20 mostra os elementos componentes desse processo de interação. Observa-se que no lençol freático existe o movimento da água nos dois sentidos, devido aos processos de infiltração no sentido descendente e evaporação no sentido ascendente, aliados ao movimento da água estão a transferência de calor e a concentração de solutos. Para a área não saturada, o movimento se dá em forma de água líquida resultante da variação da sucção matricial gerada pelo processo de evaporação na camada superficial, sob forma de vapor e, ainda, há transferência de calor e concentração de solutos associados às umidades. Na área de interface entre solo e a atmosfera as transferências registradas são de água sob forma de vapor (calor latente), irradiação solar e calor sensível.

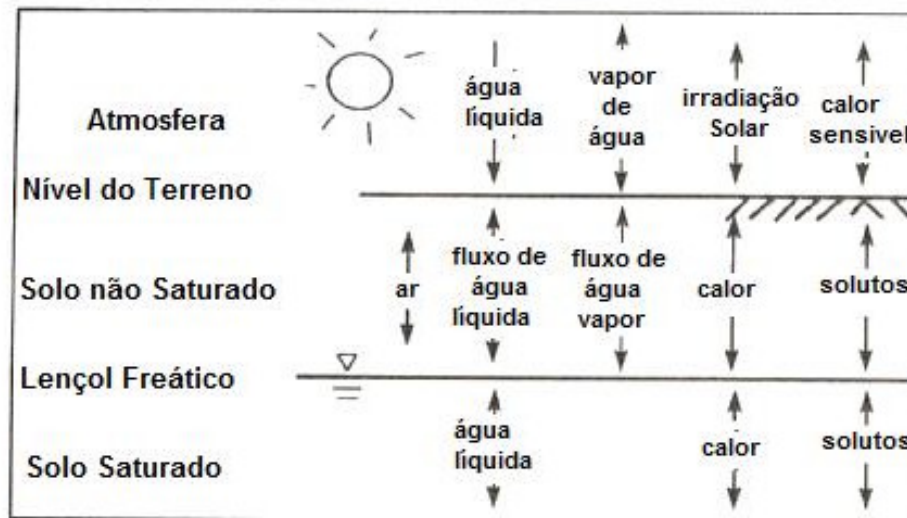


Figura 2.20 – Fluxo unidimensional de água entre o terreno e a atmosfera (WILSON, 1997).

Para rodovias pavimentadas, Barbour (1992), apud Wilson (1997), diz que apesar da base dos revestimentos de asfalto ter um nível de compactação máximo para

uma determinada umidade ótima, e proteção à infiltração. O aspecto da proteção apresentada à evaporação favorece um aumento progressivo e lento da umidade sob a área do revestimento, fator esse que gera uma modificação no grau de compactação do solo e como consequência a diminuição do suporte de carga. Observa-se este comportamento tanto nas camadas de base como de sub leito. A situação se agrava quando o subleito é formado por um solo expansivo, pois a pressão de expansão pode comprometer todo um projeto. Essa condição pode ser estendida para edificações residenciais.

2.12 – Zona Vadosa

O fenômeno capilar gera a ascensão da água no solo, essa altura de ascensão é determinada pelo tipo de solo acima do lençol freático. A água acima do lençol freático encontra-se com pressão negativa.

A camada de solo que se localiza acima do lençol freático é chamada de zona vadosa e pode ser dividida em saturada e não saturada. A Figura 2.21 mostra a subdivisão da zona vadosa.

A altura do trecho saturado da zona vadosa (Z_{\min}) equivale, em termos de pressão, a pressão de desaturação. No trecho não saturado tem-se uma altura máxima ($Z_{\max.}$) onde a água sobe por ascensão capilar nos menores vazios do solo (MARINHO, 1998).

Segundo Fredlund (1996) a pressão de desaturação corresponde a um grau de saturação com uma faixa aproximada de 95 a 100%.

A relação entre o solo e a atmosfera acontece na zona vadosa (zona ativa). Essa zona é o trecho de influência das variações sazonais.

A associação entre a pressão negativa da água na zona vadosa e o teor de umidade a uma determinada profundidade é função das características climáticas locais e das características dos solos envolvidos. Quando a superfície do solo não está

protegida das variações climáticas tem-se um ciclo de perda e absorção de água na zona vadosa (MARINHO 1998).

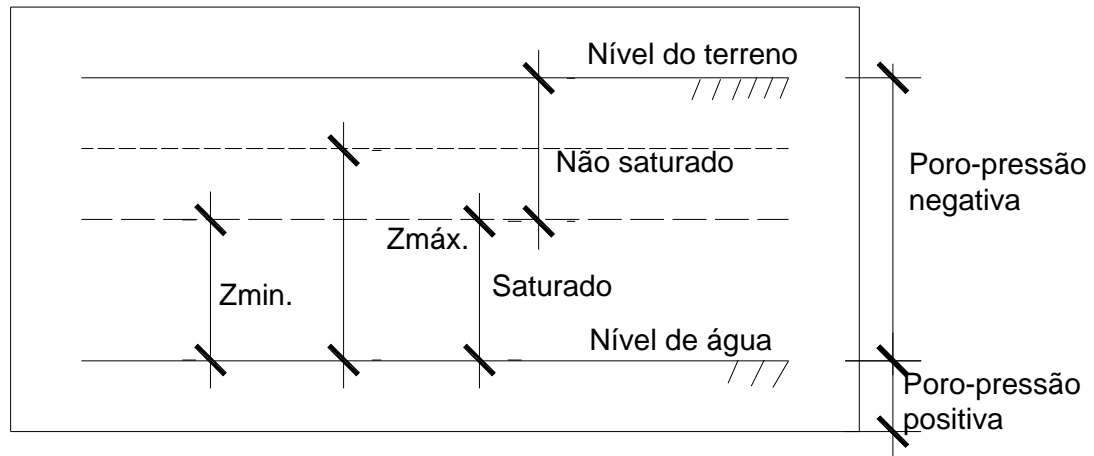


Figura 2.21 – Perfil da Zona Vadosa.

2.13 – Instrumentação de medidas (umidade e temperatura) e técnica do papel de filtro.

2.13.1 – Sonda de nêutrons

A sonda de nêutrons é um equipamento utilizado para avaliar o teor de umidade em uma determinada massa do solo. Esse equipamento basicamente pode ser dividido em duas partes; a primeira é uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos; a segunda é um detector de nêutrons térmicos.

O princípio da metodologia de determinação da umidade do solo com a sonda de nêutrons consiste, segundo Guerra (2000), em inserir uma fonte radioativa num tubo de acesso de alumínio instalado no maciço até a profundidade desejada e, emitir nêutrons rápidos que penetram radialmente no solo e colidem elasticamente com diversos núcleos atômicos ali existentes, perdendo energia cinética. Essa perda é máxima quando o nêutron bate com uma partícula de massa similar a sua. Na prática, tem-se

encontrado que a moderação de nêutrons rápidos no solo é proporcional ao conteúdo de hidrogênio. Assim, quando os neutros rápidos colidem com o núcleo de hidrogênio da água do solo, esses nêutrons perdem sua máxima energia formando, ao redor da fonte radioativa, uma nuvem de nêutrons moderados (ou termalizados) os quais são captados pelo detector, geralmente constituído de BF_3 (Trifluoreto de boro), portanto, quando um nêutron moderado lento encontra $^{10}_5\text{B}$ e é absorvido, uma partícula de He é emitida, criando um pulso elétrico. Esse pulso é enviado através de um cabo ao medidor onde a leitura é registrada. Quanto mais hidrogênio no solo mais nêutrons rápidos são moderados, maior o número de pulsos enviados ao medidor e, conseqüentemente, maior a leitura (ANDRADE et al, 2001).

O número de pulsos registrado depende de alguns fatores, como o tipo do solo, composição química, teor de matéria orgânica e massa volumétrica específica. Faz-se necessário, desta forma, a calibração do equipamento. A curva de calibração da sonda de nêutrons em campo relaciona a contagem normalizada (relação entre a contagem absoluta no solo e contagem em um meio de referência – água) e a umidade volumétrica, determinada pelo método gravimétrico com uso dos demais índices físicos para diferentes valores de umidade do solo. Através da calibração obtém-se a equação de ajuste e o coeficiente de determinação utilizando-se uma regressão linear simples.

2.13.2 – Termopar

O princípio físico do funcionamento do termopar já é conhecido desde 1900, mas só recentemente passou a ser utilizado como fonte do potencial elétrico.

O termopar é um tipo de sensor simples, robusto, de baixo custo e de fácil utilização. O dispositivo gera eletricidade a partir de diferenças de temperatura. Dois fios condutores de eletricidade, por exemplo, o cobre e uma liga de cobre-níquel, chamada “constantan”, quando unidos em uma de suas extremidades geram uma tensão elétrica que pode ser medida na outra extremidade se existir diferença de temperatura entre elas, sendo a diferença de potencial proporcional à diferença de

temperatura entre suas junções. Esse princípio é denominado de “Seebeck” em homenagem ao cientista que o descreveu e amplamente utilizado para medir temperatura na indústria em muitos tipos de máquinas e equipamentos (MOREIRA, 2002).

A Figura 2.22 mostra um circuito para medir o potencial de “Seebeck” formado por dois fios diferentes, A e B, duas junções e um voltímetro. Os fios de cobre conectam a junção de referência ao instrumento.

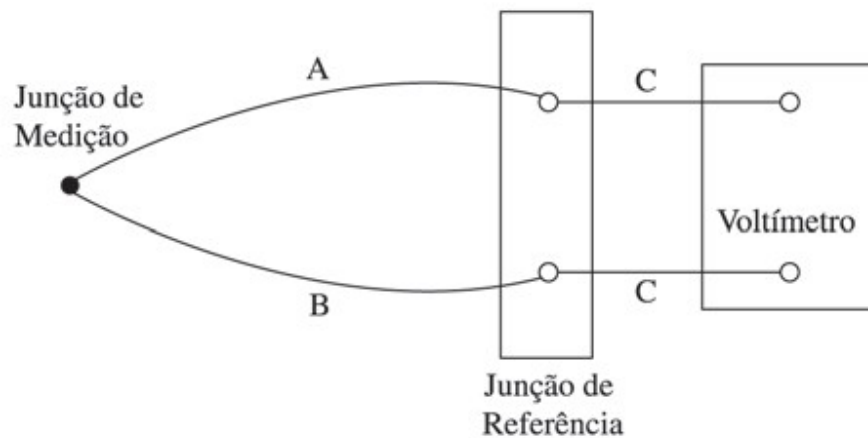


Figura 2.22 - Circuito de medição do potencial “Seebeck” (MOREIRA, 2002).

O termopar opera sob o efeito “Seebeck”, portanto, é diferente da maioria dos outros sensores de temperatura, uma vez que sua saída não está diretamente relacionada à temperatura, mas sim a um gradiente de temperatura, ou seja, da diferença de temperatura ao longo do fio termopar (MOREIRA, 2002).

2.13.3 – Técnica do papel de filtro

A técnica do papel de filtro é extremamente simples, seu princípio de funcionamento baseia-se nas trocas termodinâmicas geradas em um meio isolado do ambiente. As sucções do solo e do papel entram em equilíbrio, desta forma, por meio

de uma curva de calibração do papel de filtro, pode-se estimar a sucção ao qual o solo está submetido.

A calibração do papel de filtro é realizada colocando-se o papel em um meio cuja sucção seja conhecida e retirando sua umidade final, em seguida procede-se o traçado de um gráfico de umidade versus sucção e por fim usa-se a estatística inferencial (regressão simples) para determinação das equações de ajuste, deve-se evitar a extrapolação dos valores, para não gerar erros.

Alguns pesquisadores criticam o fato de que a calibração para sucções baixas seja feita com o contato entre o papel de filtro e a água, enquanto que para sucções altas não há esse contato. A Tabela 2.9 apresenta técnicas de calibração para o papel de filtro.

Tabela 2.9 – Técnicas usadas para a calibração do Papel de Filtro (MARINHO, 1995).

Técnicas	Faixa de sucção para calibração do papel filtro	Comentários
Placa de sucção	0 - 1 atm	Sucção gerada diretamente.
Amostras de campo	0 - 2MPa	Utilizada a habilidade dos solos plásticos de sustentar à média da tensão efetiva quando descarregado sob condições não drenadas. Assume-se que a sucção matricial é numericamente igual à média da tensão efetiva da amostra no campo.
Amostras edométricas	0,1 MPa – 2MPa	Assume-se descarregamento uni-dimensional e não drenado. A pressão de consolidação aplicada é numericamente igual a sucção matricial da amostra descarregada.
Placa de pressão	0 – 1,5 MPa	Usa técnica de translação de eixos
Dessecador	0,5MPa – 30MPa	Soluções com a pressão de vapor conhecida são utilizadas. O papel filtro é colocado em ambiente fechado com a solução. A transferência de água é por vapor. O equilíbrio é alcançado quando a afinidade por água da solução usada e do papel filtro são equalizadas.

Na execução do ensaio um dos procedimentos mais importantes para obtenção de uma sucção mais confiável é garantir que o papel filtro após o equilíbrio seja removido do ambiente termicamente isolado sem perda ou ganho de umidade.

A perda de umidade é da ordem de 1,5% por minuto para uma umidade de aproximadamente 35%. Essa perda depende da umidade do papel. Para baixas umidades (sucções elevadas) a evaporação é menor. Quando retirado da estufa o papel absorve água do ar e, portanto, deve ser rapidamente pesado (MARINHO, 1995).

Para a medida da sucção é necessário que haja troca de umidade entre o solo e o sistema de medição. À compreensão do fenômeno exige o conhecimento do fluxo de água envolvido. No uso da técnica do papel de filtro, para obtenção da sucção, o fluxo de água pode ocorrer por vapor ou por capilaridade.

A Figura 2.23 apresenta as técnicas para obtenção da sucção total e matricial utilizando o papel de filtro.

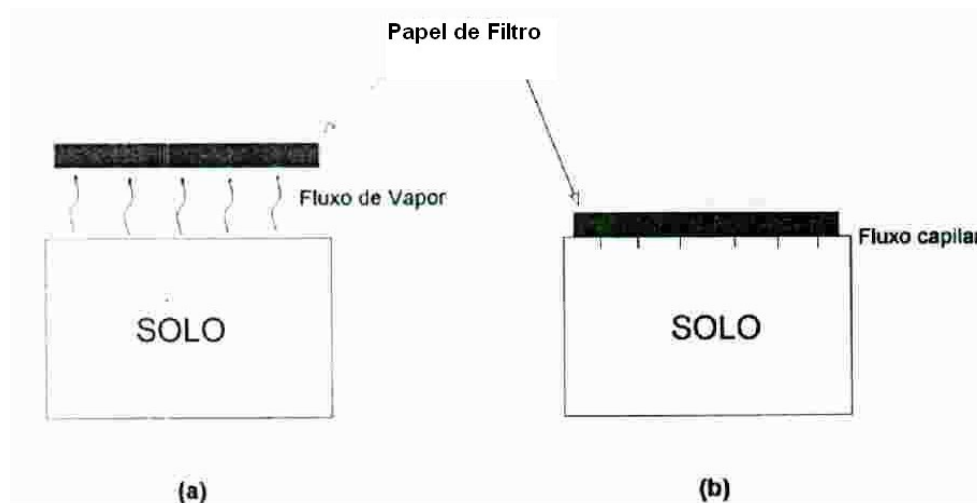


Figura 2.23 – Determinação da sucção (a) Total (b) Matricial, utilizando o papel de filtro (MARINHO 1995).

Na situação do fluxo por vapor as moléculas de água têm que escapar dos poros vencendo as forças capilares e forças osmóticas que agem devido à presença de sais. O espaço de ar deixado entre o solo e o papel de filtro fornece uma barreira para os

sais, permitindo apenas o fluxo de vapor de água (i.e. água pura). O fluxo capilar ocorre através das partículas do solo e das fibras do papel de filtro sem que a água perca continuidade. O fluxo capilar implica na interação entre o papel de filtro e a água dos poros (i.e. com sais, etc). Se o fluxo ocorre apenas através de vapor o papel de filtro medirá sucção total, uma vez que estará incorporando forças osmóticas e capilares que retêm as moléculas de água. Quando o fluxo ocorre apenas por capilaridade a sucção medida é matricial. Nesse caso, o componente osmótico não age como força adicional que impede o fluxo de água para o papel de filtro (MARINHO, 1995).

Para sucções muito altas é possível que haja fluxo de vapor, apesar do papel de filtro estar em contato com o solo.

2.14 – Estudo Estatístico

No estudo do nível de variabilidade de dados, os elementos da estatística clássica mais comumente utilizados são: a variância, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. Além desses, outras medidas como a amplitude total, desvio médio e a amplitude interquartílica que é mostrada na Figura 2.24.

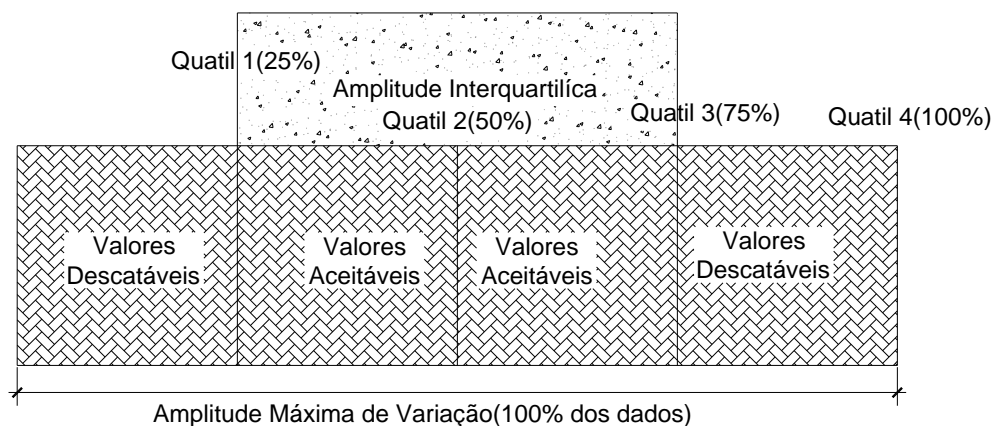


Figura 2.24 – Representação gráfica da amplitude interquartílica

A amplitude interquartilica e os limites críticos representam medidas de dispersão insensível a observações perturbadoras, sendo utilizadas na identificação de dados discrepantes, conforme as equações (2.3 e 2.4).

$$A_{INT}=Q_3-Q_1 \quad (2.3)$$

onde:

A_{INT} : distância interquartilica;

Q_3 : quartil superior;

Q_1 : quartil inferior.

$$L_I=Q_1-1,5. A_{INT}$$

$$L_S=Q_3+1,5. A_{INT} \quad (2.4)$$

onde:

L_I : limite crítico inferior;

L_S : limite crítico superior.

O coeficiente de variação é a medida que vale o resultado da divisão do desvio-padrão pela média aritmética, cujo resultado mostra o quão maior (ou menor) o desvio-padrão é da média. É uma grandeza útil para comparar distribuições de unidades diferentes, mas que tem pouca utilidade quando a média aritmética se aproxima de zero (ANDRIOTTI, 2003).

Ao analisar um conjunto de valores experimentais, diz-se que a distribuição possui pequena variabilidade (dispersão) quando o coeficiente de variação der até 15%; média dispersão quando estiver acima de 15% até 30%; e grande dispersão quando superar os 30% (Simon, 1995).

A teoria clássica da estatística baseia-se na distribuição contínua mais importante e mais utilizada que é a distribuição normal, geralmente citada como curva normal ou curva de Gauss. Sua importância em análise matemática resulta do fato de que muitas técnicas estatísticas, como análise de variância, regressão e alguns testes de hipóteses, assumem e exigem a normalidade dos dados. Quando os dados fogem a esse tipo de distribuição, lança-se mão de recursos de transformação para poder analisá-los através de sua aplicação.

A distribuição normal é a distribuição de dois parâmetros e tem forma de sino. A função densidade de probabilidade tem a seguinte forma (Equação 2.5).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

Para maiores informações da verificação da normalidade, recorrer à literatura específica (BUSSAB; MORETTIN, 2006).

Informações detalhadas sobre a variabilidade espacial das propriedades físico-mecânica de um solo são essenciais para a obtenção de valores médios representativos de grandes áreas para que se possa ser utilizada com segurança no estudo de fatores como expansão e colapso dos solos especiais.

No estudo da variabilidade das propriedades físico-mecânicas do solo podem ser utilizados basicamente dois enfoques que diferem, entre si, na forma da análise dos dados. O primeiro é o método estatístico clássico aplicado às amostras de populações que exigem a validade de algumas hipóteses básicas, como a independência entre as observações e a distribuição normal dos dados. O segundo é a Geoestatística, que vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de parâmetros

físico-mecânicos, permitindo a interpretação dos resultados com base na estrutura de sua variabilidade natural.

2.14.1 - Estatística clássica

Trabalhos de pesquisa estudando a variabilidade das propriedades do solo com o uso da estatística clássica utilizam apenas os enfoques inteiramente aleatórios, baseando-se na análise descritiva geral dos dados como a distribuição de frequência dos dados, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, onde os maiores coeficientes de variação indicam maiores variabilidades da propriedade. Essa análise descritiva geral somente leva em conta os valores obtidos nas amostras, sem considerar sua posição, permitindo uma primeira visão dos seus aspectos gerais, sem nenhuma pretensão de inferência.

O uso do método estatístico clássico em estudo de variabilidade do solo apresenta basicamente dois problemas: a) assume, sem testar, a independência entre os pontos amostrados, exigência básica inerente a qualquer método de amostragem; b) as observações ficam reduzidas à média e às medidas de dispersão, não informando sobre as distribuições espaciais dos dados, cujo conhecimento é necessário em muitos trabalhos.

A forma de obtenção dos dados, por economia de tempo ou de recursos financeiros muitas vezes é a amostragem. Isso ocorre devido à impossibilidade de se trabalhar com toda a população no estudo dos parâmetros do solo. Assim, os pesquisadores são forçados a estimar os parâmetros de uma população a partir de amostras de indivíduos que a represente.

2.14.2 – Geoestatística

A Geoestatística teve sua origem no ano de 1951 quando o Daniel Krige ao estudar a presença de determinados minerais verificou a variabilidade espacial entre as

concentrações, chegando à conclusão de que considerar apenas a variabilidade estocástica não resolveria o problema do estudo de tais minérios.

O estudo da Geoestatística engloba um conjunto de técnicas que possibilitam mapear com melhor precisão as propriedades dos dados geográficos. O estudo geoestatístico baseia-se nas seguintes etapas:

- i) Análise exploratória dos dados;
- ii) Análise estrutural dos dados;
- iii) Realização das Inferências.

A partir da introdução da Geoestatística, surge nas ciências da terra um novo tipo de variável denominada variável regionalizada, que é uma variável distribuída no espaço para representar um fenômeno natural. Como exemplo de variável regionalizada pode-se citar o teor de argila contida no solo. Os fenômenos naturais levam consigo um duplo aspecto: o estruturado e o aleatório.

A análise geoestatística consiste no entendimento, por meio de análise matemática, dos seguintes aspectos: a gênese e leis naturais que governam os fenômenos interpretados como regionais; da estimativa das variáveis regionais, ou algumas de suas características espaciais, usando informações e relações a partir de um conjunto discreto de amostras; e da avaliação dos erros de estimativa, para estabelecer um grau de segurança em previsões e padrões ótimos de amostragem, que assegure que um erro máximo de estimativa não seja excedido (LANDIM, 2003).

Estudos realizados por Andrade (2002), mostram uma dependência espacial entre os valores de alguns parâmetros do solo, entre eles, estão à condutividade hidráulica e a umidade.

Para a validade do estimador estatístico usado na Geoestatística admite-se as seguintes hipóteses, a saber:

i) Hipótese de estacionaridade de segunda ordem

Uma função aleatória $Z(x_i)$ é estacionária de segunda ordem atende a Equação 2.6.

$$E \{Z(x_i)\} = m \quad (2.6)$$

a) o valor esperado $E\{Z(x_i)\}$ existir e não depender da posição x , ou seja para qualquer x_i dentro da área valores medidos.

b) para cada par de variáveis aleatórias, $\{Z(x_i), Z(x_i+h)\}$, a função covariância, $C(h)$, existir e for função de h , para qualquer x_i dentro da área de valores medidos(Equação 2.7).

$$C(h) = E \{Z(x_i) Z(x_i+h)\} - m^2 \quad (2.7)$$

Na Equação (2.6), a estacionaridade da covariância, implica na estacionaridade da variância e do variograma. Assim, usando a linearidade do operador valor esperado, obtém-se a Equação 2.8.

$$VAR \{Z(x_i)\} = E \{Z(x_i+0)\} - E \{m^2(x_i)\} \quad (2.8)$$

E aplicando as condições de estacionaridade (2.6) e (2.7), obtém-se a Equação 2.9,

$$VAR \{Z(x_i)\} = E \{Z^2(x_i)\} - m^2 = C(0) \quad (2.9)$$

O variograma pode ser desenvolvido, gerando a Equação 2.10

$$2\gamma(x_i, x_i+h) = 2\gamma(h) = E\{Z^2(x_i) - 2Z(x_i)Z(x_i+h) + Z^2(x_i+h)\} \quad (2.10)$$

Somando e subtraindo $2m^2$, da Equação 2.10, obtém-se a Equação 2.11

$$2\gamma(h) = E\{Z^2(x_i) - m^2 - 2Z(x_i)Z(x_i+h) + 2m^2 + Z^2(x_i+h) - m^2\} \quad (2.11)$$

Usando a linearidade do operador, e reconhecendo que o valor esperado de uma constante é a própria constante, tem-se a Equação 2.12

$$2\gamma(h) = E\{Z^2(x_i)\} - m^2 - 2(E\{Z(x_i)Z(x_i+h)\} - m^2) + E\{Z^2(x_i+h)\} - m^2 \quad (2.12)$$

Substituindo as equações (2.7) e (2.9) na equação (2.12), tem-se a Equação 2.13

$$2\gamma(h) = C(0) - 2C(h) + C(0) = 2C(0) - 2C(h) \quad (2.13)$$

Ou simplificando,

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (2.14)$$

Isolando $C(h)$, tem-se a equação 2.15

$$C(h) = C(0) - \gamma(h) \quad (2.15)$$

Dividindo ambos os lados pôr $C(0)$ e reconhecendo que o correlograma $\rho(h) = C(h)/C(0)$, tem-se a equação 2.16

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{C(0)} = \frac{C(0)}{C(0)} - \frac{\gamma(h)}{C(0)} \quad (2.16)$$

$$\rho(h) = 1 - \frac{\gamma(h)}{C(0)}$$

Portanto, se a hipótese de estacionaridade de segunda ordem puder ser satisfeita, a covariância $C(h)$ e o variograma $2\gamma(h)$ são ferramentas equivalentes para caracterizar a dependência espacial. A existência de estacionaridade dá a oportunidade de repetir um experimento mesmo que as amostras devam ser coletadas em pontos diferentes, porque todas as amostras são consideradas pertencentes a populações com os mesmos momentos estatísticos.

ii) Hipótese intrínseca

A hipótese de estacionaridade de segunda ordem implica na existência de uma variância finita dos valores medidos, $\text{VAR} \{Z(x)\} = C(0)$. Esta hipótese pode não ser satisfeita para alguns fenômenos físicos os quais tem uma capacidade infinita de dispersão. Exemplos incluem a concentração de ouro em minas da África do Sul (KRIGE, 1951), movimento Browniano (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978) e algumas cadeias de Markov (BARTLETT, 1966). Para tais situações, uma hipótese menos restritiva, a hipótese intrínseca, pode ser aplicável. Esta hipótese requer apenas a existência e estacionaridade do variograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita. Uma função aleatória é intrínseca quando, além de satisfazer a condição expressa na equação (2.6), a estacionariedade do primeiro momento estatístico, também o incremento $\{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}$ tem variância finita, e não depende de x_i para qualquer vetor h . Matematicamente isto pode ser escrito, pela Equação 2.17

$$\text{VAR} ([Z(x_i) - Z(x_i+h)]) = E[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2.17)$$

para qualquer x_i dentro da área de valores medidos.

Substituindo no variograma a equação (2.17), gera a Equação 2.18

$$2\gamma(h) = E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2.18)$$

A função $\gamma(h)$ é o semivariograma. A razão para o prefixo "semi" é que a equação (2.18) pode ser escrita na forma

$$\gamma(h) = 1/2 E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2.19)$$

O fator 2 foi introduzido na definição do variograma, $2\gamma(h)$, para cancelamento e simplificação da equação (2.14), e a quantidade mais freqüentemente usada é $\gamma(h)$ e não $2\gamma(h)$. A hipótese intrínseca é na verdade, a mais freqüentemente usada em Geoestatística, principalmente pôr ser a menos restritiva.

iii) Hipótese de Tendência - Krigagem Universal

Nesta hipótese, a função aleatória $Z(x_i)$, para qualquer posição, x_i , consiste de dois componentes, como mostra a Equação 2.20.

$$Z(x_i) = m(x_i) + e(x_i) \quad (2.20)$$

onde $m(x_i)$ é o "drift" (tendência principal) e $e(x_i)$ é o erro residual. Portanto, para se trabalhar sob esta hipótese, é preciso, para cada posição x_i , determinar o "drift", $m(x_i)$ e ter uma expressão para o semivariograma dos resíduos (WEBSTER E BURGESS, 1980). Devido à arbitrariedade envolvida na expressão do "drift" e do semivariograma dos resíduos, não será apresentado aqui nenhum desenvolvimento teórico para krigagem universal. Trabalhos neste assunto podem ser encontrados em Olea (1975) e Olea

(1977). Se uma função aleatória é estacionária de ordem K ($K > 0$), então, ela também será estacionária de todas as ordens menores que K . Conseqüentemente, se uma função aleatória $Z(x_i)$ é estacionária de segunda ordem, então ela será também intrínseca. Entretanto, o contrário não é necessariamente verdade.

Até o início dos anos 60, a análise de dados como os descritos no capítulo anterior era feita sob a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória, para permitir o uso de métodos estatísticos como análise de variância e parâmetros como o coeficiente de variação (HARRADINE, 1949; BALL; WILLIAMS, 1968). Entretanto, este tipo de hipótese não pode simplesmente ser feito antes que se prove a não existência de correlação de amostras com distância. Se provada a correlação espacial, a hipótese de independência fracassa. Um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo, de amostras vizinhas é através da autocorrelação. Este método tem suas origens em análise de séries temporais e tem sido largamente usado em Ciência do Solo (WEBSTER, 1973; WEBSTER; CUANALO, 1975; VIEIRA et al., 1981) principalmente para medições efetuadas em uma linha reta. A sua análise pode auxiliar na localização de divisas entre dois tipos de solos, ou na análise de periodicidade nos dados, através da análise espectral (VAUCLIN et al. 1982). Porém, quando as amostras forem coletadas nas duas dimensões do campo e interpolação entre locais medidos for necessário para a construção de mapas de isolinhas, será preciso usar uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial. Esta ferramenta é o semivariograma (VIEIRA et al., 1983).

O semivariograma é, pôr definição, é dado pela equação (2.21).

$$\gamma(h) = 1/2 E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2.21)$$

E pode ser estimado através da equação (2.22)

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2.22)$$

Onde:

$\gamma(h)$: semivariograma estimado;

n: número de pares de valores $Z(x)$ e $Z(x+h)$, separados por um vetor distância h ;

$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$: valores da i -ésima observação da variável regionalizada.

A Figura (2.25) mostra um semivariograma experimental e seus principais componentes.

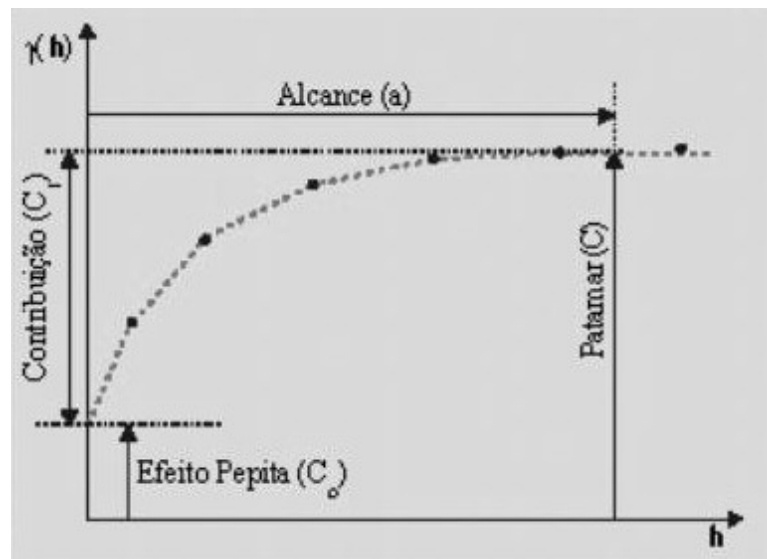


Figura 2.25 – Semivariograma experimental (CAMARGO,1997).

Onde:

i) Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;

ii) Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras;

iii) Efeito Pepita (C_0): identicamente, $h(0)=0$. Na prática, à medida que h tende para zero, (h) se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras;

iv) Contribuição (C_i): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

Existem três tipos de semivariograma, a saber: Experimental, Teórico e o Verdadeiro. O Experimental ou observado é o único conhecido por que provém do conjunto de amostras obtidas durante a amostragem. O semivariograma que melhor se ajusta ao Experimental e que a partir dele se realiza inferências em relação ao Verdadeiro, é o Teórico. É dito Verdadeiro, aquele semivariograma real da variável em estudo, matematicamente correto, sendo para nós desconhecido (ANDRADE, 2002).

Durante o estudo variográfico tenta se chegar ao semivariograma Teórico que melhor se ajusta ao Experimental, pois, desta maneira, pode-se realizar inferências diante de um possível semivariograma real. Entre os modelos teóricos conhecidos estão os semivariogramas: Exponencial, Esférico e Gaussiano (Figura 2.26).

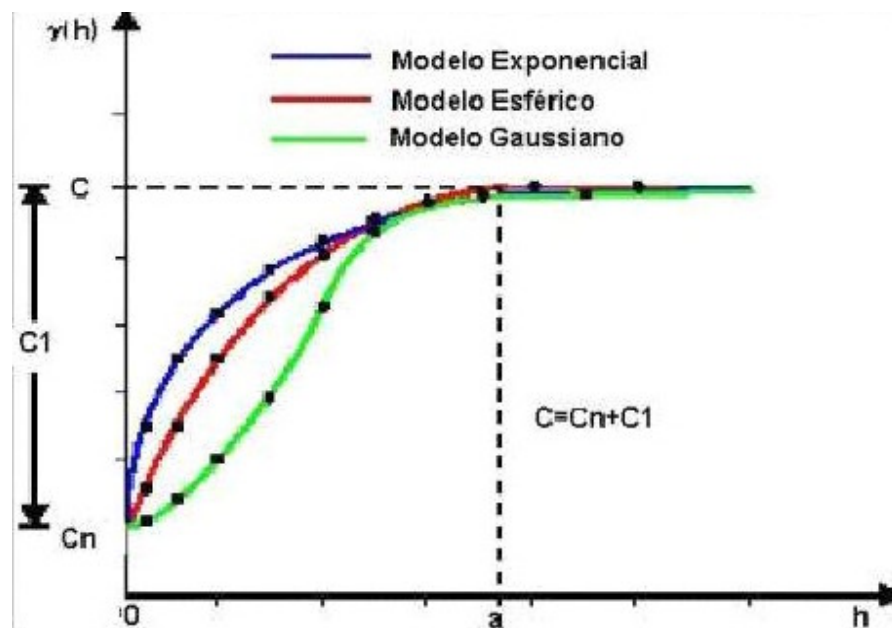


Figura 2.26 – Modelos teóricos de semivariogramas (CAMARGO, 1997).

Outra conclusão importante que a geoestatística possibilita é a verificação da anisotropia dos dados. Rotineiramente, ao se estudar os dados a luz da estatística convencionam-se adotar as direções mostradas na Figura 2.27.

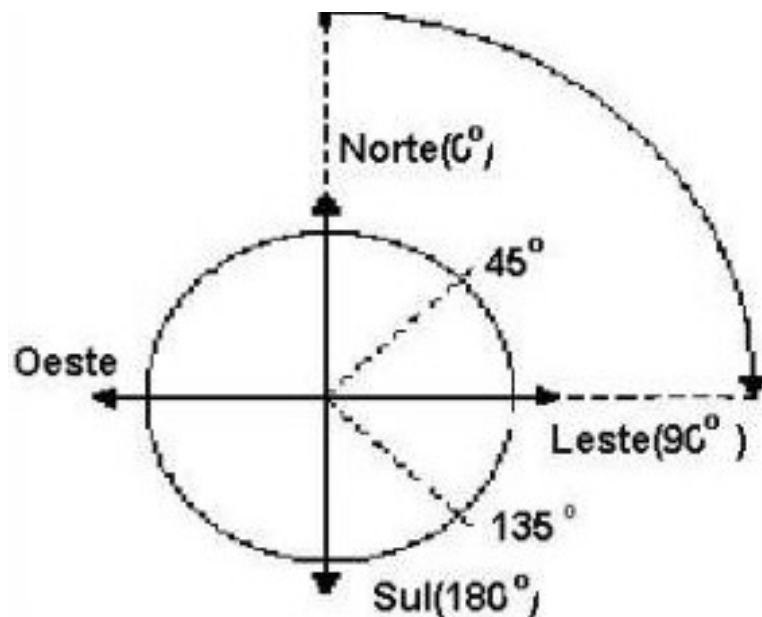


Figura 2.27 – Direções convencionais de estudos (CAMARGO, 1997).

Caso se calcule os semivariogramas nas direções 0° , 45° , 90° e 135° e se verifique uma similaridade bastante grande, pode-se utilizar um único modelo para todas as direções, podendo afirmar que os dados seguem uma isotropia. Por outro lado, se os semivariogramas não são iguais em todas as direções, a distribuição é denominada anisotrópica (Figura 2.28).

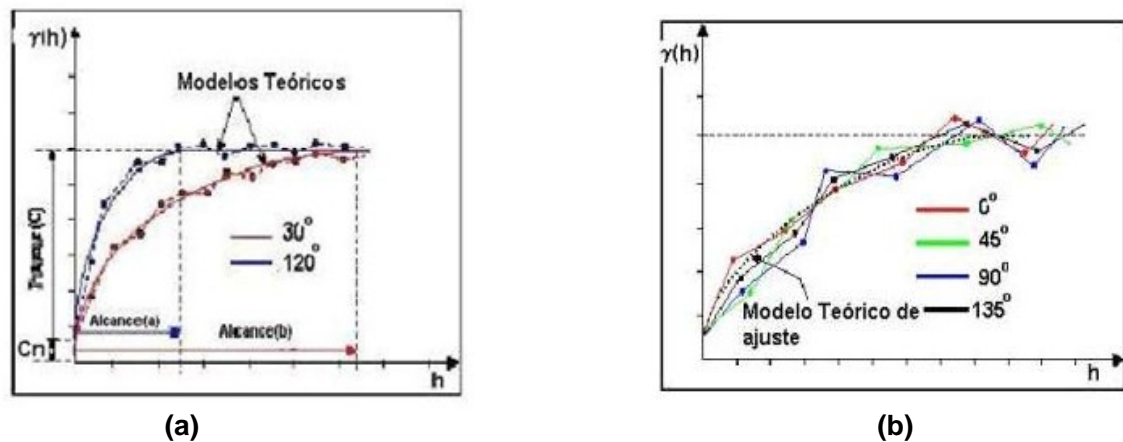


Figura 2.28 – Modelo teórico: (a) anisotropia e (b) isotropia(CAMARGO,1997).

Após a realização das amostragens; estudo descritivo; histograma; verificação da tendência de ajuste dos dados ao modelo de distribuição normal e a escolha do semivariograma teórico, pode-se chegar à interpolação numérica que é a conclusão da Geoestatística. Esse processo pode ser desenvolvido com as seguintes técnicas: médias locais, inversas do quadrado das distâncias ou krigagem. Será dada ênfase a esse último processo.

O termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o pioneiro a introduzir o uso das médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. A diferença entre krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso da interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $\frac{1}{N}$ onde N é o

número de amostras. Na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, o procedimento é semelhante ao ato de interpolação por média móvel ponderada, exceto que, aqui os pesos são determinados a partir de análises espaciais, baseadas no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima (CAMARGO, 1997).

Para Landin (2003), krigagem é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como independentes pelo semivariograma. Trata-se de um método de estimativa por médias móveis.

A krigagem engloba um conjunto de estimadores, a saber:

- i) krigagem simples;
- ii) krigagem ordinária;
- iii) krigagem universal;
- iv) krigagem indicatriz;
- iv) co-krigagem e outros.

No presente trabalho será utilizado apenas o método da krigagem ordinária. Maiores detalhes sobre os demais tipos de krigagem sugere-se recorrer à literatura específica (CAMARGO, 1997; ISAACS & SRIVASTAVA, 1969; LANDIN, 2003; ANDRIOTTI, 2003).

Considere uma superfície sobre a qual se observe alguma propriedade do solo, Z , em n pontos distintos com coordenadas representadas pelo vetor x . Assim, tem-se um conjunto de valores $\{Z(x_i), i=1, \dots, n\}$, onde x_i , os quais identificam uma posição em duas dimensões, representada pelos pares de coordenadas (x_i, y_i) . Suponha que se queira estimar o valor de Z no ponto x_0 , o valor desconhecido de $Z(x_0)$ pode ser

estimado a partir de uma combinação linear dos n valores observados, adicionado a um parâmetro, λ_0 (JOURNEL, 1988, apud CAMARGO, 1997).

$$Z^*_{x_0} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2.23)$$

Deseja-se um estimador não tendencioso, isto é:

$$E[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}] = 0 \quad (2.24)$$

A equação 2.23 impõe que as duas médias sejam iguais. Aplicando-se a Equação 2.23 na 2.24, obtém-se:

$$E[Z_{x_0}] = E\left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)\right] \Rightarrow m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i m \quad (2.25)$$

A krigagem ordinária não requer o prévio conhecimento da média m . Neste caso, para que a igualdade da Equação 2.25 seja satisfeita é necessário que:

$$\lambda_0 = 0 \text{ e } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2.26)$$

Portanto, o estimador de krigagem ordinária é:

$$Z^*_{x_0} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1. \quad (2.27)$$

Para Camargo (1997) segundo Journal, 1998 minimizando a variância do erro ($Var[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}]$) sob a condição de que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, os pesos λ_i são obtidos a partir do sistema de equações (2.27), denominado de sistema de krigagem ordinária:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.28)$$

onde:

- $C(x_i, x_j)$ e $C(x_i, x_0)$: são respectivamente, a semivariância entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 ;
- λ_o : é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

A correspondente variância minimizada do erro, denominada variância de krigagem ordinária (σ^2_{ko}), é dada pela Equação 2.29 (Camargo, 1997 apud Journal, 1988):

$$\sigma^2_{ko} = Var[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}] = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_0) - \alpha \quad (2.29)$$

A krigagem ordinária é um interpolador exato no sentido de que, quando as equações acima forem usadas, os valores interpolados irão coincidir com os valores dos pontos amostrais. A variância da krigagem ordinária, indicada na Equação (2.29) fornece importante informação sobre a confiabilidade dos valores interpolados (BOURROUGH, 1987 apud CAMARGO, 1997).

2.14.3 - Análise em componentes principais (A. C. P.).

Outra ferramenta estatística de largo uso na geologia e ciências da terra é a Análise Multivariada, principalmente a Análise em Componentes Principais (A. C. P.).

A análise de componentes principais consiste essencialmente em reescrever as coordenadas das amostras em outro sistema de eixos mais conveniente para a análise de dados. Em outras palavras, as n-variáveis originais geram através de suas combinações lineares, n-componentes principais, cuja principal característica além da ortogonalidade é que podem ser obtidos em ordem crescente de máxima variância, ou seja, ordem crescente de informação estatística (NETO; MOITA, 1997).

Para Cruz (1990), a técnica de componentes principais possui os seguintes propósitos: a) examinar as correlações entre as variáveis estudadas; b) avaliar a importância de cada variável e promover a eliminação daquele que contribui pouco, em termos de variação no grupo de indivíduos avaliados; c) construir índices das variáveis avaliadas.

Para a aplicação da técnica de componentes principais (ACP) faz-se necessário à construção da matriz de dados brutos que pode ser disposta em n medidas de diferentes propriedades (variáveis) executadas sobre m amostras (objetos), de modo que a matriz de dados d é formada por mxn (m linhas correspondentes às amostras e n colunas correspondentes as variáveis). A j-ésima variável é representada por um vetor coluna. O i-ésimo objeto, ou seja, uma amostra qualquer, é representada por um vetor linha chamada vetor resposta, representada pela matriz indicada na Figura 2.29.

Amostras	Variáveis (Parâmetros medidos)			
	Variável1	Variável2	VariávelM
1	X1	Y1		m1
2	X2	Y2		m2
3	X3	Y3		m3
4	X4	Y4		m4
.....
n	Xn	Yn		mn

Figura 2.29 – Matriz de dimensão $n \times m$.

Uma das mais importantes etapas é o pré-processamento, nessa etapa o pesquisador deve decidir entre a matriz de covariância (dados centrados na média) ou escalonamento (dados centrados na média e divididos pelo desvio padrão). A segunda alternativa parece ser mais indicada, pois elimina o fato da diferença de amplitude de variação entre as variáveis, tornando as variações adimensionais e levado a resultados mais justos no caso de dados de engenharia. A formulação do escalonamento se encontra representada na Equação 2.30.

$$Z_{ij} = \frac{d_{ij} - \bar{d}_i}{S_j}, \quad (2.30)$$

Os valores médios (\bar{d}_i) e da variância amostral (S_j) e são calculadas, respectivamente, por:

$$\bar{d}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m d_{ij} \quad \text{e} \quad S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (d_{ij} - \bar{d}_j)^2$$

Na análise de agrupamentos (cluster analysis) a similaridade entre duas amostras pode ser expressa como uma função da distância entre os dois pontos representativos dessa amostra no espaço n -dimensional. A maneira usual de calcular essa distância entre dois pontos a e b no espaço é conhecida por distância euclidiana (x_{ab}), representada pela Equação 2.31:

$$x^2_{ab} = \sum_{j=1}^n (d_{aj} - d_{bj})^2 \quad (2.31)$$

A técnica de agrupamento hierárquico interliga as amostras por suas associações, produzindo um dedograma onde as amostras semelhantes, segundo as variáveis escolhidas, são agrupados entes si. A suposição básica de sua interpretação é que quanto menor à distância entre os pontos, maior a semelhança entre as amostras.

Tanto o pré-processamento quanto às técnicas citada nos parágrafos anteriores faz parte de um processo para se chegar à análise exploratória dos dados, no caso em estudo, trata-se da Análise de Componentes Principais.

Uma decisão a ser tomada diz respeito ao número de componentes principais que deve ser retido na análise. Se esse número é muito pequeno pode haver uma redução exagerada da dimensionalidade e muita informação pode ser perdida. Se o número for grande, pode-se não atender aos objetivos de redução. Na verdade, essa redução depende das correlações e das variâncias das variáveis originais (BARROSO ; ARTES, 2003).

Existem vários critérios práticos para determinar quantas componentes reter na análise:

- *Scree Plot*: representa graficamente a porcentagem de variância explicada (autovalores) por cada componente (Y_i) (Figura 2.30). No gráfico estão representados os autovalores, e normalmente a diferença entre os primeiros autovalores é grande e diminui para os últimos. Quando esta diferença se reduz e a curva passa a ser quase paralela ao eixo das abscissas, excluimos as componentes correspondentes.

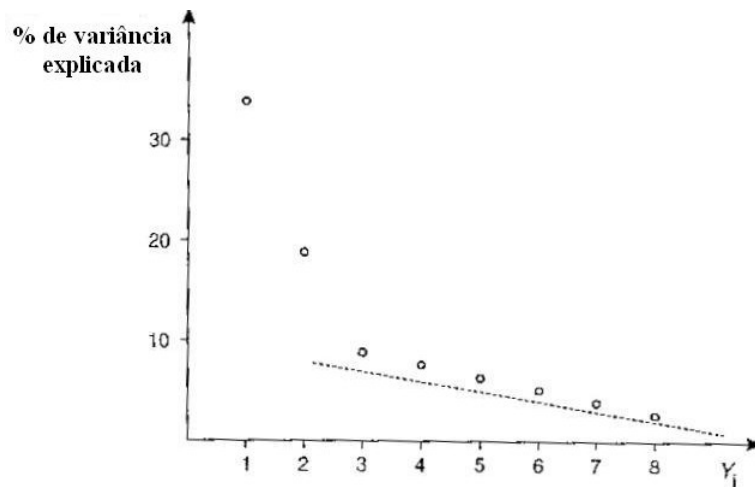


Figura 2.30 - Representação gráfica do *scree plot* (REIS, 2001).

- Critério de Kaiser (1958): sugere manter na análise as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores do que a média dos autovalores, se a análise for baseada na matriz de variâncias, ou as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que 1 se a matriz utilizada for a de correlação.
- Incluir as componentes principais suficientes para explicar mais de 70% da variância (variabilidade) total dos casos.
- Reter o número de componentes principais tal que, acumulem a porcentagem da variabilidade de cada uma das variáveis originais, por exemplo, 50%.

Algumas informações na escolha do critério a ser utilizado poderão ser úteis segundo Reis (2001) quando o número de variáveis em análise é relativamente pequeno ($p=30$) ou o número de observações elevado ($n>250$) e ainda quando as comunalidades são no mínimo 0,60 quer o critério de Kaiser, quer o *scree plot*, geram soluções credíveis quanto ao verdadeiro número de componentes principais. Essa credibilidade pode ser aumentada se o quociente $q/p < 30$ (número de componentes retidas/ número de variáveis iniciais).

Assim qualquer que seja o critério a ser utilizado, deve-se sempre fazer o uso do bom senso e avaliar para que nenhuma componente principal com contribuição importante seja descartada.

2.14.4 - Análise de variância (ANOVA)

A Análise de variância trata-se de um estudo estatístico, que através de testes de igualdade de médias, verifica-se se fatores produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse.

Aplica-se a Análise de variância para a comparação simultânea entre médias de diversas amostras ou para estimar a variabilidade associada a diferentes fontes de variação. Essa análise baseia-se no fato de que a variância de uma soma de variáveis aleatórias, não correlacionadas entre si, é igual à soma das variâncias dessas mesmas variáveis (LANDIM, 2003).

A variabilidade ou variância entre observações é identificada com base em várias fontes, ao serem testadas de maneira apropriada, indicando se as diferenças observadas entre grupos são provavelmente reais ou meramente decorrentes do acaso (WITTE; WITTE, 2005).

A estruturação básica da análise de variância supõe algumas hipóteses estatísticas, dentre elas destacam-se:

- i) As amostras devem ser casuais e independentes;
- ii) As variáveis de interesse devem ter distribuição normal e variâncias iguais;

Todavia, grandes partes dos pesquisadores na área de estatística admitem que as desobediências moderadas das restrições descritas acima não invalidam o teste, pelo fato de que o teste estatístico utilizado, Teste F, ser robusto. Mais informações sobre ANOVA pode ser obtido em bibliografia especializada (LANDIM, 2003; WITTE; WITTE, 2005; MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

A idéia básica da análise de variância ANOVA é dividir a variabilidade total em duas fontes de variabilidade, a primeira, proveniente das populações (variabilidade entre), a segunda proveniente das variabilidades entre cada amostra (variabilidade dentro). Quanto maior for a variabilidade dentro, maior será a dificuldade para concluir se as médias entre as populações são diferentes.

2.14.5 – Teste HSD de Tukey

Uma vez que a hipótese nula seja rejeitada na ANOVA, o teste HSD (“Honestly Significant Difference”) de Tukey pode ser utilizado com o objetivo de testar todas as diferenças possíveis entre pares de médias aritméticas (WITTE & WITTE, 2005).

O Teste Tukey fornece um único valor crítico (HSD) o qual é utilizado para avaliar a grandeza de cada diferença entre todos os possíveis pares de médias aritméticas obtidos, julgando as que são estatisticamente iguais ou diferentes. Para a determinação do HSD utiliza-se a Equação 2.32.

$$HSD = q \sqrt{\frac{MQ_{dentro}}{n}} \quad (2.32)$$

onde:

HSD : valor crítico positivo para qualquer diferença entre duas médias aritméticas;

q: valor tecnicamente conhecido;

MQ_{dentro} : quadrado da média usual para a variabilidade dentro do grupo;

n: tamanho da amostra em cada grupo.

Caso a diferença absoluta entre qualquer par de médias aritmética seja igual ou maior do que o valor crítico (HSD), a hipótese nula para aquele par específico de média aritmética de populações pode ser rejeitada.

2.14.6 – Teste Qui-Quadrado (χ^2)

O teste Qui-Quadrado é não paramétrico e pode ser utilizado para à adequação ou ajustamento de uma gama de valores a uma distribuição padrão ou a valores padrão. Trata-se de um teste de hipóteses, que usa a distribuição de probabilidade de Fischer (F), como teste de validade das hipóteses formuladas.

Na formulação do teste deve-se definir o grau de liberdade e assumir um nível de significância (α) para o mesmo. Utilizando-se a Equação 2.33, determina-se o valor calculado do Qui-Quadrado e através das tabelas da distribuição, (F) verifica-se se houve a adequação ou ajustamento dos valores (aceitação ou rejeição da hipótese nula).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(F_o - F_{e_i})^2}{F_{e_i}} \quad (2.33)$$

onde:

F_o : valor observado;

F_{e_i} : valor esperado.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta a planta de situação, locação dos furos e todas as atividades de campo e de laboratório realizadas. Também, são abordados aspectos relativos à formação geológica e clima.

A área pesquisada situa-se na estação de tratamento de esgotos do Janga (ETE-Janga) da Companhia de saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA), no Município de Paulista – PE, latitude de 7° 55' 35 "e longitude de 34° 50' 49".

3.1 – Aspectos Geológicos e Climáticos

“A Bacia Paraíba é constituída por uma seqüência sedimentar repousando discordantemente sobre rochas do embasamento cristalino protezóico, que se apresenta mergulhado suavemente para o leste, e sobre o qual, se depositou todo o pacote sedimentar cretáceo-paleocênico, de caráter continental/marinho transgressivo/marinho regressivo, obedecendo a essa estruturação homoclinal, de maneira que, as camadas inferiores afloram na borda ocidental da bacia, enquanto as mais superiores afloram em direção à costa. Toda seqüência é recoberta por sedimentos terciários e quartenários” (SOUZA, 1999, apud JUSTINO DA SILVA, 2001).

A estratigrafia é relativamente simples, apresentando apenas três grandes unidades, a saber: Grupo Paraíba, Formação Barreiras e Depósitos Quartenários. O grupo Paraíba engloba todo o conjunto litológico cretáceo-paleocênico, cujas características lito-faciológicas permitem sua subdivisão em duas seqüências: uma inferior, denominada seqüência clástica basal representada pela formação Beberibe e a outra, chamada de seqüência carbonática superior, representada pelas formações Gramame e Maria Farinha. Recobrimdo discordantemente essa seqüência, encontra-se

a Formação Barreiras, constituída de sedimentos areno-argilosos de granulação heterogênea, com freqüentes lentes argilosas, idade pliocênica e origem continental de clima semi-árido. Finalizando, têm-se os sedimentos quaternários, representados por pedregulhos, areias, siltes e argilas (SOUZA, 1999, apud JUSTINO DA SILVA, 2001).

O clima pode ser classificado como As' de köppen, tropical e úmido, com chuvas de outono-inverno. Distinguem-se dois períodos: o de chuva (úmido) e de estiagem (seco), sendo que os períodos úmidos são curtos e os secos são prolongados.

A maior parte das chuvas está concentrada nos meses de abril a julho, onde a maior incidência ocorre em maio e junho, não sendo bem distribuída anualmente, haja vista que quase 70% ocorrem nesse período. Também podem ocorrer ocasionais temporais e longas estiagens (JUSTINO DA SILVA, 2001).

A precipitação pluviométrica e a evaporação foram obtidas na estação meteorológica Recife Curado, devido à dificuldade de leitura manual diária na área experimental. Os valores de precipitação e evaporação foram observados no período de dezembro de 2005 e fevereiro de 2007 (Figura 3.1).

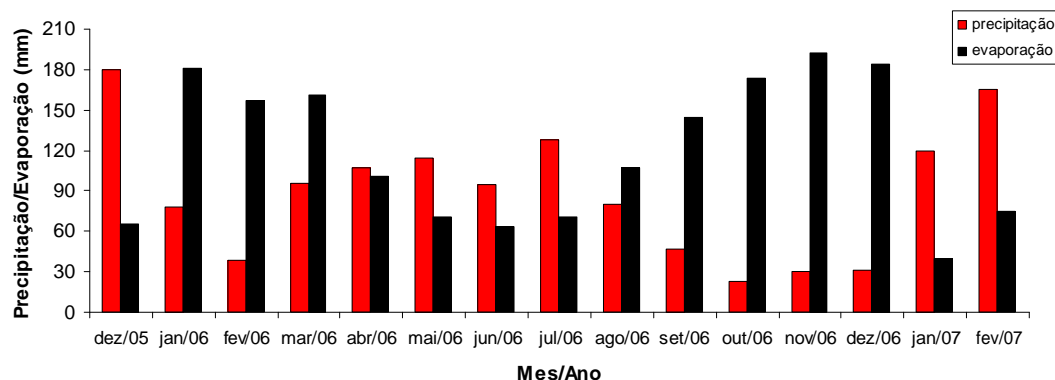


Figura 3.1 – Precipitação e evaporação mensal de dezembro de 2005 a fevereiro de 2007 (Estação Recife Curado).

3.2 - Vegetação Predominante

Na área de estudo foi observada uma vegetação perene predominante, após análise no laboratório de botânica da Universidade Estadual da Paraíba verificou-se tratar da *Brachiaria humidicola*, que é uma vegetação de origem da África Equatorial, cresce espontaneamente na região da Amazônia e apresenta como características: alta capacidade de adaptação a vários tipos de solos, especialmente, os de baixa fertilidade e com alto nível de umidade. Rebrotava vigorosa, mesmo com manejo baixo e intervalos pequenos de cortes sob pastejo. Apresenta estolões finos, e fortes. As folhas possuem cores verde-pálidas e fortemente denticuladas nas margens. É resistente ao pastejo e apresenta boa tolerância ao encharcamento, podendo ser plantada em várzeas. Não tolera o fogo. Produz pouca semente (BRITO; RODELLA, 2002), Figura 3.2.

A raiz apresenta um bulbo vegetal do qual deriva tentáculos que conseguem extrair água do solo a profundidades de até 2,0 m. A Tabela 3.1 mostra as características da vegetação.



Figura 3.2 – Vegetação local (*Brachiaria humidicola*).

Tabela 3.1 – Características da vegetação, adaptado de Brito; Rodella, (2006).

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS	
Nome Científico	<i>Brachiaria Humidicola</i>
Origem	África Equatorial
Ciclo Vegetativo	Perene
Altura de Crescimento livre	Crescimento livre até 1,20 m
Forma de Crescimento	Crespitoso (touceras)
Forma de Uso	Pastejo
Precipitação Pluviométrica requerida	800mm/ano
Teor de proteína na matéria orgânica seca	12% no verão e 5% no inverno
Época de Plantio	Durante a estação chuvosa
Tolerância ao Frio	Alta
Tolerância a Seca	Alta
Temperatura	32 a 35 C°
Consumo da raiz (litro/ano/m ²)	800 l/a/m ²
Comprimento da raiz (fase adulta)	20 cm

3.3 – Campo Experimental

A investigação de campo foi realizada em um campo experimental com área de 345 m² e perímetro de 81m, constituída de três áreas distintas: uma sem vegetação; outra área revestida com placa de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e uma terceira com vegetação, Figura 3.3.

As variações de umidade, sucção e volume nas três áreas foram acompanhados durante um período de 15 meses. A Figura 3.4, mostra a planta baixa do campo experimental.

A Figura 3.5 apresenta a locação das áreas imaginárias, células geoestatística e os pontos de observação, das três áreas estudadas.



Figura 3.3 – Placa de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

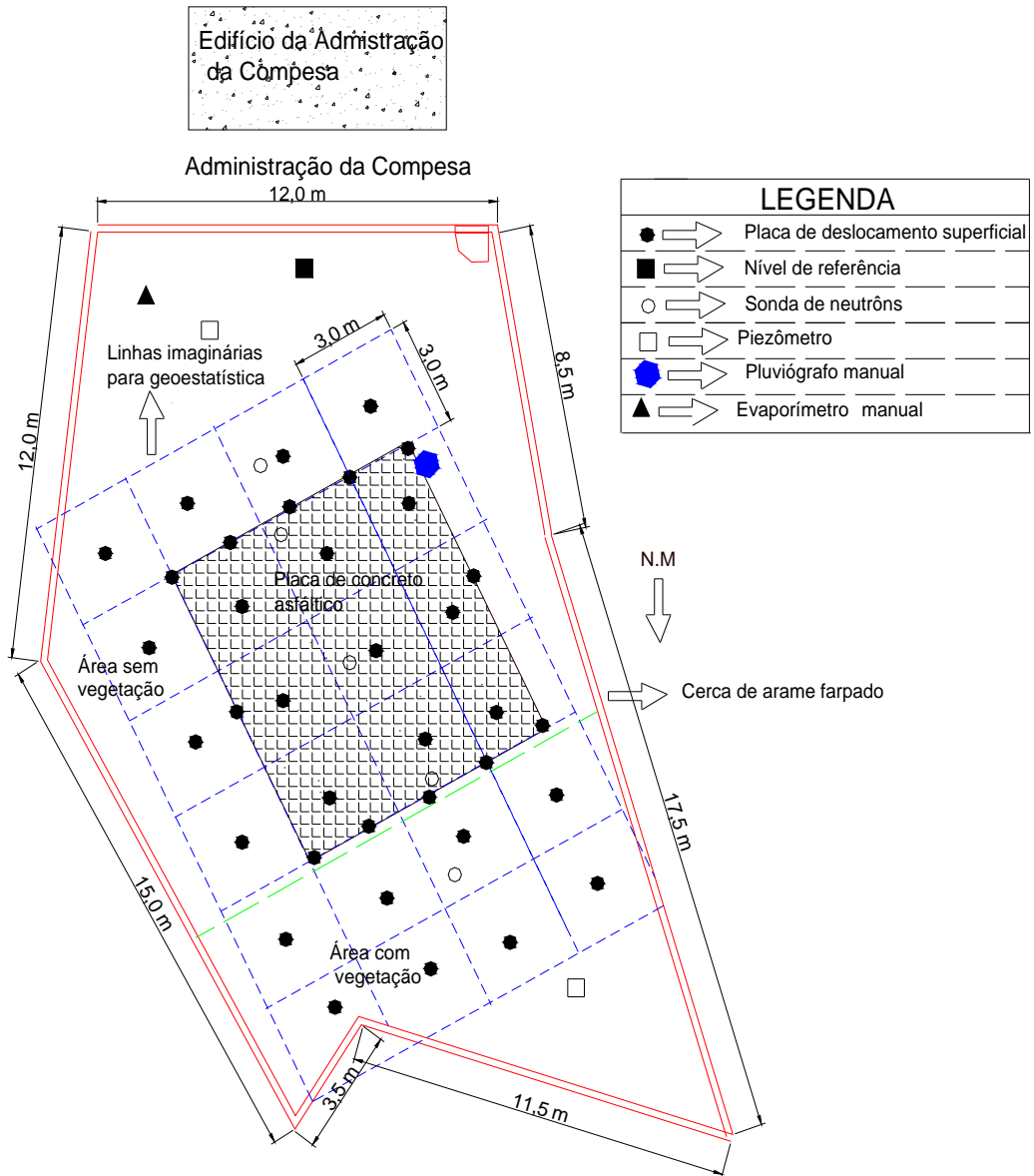


Figura 3.4 – Planta baixa do campo experimental.

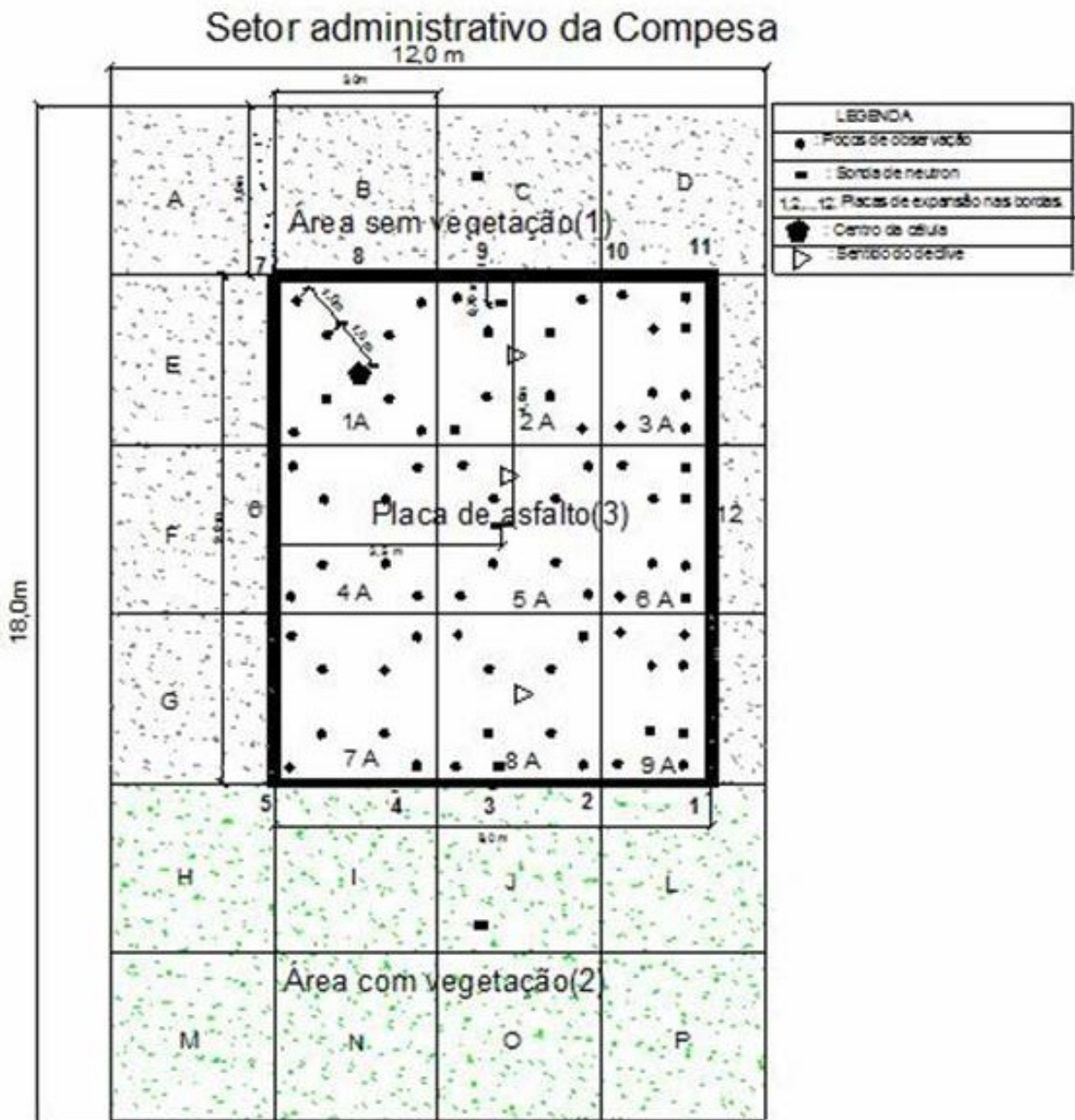


Figura 3.5 – Planta de locação das células geostatística e pontos de observação.

Para o levantamento plano-altimétrico da área foi delimitado um espaço com 18mx24m, onde nele está inserido o campo experimental, Figura 3.6. As curvas de nível estão amarradas à cota do nível de referência profundo.

As figuras 3.7 e 3.8 apresentam os cortes \overline{AB} e \overline{CD} , indicados na Figura 3.6.

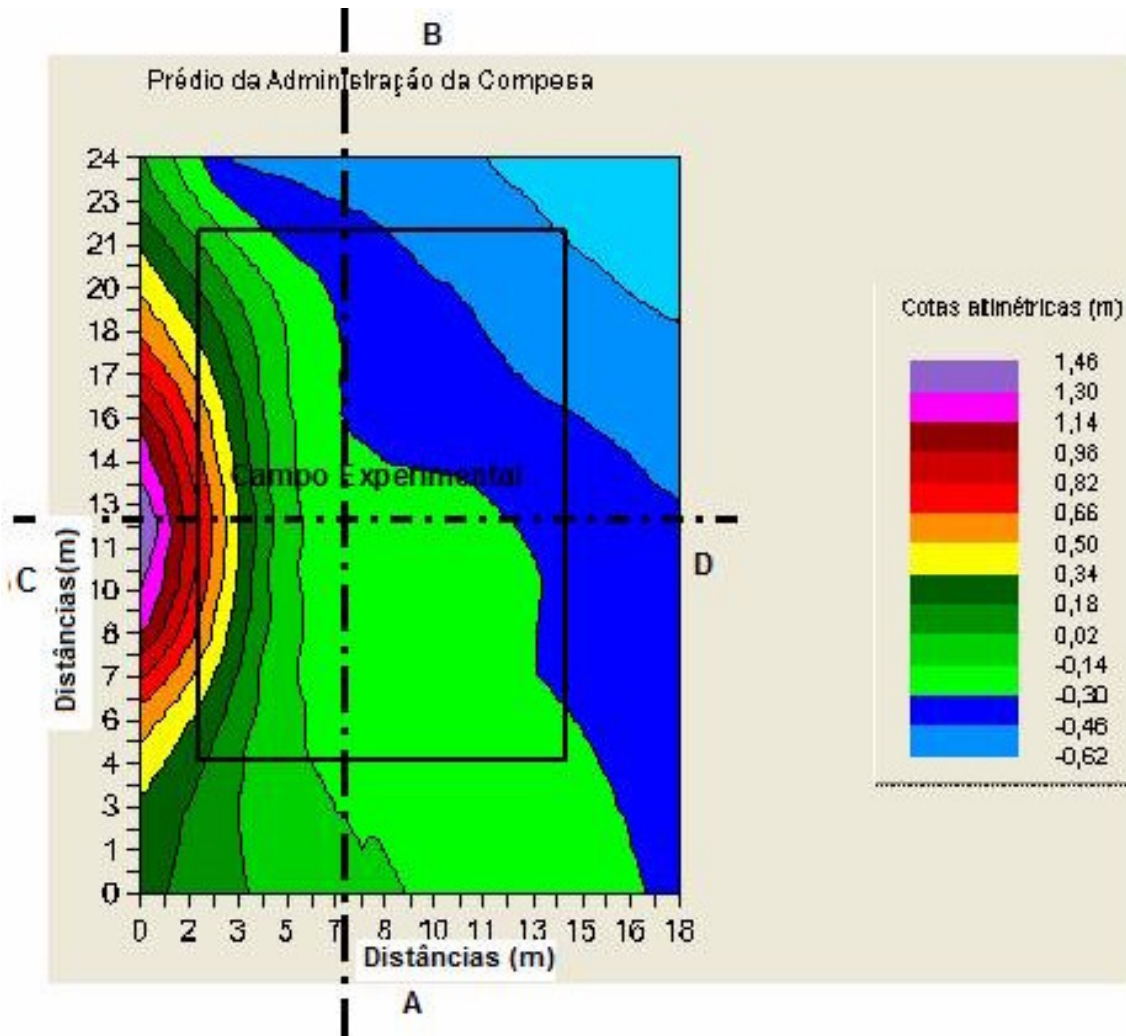


Figura 3.6 – Levantamento plano-altimétrico do local.

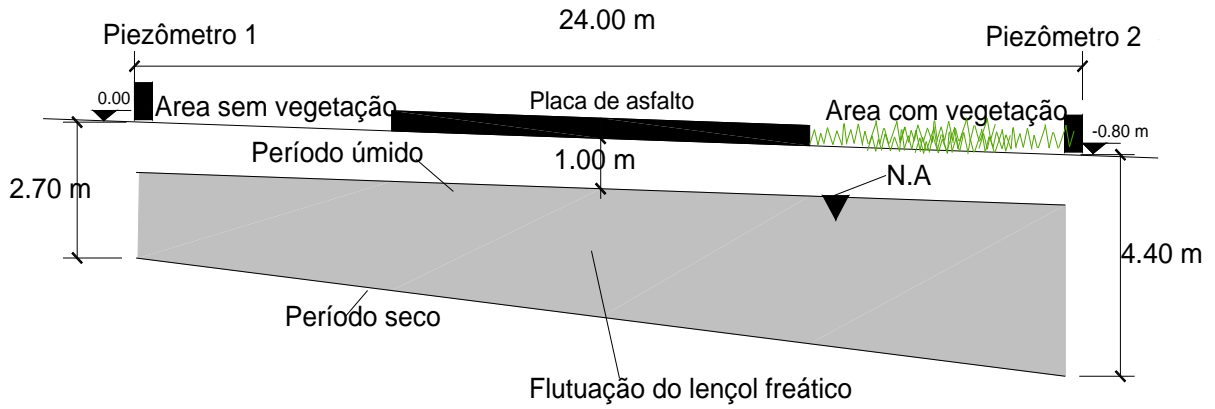


Figura 3.7 – Corte \overline{AB} .

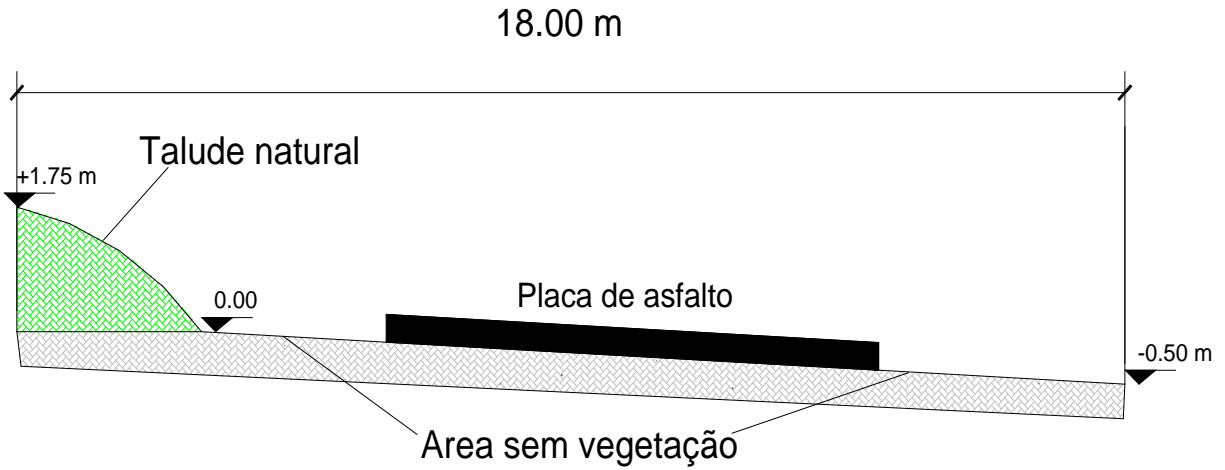


Figura 3.8 – Corte \overline{CD} .

3.4 – Investigação de Campo

As atividades de campo constituíram na realização das seguintes etapas:

- Demarcação da área com uso de estacas de concreto e arame farpado;
- Locação das células imaginárias da geoestatística;
- Execução de 30 furos de sondagens a trado com 150 mm de diâmetro para retirada de amostras amolgadas e definição do perfil geotécnico da área;
- Execução de 05 furos de sondagem para instalação de tubos de acesso, com 50 mm de diâmetro, para sonda de nêutrons;
- Execução de sondagem por circulação de água com diâmetro de 100 mm, para instalação de quatro piezômetros tipo Casagrande e a referência profunda de nível;
- Execução da placa em (CBUQ) concreto betuminoso usinado a quente (setembro de 2005);
- Calibração do equipamento de amostragem indeformada “*Shelby*”;
- Instalação de 36 placas superficiais de medição de deslocamento vertical;
- Leitura das placas (freqüência mensal);
- Leitura da umidade volumétrica, gravimétrica e do grau de saturação com uso da sonda de nêutrons, até a profundidade máxima de 2,5 m (freqüência mensal);
- Leitura do nível de água (freqüência mensal);
- Extração de amostra indeformada, utilizando tubo “*shelby*” com 75 mm de diâmetro e 15 cm de altura a uma profundidade de 1,5 m, iniciada em dezembro de 2005, com freqüência trimestral (cinco campanhas);
- Leitura da temperatura do solo na profundidade de 1,5m de profundidade (freqüência trimestral);

A Tabela 3.2 apresenta o período da realização das atividades implementadas no campo e os quantitativos referentes às mesmas.

Tabela 3.2 – Descrição das atividades de campo.

Natureza	Data	Quantidade	Profundidade	Finalidade
Sondagem por circulação de água	05/03/05	03	Variável	Instalação do R.N e piezômetros tipo Casagrande.
Sondagem a trado	10/11/05	03	0,5 – 3,5	Perfil geotécnico e índices físicos.
Sondagem a trado	01/06/05	24	1,5	Caracterização física.
Sondagem a trado	12/10/05	06	0-3,5	Instalação e calibração da sonda de nêutrons
Sondagem a trado	15/06/06	01	1.0 – 3.0	Calibração da sonda de nêutrons
Sondagem a trado	12/10/05	01	0,5 – 3,5	Curvas de retenção.
Amostragem “Shelby” .	15/05/05	01	0,5 – 3,0	Aferição do equipamento de amostragem.
Sondagem a trado	15/01/07	01	1.0 – 3.0	Calibração da sonda de nêutrons
Amostragem “Shelby” e medição de temperatura	27/12 a 30/12/05	24	1,5	Sucção matricial, umidade gravimétrica, e volumétrica, índices físicos e temperatura.
	31/03 a 03/04/06	24	1,5	
	11/06 a 13/06/06	24	1,5	
	27/09 a 30/09/06	24	1,5	
	12/12 a 15/12/06	24	1,5	
Placa Superficial	Mensal	36	variável	Variação volumétrica
Nível de água	Mensal	02	variável	Flutuação do lençol freático
Sonda de nêutrons	Mensal	50	variável	Umidade gravimétrica, volumétrica e grau de saturação.
Sondagem a trado	12/10/05	01	0.5 – 3.0	Curvas de retenção.

3.4.1 – Perfil geotécnico

O perfil geotécnico da área estudada foi obtido através do uso de um trado concha com 150 mm de diâmetro, durante o período seco, não tendo sido detectado a presença de lençol freático (Figura 3.9).

Os ensaios foram realizados na célula Geoestatística C (Figura 3.5).

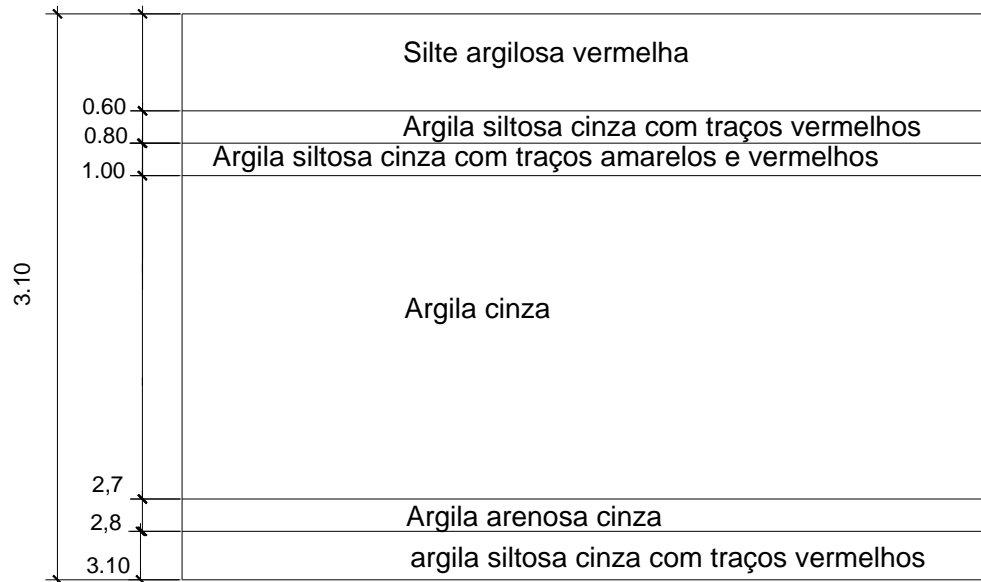


Figura 3.9 – Perfil geotécnico tipo.

- Camada I – Silte argiloso de cor predominante vermelha com traços cinza, com espessura de 0,60 m;
- Camada II – Argila siltosa cinza com traços vermelho 0,2 m;
- Camada III – Argila siltosa cinza com traços vermelho e amarelo, espessura de 0,2 m;
- Camada IV – Argila cinza, com espessura de 1,70 m
- Camada V – Argila arenosa cinza, com espessura de 0,10 m
- Camada VI – Argila siltosa cinza com traços vermelhos, com espessura de 0,30 m.

A Figura 3.10 mostra a variação média do lençol freático de dois piezômetros tipo Casagrande, estando o nível de água 1 próximo ao prédio da administração e o nível de água 2 na área com vegetação.

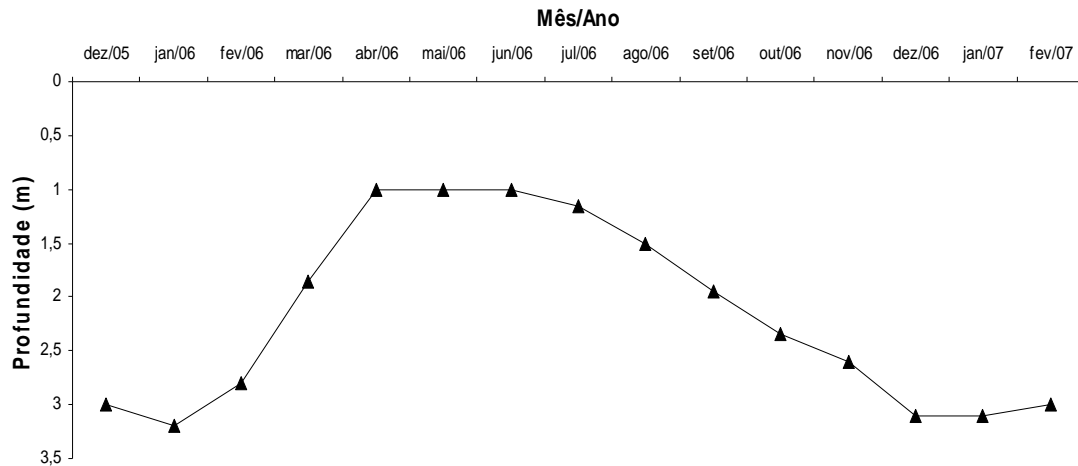


Figura 3.10 – Variação média do nível do lençol freático na área estudada.

3.4.2 – Amostragem Indeformada

3.4.2.1 – Aferição do processo de amostragem indeformada tipo “Shelby”.

Para a extração das amostras indeformadas tipo “shelby”, foi necessário projetar e desenvolver um equipamento versátil e de fácil locomoção dentro do campo experimental. Foram utilizados tubos “shelby” com 75 mm de diâmetro e 120 mm de altura, tendo sido extraída 130 amostras devido a necessidade da utilização da estatística para a análise dos parâmetros obtidos.

Para aferição do processo de amostragem foi realizada uma campanha de ensaios usando amostras obtidas através do equipamento desenvolvido na atual pesquisa e obtidas através da prensa de cravação empregada por Justino da Silva (2001) (Figura 3.11).

O procedimento seguinte foi à realização de uma análise de variância (ANOVA) com um único fator, respeitando-se as seguintes condições:

- Objetivo: testar se o peso específico aparente natural das amostras coletadas em cada amostrador é diferente estatisticamente ou as variações são casuais;
- Variável resposta: diferença de pesos específicos aparentes naturais em cada ensaio;
- Tratamento: diferentes técnicas de amostragem;

Amostragem 1 – cravação quasi-estática utilizando como reação uma galiota carregada com areia (cargueira);

Amostragem 2 – cravação quasi-estática utilizando como reação uma viga metálica.

- Unidade de Amostragem: tipo de cravação;
- Repetições: cinco com a amostragem (1) e quatro com amostragem (2);
- Hipóteses: H_0 (hipótese nula) todas as médias são iguais;
 H_1 (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;
 $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

Verifica-se após a análise estatística de variância que as médias dos pesos específicos aparente não diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi menor do que o do F_{cri} , o que significa que o método atual não modifica as características naturais da amostra, com 95% de certeza, Tabela 3.3.



Figura 3.11 – Viga de reação para cravação quasi-estática do amostrador tipo *shelby* (JUSTINO DA SILVA, 2001).

Tabela 3.3 – Análise de variância para a validação do sistema de cravação com relação ao peso específico aparente natural.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,009	1	0,009	4,20	0,08	5,59
Dentro dos grupos	0,0148	7	0,002			
Total	0,0027	8				

3.4.2.2 – Extração das amostras indeformadas.

Para a retirada das amostras indeformadas executou-se furos a trado de 150 mm de diâmetro, com profundidade de 1,5 m, pois o objetivo era estudar as amostras de argila cinza, por seu grande potencial de expansão. Na cravação do tubo utilizou-se um macaco hidráulico com capacidade de suporte de duas toneladas, tendo como reação uma galiota carregada com areia, Figura 3.12.

A Figura 3.13, mostra a extração da amostra bem como todos os componentes do equipamento utilizado. Para a extração da amostra usou-se uma braçadeira com 4,2 mm de diâmetro tendo como reação à base do macaco.



Figura 3.12 – Retirada de amostras tipo *shelby*.

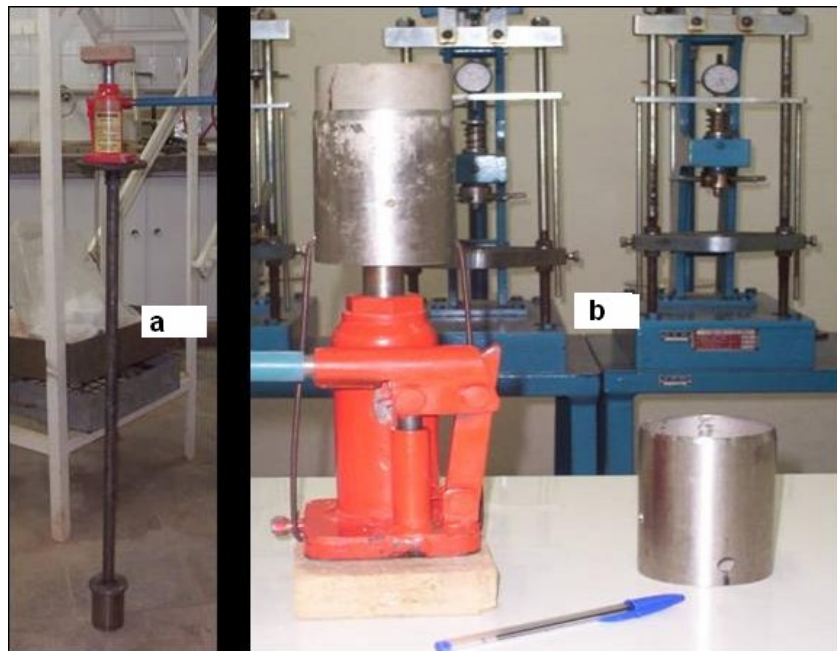


Figura 3.13 – Equipamento de cravação e extração da amostra tipo “shelby”:
(a) sistema de cravação (b) processo de extração.

3.4.3 – Instrumentação de Campo

3.4.3.1 – Sonda de nêutrons

Para a leitura do número de nêutrons moderados ou termalizados utilizou-se a sonda tipo Troxler série 3330 (Figura 3.14).

Foram instaladas cinco verticais de tubos de acesso de alumínio com 50 mm de diâmetro interno, parede com 2 mm de espessura, comprimento de 2,5 m, Figura 3.15.

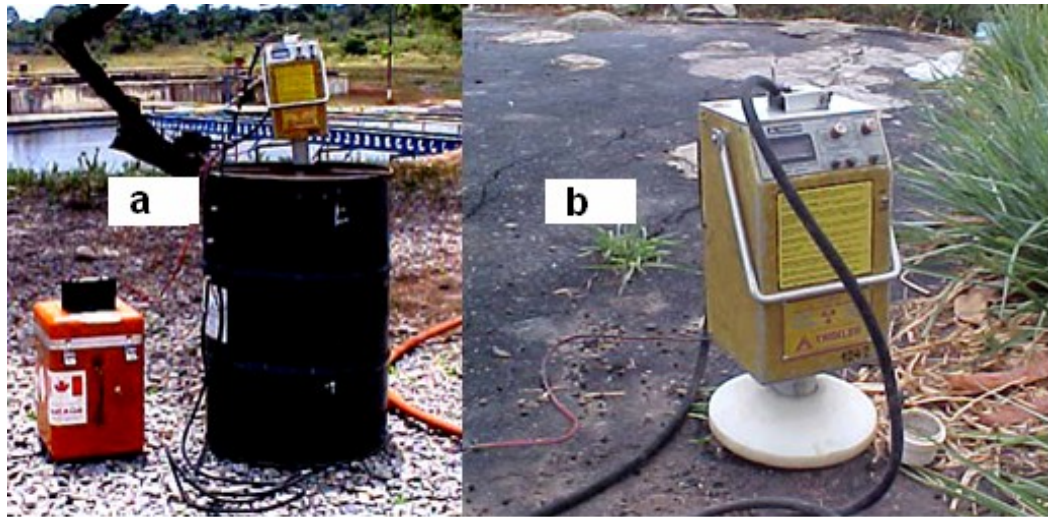


Figura 3.14 – Sonda de nêutrons: (a) leitura na água; (b) medição no campo.



Figura 3.15 – Tubo de acesso da sonda de nêutrons.

Para a calibração da sonda procedeu-se à retirada de três amostras indeformadas para cada profundidade ensaiada, sendo realizados ensaios de umidade gravimétrica, volumétrica e grau de saturação, cujos resultados foram utilizados na calibração. As figuras 3.16 a 3.18 apresentam as equações; coeficiente de correlação e as curvas de calibração para as variáveis estudadas.

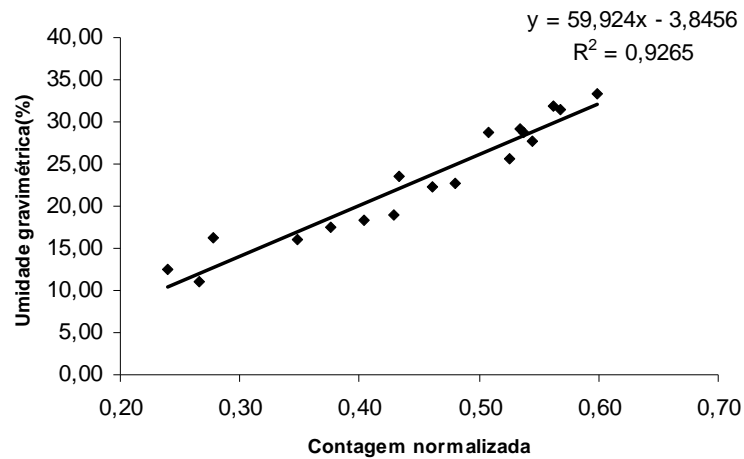


Figura 3.16 – Calibração da umidade gravimétrica.

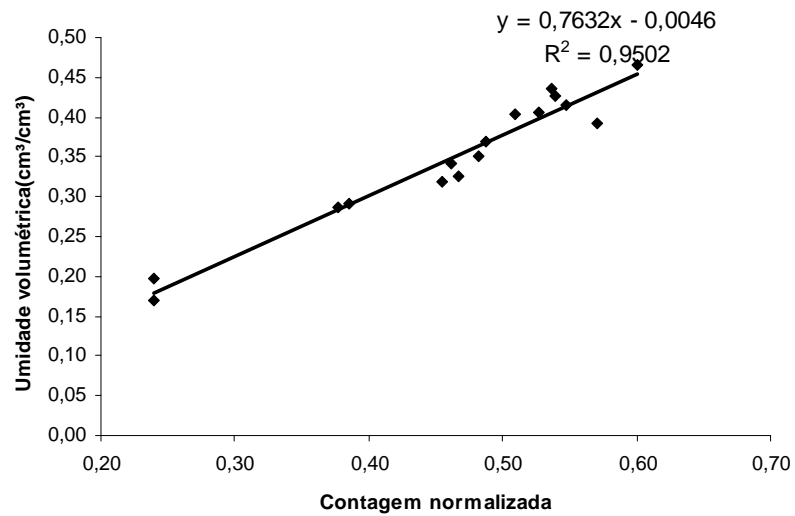


Figura 3.17 – Calibração da umidade volumétrica.

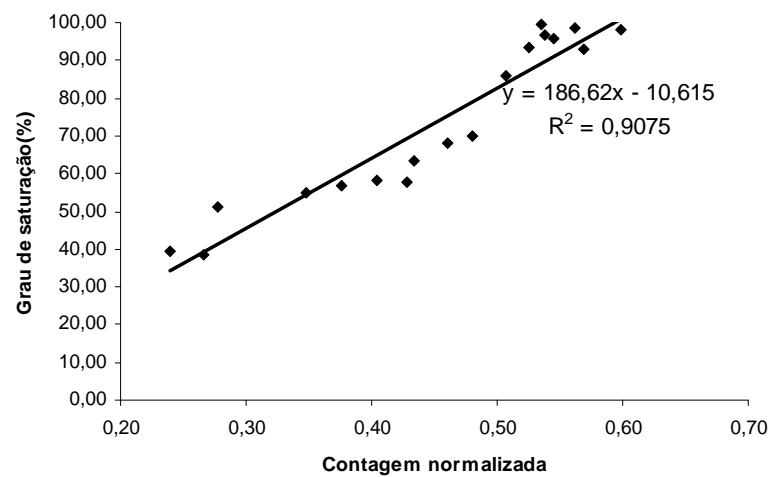


Figura 3.18 – Calibração do grau de saturação.

3.4.4 – Piezômetro tipo Casagrande

Foram instalados quatro piezômetros tipo Casagrande em dois furos de sondagem, com 6,0 metros de profundidade, abertos através de circulação d'água. Em cada furo foram instalados dois piezômetros nas profundidades de três e seis metros, Figura 3.19.

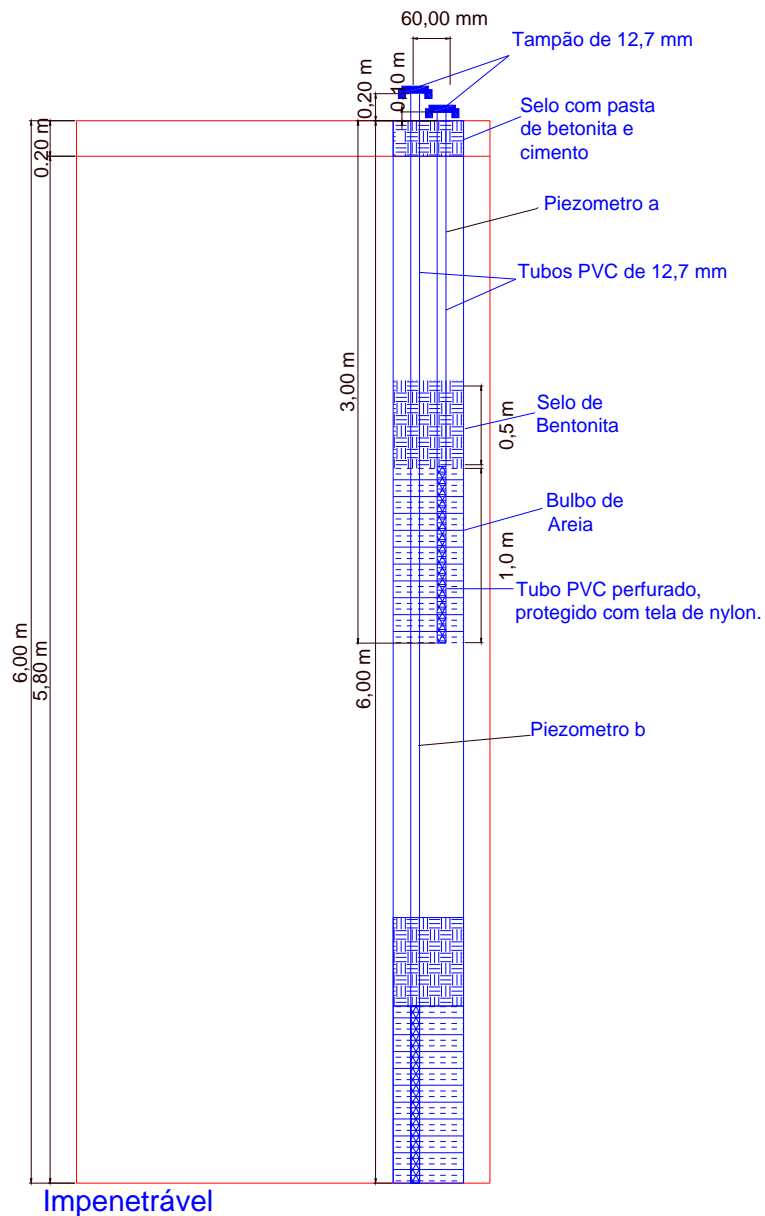


Figura 3.19 –Perfil do piezômetro tipo Casagrande: (a) 3.00 m e (b) 6.00m.

3.4.5 – Medidor de temperatura

Para execução da leitura faz-se, inicialmente, à cravação de uma haste de ponta cortante no fundo do furo utilizado para obtenção de amostra indeformada.

Na pesquisa realizada utilizou-se para a medição da temperatura o equipamento modelo Ploimed PM – 1020. As medições foram feitas a uma profundidade de 1,5 m, um termopar foi usado como sensor térmico.

Para a realização da calibração utilizou-se como instrumento base um termômetro de coluna de mercúrio. As figuras 3.20 e 3.21 mostram, respectivamente, detalhes do equipamento e da execução da medição, a reta de calibração, a equação de ajuste e o coeficiente de determinação.

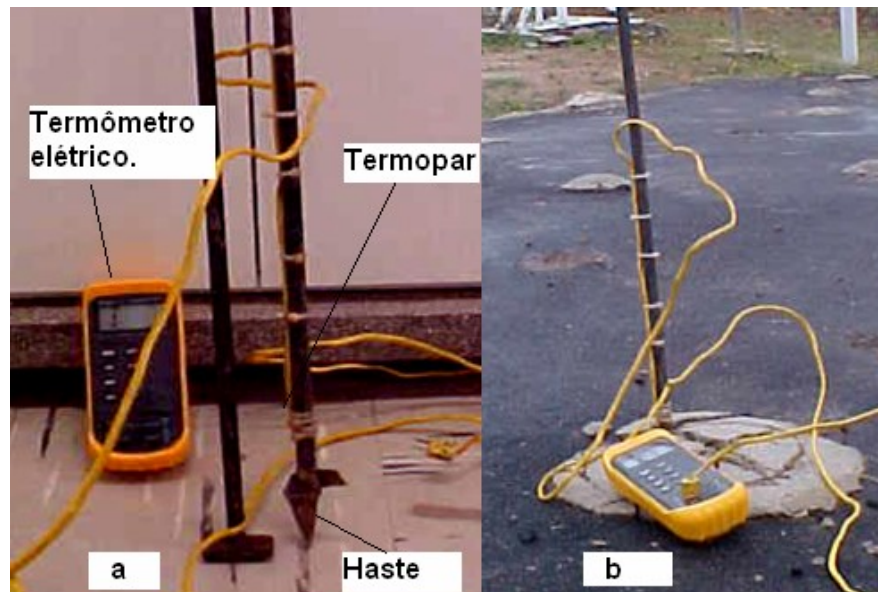


Figura 3.20 – Medidas de temperatura: (a) equipamento (b) execução da medição.

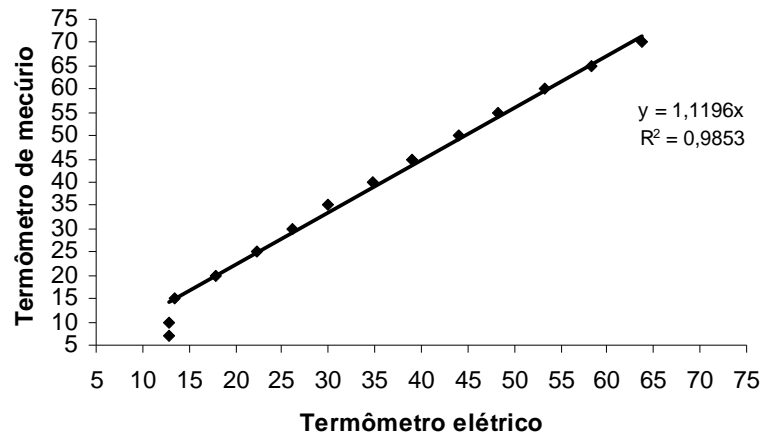


Figura 3.21 – Equação de calibração do termômetro elétrico.

3.4.6 – Referência de nível profunda (RN)

Para execução da referência de nível procedeu-se a abertura de um furo de sondagem por circulação de água até 8,0 metros de profundidade. Inicialmente, coloca-se argamassa de cimento e areia no fundo do furo e em seguida instalou-se o tubo de aço galvanizado de 20 mm (haste de referência). A proteção da haste de referência foi feita através de um tubo de PVC com 75 mm de diâmetro preenchido com graxa, para evitar a entrada de água no tubo. As figuras 3.22 e 3.23 mostram, respectivamente, detalhes da execução e do projeto do equipamento.



Figura 3.22 – Execução da referência de nível profunda.

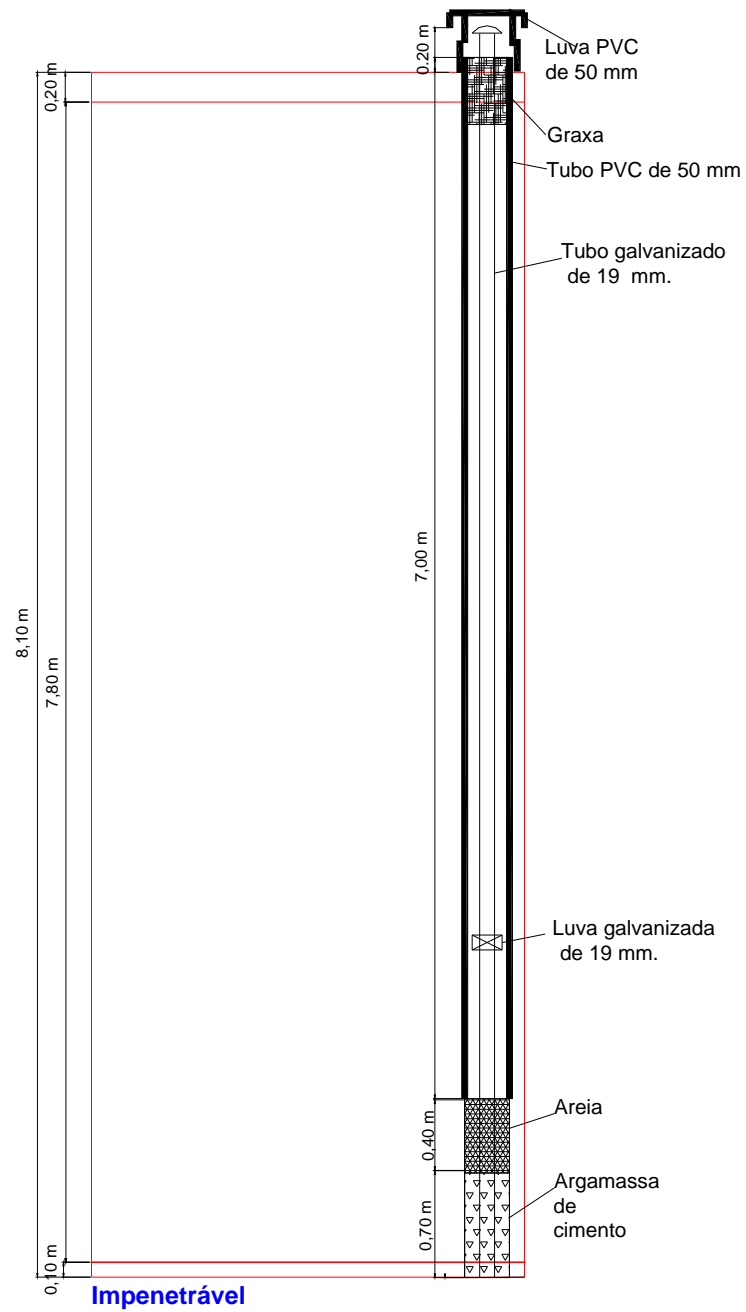


Figura 3.23 – Perfil do nível de referência.

3.4.7 – Placa de deslocamento vertical superficial

As placas utilizadas para a medição do deslocamento vertical superficial consistem em um disco metálico com 150 mm de diâmetro e 12,4 mm de espessura tendo uma haste metálica central soldada (Figura 3.24).

Foram instaladas 36 placas superficiais a uma profundidade de 0,20 m do nível do terreno, sendo sete na área sem vegetação; oito na área com vegetação e vinte e uma sob a placa de asfalto.

O processo de medição constituiu na leitura ótica através de um nível de precisão (Leica – NA828) munido de placa plana e paralela, utilizando-se uma mira de invar apoiada no topo da haste central tendo como cota de referência a haste de referência profunda (JUSTINO da SILVA, 2001).



Figura 3.24 – Placa de deslocamento vertical superficial.

3.5 – Atividades de Laboratório

As atividades de laboratório envolveram ensaios utilizando amostras amolgadas e indeformadas, resultando nas determinações indicadas abaixo e nas quantidades indicadas na Tabela 3.4.

- Caracterização física do solo em cada uma das células da geoestatística (curva granulométrica limite de liquidez, plasticidade, densidade real dos grãos);
- Caracterização mineralógica (difração de raios-X - quinze lâminas);
- Construção e ajuste de curvas de retenção ao modelo teórico de van Genuchten (1980), admitindo as hipóteses de Mualem (1976);
- Determinação da umidade volumétrica, gravimétrica, sucção matricial, peso específico aparente seco e natural, índice de vazios, porosidade, grau de saturação (por trimestre);
- Execução de dois ensaios para determinação de coeficiente de condutividade hidráulica;
- Execução de dois ensaios de expansão livre.

Tabela 3.4 – Ensaio de laboratório.

Tipo	Quantidade	Profundidade
Difração de Raio-X	05	0,25; 0,50; 1,0; 1,5; 3,5
Caracterização física	31	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5
Curva de Retenção	07	0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0.
Ensaio de Permeabilidade	02	0,3; 1,5
Expansão livre	02	1,5
Sucção matricial, umidade volumétrica, gravimétrica e índices físicos.	24	1,5
	24	1,5
	24	1,5
	24	1,5
	24	1,5

3.5.1 – Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica da fração argila foi feita utilizando a técnica da difração de raio x, considerando os picos de primeira ordem. O difratômetro usado foi

da marca Rigaku – Geigerflex, com radiação K-alfa de cobre, velocidade do goniômetro de 2°/min e velocidade da carta de 10 mm/min. Foram utilizadas lâminas orientadas submetidas aos seguintes tratamentos: a) saturadas com potássio e secas a 25° C; b) saturadas com potássio e aquecidas a 550° C por duas horas e c) saturadas com magnésio e glicerol. Foi amostrado o solo da célula imaginária geoestatística D, nas seguintes profundidades: 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 e 3,5 m, em cada cota foram preparadas três lâminas, perfazendo um total geral de 15 lâminas ensaiadas. A Tabela 3.5 pode ser usada como referência para a análise mineralógica.

Tabela 3.5 – Identificação de argilo - minerais, adaptado de Santos (1973).

	Distância Basal	Natural	Aquecido a 550 C°	Mg + Glicerol
Caulinita	7 A°	7,10 a 7,15 A°	Desaparece	Não altera
Illita	10 a 11A°	10 a 10,2 A°	Permanece	10 A
Montmorilonita	12 a 15 A°	12 a 15 A°	Desce para 10 A°	17,5 a 18 A°

3.5.2 – Caracterização física do solo

A curva granulométrica e os limites de consistência foram obtidos quando da caracterização e identificação de cada célula imaginária da geoestatística.

As determinações das curvas granulométricas e dos limites de consistência seguiram as normas 1781, 6459 e 7180 da ABNT. A Figura 3.25 mostra uma curva granulométrica típica da área estudada, outras curvas granulométricas estão presentes no Anexo B.

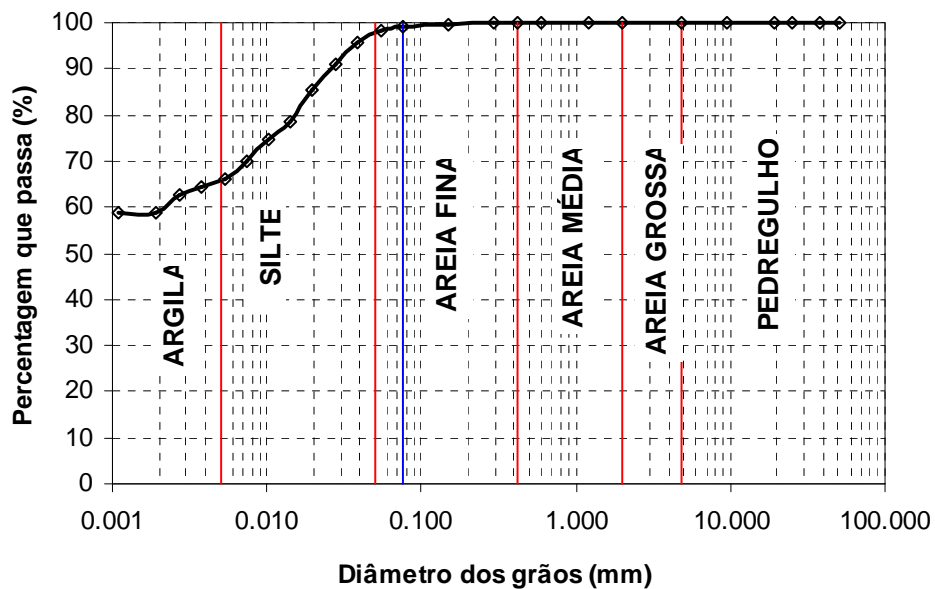


Figura 3.25 – Curva granulométrica.

3.5.3 – Sucção matricial e curva de retenção.

Os corpos de prova foram moldados das amostras indeformadas, resultando num cilindro com 75 mm de diâmetro e 20 mm de altura, e tendo a superfície plana e bem definida, (Figura 3.26).



Figura 3.26 – Corpos de prova para determinação de índices físicos e sucção matricial.

3.5.3.1 – Sucção matricial

Após a moldagem do corpo de prova, colocou-se em contato com os mesmos dois papéis de filtro, um em cada face, em seguida envolveu-se ambos com filme PVC em várias camadas. Decorridos sete dias fez-se à remoção e pesagem dos mesmos (papel de filtro e corpo de prova). Os papéis de filtro foram pesados numa balança com precisão de 0,001g. Também se pesou o corpo de prova e levou-o à estufa para a determinação da umidade correspondente à sucção medida.

Em todas as etapas do trabalho de determinação da sucção foi feita através do uso do papel de filtro, de acordo com Marinho (1994). Foi usado o papel de filtro Whatman 42 de 70 mm de diâmetro e as equações da curva de calibração de Chandler et al (1992), (Equação 3.1).

$$\begin{cases} W > 47\% \Rightarrow \text{Sucção}(kPa) = 10^{(6,05-2,48.\log(W))} \\ W \leq 47\% \Rightarrow \text{Sucção}(kPa) = 10^{(4,84-0,0622.W)} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.5.3.2 – Curvas de retenção

Moldado o corpo de prova e feita à pesagem inicial, realizou-se o primeiro estágio colocando-se em contato com o corpo de prova dois papéis de filtro, um em cada face, e em seguida, envolveu-se ambos com papel filme PVC em várias camadas. Decorridos sete dias, fez-se a pesagem dos papéis de filtro em uma balança com precisão de 0,001g e a pesagem e medição (diâmetro e altura) dos corpos de prova. Na seqüência, em relação à trajetória de drenagem, procedeu-se da seguinte maneira:

Trajatória de Secagem – a cada estágio submeteu-se o corpo de prova à secagem lenta em ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controladas. O estágio foi delimitado pela variação de umidade; no caso adotou-se uma redução de 3%.

Trajatória de Umedecimento - submeteu-se o corpo de prova ao umedecimento pelo processo de absorção de vapor, tendo sido adotado um acréscimo de 3% no teor de umidade por estágio. Ao ser atingido o peso calculado pela variação de umidade, tanto

para a secagem quanto para o umedecimento, iniciou-se o segundo estágio idêntico ao primeiro e assim sucessivamente.

3.5.4 – Permeabilidade da argila siltosa

A retirada da amostra no campo foi realizada utilizando-se de um amostrador tipo Hilf com altura de 17 cm e 10 cm de diâmetro. Foram retiradas duas amostras uma a 0,3 e a outra 1,5 m de profundidade. Após a retirada, a amostra foi envolvida com papel filme para evitar perda de umidade.

O ensaio foi realizado utilizando-se o permeâmetro de parede flexível (Tri-Flex). Consistiu na extração da amostra e colocação na câmara de pressão, Figura 3.27.

Após a colocação da amostra na câmara de pressão, foi aplicada uma pressão entre base e topo de 100kPa por um período de 12 horas, em seguida a pressão foi aumentada para 250 kPa por 72 horas para garantir a saturação do corpo de prova, Figura 3.28.

Obtida a saturação o ensaio teve início aplicando-se uma pressão diferencial de 100 kPa entre base e topo, sendo 250 kPa na base e 150 kPa no topo, gerando assim um fluxo ascendente. Para essa pressão diferencial trabalhou-se com intervalos de tempo de 3600 segundos.

A equação 3.2 foi usada para a estimativa da permeabilidade.

$$K_{Sat} = \frac{V_a \cdot h}{A_c \cdot \Delta p \cdot \Delta t} \quad (3.2)$$

Onde:

K_{Sat} : coeficiente de permeabilidade;

V_a : volume de água percolado no corpo de prova;

A_c : área da base da amostra;

Δt e Δp ; variação de tempo e de pressão entre base e topo.



Figura 3.27 – Corpo de prova moldado e câmara de ensaio.



Figura 3.28 – Permeâmetro de parede flexível (TRIFLEX).

Os coeficientes de permeabilidade obtidos para as profundidades de 0,3 m e 1,5m foram de $2,31 \times 10^{-8}$ cm/seg e $2,31 \times 10^{-10}$ cm/seg, respectivamente. Esses valores são típicos de argila siltosa e de argila coloidal respectivamente (Carvalho, 1997).

3.5.5 – Ensaio de expansão livre

Foram realizados dois ensaios de expansão livre, na cota de 1,5 metros. Os ensaios foram realizados em células edométricas convencionais com drenagem por ambas as faces e prensas tipo Bishop com relação de braço de alavanca de 10:1.

Utilizou-se corpos de prova com 71,3mm de diâmetro e 20 mm de altura, moldados a partir de amostras indeformadas tipo shelby, por cravação quasi-estática de anel com ponta biselada. Após a colocação do mesmo na célula edométrica, seguiu-se a umidificação da amostra e as leituras previstas.

As amostras apresentaram em média umidade gravimétrica de 31,8% no início do ensaio e 37,2% no final do ensaio. A Figura 3.29 apresenta o corpo de prova antes e após a retirada da estufa.



Figura 3.29 – Corpo de prova: (a) antes da colocação na estufa; (b) após a retirada da estufa a 110 C°.

3.5.6 – Análise estatística

Na análise realizada dos parâmetros do solo considerou-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, proporcionando um grau de confiança de 95%, que é um valor excelente para a engenharia geotécnica, devido ao acentuado nível de incerteza quando do estudo do solo. Uma síntese do estudo é mostrado na Tabela E5 (Anexo). Para a realização da análise estatística utilizou-se dos programas *Statístic 6.0*, para a estatística descritiva e inferencial e *GS+ for windows* para a análise geoestatística.

Na pesquisa realizada foram feitas as análises dos seguintes fatores:

- Índices Físicos
- Sucção matricial;
- Umidades gravimétricas, volumétricas;
- Curvas de retenção;
- Deformação volumétrica;

CAPÍTULO 4

RESULTADO E ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo apresenta os resultados e análises dos dados obtidos das atividades de campo e de laboratório.

Os resultados são apresentados sob forma de tabelas e figuras, seguidos por um estudo estatístico. Inicialmente, faz-se a apresentação dos parâmetros descritivos e, em seguida, uma análise de variância (ANOVA). Em alguns casos, executa-se um teste de Tukey, uma Análise em Componentes Principais (A. C. P.) e o uso da Geoestatística.

4.1 - Caracterizações Física e Mineralógica do Solo

4.1.1– Caracterização mineralógica

Os difratogramas obtidos com as amostras na profundidade de 1,50 m estão apresentados nas figuras 4.1 a 4.3. Os demais difratogramas estão mostrados no Anexo A.

Foram analisadas 15 lâminas e delas pode-se concluir que o grau de cristalinidade de todos os minerais é baixo, principalmente os do tipo 2:1. O único mineral cujo pico de primeira ordem está bem individualizada é a caulinita. Mesmo assim é evidente a interstratificação irregular envolvendo minerais 2:1 e a própria caulinita. A mineralogia qualitativa é a mesma em todos os níveis. Caulinita, interstratificados irregulares envolvendo fases expansivas (esmectitas e vermiculitas), não expansivas e a própria caulinita. Principalmente nas amostras a partir de 1,0 m de profundidade.

Em resumo, pode-se destacar em relação à mineralogia de fração argila:

- Ela é representada por minerais do tipo 1:1 e 2:1;
- Minerais do tipo 1:1 - Grupo das caulinitas exibindo uma pobre cristalinidade exceto na amostra entre 0,25 e 0,50 m de profundidade onde está melhor individualizada;
- Minerais do tipo 2:1 – Grupo das micas e esmectitas e interestratificados irregulares envolve solos expansivos e até mesmo a caulinita. Todos os minerais 2:1 apresentam um grau de cristalinidade ainda pior do que os 1:1. Talvez por estarem em processo de degradação.

A análise dos picos das lâminas ensaiadas indicam a presença de argilominerais do grupo das caulinitas, ilitas e esmectitas (montmorilonita). De acordo com o critério de identificação mostrada na Tabela 3.5 (capítulo 3, metodologia).

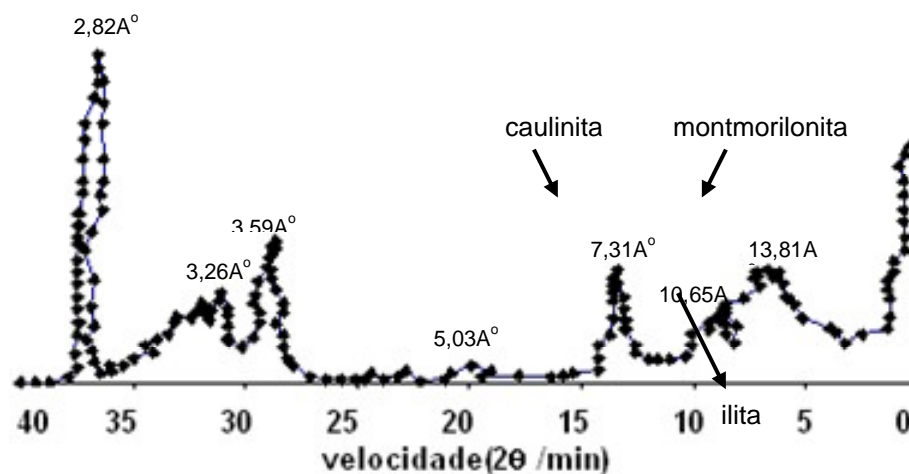


Figura 4.1 – Argila natural (1,5 m de profundidade).

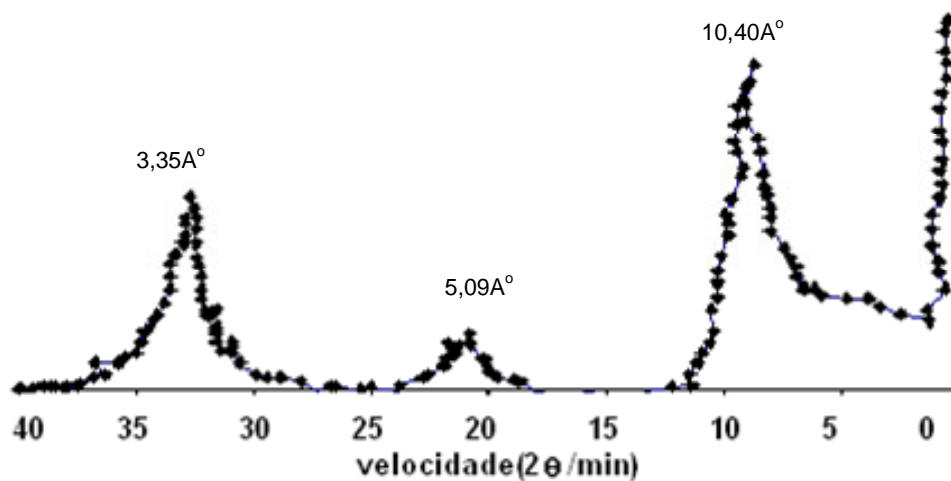


Figura 4.2 – Argila aquecida a 500 °C (1,5 m de profundidade).

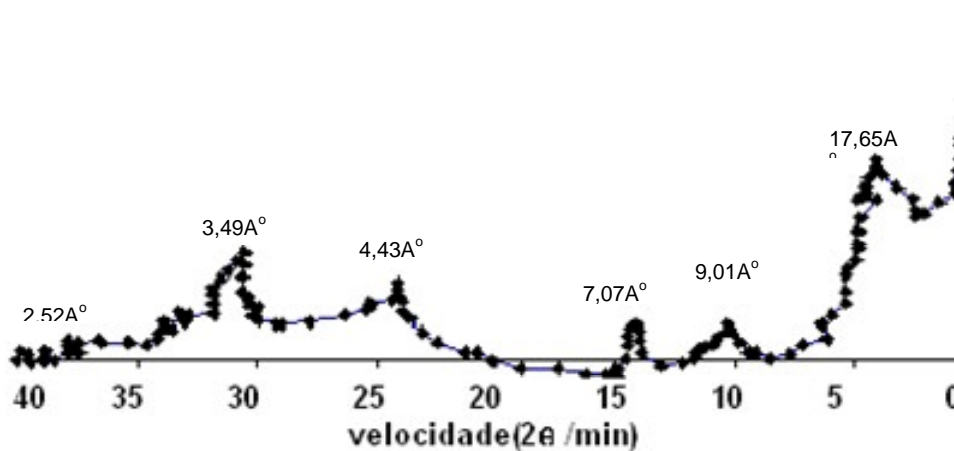


Figura 4.3 – Argila tratada com magnésio e glicerol (1,5 m de profundidade).

4.1.2 – Caracterização física

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos índices físicos obtidos das amostras coletadas a 1,50 m de profundidade.

O solo apresenta uma atividade normal, com variação entre 0,75 e 1,25 e um índice de plasticidade elevado, variando entre 20 e 59%.

Tabela 4.1 – Características físicas da área experimental.

Célula	%areia	%silte	%argila	LP	LL	IP	Ia
A	22	32	46	28	55	27	0,59
B	4	32	64	23	81	58	0,91
C	3	22	75	28	87	59	0,79
D	4	40	56	28	81	53	0,94
E	40	19	51	21	45	24	0,78
F	35	30	35	21	48	27	0,77
G	15	33	52	25	67	42	0,81
1A	36	26	38	22	54	32	0,85
2A	25	35	40	25	56	31	0,78
3A	4	37	59	31	86	55	0,80
4A	30	27	43	27	61	34	0,79
5A	25	29	46	25	59	34	0,74
6A	30	30	40	20	58	38	0,95
7A	35	28	37	23	56	33	0,89
8A	35	31	34	20	58	38	1,11
9A	25	33	42	21	54	33	0,78
H	37	28	35	20	48	28	0,80
I	32	28	40	23	54	31	0,74
J	30	30	40	25	66	41	1,00
L	35	26	39	24	44	20	0,51
M	31	30	39	23	51	28	0,72
N	42	25	33	18	48	30	0,91
O	23	35	42	23	58	35	0,83
P	31	30	39	21	52	31	0,80

IP: índice de plasticidade; LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; Ia: índice de atividade.

As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam valores descritivos da média e da dispersão do índice de plasticidade e do índice de atividade em cada uma das áreas.

Para verificar se existiam diferenças físicas significativas entre as áreas estudadas que pudessem influir na interpretação dos resultados das variações de umidade, sucção e de volume, foram escolhidos dois índices (plasticidade e atividade), por se tratar de índices influentes na variação volumétrica, para fazer um estudo de análise de variância com um único fator. A análise foi realizada com base nas seguintes condições (tabelas 4.4 e 4.5).

- Objetivo: testar se os índices de plasticidades e de atividade de cada área são diferentes ou se as variações são casuais;

- Variável resposta: diferença de índice de plasticidade e atividade para cada área;
- Tratamento: Três áreas com coberturas distintas;
 Área 1 – sem vegetação (72 m²);
 Área 2 - placa de asfalto (72 m²).
 Área 3 - com vegetação (72 m²);
- Unidade de Amostragem: área individual;
- Repetições: sete na área (1); nove na área (2) e oito na área (3);
- Hipóteses: H₀ (hipótese nula) todas as médias são iguais;
 H₁ (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;
 $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

A análise estatística de variância mostra que as médias dos índices de plasticidade e de atividade não diferem estatisticamente, pois o valor do F_{cal} foi menor do que o do F_{cri}. Desta forma, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que os valores estudados têm a mesma influência em cada uma das áreas nas condições de variações de umidade e de volume.

Tabela 4.2 – Valores descritivos para o índice de plasticidade das áreas.

ÍNDICE DE PLASTICIDADE			
Valores	Área sem Vegetação	Área da Placa	Área com Vegetação
Média	41,43	36,44	30,50
Maior	59,00	55,00	35,00
Menor	24,00	31,00	20,00
D.Padrão	15,48	7,37	6,02
Coef.Variação	37,36	20,22	19,75

Tabela 4.3 – Valores descritivos para o índice de atividade das áreas.

ÍNDICE DE ATIVIDADE			
Valores	Área sem Vegetação	Área da Placa	Área com Vegetação
Média	0,75	0,87	0,80
Maior	0,95	1,11	1,00
Menor	0,47	0,74	0,51
D.Padrão	0,17	0,12	0,12
Coef.Variação	22,51	13,63	18,60

Os resultados dos coeficientes de variação para o índice de plasticidade e atividade apresentaram valores que oscilam entre média e alta dispersão, todavia, devido a grande diferença de amplitude estes valores são considerados estatisticamente iguais, de acordo com a análise de variância realizada.

Tabela 4.4 – Análise de variância (ANOVA) para o índice de plasticidade.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GI</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcal</i>	<i>Valor P</i>	<i>Fcrítico</i>
Entre grupos	449,89	2	224,95	2,22	0,13	3,47
Dentro dos grupos	2125,94	21	101,24			
Total	2575,83	23				

Tabela 4.5 – Análise de variância (ANOVA) para o índice de atividade.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GI</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor P</i>	<i>Fcrítico</i>
Entre grupos	0,055	2	0,02	1,32	0,28	3,467
Dentro dos grupos	0,43	21	0,02			
Total	0,49	23				

4.1.3 – Expansão livre

O ensaio de expansão livre mostrou para um tempo de 1440 minutos uma variação volumétrica média para os dois corpos ensaiado de 3,2 mm, o que leva a um potencial de expansão de 17%. Segundo Chen (1965), pode ser classificado como um solo com grau de expansão elevado (Figura 4.4).

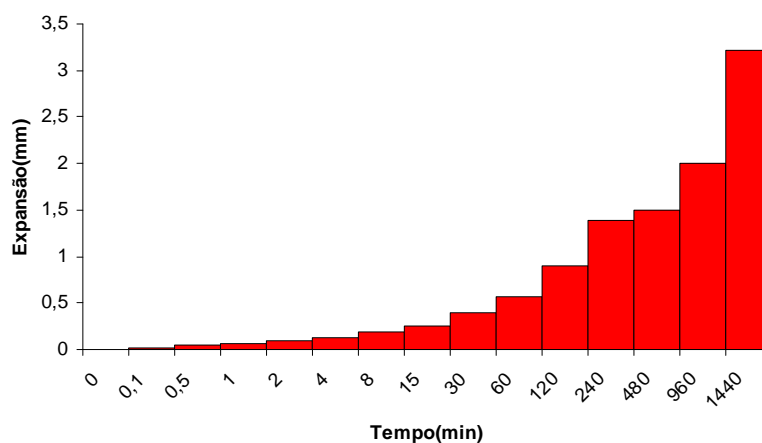


Figura 4.4 – Desempenho qualitativo da expansão durante o ensaio

4.2 - Curvas de Retenção

A Figura 4.5 apresenta os resultados dos ajustes das curvas de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980) utilizando as hipóteses de Mualem (1976) para a profundidade de 1,5 m.

O ajuste dos dados experimentais foi realizado pelo método dos mínimos quadrados e usando o critério matemático iterativo de Gauss-Newton. Apresentaram os valores médios dos coeficientes de determinação (R^2) e soma a dos quadrados dos resíduos (SQR) iguais a 0,97 e 0,09 respectivamente.

Para a comprovação estatística da qualidade do ajuste ou adequação entre os valores experimentais e simulados fez-se uso da estatística não paramétrica, por meio do teste Qui-Quadrado (χ^2), com base nas seguintes hipóteses do teste.

- Objetivo: testar o ajuste dos valores medidos e simulados para a umidade volumétrica;
- Variável resposta: umidade volumétrica;
- Tratamento: dados experimentais e simulados;
- Unidades de Amostragem: profundidades de 1,0 e 1,5 m e trajetórias de secagem e umedecimento;
- Repetições: 34 experimentais e 34 simulados;
- Hipóteses:

H_0 (hipótese nula) os valores se ajustam (seguem a mesma tendência);

H_1 (hipótese alternativa) os valores não se ajustam;

$\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

Verifica-se após o teste Qui-quadrado que existe uma forte tendência que os pontos amostrados e simulados possam ser ajustados por uma mesma curva, pois o valor do χ^2_{cal} foi menor do que o χ^2_{tab} o que leva a concluir com 95% de certeza que eles seguem uma mesma tendência (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Teste Qui-Quadrado para dados experimentais e simulados.

Qui-Quadrado para adequação ou ajustamento		
χ^2 (calculado)	χ^2 (tabelado)	Hipótese aceita
40,9	62,4	Ho (os dados seguem uma mesma curva de ajuste).

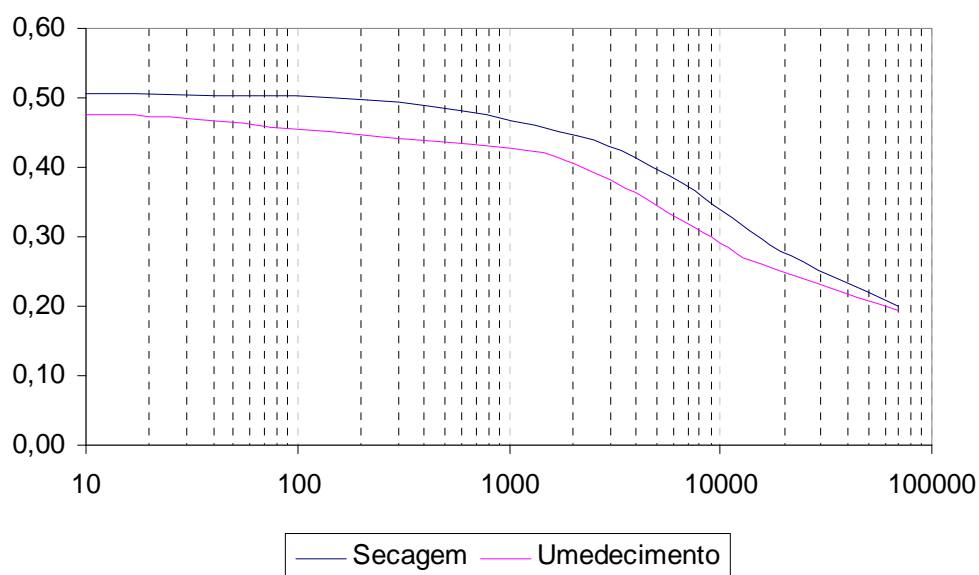


Figura 4.5 – Curva de retenção do modelo de van Genutchten (1980) – Mualem (1976) nas trajetórias de secagem e umedecimento para a profundidade de 1,5 m.

Santos (2008) estudou a histerese em relação à profundidade das curvas de retenção para esse solo, utilizando os modelos teóricos de Gardner (1958), van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994), chegando a conclusão que o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais é o de Fredlund & Xing (1994).

Em relação à história de tensões, as curvas do modelo apresentam características típicas de um solo pré-adensado. Alguns gráficos de ajuste, para outras profundidades, estão mostrados no anexo C.

4.3 – Umidade do Solo através da Sonda de Nêutrons

4.3.1 – Umidade volumétrica

Os tubos de acesso à sonda nêutrons tem as seguintes localizações: (1) Área sem vegetação, (2), (3) e (4) área da placa de asfalto e (5) área com vegetação. Sendo que o tubo (2) está no limite entre a placa de asfalto e a área sem vegetação, o tubo (3) está no centro da placa de asfalto e o tubo (4) está na fronteira entre a placa e área com vegetação. Os valores descritivos da umidade volumétrica para as profundidades entre 0,1 a 2,5 m, em cada tubo são mostrados na Tabela 4.7.

Observa-se que a média dos valores medidos sob a área da placa (tubos: 2, 3 e 4) apresentam uma menor dispersão ou estabilidade. Para os valores da área com vegetação (tubo 5), observa-se uma grande dispersão, enquanto, na área sem vegetação (tubo 1), tem-se um valor intermediário.

Tabela 4.7 – Valores descritivos da umidade volumétrica por tubo de acesso.

UMIDADE VOLUMÉTRICA(cm ³ /cm ³)					
Valores	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
Média	0,36	0,41	0,42	0,40	0,35
Máximo	0,46	0,47	0,48	0,52	0,51
Mínimo	0,13	0,25	0,31	0,14	0,10
D.Padrão	0,09	0,05	0,04	0,09	0,09
Coef.Variação	24,47	11,05	8,48	21,58	26,60

Do ponto de vista da engenharia, devido à proteção aos processos de evaporação e infiltração, a área da placa apresentou maiores valores de umidade volumétrica, além de uma baixa dispersão.

4.3.2 – Umidade gravimétrica

A Tabela 4.8 mostra os valores descritivos da umidade gravimétrica determinada em cada um dos cinco perfis verticais obtidos quando da instalação dos tubos de acesso a sonda de nêutrons, para as profundidades variando entre 0,10 a 2,50 m. Observa-se nos tubos de acesso 2, 3 e 4 uma menor dispersão e, conseqüentemente menor variação da umidade abaixo da placa. A menor variabilidade ocorreu na vertical 3, enquanto a vertical 2 apresentou maior umidade gravimétrica; a vertical 4, localizada no limite placa / vegetação, apresentou a maior variação (Figura 4.6).

Uma análise de variância foi realizada para testar a condição de igualdade das médias dos valores em cada vertical de acesso. Foram aceitas as seguintes condições:

Objetivo: testar o efeito da cobertura no parâmetro umidade gravimétrica.

- Variável resposta: diferença de umidade gravimétrica para cada tubo de acesso;
- Tratamento: Três áreas com diferente cobertura;
 - Tubo - 1 (área sem vegetação);
 - Tubo - 2 (placa, próximo à área sem vegetação);
 - Tubo - 3 (centro da placa de asfalto);
 - Tubo - 4 (placa, próximo à área com vegetação);
 - Tubo - 5 (área com vegetação).
- Unidade de Amostragem: tubos individuais;
- Repetições: cotas (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,75; 1,00; 1,30; 2,00; 2,50), todas em m;
- Hipóteses: H_0 (hipótese nula) todas as médias são iguais;
 - H_1 (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;
 - $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

Verifica-se por meio da análise estatística de variância que as médias das verticais de acesso diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi maior do que o do F_{cri} para um grau de confiabilidade da ordem de 95% (Tabela 4.9).

Tabela 4.8 – Valores estatísticos descritivos da umidade gravimétrica.

UMIDADE GRAVIMÉTRICA					
Valores	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5
Média	24,23	28,57	28,43	27,34	21,72
Máximo	32,18	33,26	34,22	36,82	36,00
Mínimo	6,25	15,57	19,94	6,97	2,11
D.Padrão	6,95	3,47	2,80	6,80	8,86
Coef.Variação	28,68	12,13	9,84	24,80	40,79

Tabela 4.9 – Análise de variância para umidade gravimétrica.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	Valor p	Fcrítico
Entre grupos	1952,94	4	488,23	12,71	$1,77 \times 10^{-9}$	3,47
Dentro dos grupos	10177,12	265	38,40			
Total	12130,06	269				

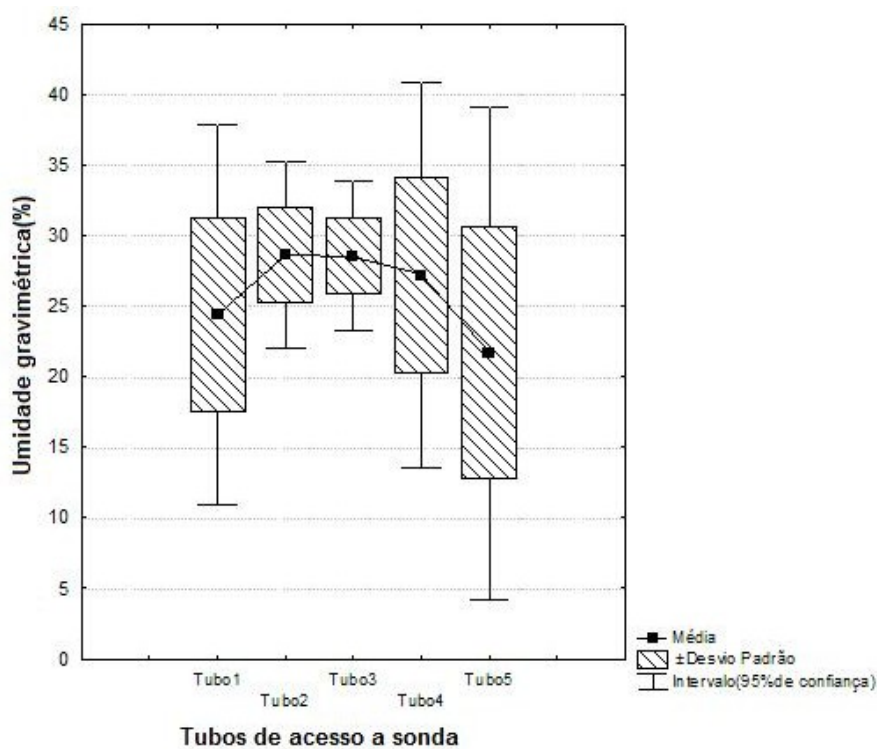


Figura 4.6 – Dispersão dos valores da umidade gravimétrica.

4.4 – Umidade Volumétrica e Sucção Matricial através dos Índices Físicos

4.4.1 – Umidade volumétrica a partir de amostras indeformadas.

Os valores da umidade volumétrica obtida através de amostra indeformada, na profundidade de 1,50 m, nas cinco campanhas realizadas, são apresentas sob a forma de valores descritivos na Tabela 4.10.

Observa-se por meio dos valores obtidos que a umidade volumétrica apresentaram valores com grande dispersão na área com vegetação. Comportamento semelhante ao obtido com os valores da sonda de nêutrons.

Em relação à área da placa, verifica-se uma tendência à estabilização da umidade no centro da mesma, com baixos coeficientes de variação e diferenças absolutas menores entre os valores extremos obtidos, exceto na terceira campanha de ensaio, pois, o nível do lençol freático estava a um metro da superfície do terreno.

Com relação aos valores médios em todas as campanhas, a situação da umidade apresenta-se bem definida, ou seja, a área com vegetação com alta dispersão e valores absolutos maiores.

As figuras 4.7 a 4.9 têm como finalidade mostrar a variação da umidade volumétrica. Observa-se que no período úmido (terceira campanha), a umidade se manteve muito próxima entre as três áreas, para o intervalo medido, enquanto no período seco (primeira, segunda, quarta e quinta campanhas), as variações foram grandes, caracterizadas pelo fator tipo de cobertura.

Tabela 4.10 – Valores da umidade volumétrica obtida nas campanhas de ensaio.

Períodos	Parâmetros	Área não vegetada	Área da Placa	Área com vegetação	
1ª Camp.	Média (cm ³ /cm ³)	0,41	0,41	0,30	
	E.Padrão(cm ³ /cm ³)	0,01	0,01	0,02	
	Mínimo (cm ³ /cm ³)	0,36	0,36	0,22	
	Máximo (cm ³ /cm ³)	0,49	0,49	0,41	
	Coef.Variação (%)	9,8	9,8	20,0	
2ª Camp.	Média (cm ³ /cm ³)	0,46	0,41	0,35	
	E.Padrão(cm ³ /cm ³)	0,01	0,01	0,02	
	Mínimo (cm ³ /cm ³)	0,40	0,35	0,23	
	Máximo (cm ³ /cm ³)	0,48	0,46	0,45	
	Coef.Variação (%)	6,5	9,8	20,0	
3ª Camp.	Média (cm ³ /cm ³)	0,45	0,42	0,45	
	E.Padrão(cm ³ /cm ³)	0,01	0,01	0,01	
	Mínimo (cm ³ /cm ³)	0,39	0,36	0,40	
	Máximo (cm ³ /cm ³)	0,47	0,54	0,51	
	Coef.Variação (%)	6,7	11,9	8,9	
4ª Camp.	Média (cm ³ /cm ³)	0,38	0,36	0,39	
	E.Padrão(cm ³ /cm ³)	0,03	0,00	0,01	
	Mínimo (cm ³ /cm ³)	0,25	0,33	0,36	
	Máximo (cm ³ /cm ³)	0,47	0,38	0,42	
	Coef.Variação (%)	18,4	2,8	5,10	
5ª Camp.	Média (cm ³ /cm ³)	0,38	0,36	0,31	
	E.Padrão(cm ³ /cm ³)	0,02	0,01	0,02	
	Mínimo (cm ³ /cm ³)	0,29	0,33	0,22	
	Máximo (cm ³ /cm ³)	0,47	0,38	0,38	
	Coef.Variação (%)	15,8	5,6	16,1	
VALORES MÉDIOS GERAIS					
Áreas	Média	E. Padrão	Mínimo	Máximo	C. Variação
S.Veg.	0,41	0,01	0,33	0,48	11,4
Pde Asfal.	0,39	0,01	0,35	0,45	8,0
C. Veg.	0,36	0,02	0,29	0,43	14,0

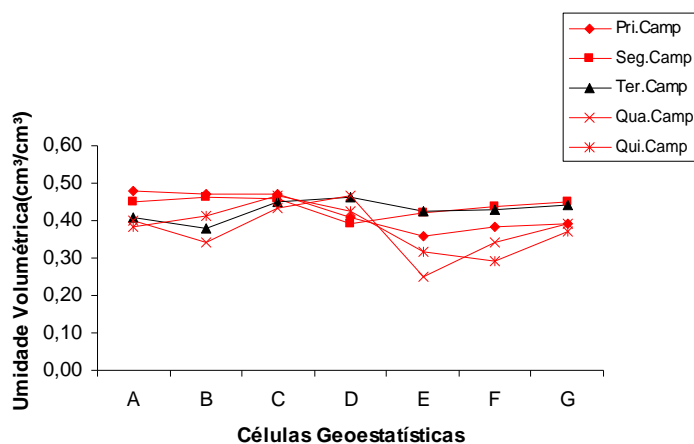


Figura 4.7 - Valores de umidade volumétrica da área sem vegetação a 1,5 m de profundidade.

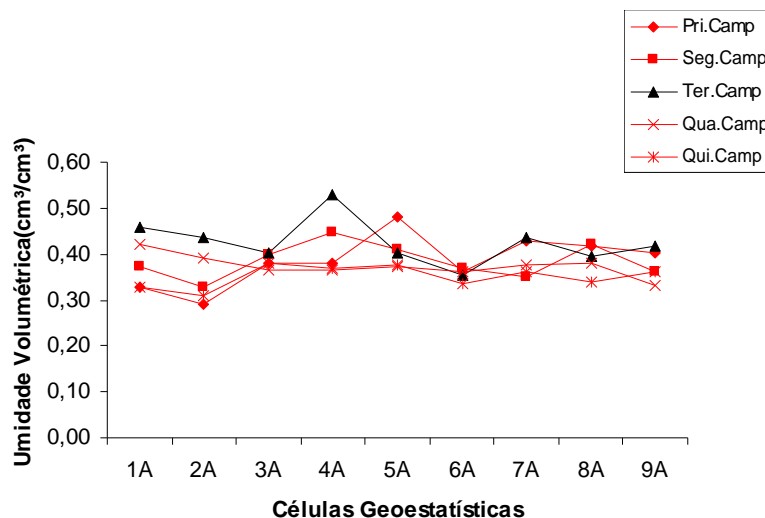


Figura 4.8 – Valores de umidade volumétrica da área da placa a 1,5 m de profundidade.

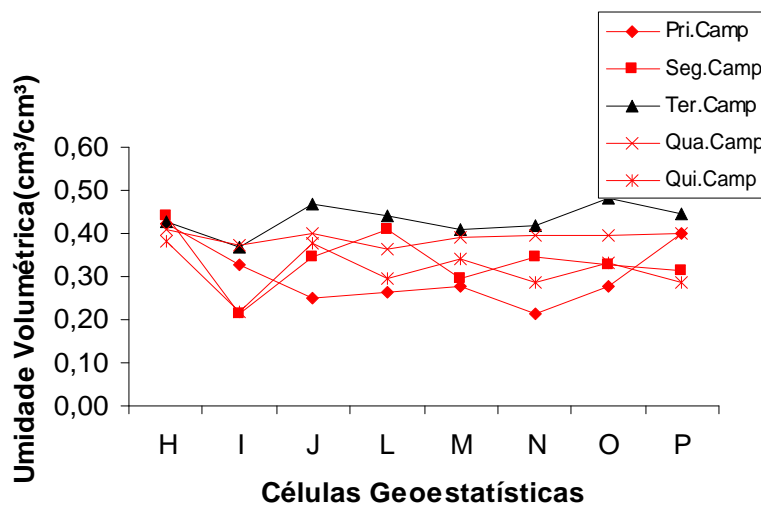


Figura 4.9 – Valores de umidade volumétrica da área com vegetação a 1,5 de profundidade.

Foi realizada uma análise de variância com dois fatores e repetição para o estudo da influência simultânea entre o tipo de cobertura e o valor absoluto das áreas com e sem vegetação. Foram Consideradas sete células geoestatística resultando nas

seguintes áreas de estudo: (9; 18; 27; 36; 45; 54; 63) m², perfazendo um total de 14 grupos, para duas condições distintas de cobertura consideradas.

Para a análise de variância foram admitidas as seguintes condições:

- Objetivo: testar se existe influência nos valores da variável umidade volumétrica das condições do tipo de cobertura e do valor absoluto da área estudada.
- Variável resposta: Interseção de influência das condições tipo de cobertura e valor da medida absoluta da área e condições isoladas.
- Repetições: sete na área (1); sete na área (3);
- Hipóteses: H₀ (hipótese nula): não há efeito principal do fator condição de cobertura;
 H₀ (hipótese nula) Não há efeito principal do fator área da estudada;
 H₀ (hipótese nula): não há combinação de efeitos;
 H₁ (hipótese alternativa): há efeito em cada um dos três fatores.
 $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

A Tabela 4.11 apresenta o resultado da análise de variância, para aceitação ou rejeição das hipóteses formuladas:

- Linha interação entre fatores ($F_{cal} < F_{cri.}$)
- Linha amostra ($F_{cal.} < F_{cri.}$)
- Linha colunas ($F_{cal.} > F_{cri.}$).

Constata-se que não há interação entre os fatores, pois $F_{cal} < F_{cri.}$, ou os dois fatores juntos (tipo de cobertura e tamanho das áreas em m²) não influenciam na variável resposta.

O Fator tamanho da área amostrada não se apresenta como fator importante na variável estudada, dentro dos limites de tamanho estudado, pois $F_{cal} < F_{cri}$.

Já o fator tipo de cobertura influenciou de maneira acentuada na variável estudada, visto que $F_{cal} > F_{cri}$. As afirmações podem ser consideradas verdadeiras com 95% de confiança.

Tabela 4.11 – Análise de variância com fator duplo e repetição para a umidade volumétrica.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GI</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor p</i>	<i>Fcrítico</i>
Amostra (tamanho da área)	63,16	6	10,52	0,38	0,88	2,26
Colunas (tipo de cobertura)	1040,43	1	1040,43	37,52	$9,48 \times 10^{-9}$	4,01
Interações	151,54	6	25,26	0,91	0,49	2,26
Dentro	1552,63	56	27,73			
Total	2807,76	69				

4.4.2 – Sucção matricial a partir de amostras indeformadas

A Tabela 4.12 apresenta os valores descritivos para as sucções medidas de cada área estudada, a uma profundidade de 1,5 m. Observa-se que os valores apresentam alta variabilidade na área com vegetação, uma variabilidade menor na área sem vegetação e uma tendência de estabilização na área sob a placa de asfalto. A sucção matricial é afetada por vários fatores experimentais, tais como, tipo e técnica de amostragem. Em face disso, procedeu-se um estudo estatístico inferencial.

A análise de variância seguiu as seguintes hipóteses:

- Objetivo: testar o efeito do tipo de cobertura na sucção matricial;
- Variável resposta: medidas de sucção matricial.
- Tratamento: Três áreas com diferente tipo de cobertura;
Área 1 – área sem vegetação (72 m²);
Área 2 - placa de concreto asfalto (72 m²).

Área 3 - com vegetação (72 m²);

- Unidade de Amostragem: áreas individuais;
- Repetições: sete na área (1); nove na área (2) e oito na área (3);
- Hipóteses: H₀ (hipótese nula) todas as médias são iguais;
H₁ (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;

Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 4.13. Verifica-se que as médias das sucessões matriciais diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi maior do que o do F_{cri} para um grau de confiabilidade da ordem de 95%.

Para ter certeza da superioridade absoluta de uma área em relação à outra, foi usado o teste de Tukey. A Tabela 4.14 mostra que a área com vegetação apresenta uma média absolutamente superior às outras. Já com relação à área da placa e a sem vegetação as diferenças dos valores médios podem ser atribuídas ao acaso, mostrando que nas proximidades de uma edificação, para esse tipo de solo, é aconselhável que haja um cuidado com a presença da vegetação.

Observa-se a grande dispersão da variável em estudo causada pela vegetação.

A Figura 4.10 apresenta um gráfico de dispersão com uma visão gráfica dos valores médios da sucessão matricial em função de cada área. Nota-se a grande diferença de média em cada área. A figura dá um indicativo do valor absoluto da sucessão matricial em função do tipo de cobertura.

Tabela 4.12 – Valores descritivos da sucção matricial por área.

Períodos	Parâmetros	Área não vegetada	Área da Placa	Área com vegetação	
1ª Campanha	Média (kPa)	1209,36	627,37	2400,61	
	Erro Padrão(kPa)	108,99	144,72	249,07	
	Mínimo (kPa)	890	1230,9	1364,90	
	Máximo	1669,8	97	3337,2	
	Coef.Varição(%)	23,84	55,74	29,35	
2ª Campanha	Média (kPa)	591,85	638,7	2530,86	
	Erro Padrão(kPa)	239,73	79,32	422,66	
	Mínimo (kPa)	7,7	305,4	123,2	
	Máximo	1542,2	954,10	4257,2	
	Coef.Varição(%)	108,98	37,25	47,24	
3ª Campanha	Média (kPa)	279,80	133,71	165,57	
	Erro Padrão(kPa)	88,24	18,24	33,77	
	Mínimo (kPa)	52,65	56,81	56,25	
	Máximo	722,26	242,50	310,57	
	Coef.Varição(%)	83,44	40,94	57,69	
4ª Campanha	Média (kPa)	518,22	472,84	455,80	
	Erro Padrão(kPa)	111,71	80,26	99,37	
	Mínimo (kPa)	47,97	81,58	139,98	
	Máximo	1050,01	709,68	917,91	
	Coef.Varição(%)	57,07	50,92	61,66	
5ª Campanha	Média (kPa)	767,82	516,05	2510,29	
	Erro Padrão(kPa)	234,38	97,67	221,93	
	Mínimo (kPa)	34,34	142,83	1656,95	
	Máximo	1517,67	993,76	3769,81	
	Coef.Varição(%)	80,76	56,78	25,00%	
VALORES MÉDIOS GERAIS					
Áreas	Média	Erro padrão	Mínimo	Máximo	Coef. Varição
A.S.Veg.	675,24	78,49	30	1669,8	73,52
Área da Placa	478,15	41,61	56,81	1230,9	61,54
A.C. Veg.	1612,62	185,55	56,25	4257,2	77,18

Tabela 4.13 – Análise de variância para valores da Sucção Matricial.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	Valor P	Fcrítico
Entre grupos	33741608	2	16870804	27,14	1,33x10⁻¹⁰	3,06
Dentro dos grupos	82026917	132	621416			
Total	1,16 x10 ⁸	134				

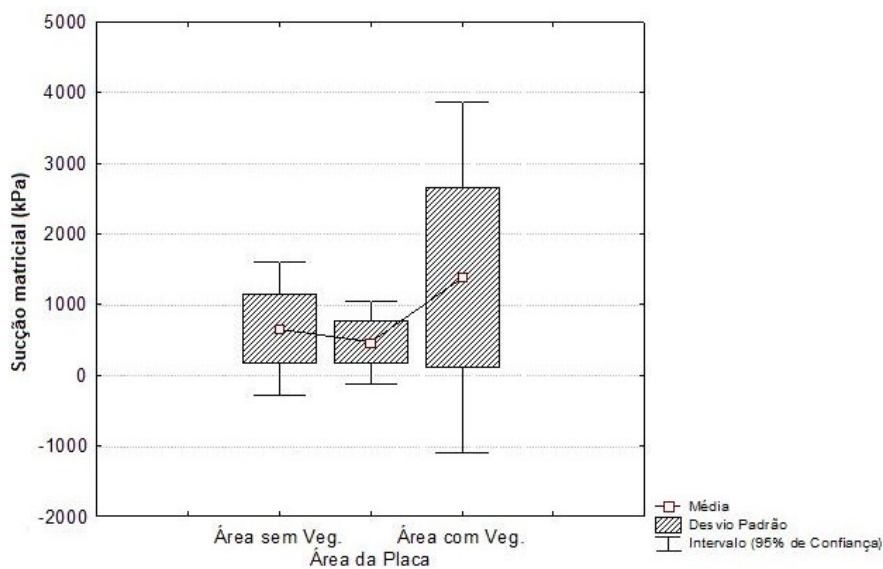


Figura 4.10 – Gráfico de dispersão da média da sucção matricial por área.

Tabela 4.14 - Teste TUKEY para médias das sucções matriciais por áreas.

Áreas (m ²)	Sucção Matricial (kPa)	Níveis de igualdade	
	Valor médio	1	2
Área sem vegetação	675,24		
Área da Placa	478,16		
Área com vegetação	1612,62		

Foi realizada uma análise de variância com dois fatores e repetição para o estudo da influência simultânea entre o tipo de cobertura e o valor absoluto das áreas com e sem vegetação. Foram Consideradas sete células geoestatística resultando nas seguintes áreas de estudo: (9; 18; 27; 36; 45; 54; 63) m², perfazendo um total de 14 grupos, para as duas condições distintas de cobertura consideradas.

- Objetivo: testar se existe influência nos valores da variável sucção matricial dos fatores tipo de cobertura e valor absoluto da área estudada.
- Variável resposta: Interseção de influência das condições tipo de cobertura e valor da medida absoluta da área e condições isoladas.
- Hipóteses: H₀ (hipótese nula): não há efeito principal do fator tipo de cobertura;
H₀ (hipótese nula): Não há efeito principal do fator da área estudada;

H_0 (hipótese nula): não há combinação de efeitos;

H_1 (hipótese alternativa): há efeito em cada um dos três fatores.

$\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

A Tabela 4.15 mostra o resultado da análise de variância, que pode ser resumida como segue:

- Linha interação entre fatores ($F_{cal} < F_{crítico}$);
- Linha amostra (valor absoluto das áreas) ($F_{cal} < F_{crítico}$);
- Linha colunas (condição de umidificação) ($F_{cal} > F_{crítico}$).

Constata-se que não há interação entre os fatores, pois $F_{cal} < F_{cri}$, os dois fatores juntos (tipo de cobertura e tamanho das áreas em m^2) não influenciam na variável resposta.

O fator tamanho da área não se apresenta como fator importante na variável estudada, dentro dos limites de tamanho estudado, pois $F_{cal} < F_{cri}$.

Já o fator tipo de cobertura influenciou de maneira acentuada na variável estudada, visto que $F_{cal} > F_{cri}$. As afirmações podem ser consideradas verdadeiras com 95% de confiança.

Tabela 4.15 – Análise de variância com fator duplo e repetição para a sucção matricial.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor de p</i>	<i>Fcrítico</i>
Amostra (tamanho da área)	101602,50	6	16933,75	0,02	0,99	2,26
Colunas (tipo de cobertura)	8743823	1	8743823	10,92	$1,62 \times 10^{-3}$	4,01
Interações	220443,7	6	36740,62	0,04	0,99	2,26
Dentro	44837264	56	800665,4			
Total	53903133	69				

Das análises realizadas nesse item verifica-se que, dentre todos os fatores analisados, o que tem maior influência para a variação da sucção matricial é o fator tipo

de cobertura e que a vegetação é a maior responsável pelas variações de sucção matricial.

4.5 – Temperatura

Para cada amostragem indeformada, procedeu-se à determinação da temperatura do solo, pois seu valor é um fator de grande importância no processo de deslocamento e retenção da água no solo. As leituras das temperaturas foram realizadas após a extração das amostras conforme apresentado no Capítulo 3.

A Figura 4.11 mostra o comportamento da temperatura em cada campanha por célula geostatística. Observa-se que as células da área sem vegetação apresentaram valores de temperatura superiores às outras duas áreas, devido à exposição direta a irradiação solar.

Para a terceira campanha de ensaio, a ascensão do lençol freático e a redução da incidência dos raios solares diminuem o nível de evaporação superficial, resultando em uma temperatura média aproximadamente igual para as três áreas.

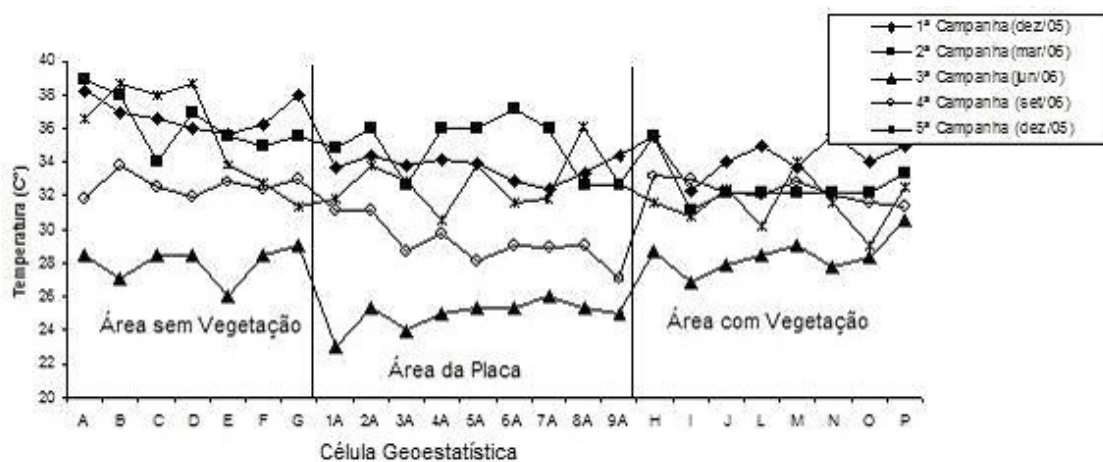


Figura 4.11 – Valores de temperatura por célula e campanha (entre 1,0 e 1,5 m)

Com o objetivo de analisar as informações da temperatura, foi elaborada uma tabela descritiva dos valores médios por área estudada (Tabela 4.16). Observa-se que a média da temperatura é menor abaixo da placa de asfalto, gerando um gradiente de

temperatura no sentido da área de fora da placa para a área abaixo da mesma. As figuras 4.12 e 4.13 mostram as temperaturas medidas entre as três áreas. As setas indicam a direção da redução da temperatura.

Para verificar se os valores médios das temperaturas são estatisticamente diferentes ou não, procedeu-se a uma análise de variância, com um fator, tipo de cobertura. Foram admitidas as seguintes hipóteses: (Tabela 4.17)

- Objetivo: testar o efeito do tipo de cobertura na temperatura;
- Variável resposta: medidas de temperatura.
- Tratamento: Três áreas com diferente tipo de cobertura;
 Áreas 1 – sem vegetação (72 m²);
 Área 2 - placa de concreto asfalto (72 m²).
 Áreas 3 - com vegetação (72 m²);
- Unidade de Amostragem: áreas individuais;
- Repetições: sete na área (1); oito na área (2) e nove na área (3);
- Hipóteses: H₀ (hipótese nula) todas as médias são iguais;
 H₁ (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;
 $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

Verifica-se após a análise estatística de variância que as médias das temperaturas diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi maior do que o do F_{cri} com 95% de certeza, portanto o fator tipo de cobertura influencia a variável temperatura.

A Tabela 4.18 apresenta a análise da temperatura por meio de um teste Tukey. Observa-se a diferença de comportamento dos valores, principalmente, na área sem vegetação onde a temperatura é a maior entre as três áreas estudadas. A Tabela 4.17 mostra que estatisticamente existe diferença de temperatura entre a área da placa e a área sem vegetação e não existe diferença entre a área da placa e a área com vegetação, devido à proteção que a placa e a vegetação apresentam contra o efeito da

irradiação solar. O gráfico de dispersão apresentado na Figura 4.15 comprova todo o estudo estatístico efetuado.

Tabela 4.16 – Valores descritivos da temperatura por área.

TEMPERATURA (C°)			
Valores	Área sem vegetação	Área da Placa	Área com Vegetação
Média	33,64	31,18	32,52
Máximo	38,79	37,10	39,51
Mínimo	28,44	25,40	26,88
D.Padrão	3,31	3,69	3,17
Coef.Variação	9,85	11,84	9,77

Tabela 4.17 – Análise de variância para a temperatura.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	Valor P	Fcrítico
Entre grupos	121,44	2	60,72	5,19	6,89x10⁻³	3,07
Dentro dos grupos	1367,60	117	11,68			
Total	1489,04	119				

Tabela 4.18 – Teste Tukey para valores da temperatura a 1,5 m.

Áreas(m ²)	Temperatura (C°)	Níveis de Igualdade	
	Valor médio	1	2
Área com vegetação	32,52		
Placa de Asfalto	31,18		
Área sem vegetação	33,64		

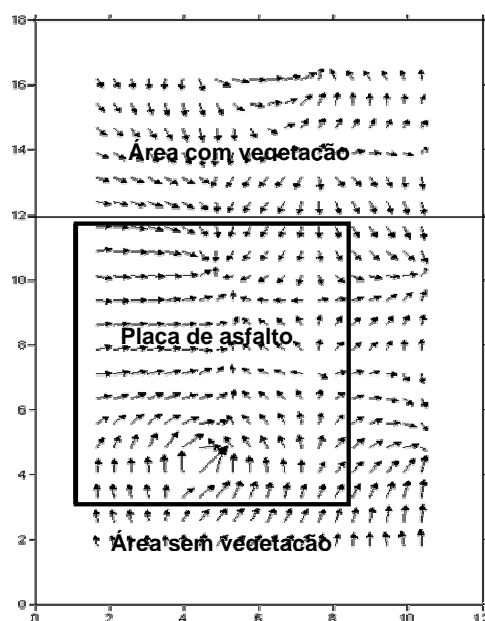


Figura 4.12– Gradiente de temperaturas a 1,5 m de profundidade (maior para menor).

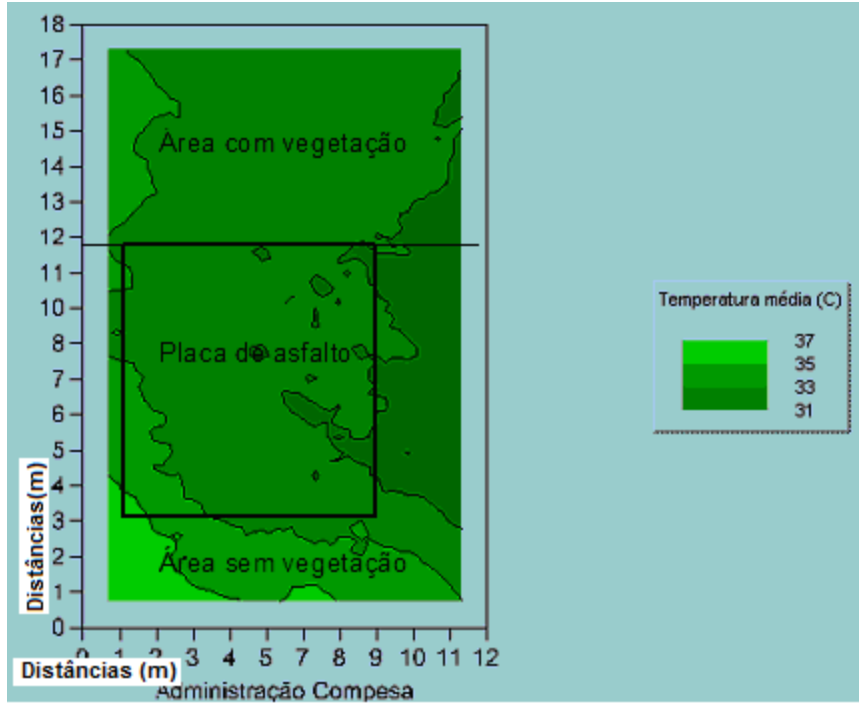


Figura 4. 13 – Valores médios da temperatura ao longo da amostragem.

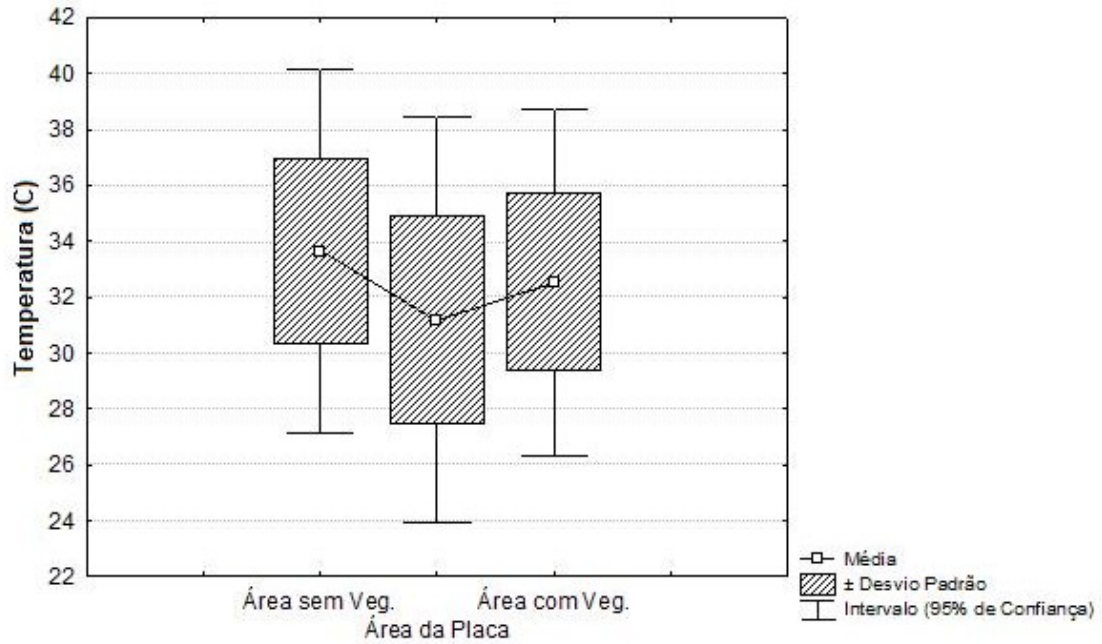


Figura 4.14 – Dispersão da média da temperatura por área.

4.6 – Análise em Componentes Principais (A. C. P.)

Para um estudo multivariado (diversas variáveis juntas), foi usada a técnica da análise em componentes principais para valores de índices físicos, sucção matricial e deslocamento vertical.

Sabe-se que o coeficiente de correlação mede o grau de associação entre duas variáveis; se ele é nulo não existe qualquer tipo de associação linear, se o seu valor absoluto for próximo de +1 ou -1 tem-se uma associação linear forte e positiva ou uma associação linear forte ou negativa, respectivamente. A Tabela 4.19 ilustra a matriz de correlação dos dados, nela pode-se observar que na diagonal principal todos os elementos são iguais a 1 e que a matriz é simétrica, característica de uma matriz de correlação. Verifica-se que a matriz de correlação apresenta uma correlação positiva entre a sucção matricial e as variações volumétricas, o que leva a verificar o forte poder da contração do solo em estudo. A Figura 4.15 mostra que o solo em estudo ao ser exposto ao ar livre perde a umidade para o meio ambiente apresentando grandes fissuras, fruto da contração.



Figura 4.15- Solo apresentando sinais de grande contração no período seco jan/06.

Tabela 4.19 – Matriz de correlação das variáveis estudadas.

	Ar	Silt	Ar.	IP	la	Ψ	w	θ	γ_d	e	S	Δh
Ar.	1,00	0,69	-0,93	0,93	0,06	-0,14	0,74	0,70	-0,55	0,64	0,40	-0,16
Silt	0,69	1,00	-0,76	0,66	0,07	-0,15	0,60	0,60	-0,39	0,44	0,43	-0,12
Ar.	-0,93	-0,76	1,00	-0,81	0,04	0,10	-0,79	-0,75	0,63	-0,67	-0,46	0,18
IP	0,93	0,66	-0,81	1,00	0,43	-0,23	0,69	0,66	-0,43	0,55	0,41	-0,23
la	0,06	0,07	0,04	0,43	1,00	-0,28	0,09	0,11	0,12	-0,04	0,13	-0,23
Ψ	-0,14	-0,15	0,10	-0,23	-0,28	1,00	-0,35	-0,49	-0,29	0,18	-0,68	0,78
w	0,74	0,60	-0,79	0,69	0,09	-0,35	1,00	0,97	-0,64	0,75	0,65	-0,32
θ	0,70	0,60	-0,75	0,66	0,11	-0,49	0,97	1,00	-0,46	0,58	0,79	-0,46
γ_d	-0,55	-0,39	0,63	-0,43	0,12	-0,29	-0,64	-0,46	1,00	-0,90	0,01	-0,21
e	0,64	0,44	-0,67	0,55	-0,04	0,18	0,75	0,58	-0,90	1,00	-0,01	0,16
S	0,40	0,43	-0,46	0,41	0,13	-0,68	0,65	0,79	0,01	-0,01	1,00	-0,66
Δh	-0,16	-0,12	0,18	-0,23	-0,23	0,78	-0,32	-0,46	-0,21	0,16	-0,66	1,00

A Figura 4.16 apresenta o gráfico dos valores dos autovalores e o percentual de variabilidade explicada pelo processo por cada um. Foram escolhidas apenas as duas primeiras componentes, pois as mesmas somadas explicam quase 75% do processo em estudo. Portanto, as componentes escolhidas explicam a maior parte da variabilidade do processo, sendo considerada satisfatória.

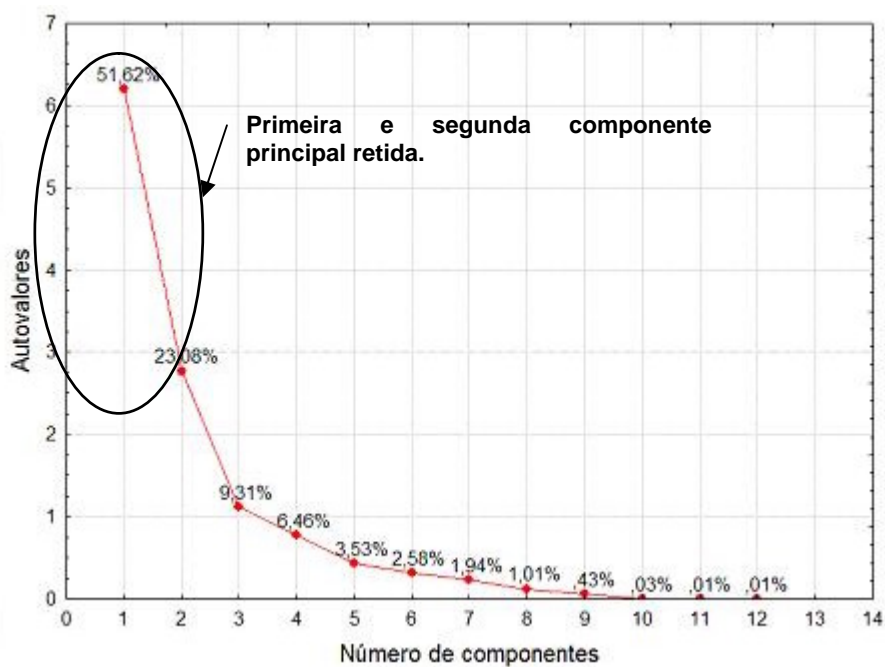


Figura 4.16- Gráfico dos autovalores.

A Figura 4.17 apresenta a projeção da variabilidade normalizada. Verifica-se que as variáveis podem ser reunidas em dois grupos, o grupo I, que é composto pelas umidades gravimétrica, volumétrica e pela composição granulométrica. O grupo II refere-se ao deslocamento vertical e a sucção matricial, onde se constata que a mudança de volume é mais influenciada pela variação da sucção matricial, pois ambos apresentaram variâncias semelhantes. Portanto, evitar variações de volume significa evitar variações de sucção, que pode ser realizado, por exemplo, com a colocação de barreiras horizontais. O aumento da sucção implica em redução da umidade, por esse motivo a correlação entre umidade e variação volumétrica ser negativa. As variações de umidades são explicadas na segunda componente principal.

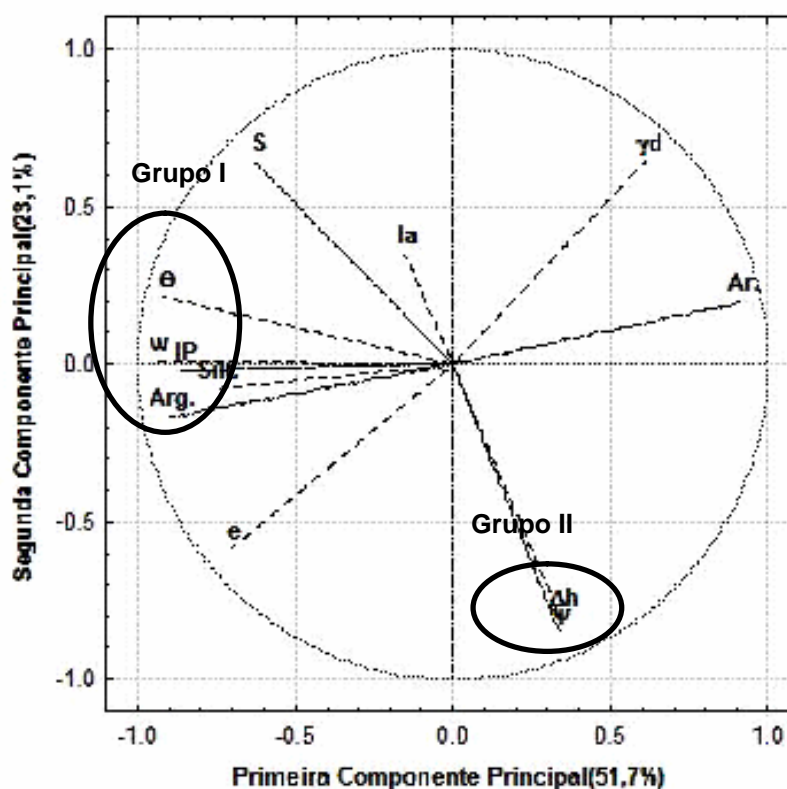


Figura 4.17 – Análise em componentes principais das variáveis estudadas (A.C. P).

Simbologia:

S: grau de saturação;

θ : umidade volumétrica

w: umidade gravimétrica;

e: índice de vazios;

ψ : sucção matricial

γ_d : peso específico aparente seco;

Δh : deslocamento;

Ia: índice de atividade;

Arg.: argila;

Ar.: areia;

Silt.: silte

4.7 – Comportamento da Umidade e Grau de Saturação entre as Áreas por Período.

Dividiu-se a análise em três períodos distintos. O primeiro envolveu as amostragens de dez/05 (meio do período seco) e de mar/06 (final do período seco); o segundo, em jul/06 (período úmido); e o terceiro, envolveu as amostragens em set/06 (início do período seco) e em dez/06 (meio do período seco). Para o primeiro e terceiro período foram considerados os valores médios das duas determinações. Para as leituras mensais, como: sonda de nêutrons, placas superficiais e piezômetros de Casagrande, utilizaram-se do seguinte critério: primeiro período seco, dezembro de 2005 a março de 2006. Período úmido, abril de 2006 a agosto de 2006, segundo período seco, setembro de 2006 a fevereiro de 2007.

4.7.1 – Fatores Climáticos

Uma análise de todo o processo de variação de umidade passa necessariamente por variáveis climáticas, responsáveis diretos pelo desencadeamento do processo de infiltração e evaporação que são as causas principais de fatores como: mudança de umidade, variação volumétrica, mudanças de temperatura, variações de sucção, grau de saturação dentre outros.

A Figura 4.18 mostra que no primeiro período de dezembro de 2005 a março de 2006, observam-se baixa frequência de precipitações, menos de cinco dias, e baixa amplitude acumulada, chuvas irregulares, prevalecendo o escoamento e a evaporação do líquido na superfície, exceção feita ao mês de janeiro de 2007 onde a precipitação, apesar de alta, não apresentou uma alta frequência, caracterizando uma alta intensidade acumulada, típica de chuvas intensas, visto que apenas houve, em torno de cinco dias de chuva. Desta forma, a superfície ao apresentar alta sucção e baixa permeabilidade, prevalece o escoamento superficial. No período úmido, abril a agosto de 2006, as precipitações apresentaram maior frequência, visto que o número de dias precipitados é superior a vinte, além de maior amplitude acumulada. As diminuições dos raios solares, característica desse período, fazem com que a água acumulada superficial aos poucos vá reduzindo a sucção matricial e conseqüentemente há um avanço da frente de umidade, prevalecendo nesse período à infiltração. Observa-se que o lençol freático atinge sua mínima profundidade justamente no período úmido devido a processos de infiltração e realimentação de áreas com cotas topográficas acima do campo experimental. No segundo período seco, setembro de 2006 a fevereiro de 2007, há uma redução da frequência de precipitação, diminuição de dias precipitados e uma redução na amplitude acumulada das chuvas, com o aumento da incidência dos raios solares, característica desse período. A evaporação real é máxima, com o passar do tempo a umidade superficial e a evaporação vão diminuindo com o aumento da sucção matricial e, conseqüente, diminuição da pressão de vapor. O lençol freático desce e modifica toda a zona vadoza.

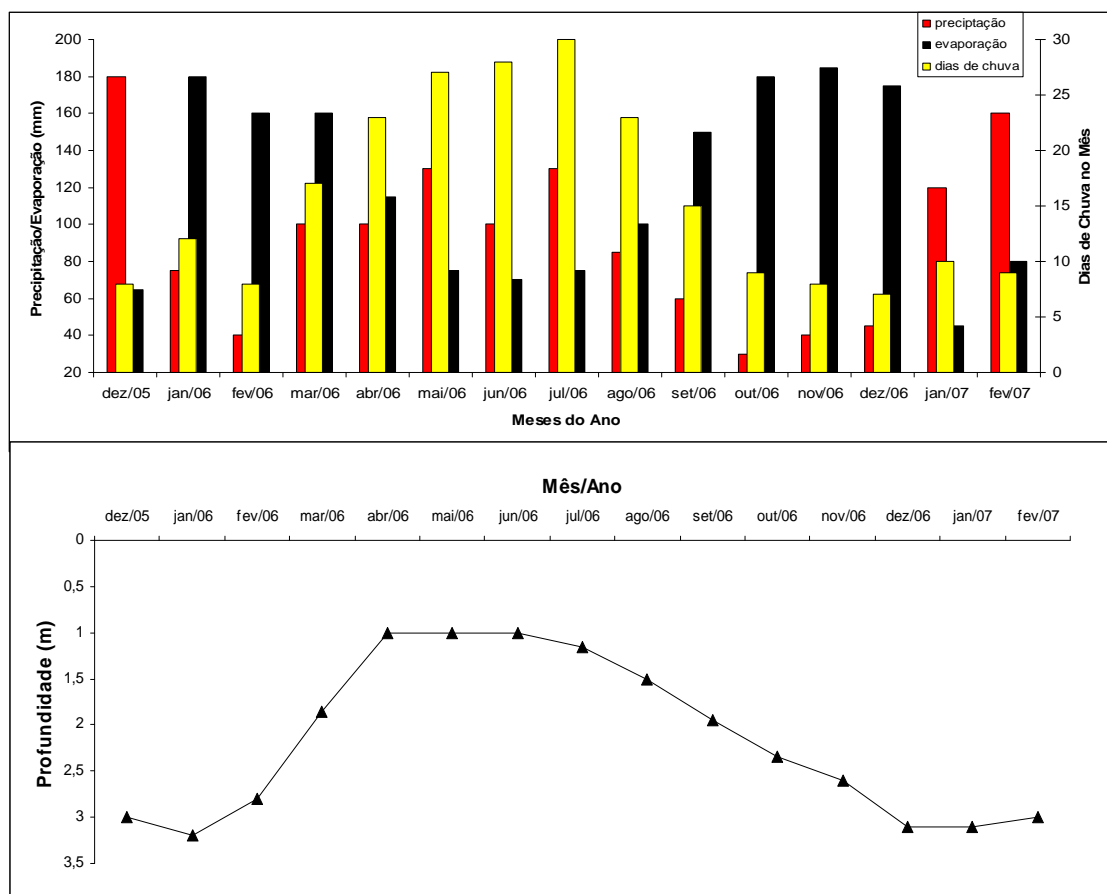


Figura 4.18 – Fatores climáticos

4.7.2 - Área sem vegetação

A área sem vegetação apresenta como características iniciais uma massa de solo desprotegida e submetida aos processos de evaporação e infiltração. Além de apresentar uma situação básica necessária para o processo de evaporação que é uma fonte de irradiação (sol) e um suprimento de água, lençol freático.

No período seco, a perda de umidade por evaporação induz um aumento na sucção da superfície e o solo apresenta um teor de umidade abaixo da capacidade de retenção e equilíbrio, desta forma, absorve a água disponível no subsolo até uma umidade de equilíbrio, não havendo a realimentação do lençol freático. Para solos expansivos, esse período é de contração e o solo apresenta fissuras (Figura 4.19).



Figura 4.19 – Solo fissurado no início do monitoramento (dez/05).

O gradiente de sucção é responsável pela ascensão da água, proveniente do lençol freático para a superfície, sob forma de difusão em forma líquida e de vapor. Ao chegar à superfície, a alta temperatura gera a transformação de estado físico da fase líquida e acontece a evaporação ou troca com a atmosfera.

A Figura 4.20 apresenta os perfis de umidade volumétrica para cinco diferentes períodos. Verifica-se que a zona vadoza está situada da superfície até uma profundidade aproximada de 2,5 m.

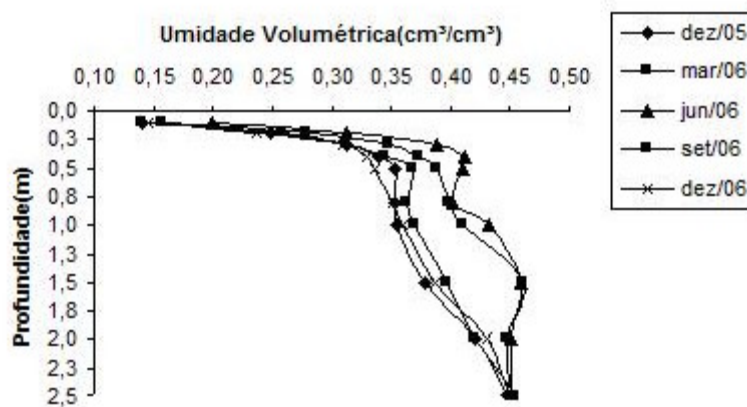


Figura 4.20 – Perfil de umidade volumétrica na área sem vegetação.

Ao iniciar o período úmido irá acontecer um aumento gradual da umidade volumétrica. Ocorrendo uma redução da sucção abaixo do valor de equilíbrio, o excesso de água é drenado para as camadas inferiores, desta forma, ocorre a ascensão do lençol freático e aumento da permeabilidade do solo intensificando-se os processos de infiltração (Figura 4.21).

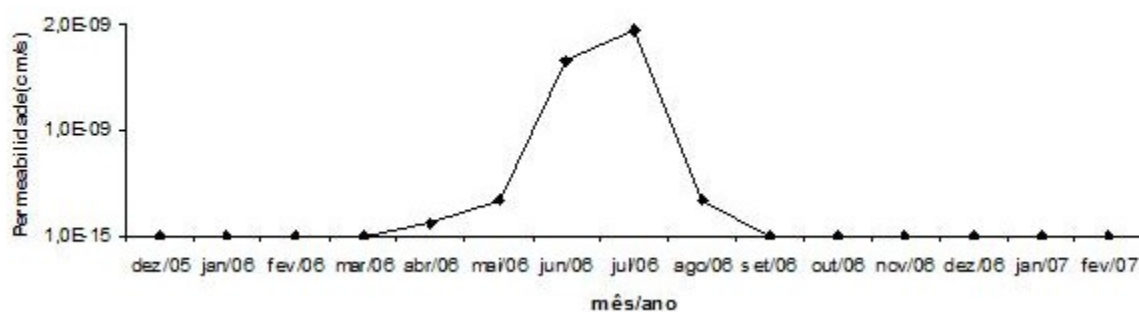


Figura 4.21 - Estimativa da permeabilidade com uso da equação de van Genuchten (1980), para uma profundidade de 0,3 m, na área sem vegetação.

4.7.3 - Área da Placa

Quando não existe infiltração nem evaporação, abaixo de uma área coberta, o solo se encontra em equilíbrio hidrostático e o valor da sucção está associado à altura da coluna de água que o solo pode reter, o que representa a capacidade de retenção do solo. O perfil de pressões neutras atingirá o equilíbrio na condição hidrostática não havendo, portanto, o fluxo de água no solo.

A Figura 4.22 mostra um perfil de umidade volumétrica que tem pequenas variações e pode ser atribuída à ascensão do lençol freático no período úmido. Por ação de forças capilares, verifica-se que não existem grandes variações de umidade entre os períodos seco e úmido, fato esse atribuído à proteção contra a infiltração e a evaporação, gerando desta forma um perfil de umidade volumétrica estático.

Para as profundidades de 10 e 20 cm observa-se valores menores de umidade volumétrica esse fator pode ter sido desencadeado pela esfera de influência gerada na

sonda de nêutrons as medir as umidades volumétricas, pois para essas profundidades existem dois tipos de material a considerar, o solo e o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), da placa de asfalto.

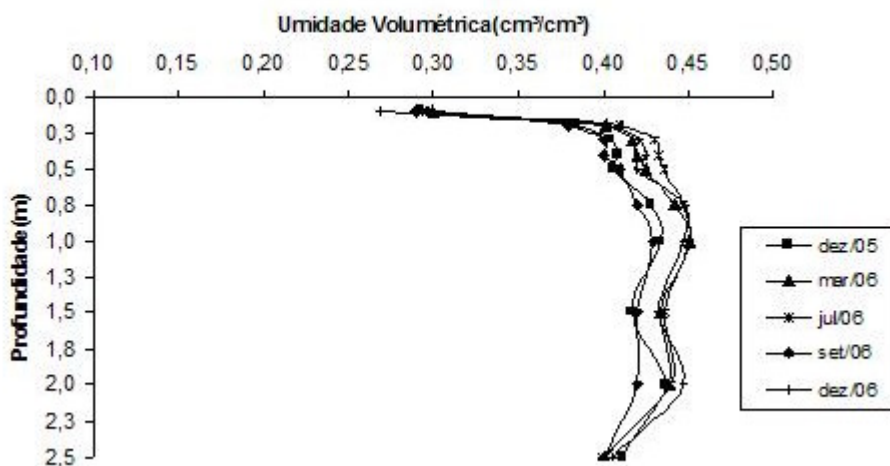


Figura 4.22 – Perfil de umidade volumétrica na área da placa.

Com relação à permeabilidade estimada, a mesma se apresenta constante em praticamente todo o período de monitoramento. Apenas no meio do período úmido, devido à ascensão do lençol freático e efeito de capilaridade há um aumento da mesma (Figura 4.23).

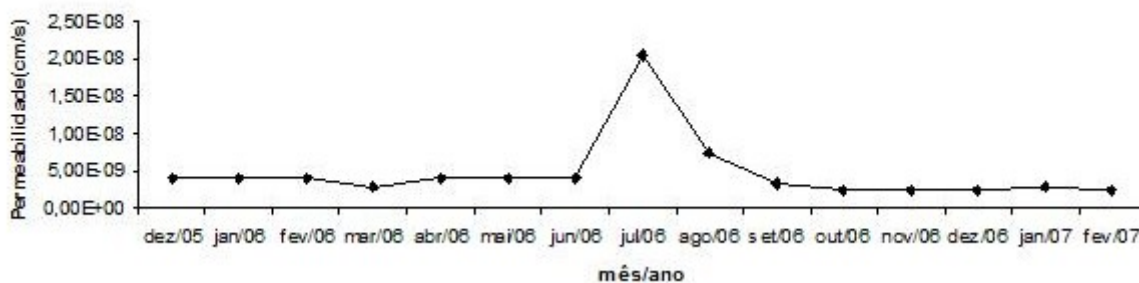


Figura 4.23 - Estimativa da permeabilidade com uso da equação de van Genuchten (1980), para uma profundidade de 0,3m, na área da placa.

4.7.4 - Área com Vegetação

A vegetação modifica o comportamento da zona vadoza, apesar da proteção a evaporação e ao aumento da temperatura na superfície, ela pode aumentar a infiltração e modificar todo o comportamento tensional do solo com a sucção gerada por suas raízes.

A Figura 4.24 mostra ser difícil definir uma região de flutuação de umidade para essa área, pois as raízes da vegetação extraem a umidade do solo até o ponto de murcha 1,5 MPa, após essa sucção, as raízes buscam a umidade em maiores profundidades, pela necessidade de subsistência e a condição de perenidade da vegetação predominante no local. Observa-se que no período úmido, devido à abundância de água, o processo de transpiração da vegetação é pequeno e a umidade volumétrica no solo alcança valores altos. Já no período seco, com a intensificação dos processos de sucção das raízes da vegetação, essa umidade é bastante reduzida, o que para um solo expansivo gera o efeito de contração e fissuras.

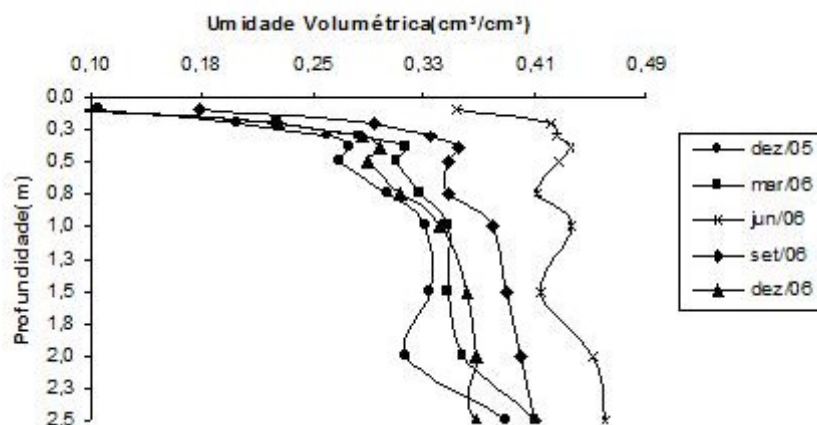


Figura 4.24 – Perfil de umidade volumétrica na área com vegetação.

A Figura 4.25 mostra que a permeabilidade estimada nessa área sofre grandes variações em todo o período devido à grande dispersão dos valores de sucção matricial gerado pela retirada de água do solo pelas raízes da vegetação.

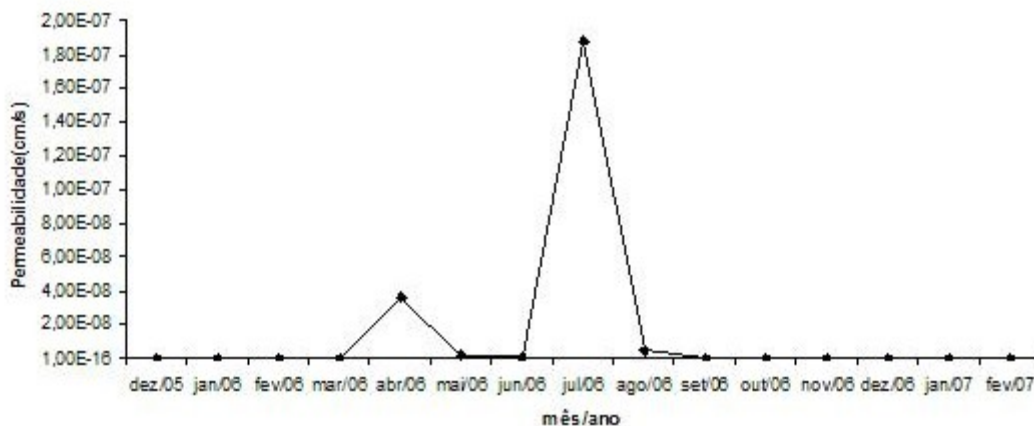


Figura 4.25 - Estimativa da permeabilidade com uso da equação de van Genuchten (1980), para uma profundidade de 0,3 m, na área com vegetação.

4.7.5 – Troca de umidade entre as áreas

4.7.5.1 - Área sem vegetação / área da placa

Para o limite entre a área sem vegetação e placa de asfalto, o transporte da água se dá devido ao aumento de sucção na área sem vegetação, causada pela evaporação. Desta forma é gerado gradientes de sucção entre as duas áreas e se tem o movimento de água no sentido placa de asfalto para a área sem vegetação (Figura 4.26).

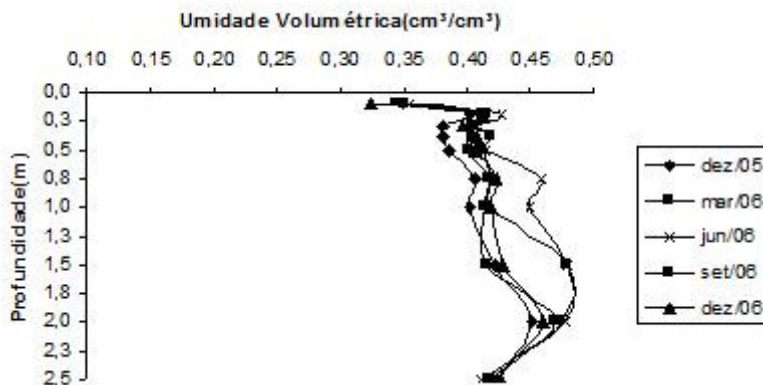


Figura 4.26– Variação volumétrica no limite área descoberta/placa.

O transporte de água entre a área sem vegetação e a placa se dá no sentido da área sem vegetação, devido ao aumento da sucção matricial, causada pelo processo de evaporação na mesma devido à incidência direta dos raios solares.

4.7.5.2 – Área com vegetação/área da placa

O limite área com vegetação e placa de asfalto apresenta uma grande variabilidade dos valores de umidade volumétrica, principalmente nas camadas superiores, até 0,5 m, devido à extração pelas raízes da vegetação. Essa grande variabilidade dos valores causa os movimentos verticais de expansão e contração, gerando fissuras nas edificações (Figura 4.27).

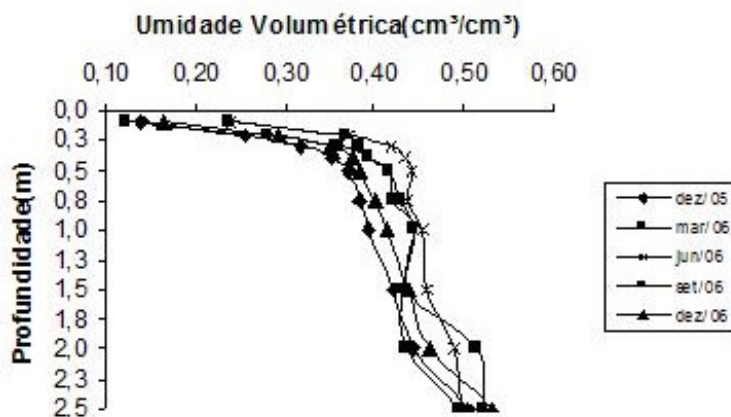


Figura 4.27 – Perfil de umidade volumétrica limite área com vegetação/placa.

A vegetação contribui para o aumento da sucção matricial devido à atividade das raízes. Portanto, o deslocamento da água acontece no sentido da área da placa para a área com vegetação. A Figura 4.28 mostra a placa de asfalto fissurada nessa região devido aos deslocamentos verticais ocorridos na borda da mesma.



Figura 4.28 – Fissuras causadas no limite placa/área com vegetação pela retirada de umidade das raízes do solo.

4.7.6 – Intensidade de Variação da Umidade Volumétrica por Profundidade em toda a Área.

A Figura 4.29 mostra o comportamento do coeficiente de variação da umidade volumétrica por camada de solo em todo o tempo de monitoramento. Observa-se que para a área sem vegetação (tubo 1) a dispersão dos valores de umidade volumétrica são baixos, exceção nas camadas de 10 e 20 cm, o que leva a concluir que há um equilíbrio entre evaporação e suprimento de umidade gerado por infiltrações e pelo lençol freático, pois em períodos muito secos a umidade chega as camadas superiores por difusão de água e de vapor de água provocados por gradientes de sucção e temperatura.

No limite placa/ área sem vegetação (tubo 2) observa-se uma baixa variabilidade da umidade volumétrica. Apenas nas camadas 10 e 20 cm devido ao raio de ação da sonda de nêutrons, há uma grande dispersão dos valores entre o período úmido e seco.

No centro da placa (tubo 3), praticamente não há variação de valores da umidade volumétrica, constituindo-se em um local de umidade estática, pelo fato do fluxo de umidade ser quase nulo.

No limite área com vegetação/placa de asfalto (tubo 4), observa-se uma grande variabilidade dos valores de umidade volumétrica, resultado da retirada de água do solo por parte da vegetação por gradiente de sucção, gerado pelas raízes da vegetação, principalmente nas duas primeiras camadas do solo.

Já para a área com vegetação (tubo 5), a variabilidade é muito intensa, principalmente nos primeiros 30 cm da camada do solo. Apesar da proteção aos processos de evaporação, devido à presença da vegetação, essa área apresenta uma atividade intensa das raízes na retirada da água, causando grandes variações de umidade volumétrica.

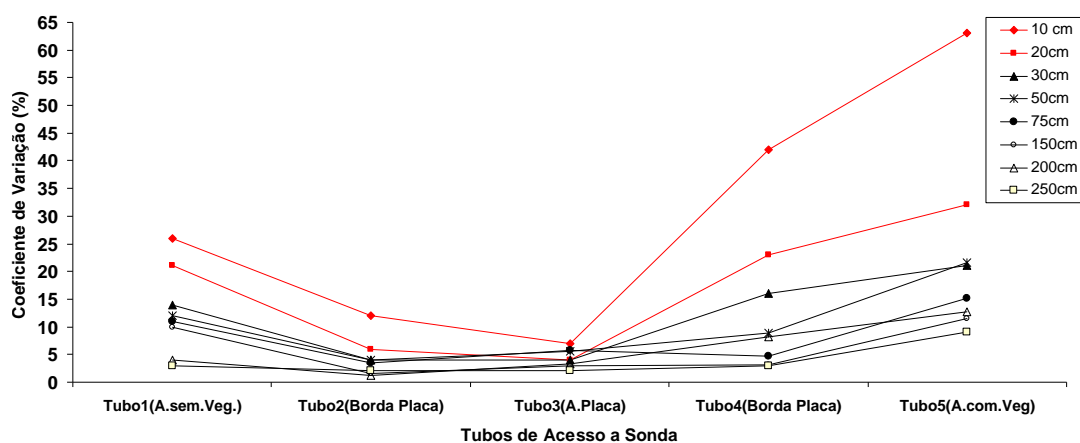


Figura 4.29 – Coeficiente de variação para a umidade volumétrica.

A variação de umidade entre as áreas é intensa no limite entre placa e área com vegetação, pela ação das sucções matriciais geradas nas raízes da vegetação. Já para o limite placa e área sem vegetação, apesar dos gradientes térmicos gerados nesse limite, o deslocamento da umidade sob forma de vapor é menos nociva a edificação, o que causa menores danos estruturais, pois não se observou durante todo o tempo de monitoramento fissuras nesse limite.

A Figura 4.30 mostra fissuras devido ao efeito do deslocamento de água entre as regiões com e sem vegetação e a placa de asfalto. Observa-se que no limite entre área sem vegetação e placa de asfalto (A) o deslocamento não é capaz de causar grandes variações de volumes, desta forma, a placa apresentou-se sem fissuras que levaria a ruína. Já com relação ao limite da área com vegetação e placa de asfalto (B) verificam-se várias fissuras de tamanhos variados que são caminhos preferenciais para entrada de água e ruína da edificação, tanto na borda como no corpo da placa de asfalto.



Figura 4.30 – Limites entre as áreas: (A) – Placa/área sem vegetação; (B) Placa/área com vegetação.

4.8 – Análise Estatística do Comportamento da Umidade Gravimétrica e Sucção Matricial no plano localizado a 1,50 m de Profundidade (amostragem Shelby).

Foi realizada uma avaliação da variação da umidade no plano horizontal, a uma profundidade de 1,50 m. Para essa profundidade, foram realizadas amostragens de solos indeformadas tipo Shelby, e foram estimadas as medidas de variáveis hidráulicas tais como: umidade gravimétrica, umidade volumétrica, sucção matricial, com frequência trimestral, perfazendo cinco campanhas de ensaio. Dividiu-se a análise em três períodos distintos, já citados no item 4.7.

4.8.1 – Análise Estatística do Comportamento da Umidade Gravimétrica.

A utilização da estatística clássica, através da análise de variância, permitiu a avaliação da umidade gravimétrica inicial e a dispersão dos valores em cada área.

No primeiro período seco, uma análise de variância foi realizada para verificar se as médias das umidades gravimétricas em cada área poderiam ser consideradas diferentes estatisticamente. Foram admitidas as seguintes condições:

- Objetivo: testar, pelo menos, se umas das médias das umidades gravimétricas, nas três áreas, diferem estatisticamente.
- Variável resposta: medidas das umidades gravimétricas.
- Tratamento: Três áreas com diferente tipo de cobertura
 Área 1 – sem vegetação (72 m²);
 Área 2 - placa de concreto asfalto (72 m²).
 Área 3 - com vegetação (72 m²);
- Unidade de Amostragem: áreas individuais;
- Repetições: sete na área (1); nove na área (2) e oito na área (3);
- Hipóteses: H₀ (hipótese nula) todas as médias são iguais;
 H₁ (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;
 $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

Verifica-se que as médias das umidades gravimétricas entre as áreas diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi maior do que o do F_{cri} para um grau de confiabilidade da ordem de 95%, (Tabela 4.20).

Tabela 4.20 – Análise de variância para umidade gravimétrica

<i>Fonte da variação</i>	SQ	GL	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	1246,95	2	623,47	74,08	8.2.10 ⁻¹⁶	3,18
Dentro dos grupos	429,23	51	8,41			
Total	0,0027	53				

A Geoestatística permitiu a geração do mapa interpolado da umidade gravimétrica na sua condição inicial de cada área. Figuras 4.1 e 4.32.

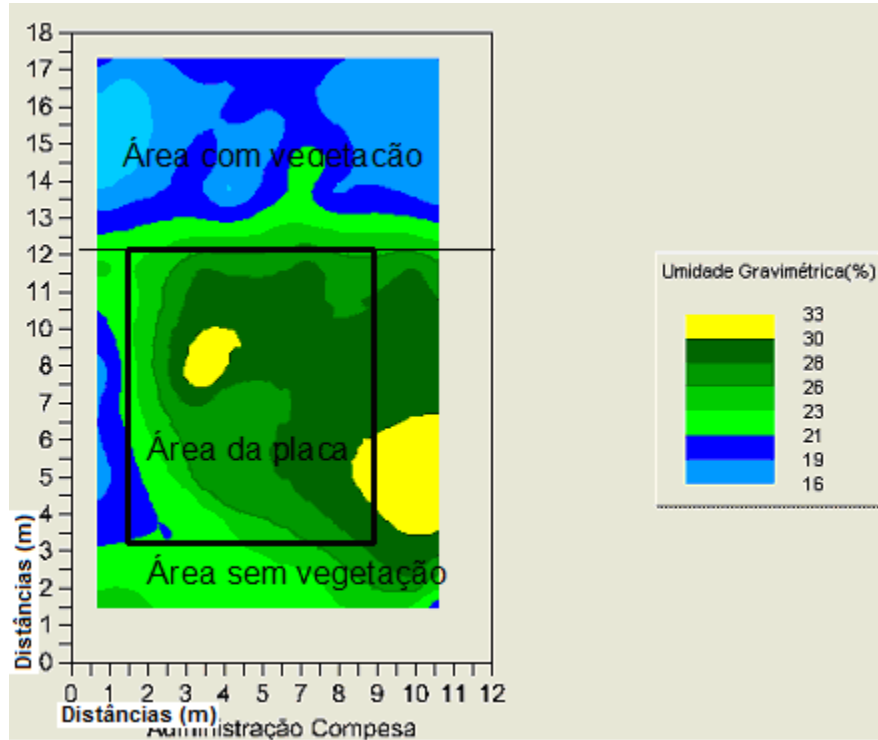


Figura 4.31 – Umidade gravimétrica por todo o campo experimental (no primeiro período seco, dez/05 e mar/06)

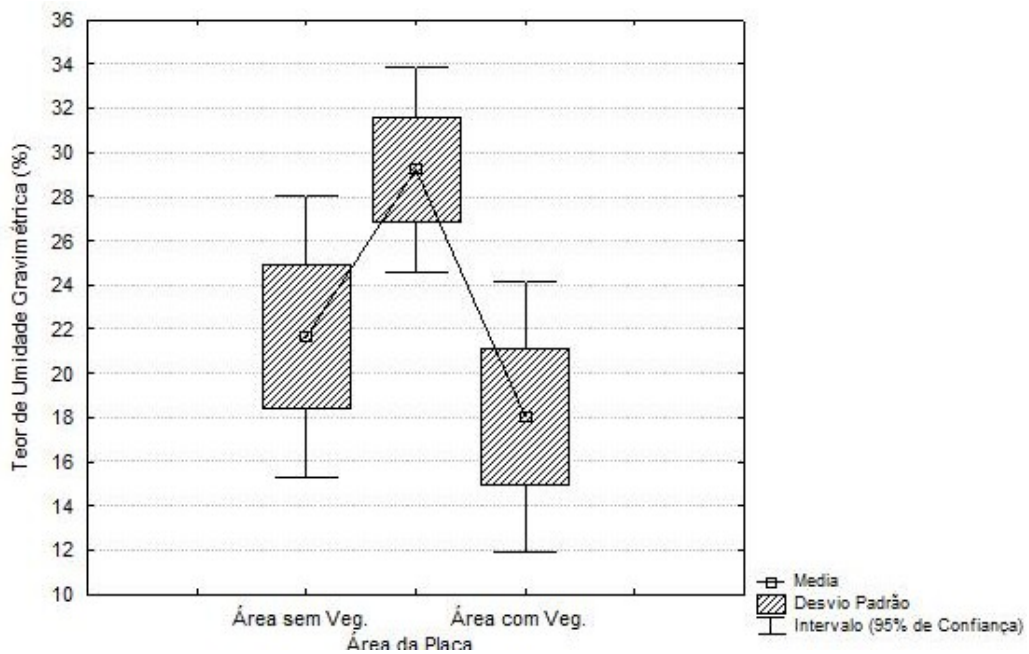


Figura 4.32 – Gráfico de dispersão da umidade gravimétrica por área (no primeiro período seco).

Observa-se, na Figura 4.31, que a umidade gravimétrica abaixo da placa é maior que nas áreas no entorno da mesma. O gráfico de dispersão apresenta os valores descritivos da umidade e mostra uma menor variabilidade na área abaixo da placa, o que leva essa região a apresentar uma umidade quase estática no centro da placa e uma umidade dinâmica em sua borda.

No período úmido, fez-se uma análise semelhante àquela realizada para o primeiro período seco.

Através da análise de variância verificou-se que as médias das umidades gravimétricas não diferem estatisticamente entre as áreas, pois, o valor do F_{cal} foi menor do que o do F_{cri} . Tabela 4.21

Tabela 4.21 – Análise de variância (ANOVA) para umidade gravimétrica

<i>Fonte da variação</i>	SQ	GL	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	11,88	2	5,94	0,42	0,66	3,40
Dentro dos grupos	336,61	24	14,02			
Total	0,0027	26				

As figuras 4.33 e 4.34 mostram que nesse período os valores de umidade gravimétrica nas três áreas se equivalem, devido às precipitações pluviométricas e a elevação do nível do lençol freático em todas as áreas.

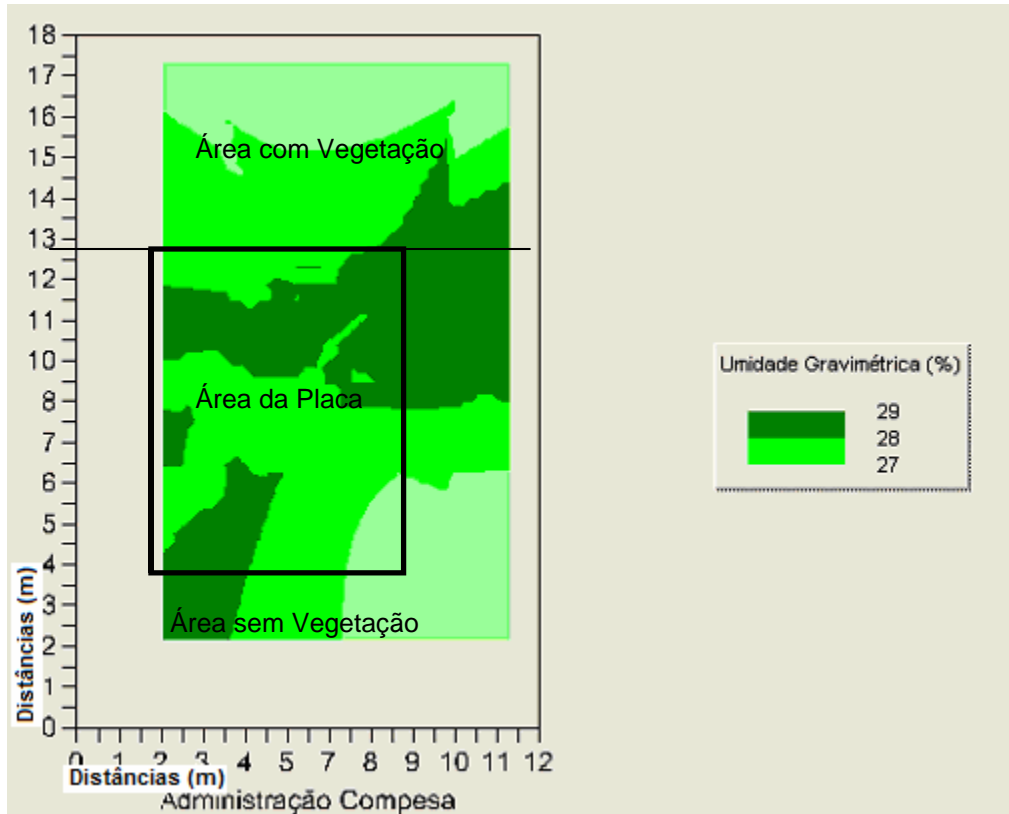


Figura 4.33 – Umidade gravimétrica por todo o campo experimental (período úmido, jul/06)

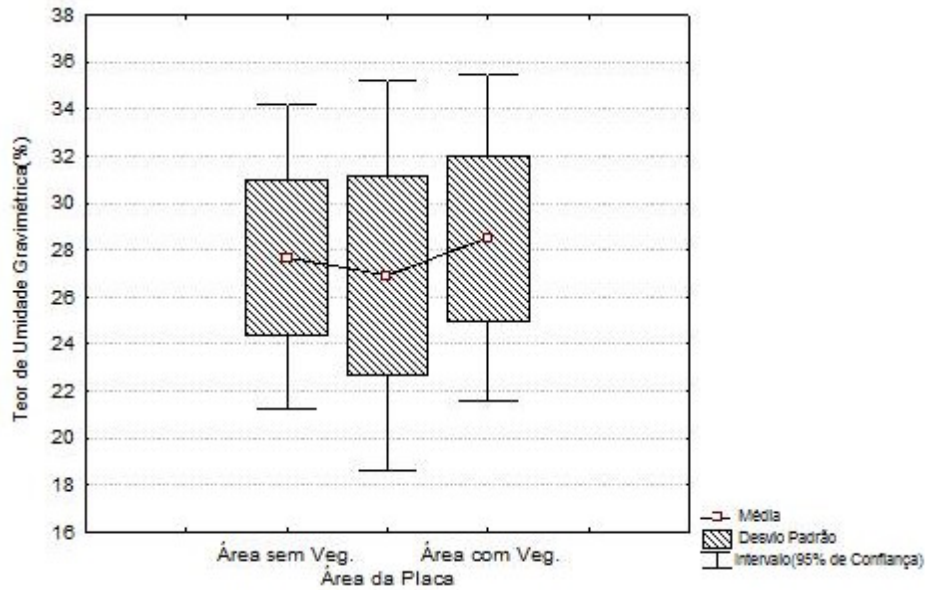


Figura 4.34 – Gráfico de dispersão da umidade gravimétrica por área (período úmido, jul/06)

No terceiro período, segundo período seco, fez-se uma análise semelhante aos dois períodos anteriores.

Verifica-se que as médias das umidades gravimétricas diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi maior do que o do F_{cri} para um grau de confiabilidade da ordem de 95%, Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Análise de variância para umidade gravimétrica

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	90,01	2	45,00	4,48	0,016	3,18
Dentro dos grupos	511,97	51	10,04			
Total	601,98	53				

Observa-se que os valores da umidade gravimétrica nas proximidades da placa de asfalto são semelhantes àqueles verificados no primeiro período seco, exceto em relação à faixa de variação, pois, essa avaliação foi realizada entre o final do período úmido e início do seco, figuras 4.35 e 4.36.

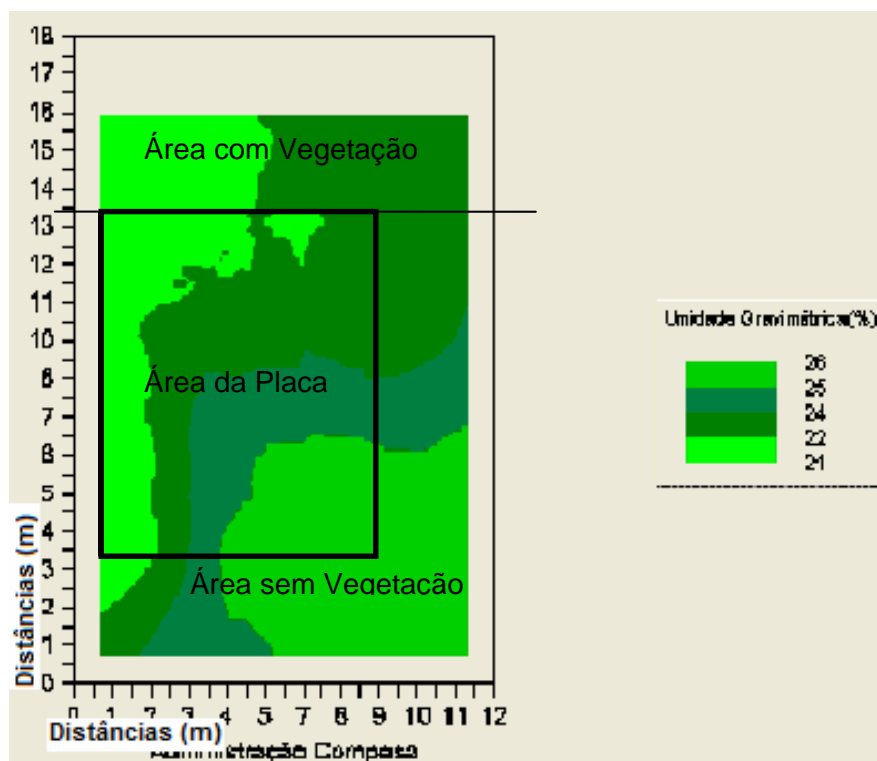


Figura 4.35 – Umidade gravimétrica por todo o campo experimental (segundo período seco, set/06 e dez/06)

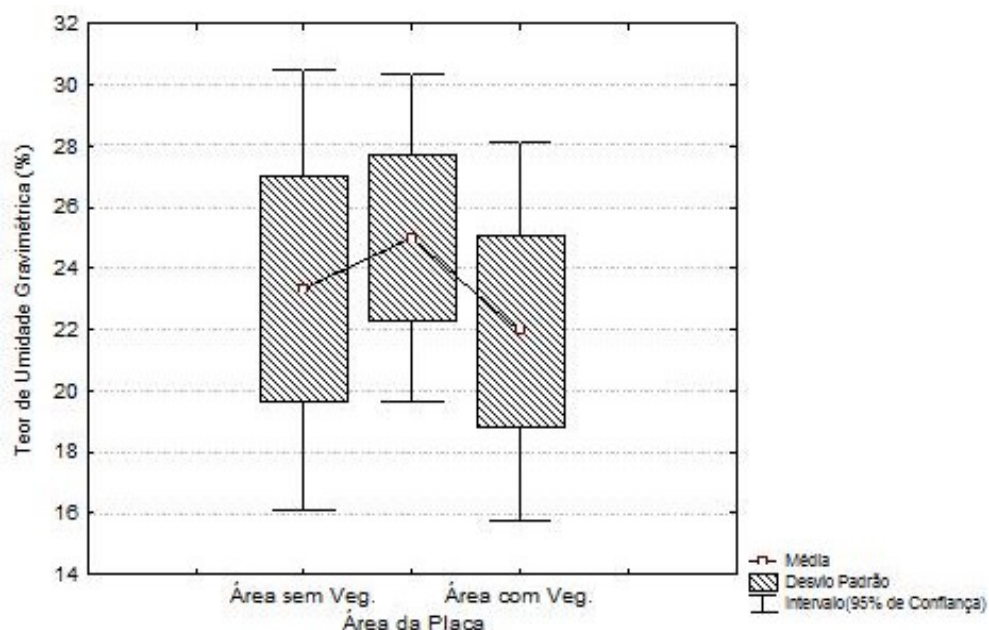


Figura 4.36 – Gráfico de dispersão da umidade gravimétrica por área (segundo período seco set/06 e dez/06).

4.8.1.1 – Qualidade da análise Geoestatística dos valores da umidade gravimétrica.

Para o estudo da Geoestatística, pelo processo de Krigagem ordinária, o modelo teórico de semivariograma que melhor se ajustou aos dados foi o esférico, observa-se que para a variável umidade gravimétrica foi obtido um bom ajuste dos valores experimentais e do modelo (Figura 4.37).

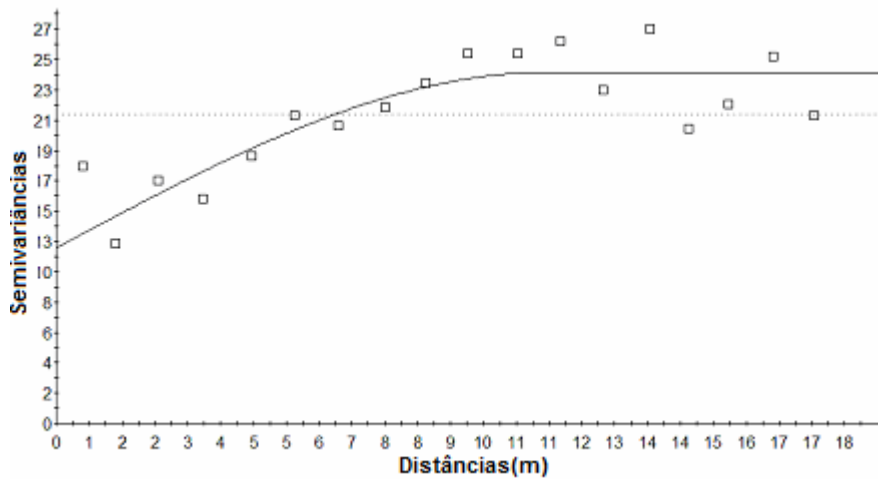


Figura 4.37 – Semivariograma experimental para a umidade gravimétrica.

A verificação do mapa de anisotropia das variâncias apresenta as menores variâncias no centro da área estudada, aproximadamente 3%, devido à proteção da placa de asfalto, esses valores chegam a ter uma variabilidade de aproximadamente 30% nas demais áreas devido a processos de evaporação, infiltração e retirada de da vegetação por parte das raízes (Figura 4.38).

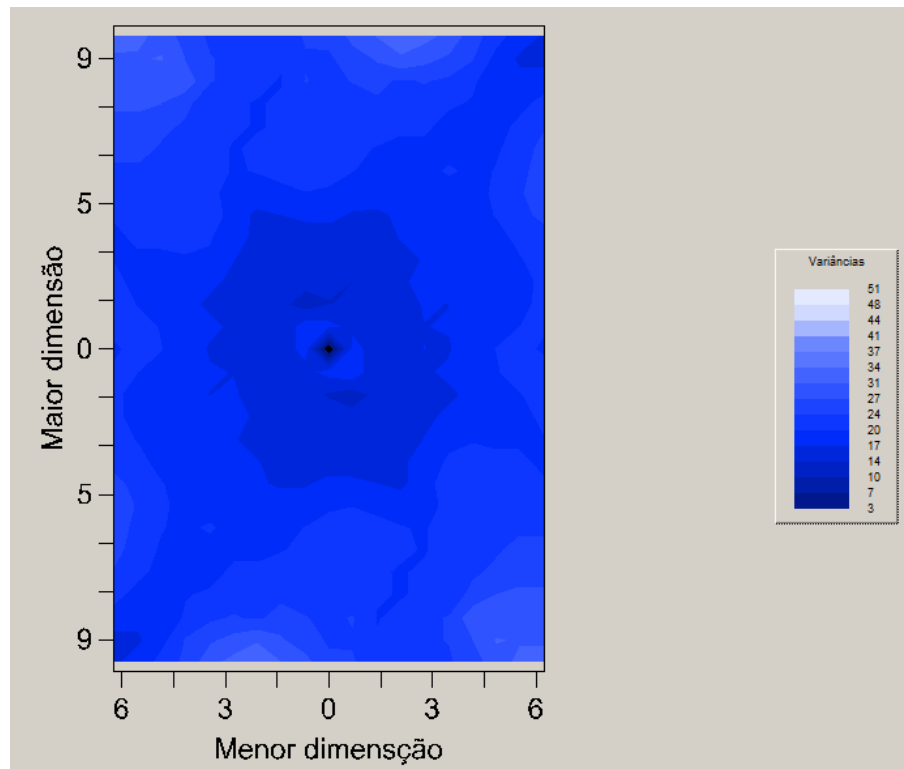


Figura 4.38 – Mapa das variâncias em toda a área para a umidade gravimétrica.

Para um indicativo da qualidade da krigagem, usa-se o gráfico de validação cruzada. A Figura 4.39 mostra o gráfico de validação cruzada para a krigagem ordinária realizada no atual estudo. Observa-se que apesar das altas dispersões apresentadas em todo o campo experimental, a diferença entre os valores reais e estimados é considerada boa, pois apresenta um coeficiente de correlação de 0,70, ou seja, aproximadamente 70% da variabilidade de x é explicado pelos valores do modelo teórico y .

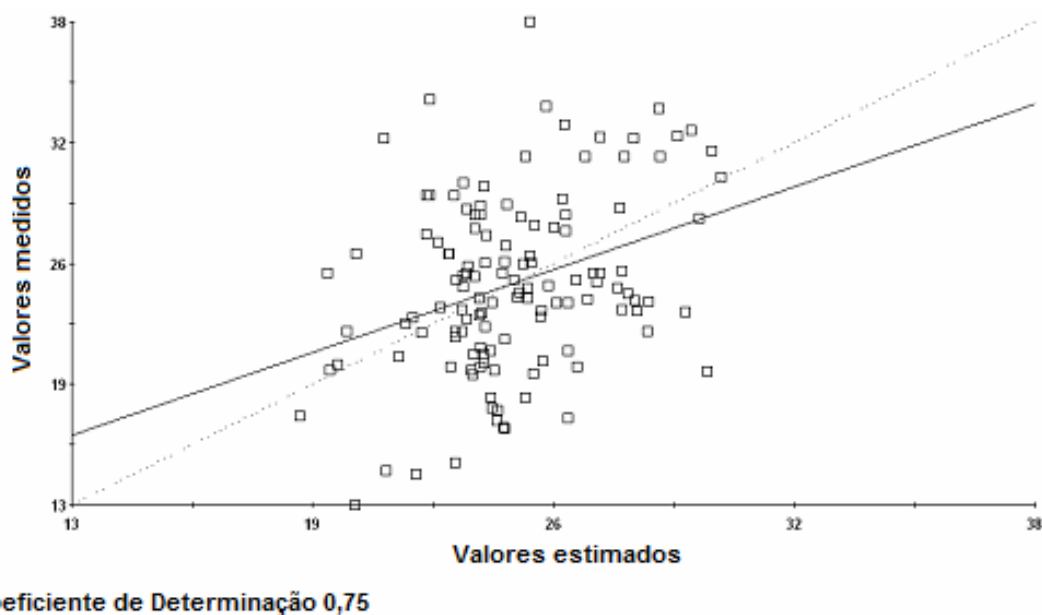


Figura 4.39 – Validação cruzada para os valores da umidade gravimétrica

4.8.1.2- Considerações sobre o estudo realizado

Como a construção da placa foi realizada no final do período úmido, o solo sob a placa reteve a umidade do solo abaixo da mesma, devido à proteção contra a evaporação e infiltração. Com relação à mudança de umidade entre as diversas áreas estudadas se deve a alguns fatores:

a) Em relação ao lado sem vegetação, a água do solo é retirada pelo processo de evaporação devido à incidência direta dos raios solares. E o aumento da umidade gravimétrica se deve a precipitação com as conseqüentes infiltrações;

b) A área da placa tem em toda sua extensão a proteção contra a incidência direta dos raios solares e infiltrações, portanto, consegue reter a água do solo que existia abaixo da mesma no período de construção (fim do período chuvoso) e evitar grandes variações de umidade e sucção matricial;

c) Em relação ao lado com vegetação, devido à retirada de água do solo pelas raízes da vegetação, prevalece os gradientes de sucção. Com a regularidade das chuvas e o processo de infiltração, essa sucção reduz;

d) No limite entre a placa de asfalto e área sem vegetação, observam-se pequenas variações de umidade, prevalecendo aí o efeito da cobertura da placa e o deslocamento de água no sentido da área sem vegetação, resultado do aumento de sucção nessa área;

e) No limite entre a placa de asfalto e a área com vegetação, devido aos efeitos da sucção das raízes no período seco o solo apresenta grandes variações volumétricas. O deslocamento de água se dá no sentido da área com vegetação por gradiente de sucção;

f) Em relação às duas laterais restantes, ocorre maior umidade em um dos lados, devido ao fluxo de água através da superfície de talude “descendente”, próxima à área da estação, enquanto, no lado oposto, a umidade é igual ou maior que a da placa, haja vista, que existe um talude “ascendente”, havendo, portanto, uma alimentação de água nas proximidades devido ao fluxo por energia potencial gravitacional.

4.8.2 – Análise Estatística do Comportamento da Sucção Matricial.

Analisando os resultados das figuras 4.40 a 4.42 realizadas por processo de krigagem simples usando-se a sucção matricial, observa-se que o comportamento das diferentes áreas é semelhante aquele estudado no item 4.8.1, estudo realizado com uso da umidade gravimétrica. Ou seja, abaixo da placa de asfalto observa-se menores valores de sucção matricial com menor dispersão. Na área com vegetação maiores valores absolutos da sucção matricial e maiores dispersões. Já na área sem vegetação observam-se valores intermediários.

Analisando a escala de valores absolutos observa-se que no primeiro período seco os valores de sucção variaram de 3162 a 650 kPa, no período úmido essa variação foi de 421 a 231 kPa. Já no segundo período seco observa-se uma variação de 1703 a 473 kPa, caracterizando dessa forma um comportamento cíclico. O tipo de cobertura age, diferenciando os valores absolutos da sucção matricial em toda a área, no período seco. Já no úmido devido a ascensão do lençol freático há uma equiparação desses valores em toda a área.

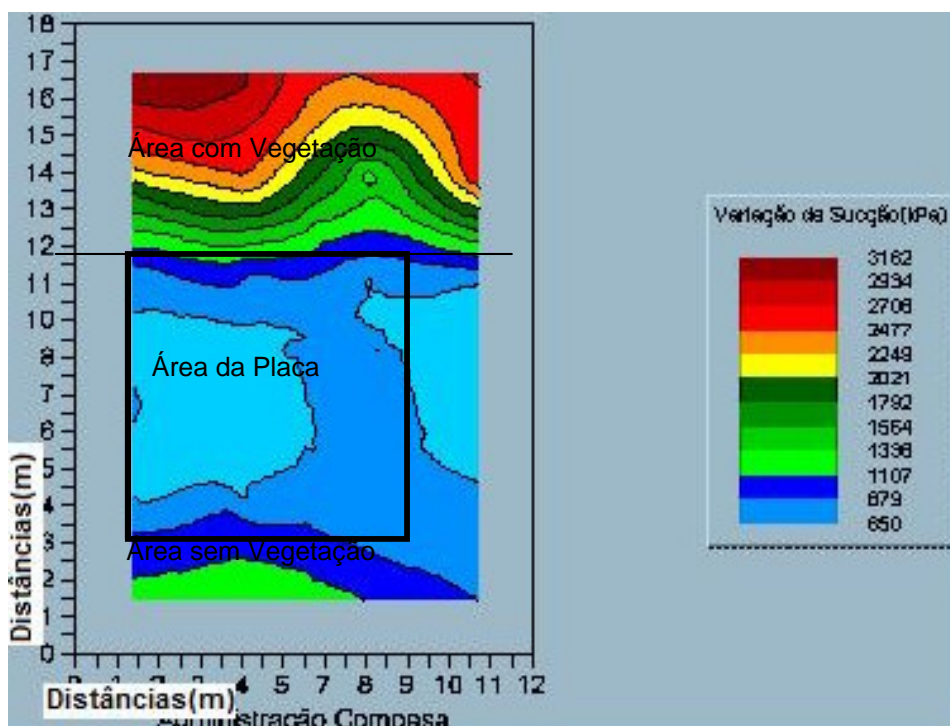


Figura 4.40 – Valores médios da sucção matricial no primeiro período (seco).

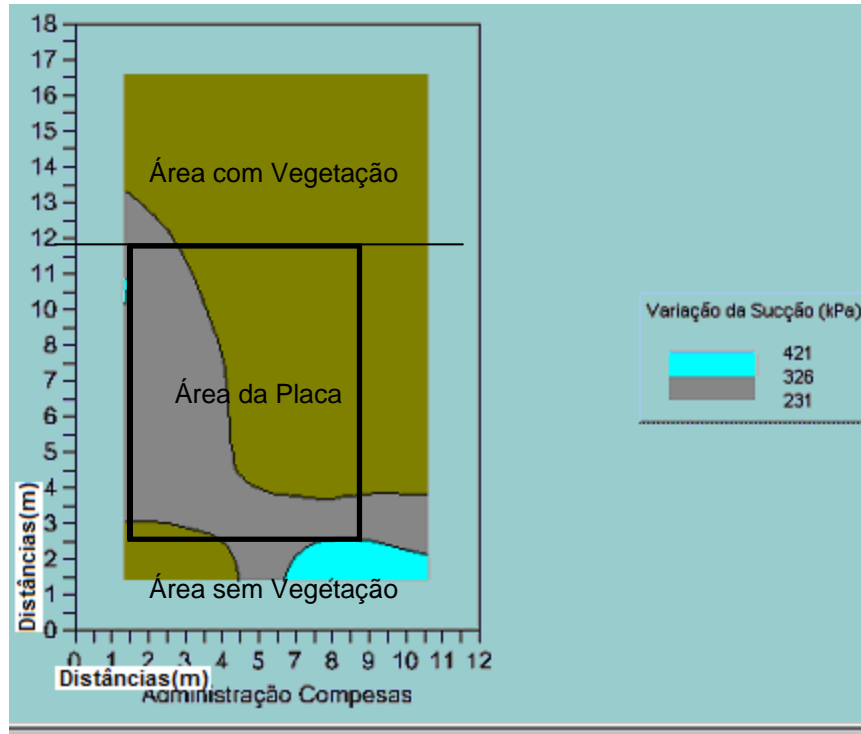


Figura 4.41 – Valores médios da sucção matricial no segundo período (úmido).

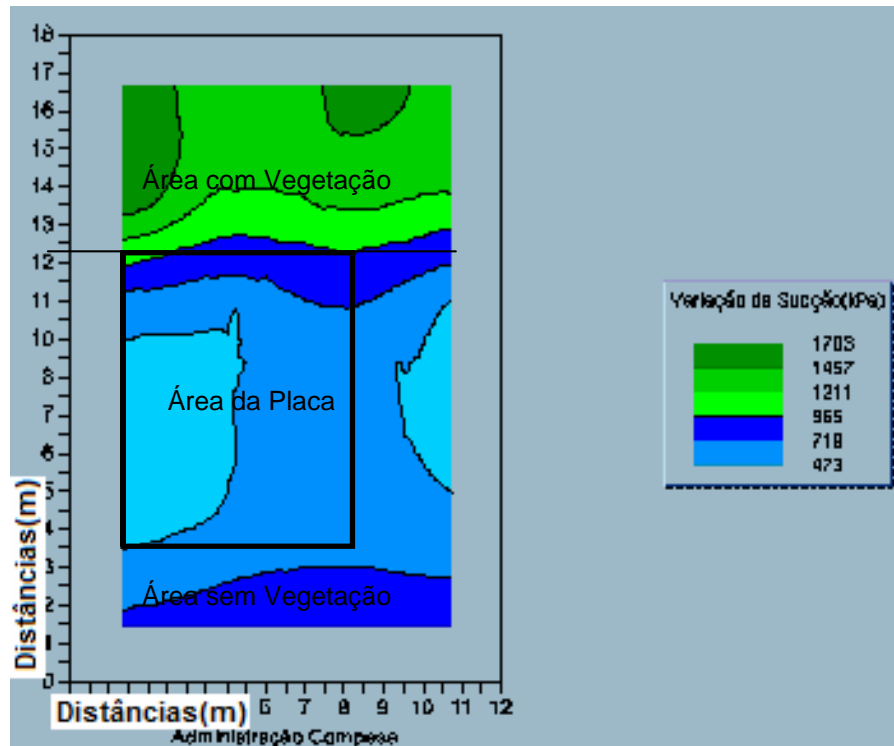


Figura 4.42 – Valores médios da sucção matricial no terceiro período (seco).

4.8.2.1- Verificação do gradiente de sucção matricial em todo campo nos períodos úmido e seco.

Para uma verificação do comportamento da sucção matricial em todo o campo experimental, dividiu-se o período de monitoramento em duas partes, período seco, composto das amostragens realizadas nesse período (dez/05; mar/06; set/06/ dez/06) e período úmido (jul/06).

As figuras 4.43 e 4.44 mostram que durante o período úmido a contribuição da ascensão do lençol freático anula o efeito do tipo de cobertura, pois a atividade das raízes da vegetação e a evaporação são reduzidas, desta forma, não se gera grandes gradientes de sucção nas áreas e, por conseguinte, não há grandes variações das umidades volumétricas.

Já no período seco, os processos de evaporação e evapotranspiração, bem como a retenção da água sob a placa de asfalto, geram grandes gradientes de sucção e como conseqüência observa-se grandes variações volumétricas, principalmente na área com vegetação e limite entre placa e área vegetada.

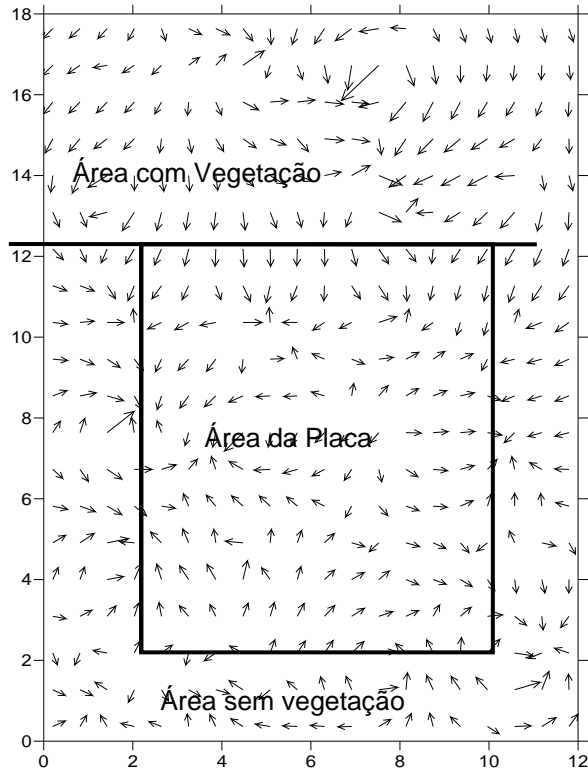


Figura 4.43 – Gradiente de sucção para o período úmido (jul/06).

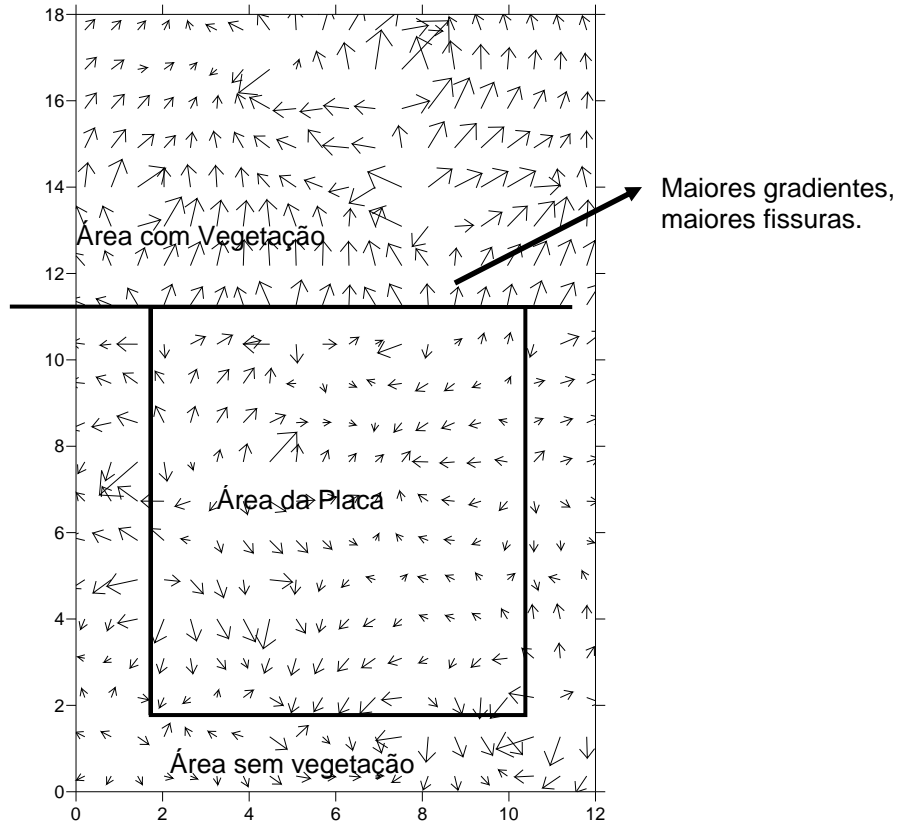


Figura 4.44 – Gradiente de sucção matricial para o período seco (dez/06, mar/06, set/06 e dez/06).

4.8.3 – Análise do valor mediana da sucção matricial por campanha de ensaio.

A Figura 4.45 apresenta o comportamento da sucção matricial em todo o período de monitoramento, foi utilizada a medida de tendência central mediana, pois essa medida não é influenciada por valores extremos. O comportamento da sucção matricial mostra uma mediana dos valores muito próxima entre as áreas sem vegetação e a placa de asfalto, todavia uma maior dispersão dos valores na área sem vegetação devido à influência dos processos de infiltração e evaporação. Para a área com vegetação, os valores absolutos e a dispersão estão muito acima das outras duas áreas devido às atividades das raízes da vegetação.

Na área sem vegetação, o valor mediano da sucção matricial se manteve em torno de 500 kPa. Já na área da placa de asfalto, o valor mediano da sucção matricial foi praticamente igual ao da área sem vegetação (500 kPa), devido ao efeito de cobertura do solo pela placa de asfalto, a dispersão é bem menor.

Para a área com vegetação, a mediana da sucção apresenta um valor aproximado de 1600 kPa e dispersão bastante elevada, o que leva a concluir que a vegetação próxima de edificações em solos ativos pode causar danos irreparáveis.

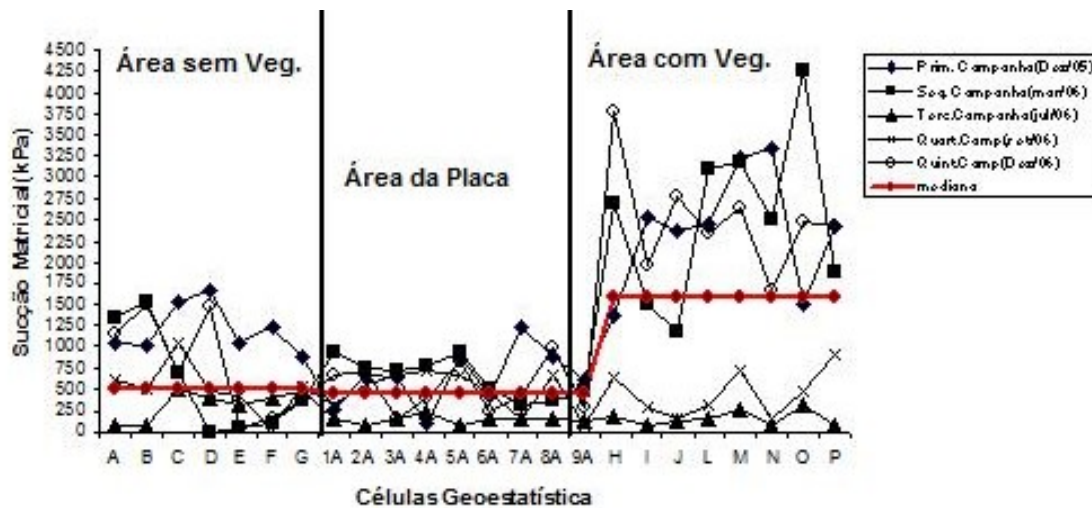


Figura 4.45 – Valores da sucção matricial por período.

4.9 – Variações Volumétricas

4.9.1 – Deslocamento vertical superficial por toda a área

Para o estudo da variação volumétrica, foram instaladas 36 placas superficiais para medidas dos deslocamentos verticais. Para cada área em estudo, foi considerado o deslocamento vertical resultante da soma dos valores máximos de expansão e de contração. A Figura 4.46 mostra as fissuras resultantes dos deslocamentos verificados no limite entre a placa e a área com vegetação, resultado da intensa variação volumétrica verificada nas bordas da placa.

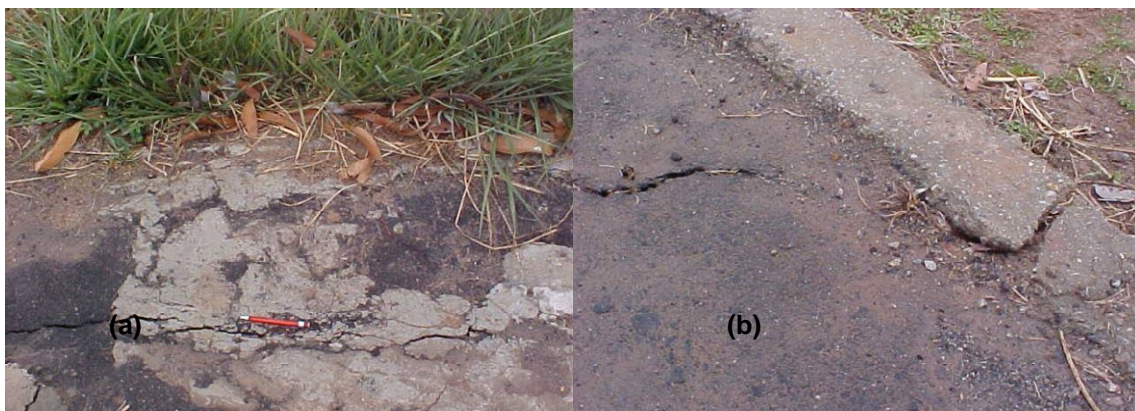


Figura 4.46 – Fissuras: (a) limite placa-área com vegetação, (b) limite placa-área sem vegetação.

As figuras 4.47 e 4.48 apresentam os valores da amplitude (diferença entre o valor máximo vertical ascendente e descendente) e dos deslocamentos verticais das placas superficiais de deslocamento vertical observado em todo o período, em relação às diferentes áreas de estudo. Onde se verifica maior dispersão nos valores da borda da placa localizada no limite da área com vegetação, devido à retirada de umidade dessa área por parte das raízes da vegetação.

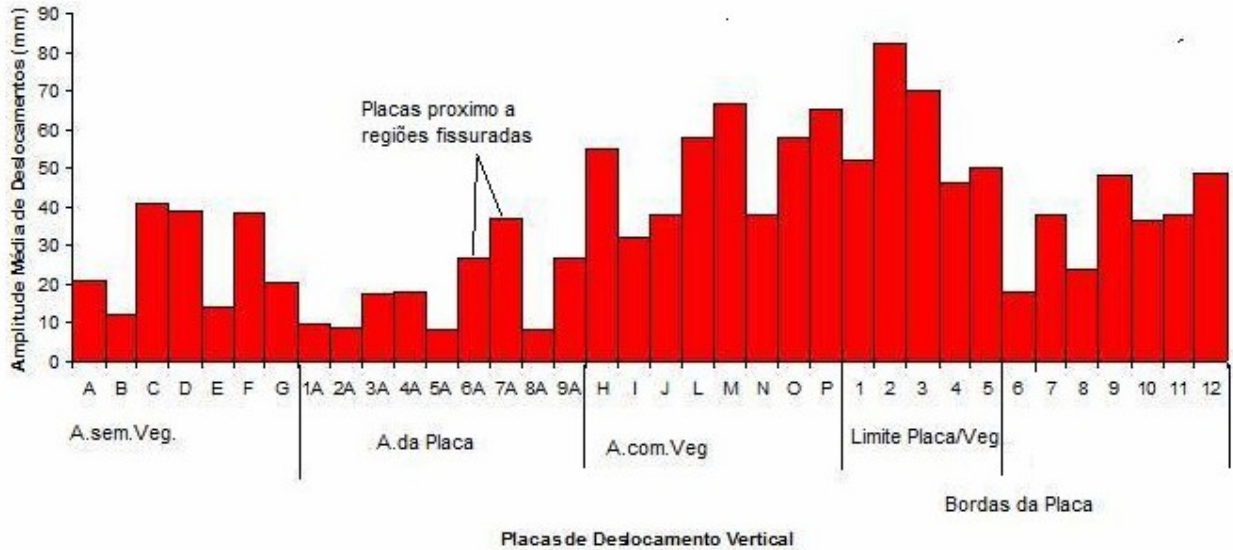


Figura 4.47 – Variação volumétrica média em função da localização da placa.

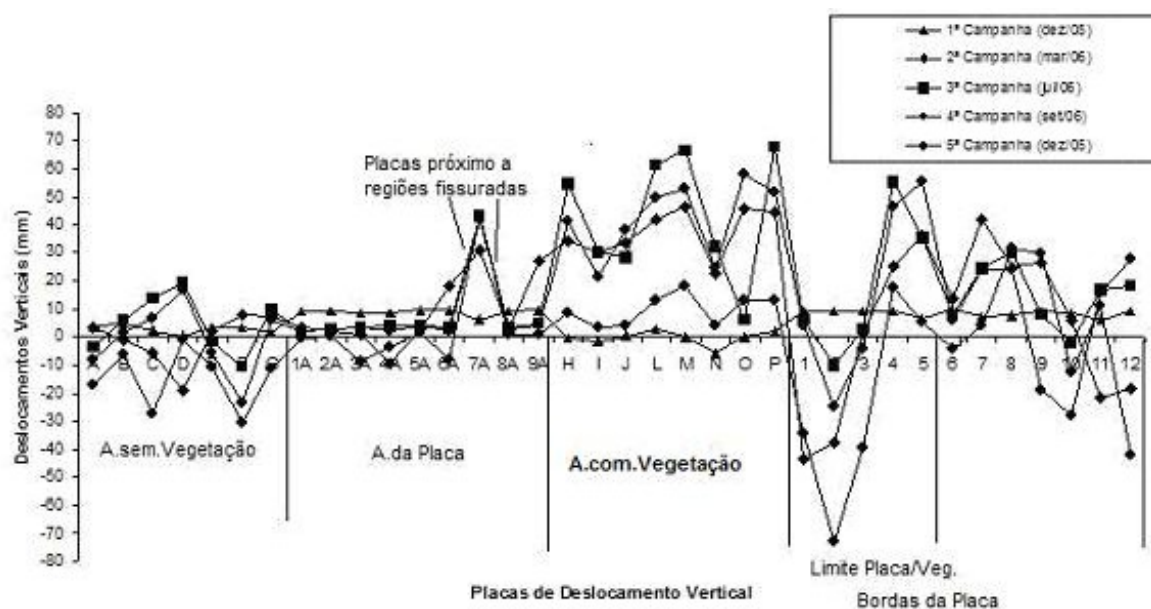


Figura 4.48 – Deslocamentos verticais superficiais medidos.

Na Tabela 4.23 são apresentados os valores descritivos referentes ao comportamento de deslocamento vertical observado nas placas superficiais.

Para uma avaliação numérica a respeito do deslocamento vertical procedeu-se uma análise de variância, com base nas seguintes hipóteses de teste:

- Objetivo: testar o efeito do nível de umidificação e o efeito de borda nos deslocamentos médios;
- Variável resposta: deslocamentos médios gerais em cada placa de deslocamento superficial;
- Tratamento: Três áreas com diferentes tipos de cobertura e efeito borda;
 - Área 1 – sem vegetação (72 m²);
 - Área 2 - placa de concreto asfalto (72 m²);
 - Área 3 - com vegetação (72 m²);
 - Borda 4 - perímetro das bordas da placa de asfalto (34 m).
- Unidade de Amostragem: áreas individuais;

- Repetições: sete na área (1); nove na área (2); oito na área (3) e doze nas bordas da placa (4).
- Hipóteses: H_0 (hipótese nula) todas as médias são iguais;
 H_1 (hipótese alternativa) pelo menos uma média difere;
 $\alpha = 0,05$ (nível de significância de 5% ou 95% de confiança).

Verifica-se após a análise estatística de variância que as médias diferem estatisticamente, pois, o valor do F_{cal} foi maior do que o do F_{cri} . Portanto, o grau de confiabilidade é de 95% de que as médias das áreas não são iguais (Tabela 4.24).

Um teste para a determinação dos valores de maior módulo (Tukey) foi realizado nos dados em estudos e têm seus valores mostrados na Tabela 4.25. Pode-se afirmar estatisticamente que existe igualdade, de deslocamentos verticais, de valores entre as placas de deslocamento vertical das áreas (1) e (2) e, também, entre as áreas (3) e na borda (4).

Tabela 4.23 – Valores médios das variações dos deslocamentos verticais obtidos.

VALORES MÉDIOS DO DESLOCAMENTO DAS PLACAS (mm)				
	Área sem vegetação	Área da Placa	Área com Vegetação	Bordas da Placa
Média (mm)	26,50	17,90	51,31	45,90
D. Padrão (mm)	12,40	10,20	13,51	17,70
Máximo (mm)	41,00	36,90	66,60	81,90
Mínimo (mm)	12,40	8,30	31,90	17,90
Amplitude (mm)	28,60	28,60	34,62	64,00

Tabela 4.24 – Análise de variância para os deslocamentos verticais medidos.

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	Valor P	Fcrítico
Entre grupos	66,46	3	22,15	10,94	$4,2 \times 10^{-5}$	2,90
Dentro dos grupos	64,79	32	2,02			
Total	131,25	35				

Tabela 4.25 – Teste Tukey para a variação de deslocamento vertical.

	Deslocamento Vertical	Níveis de Igualdade	
Área	Valor médio (mm)	1	2
Área sem vegetação	26,50		
Área da Placa	17,90		
Área com vegetação	51,30		
Bordas da placa	45,90		

A Figura 4.49 mostra um diagrama de dispersão da diferença de amplitude dos deslocamentos e o intervalo de variação com uma confiança de 95%. Nota-se uma maior magnitude de deslocamento nas placas da área com vegetação e das bordas da placa de asfalto, comprovando os resultados apresentados anteriormente.

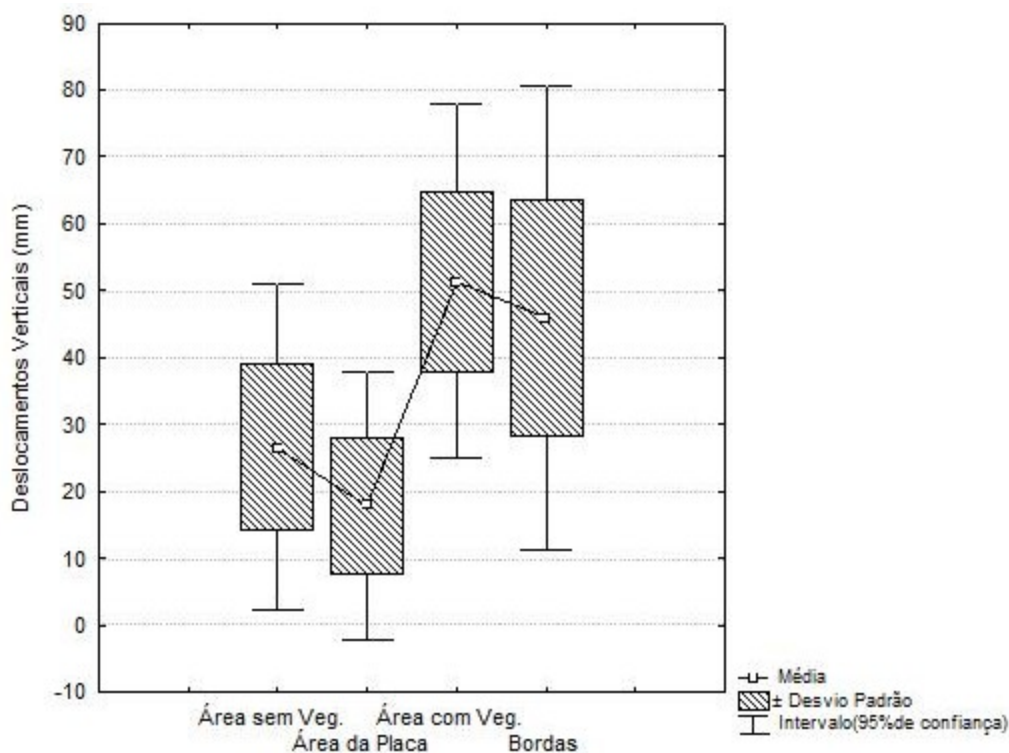
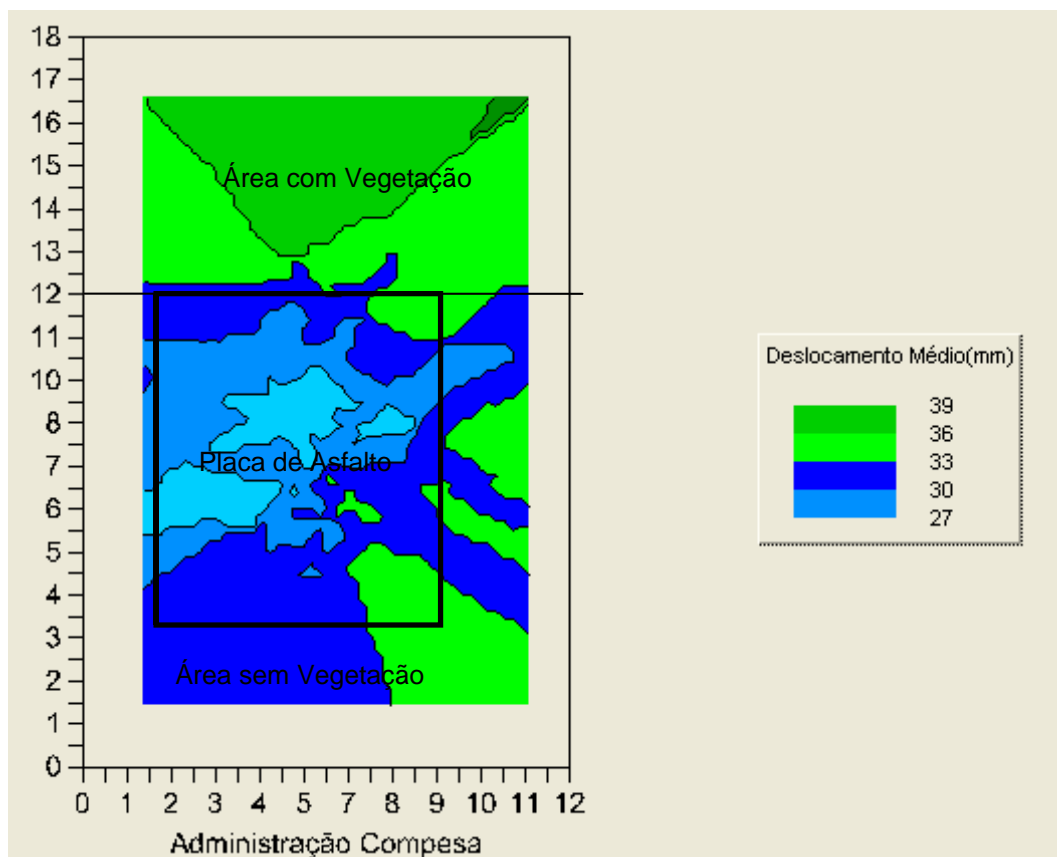


Figura 4.49 – Dispersão dos valores médios de variação do deslocamento vertical

Uma visualização das informações das diferentes áreas em relação ao deslocamento vertical é apresentada na Figura 4.50. Observa-se uma estabilização dos valores de deslocamento vertical abaixo da placa, conseqüência da retenção de umidade devido à pequena variação da temperatura abaixo da placa de asfalto, mais precisamente no centro.



Figuras 4.50 – Curvas de contorno das variações de deslocamento vertical obtido.

4.9.1.1 – Análise da qualidade do estudo geoestatístico

Para o estudo da Geoestatística, pelo processo de Krigagem ordinária, o modelo teórico de semivariograma que melhor se ajustou aos dados foi o esférico, observa-se que apesar da quantidade de pontos não ter sido muito alta, 36 pontos, foi obtido um bom ajuste dos valores experimentais e do modelo (Figura 4.51).

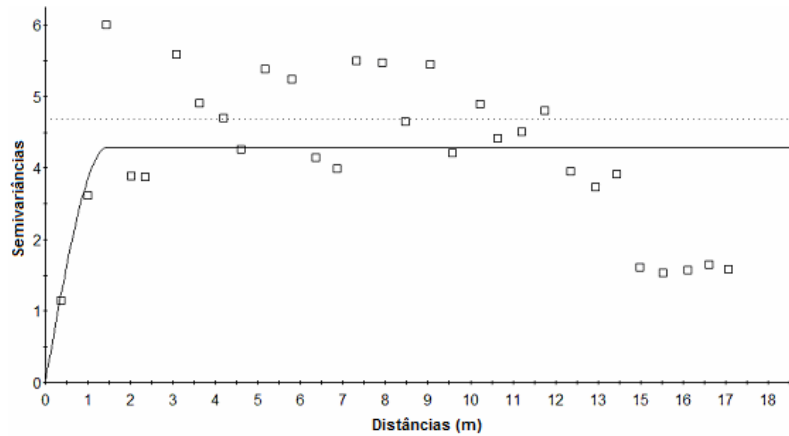


Figura 4.51 – Semivariograma experimental para os deslocamentos médios

A verificação do mapa de anisotropia das variâncias apresenta as menores variâncias no centro da área estudada devido à proteção da placa de asfalto, esses valores aumentam nas demais áreas devido a processos de evaporação, infiltração e retirada da água pela vegetação. Devido ao alto valor das variações e sucção matricial, as áreas sem vegetação e principalmente as bordas e área com vegetação apresentaram grandes variações volumétricas, e como consequência, grandes fissuras (Figura 4.52)

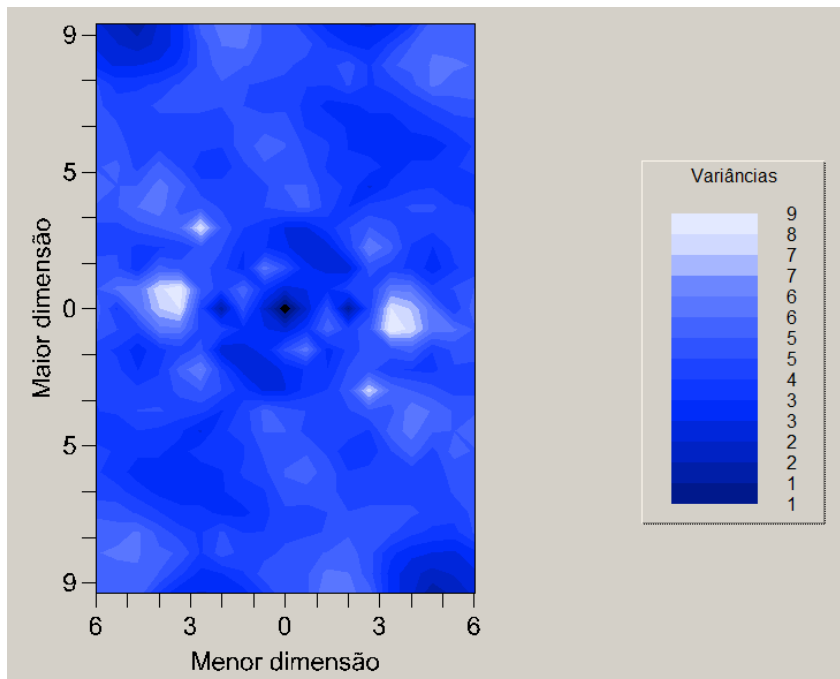


Figura 4.52– Mapa das variâncias em toda a área para os deslocamentos médios

A área sem vegetação apresentou maior contração e levantamento em relação à área da placa. Isso se deve aos aspectos referentes à evaporação e infiltração, que geram diferentes valores de sucção dentro da própria área.

Em relação à área da placa de asfalto, os valores de deslocamento têm amplitude baixa e pequena dispersão, pois a proteção contra a evaporação e a infiltração mantém a umidade aproximadamente constante.

A área com vegetação apresentou maior contração e levantamento do que a área da placa, devido principalmente aos processos de evapotranspiração e infiltração, gerando grandes dispersões de sucção dentro da área e um deslocamento da água por sucção das raízes da vegetação.

Com o objetivo de verificar as modificações volumétricas ocorridas no período que compreendeu todo o processo de amostragem indeformada, utilizou-se a krigagem ordinária para a média dos deslocamentos de cada uma das campanhas. A Figura 4.53 mostra toda a área ensaiada. Observa-se que as maiores variações de volume ocorrem na área sem vegetação e o maior responsável por tais variações são as dispersões da sucção matricial existentes na própria área. Uma observação mais detalhada mostra que essas variações intensificam-se justamente nos limites entre as áreas, o que mostra o limite entre as áreas de diferentes tipos de cobertura são locais críticos para as edificações. Os maiores deslocamentos observados, responderam pelas maiores fissuras na placa, a fronteira mais afetada foi aquela entre a placa de asfalto e a área com vegetação.

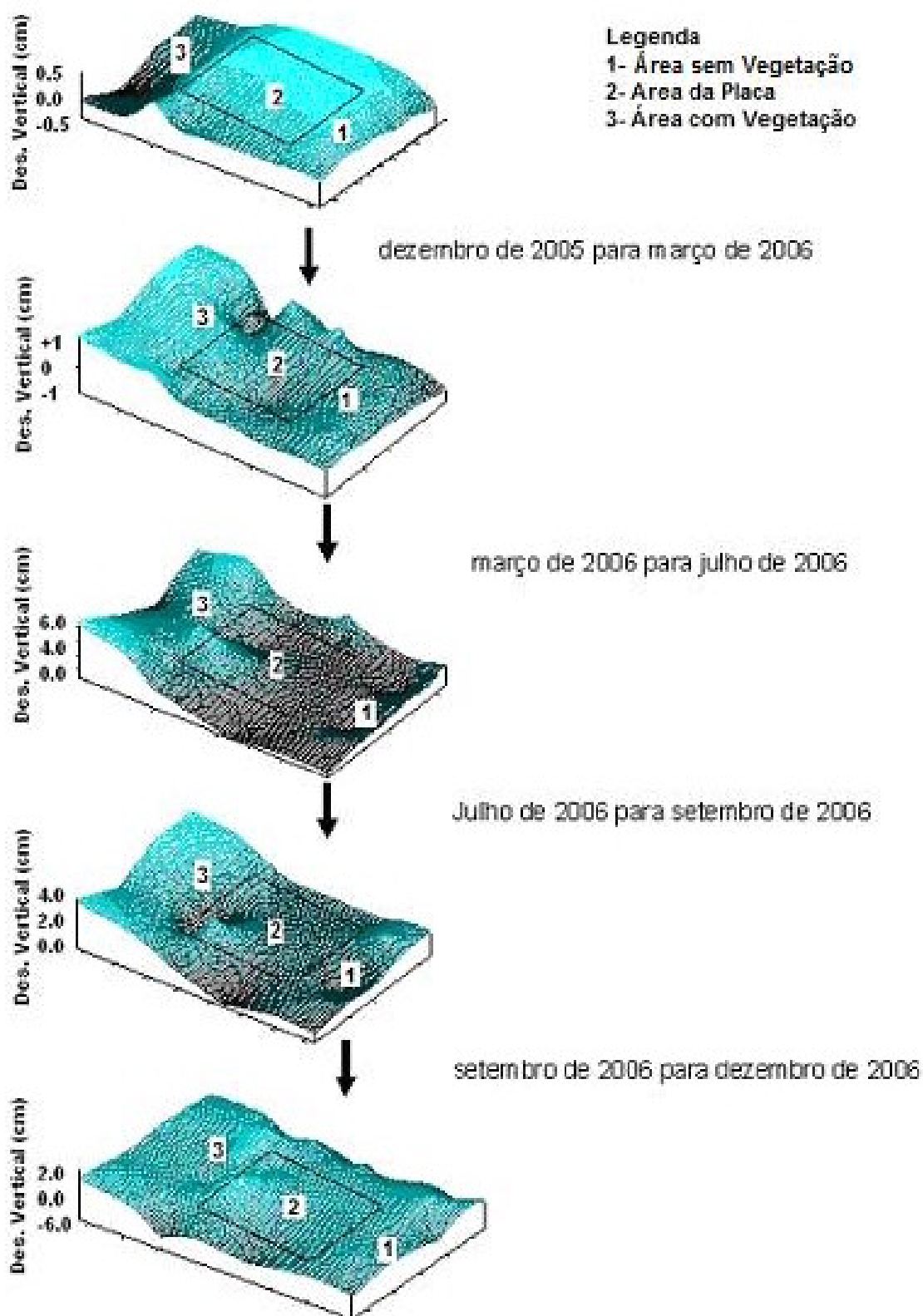


Figura 4.53 – Deslocamentos verticais em todo o plano do campo experimental.

4.10 – Distância de Dependência Espacial

4.10.1 – Dependência espacial da umidade gravimétrica (Barreira de proteção horizontal)

Para a estimativa da distância de dependência espacial, foi estimado o semivariograma para os valores de umidade gravimétrica observadas a 1,5 metros abaixo da área da placa de asfalto. Foram utilizados os valores de umidade obtidos nas cinco campanhas de ensaio desenvolvidas durante o período de monitoramento da área experimental. A Figura 4.54 apresenta o semivariograma, observa-se um bom ajuste para o modelo teórico esférico e um alcance de 1,25 metros, o que significa que para a proteção das bordas de uma edificação, nesse tipo de solo, é necessária a impermeabilização por meio de uma barreira horizontal de 1,25 metros para evitar as variações bruscas de umidades nas bordas da edificação. A maior função destas barreiras seriam deslocar as variações de umidades para longe das bordas da placa evitando fissuras.

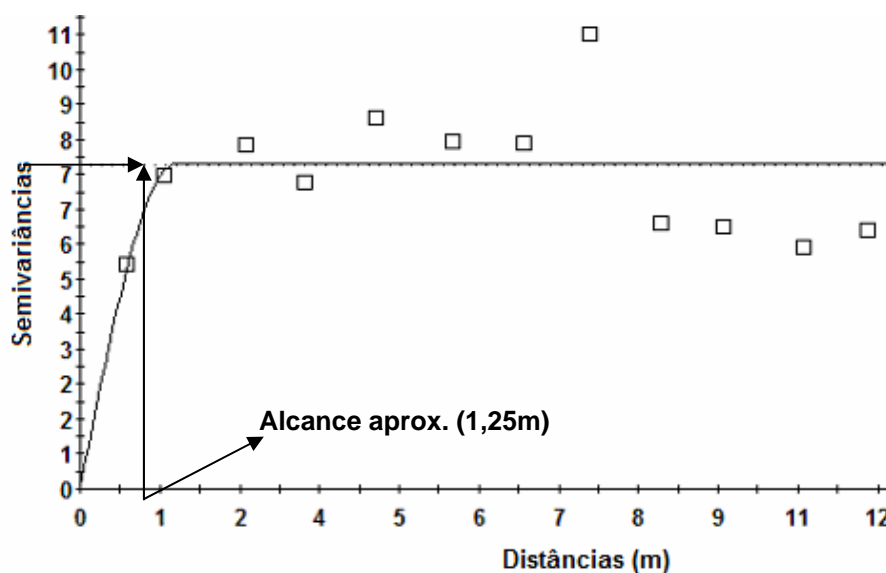


Figura 4.54 – Semivariograma para a umidade gravimétrica.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 – Conclusões

Os resultados das atividades da investigação realizada e apresentados ao longo dos capítulos anteriores permitem chegar as seguintes conclusões:

5.1.1 - Metodologia de trabalho

- a) O método de trabalho adotado, com atividades integrais de ensaios, medidas a cada três meses e leituras de deslocamento vertical, nível de lençol freático e medidas de umidades gravimétrica, volumétrica e do grau de saturação a cada mês se mostrou adequado para o objetivo da pesquisa desenvolvida;
- b) O processo de amostragem indeformada “shelby” utilizando a cravação quase estática mostrou-se eficaz pela quantidade, praticidade, versatilidade e pela recuperação das amostras extraídas;
- c) O uso da sonda de nêutrons mostrou-se eficaz e eficiente para o que foi proposta, inclusive apresentando um comportamento semelhante ao observado para as umidades gravimétrica, volumétrica e do grau de saturação obtido pela amostras indeformadas;
- d) A técnica do papel de filtro, como já comprovado em diversas pesquisas, com o solo estudado, cite-se Justino da Silva (2001), é simples, barata e confiável e se mostrou adequada na determinação da sucção matricial;
- g) O estudo estatístico descritivo seguido da análise de variância conferiu um aspecto de confiabilidade às conclusões, chegando a ser adotado um nível de confiança de 95% de certeza, valor esse considerado muito bom para análise da variabilidade dos dados em geotécnica;

- h) O estudo da variabilidade espacial apresentou a tendência de comportamento de variáveis importantes como sucção e variação volumétrica, inclusive os aspectos de interação entre os efeitos;
- i) O estudo de análise multivariada (Análise em componentes principais – A. C. P), mostrou que para se controlar a variação volumétrica, há a necessidade do controle da variável sucção matricial, pois existe uma correlação forte e positiva entre essas variáveis;
- j) O estudo da infiltração e evaporação mostrou-se muito importante na verificação da variação de umidade, pois compreendem os elementos de troca de umidade entre solo e atmosfera, entrada e saída de água no solo;
- l) O uso da geoestatística na visualização do comportamento da umidade, sucção matricial, temperatura e da variação volumétrica mostrou ser uma alternativa viável, já que diferente de algumas simulações numéricas, não requer a necessidade de parâmetros de difícil obtenção;
- m) O estudo do semivariograma para a determinação do tamanho mínimo das barreiras horizontais apresentou-se como uma alternativa interessante e real para a estimativa de tais valores;

5.1.2 – Caracterização física e mineralógica

- a) A caracterização física mostrou um solo com um alto percentual de finos e uma plasticidade considerada característica de solo com propriedades expansivas, como já comprovado por Justino da Silva, (2001);
- b) O índice de atividade se apresentou com um valor médio;
- c) As três áreas não apresentaram diferença estatística significativa para os limites de *Atterberg*, portanto pode-se afirmar com 95% de certeza que essa variável tem peso estatisticamente igual para toda a área de estudo;
- d) A difração de raios-X, apontou a presença de argilo-mineral da família esmectita (argilo-mineral expansivo);
- e) O ensaio de expansão livre mostrou um solo com alto poder de expansão;

5.1.3 – Sucção matricial

- a) A sucção matricial apresentou-se de forma estável sob a placa de asfalto e uma alta dispersão na área com vegetação mostrando a nocividade da vegetação nas proximidades de edificações assentes neste tipo de solo;
- b) Os maiores valores de sucção matriciais foram observados na área com vegetação, devido aos processos de transpiração da vegetação;
- c) A área sem vegetação apresentou valores intermediários de sucção matricial com dispersões médias, devido à exposição aos processos de infiltração e evaporação;
- d) Para o controle da sucção é aconselhável evitar vegetação nas bordas das edificações e a construções de barreiras horizontais para deslocamento dos efeitos nocivos da flutuação de umidade das bordas das fundações das edificações para a extremidade das barreiras;

5.1.4 – Curva de retenção

- a) As curvas de retenção apresentaram aspectos de um solo argiloso com alta capacidade de retenção de umidade;
- b) Observou-se um ponto de entrada de ar por volta de 2000kPa e uma umidade volumétrica residual por volta de $12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, valor característico de argila com grande número de finos;
- c) A forma da curva caracteriza-se por um solo pré-adensado;
- d) Os dados experimentais apresentaram um bom ajuste ao modelo de van Genuchten (1980) com uso das hipóteses de Mualem (1976).

5.1.5 – Temperatura

- a) A temperatura apresentou valores médios menores na área sob a placa, devido à proteção da irradiação solar, valores maiores na área sem vegetação e intermediários na área com vegetação, ocasionados pelos processos de reflexão e refração gerados pela vegetação;

5.1.6 – Sonda de nêutrons

- a) A sonda de nêutrons apresentou valores confiáveis para as umidades gravimétrica, volumétrica e o grau de saturação, valores que apresentaram o mesmo comportamento das amostragens indeformadas shelby;
- b) Uma grande vantagem dessa técnica é a possibilidade do monitoramento de determinadas variáveis sem a necessidade de ensaios destrutivos;
- c) As calibrações devem prever as maiores diferenças de umidade possível, sob a área estudada, para evitar ao máximo as extrapolações nos valores da reta de regressão linear simples.

5.1.7 – Análise em componentes principais (A. C.P)

- a) A análise em componentes principais (A. C. P) mostrou a existência de dois grupos distintos responsáveis pela variação de volume do solo;
- b) Verificou-se que a sucção matricial é o principal propulsor da variação de volume, portanto reduzindo a sua variabilidade, reduzem-se as variações volumétricas do solo;
- c) Mostrou que o solo em estudo tem um alto poder de contração, visto apresentar uma correlação positiva à sucção matricial e deformação volumétrica.

5.1.8 – Deslocamento vertical

- a) O Deslocamento vertical apresentou maior variabilidade nos seus valores na área com vegetação e nas bordas da placa de concreto asfáltico, devido a retirada da água do solo pelas raízes da vegetação e pelo movimento de umidade da área da placa para a área sem vegetação por gradiente de sucção.
- b) Na área da placa de asfalto houve certa estabilidade de deslocamento no centro e uma maior dispersão nas bordas, principalmente na borda que faz fronteira com a vegetação, o que leva a conclusão que a presença da vegetação para esse tipo de solo

margeando as fundações pode levar a edificação à ruína, aconselha-se à retirada da vegetação das proximidades das edificações e a construção de barreiras horizontais;

c) Os fenômenos de expansão e contração seguem uma regularidade de acordo com as estações climáticas. As variações se sucedem de forma cíclicas;

d) Com o estudo em componentes principais (A.C. P) foi possível observar a dependência entre variação de deslocamento e variação da sucção matricial, pois ambos formaram um grupo, ou seja, tiveram variabilidades muito próximas, o que leva a conclusão que para se evitar grandes variações de deslocamento deve-se controlar a sucção matricial;

5.1.9 – Comportamento da umidade e grau de saturação no tempo

a) Observa-se que durante o período em que o nível do lençol freático manteve-se alto, aproximadamente 1,0 m, o efeito tipo de cobertura não foi determinante. Apenas nos dois períodos secos com o rebaixamento do mesmo e que os processos de evaporação, evapotranspiração e retirada da água pelas raízes da vegetação interferiram nos valores de umidade volumétrica em cada área;

b) A evolução da umidade volumétrica no tempo mostrou que a influencia da evaporação e evapotranspiração vai até uma profundidade aproximada de 2,00 m. Isso foi possível devido à ascensão capilar da água até a superfície pela diferença de sucção matricial gerada no processo de evaporação superficial. A zona vadosa compreende desta forma, uma profundidade que vai do lençol freático até a superfície. Esse comportamento verifica-se de forma diferenciada em cada área;

c) A análise de variância para o perfil de umidade volumétrica obtida nos tubos da área experimental apresentou um comportamento bem distinto, entre eles, as menores variações ocorreram no centro da placa, umidade estática, na área com vegetação grande dispersão, característica da retirada da água pelas raízes da vegetação e efeitos de evapotranspiração, e a área sem vegetação um, valor intermediário devido aos processos de evaporação e infiltração.

d) A umidade volumétrica na fronteira placa / área sem vegetação apresentou um pequeno acréscimo durante todo o período de monitoramento o que mostra que para as

camadas superiores o gradiente de temperatura gera um deslocamento da água em forma de vapor para baixo da placa de asfalto;

e) A umidade volumétrica na fronteira placa/área, com vegetação sofre uma forte redução nos períodos secos, resultante das forças de sucção geradas pelas raízes da vegetação e como consequência grandes variações e fissuras;

5.1.10 – Comportamento da umidade e sucção no plano a 1,5 metros de profundidade.

a) A área da placa, devido à proteção contra a incidência solar direta conseguiu reter a umidade com pequenas variações ao longo da mesma;

b) A área com vegetação teve um nível térmico menor que a área sem vegetação, devido aos processos de reflexão e refração dos raios solares ao incidirem na vegetação, todavia as raízes da mesma foram responsáveis pela retirada de água do solo causando fissuras e danos à placa de asfalto;

c) Por determinados períodos observou-se um deslocamento da umidade da área sob a placa para o setor com vegetação;

d) Com o uso da estatística descritiva, análise de variância com um fator (tipo de cobertura) e da geoestatística foi possível verificar o movimento de umidade durante dois períodos secos e um úmido. O estudo inferencial conferiu uma certeza de 95% nas afirmativas;

5.1.11 – Distância de dependência horizontal

a) A geoestatística, por meio do semivariograma, pode ser usada como ferramenta para a estimativa das barreiras de proteção vertical e horizontal;

c) Para a realidade do solo estudado foi observado que uma barreira de 1,25m já é suficiente para transferir as deformações diferenciais para longe da área de borda das edificações evitando desta forma o fissuramento e ruína.

5.2 – Recomendações para Futuras Pesquisas

Como recomendações para futuras pesquisas sugerem-se um aprofundamento da atual pesquisa, com os seguintes enfoques:

- a) Desenvolvimento de parâmetros de correção da equação de Richards (1931), prevendo a deformação da matriz do solo para poder trabalhar com a transferência de umidade no solo estudado;
- b) Tentar enquadrar o deslocamento vertical do solo a um modelo de deslocamento conhecido e verificar o ajuste em cada uma das áreas;
- c) Procurar estabelecer uma relação entre parâmetros hidráulicos e variação de deslocamento com o uso da regressão múltipla em componentes principais;
- d) Monitorar campos experimentais com dimensões reduzidas para verificação do comportamento dos parâmetros hidráulicos e variação de umidade;
- e) Analisar o comportamento de compressibilidade mecânica em cada uma das três áreas;
- f) Realizar estudo semelhante para áreas menores (protótipos) com objetivo de verificar ao máximo tais variações;
- g) Realizar um estudo semelhante, todavia analisando o comportamento da transferência de umidade com a sucção matricial e osmótica para assim determinar, dentre as duas as de maior influência na transferência de umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMAYER, W. T. **Discussion of engineering properties of expansive clays.** [S.l.]: Proc. Am. Soc. Civil Eng.81, 1955. p.17-19.

ANDRADE, A. R. **Aplicação da Teoria Fractal e da Geoestatística na Estimativa da Condutividade Hidráulica Saturada e do Espaçamento entre Drenos.** 2002. 150f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias). Faculdade de Ciências Agrárias, UNESP, Botucatu.

ANDRADE, A. R. et al. Influência do Tempo de Contagem na determinação da densidade de nêutrons. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 411-415, 2001.3

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística.** Porto Alegre: Unisinos, 2003. 165p. ISBN 85-7431-171-5.

BALL, D.F. & WILLIAMS, W.M. Variability of soil chemical properties in two uncultivated brown earths. **The Journal Soil Science**, Oxford, **19**: 379-391, 1968.

BARROSO, L. P.; ARTES, R. **Análise Multivariada.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003.

BARTLETT, M.S. **Stochastic processes.** Cambridge University Press, 2nd Ed., 1966.

BASTOS, E. G. **Variação volumétrica de uma argila expansiva do litoral de Pernambuco.** 1994. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H. **Soil Physics.** 4 ed. Lodon: Wiley; Sons, 1972.

BLIGHT, G. E. **A Study of effective stresses for volume change- Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soil Beneath Covered areas-**. Austrália. 1965. p.259-269.

BLIGHT, G. E.; LYELL, K. A. **Water table depression under treed areas and swell subsequent to felling**. Proc.Int.Conf. on Expansive Soils, 5. Adelaide, 1984. p.245-249.

BRITO, C. J. F. A.; RODELLA, R. A. Caracterização morfo-anatômica da folha e do caule de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf e *B. humidicola* (Rendle) Schweick. (Poaceae). **Revista Brasil Botânica**, [S.l.], v.25, n. 2, p. 221-228, 2002.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media Hydrology Paper**. n.3., Civil Engineering Dep., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, 1964. V.92. p.61-88.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, A. P. **Estatística Básica**. 5. ed., São Paulo: Saraiva, 2006.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, Implementação e teste de procedimentos Geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING)**. 1997. 106f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. Campina Grande: Gráfica Marcone, 1997.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY; SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proc. of the Institute of Civil Engineering**. [S.l.]. 1992. n.2. p.82-89.

CHEN, F. H. **The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soil. Concluding Proc. Eng. Effects of moisture changes in soils, Int. Res. Eng. Conf. Expansive clay soils, supplementing the symposium in print**. Texas: A & M Press, 1965. p.152-171.

COSTA, S. F. **Introdução Ilustrada à Estatística**. São Paulo: Harbra, 1998. 311p. ISBN 85-294-0066-6.

CRUZ, C. D. **Aplicação de algumas Técnicas Multivariadas no melhoramento de Plantas**.1990. 188f. Tese (Doutorado em melhoramento genético). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soil**. New York: John Wiley & Sons, INC, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Canadá, 1994. p.521-532.

FREDLUND, D. G. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**. Canadá, 1979. p.121-139.

FREDLUND, D. G et al, The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. Canadá:1996. p.440-448.

GARDNER, W. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. In Highway Research Board Special Report 40. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHYSICO-CHEMICAL PHENOMENON IN SOILS. 1956 p. 78-87

GUERRA, H. O. C. **Física dos Solos**. Campina Grande: UFPB, 2000. 173.p

HAINES, W. B. The Volume-Changes associated with variations of water content in soil. **Journal of Agricultural Science**, [S.l.]: 1923. v.8. p.297-310.

HARRADINE, F.F. The variability of soil properties in relation to stage of profile development. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, **14**: 302-311, 1949.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic, 1982. 364p.

HOLTZ, W. G.; GIBBS, H. J. **Engineering properties of expansive clays**. Transact: ASCE, 1956. p. 641-677.

HOMES, R. M. **Estimation of Soil Moisture Content Using Evapotranspiration Data**. Ottawa: Queen's Printer, 1961. p. 184-196.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1969. 561p.

JOHNSON, L. D. et al. **Field test sections on expansive clays**. Conference, 3. Haifa, 1973. v.1. p.239-248.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, Ch.J. **Mining geostatistics**. Academic Press, London, 1978. 600p.

JUSTINO DA SILVA, J. M. et al. Solos Expansivos. In: GUSMÃO, A. D. et al. (Org.). **Geotécnia no Nordeste**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2005. 8. p.397 – 417.

JUSTINO DA SILVA, J. M. **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva não Saturada Submetida a Diferentes Condições Climáticas**. 2001. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

JUCÁ, J. F.T. **Ensaio de Laboratório e Monitoramento de Campo em uma Argila não Saturada**. In: COMBRAMSEF, 10, 1994, Rio de Janeiro, 1994. v.3, p. 12329-1235.

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afri.**, Johannesburg, **52**: 119-139, 1951.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. São Paulo: Unesp, 2003. 253p. ISBN 85-7139-504-7.

LEAL, F. C. **Análise Numérica de Problemas Termo-hidráulicos em meios Porosos**. 2003. Dissertação (mestrado). P.U.C, Rio de Janeiro.

LIMA, M. J. C. **Prospecção Geotécnica do Subsolo**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1983.

MAHLER, C. F.; AGUIAR, A. B. **Determinação da Permeabilidade in Situ em Aterros de Resíduos Sólidos**. CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. 2000, Porto Alegre.

MARINHO, F. A. M. **Considerações sobre o fluxo unidimensional em meio não saturado**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2., 2001, Porto Alegre.

MARINHO, F. A. M. **A técnica do Papel Filtro para medição de Sucção**. In: ENCONTRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. 1995, Porto Alegre.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage behaviour of some plastic soils**. 1994. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). University of London. Imperial College of Science, London.

MARINHO, F. A. M. **Caracterização do solo não saturado**. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. 1998, Brasília.

MEIN, R. R.; LARSON, C. L. **Modelling Infiltration During a Stesdy Rain**. [S.l]: Water Resources Research, 1973. p 384-394.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 463p.

MOREIRA, L. **Medição de Temperatura Usando-se Termopar**. [S.l]: [s.n], 2002. Disponível em: < <http://help-temperatura.com.br>>. Acessado em: 30 de Julho de 2007.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive Soils - Problems and Practice in Foudation and Pavement Engineering**. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc., 1992. 259p.

NETO, J. M. M.; MOITA, G. C. **Uma introdução a Análise Exploratória de Dados Multivariados**. Teresina,1997. Disponível em:<<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid>>. Acesso em: 09 Jul.2005.

OLEA, R. A. **Measuring spatial dependence with semivariograms**. Kansas Geol. Survey, University of Kansas, Lawrence, Kansas, 1977. (Series on Spatial Analysis nº 2)

OLEA, R. A. **Optimum mapping techniques using regionalized variable theory**. Kansas Geol. Survey, University of Kansas, Lawrence, Kansas, 1975. 137p. (Series on Spatial Analysis nº 2)

PENMAN, H. L. **Natural Evapotranspiration from Open Water, Base Soil and Grass**. London: Proc. R. Soc., 1948. p 120-145.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 253f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Texto, 2000. 247p.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de la arcillas expansivas bajo succión controlada**. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1984. 274 p.

REIS, E. **Estatística Multivariada Aplicada**. 2 ed. Lisboa: Edições Silabo, 2001.

RÖHM, S. A. **Solos não Saturados**.1993. 135f. Monografia (Especialização em Geotecnia) Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

SANTOS, M. G. **Comportamento Histerético de uma argila expansiva não saturada**. 2008. 116f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas**, vol. I, São Paulo: [s.n.],1973.

SILLERS, W. S.; FREDLUND, D. G. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering. **Canadian Geotechnical Journal**. Canadá, 2001. p.1297-1313.

SIMON, J. Curso de Estatística; Editora Atlas; 5ª edição.,1995

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soil. Washington: FHWART, 1977. p. 77-94.

TAYLOR, R. K.; SMITH, J. Engineering geology of clay mineral: swelling, shrinking and mudrock breckdown. *Clay Minerals*, 1986. p. 235-260.

TEMPANY, H. A. The shrinkage of soils. **Journalof Agricultura Science**. [S.l.],1917. v.8.p312-330.

THORNTHWAITE, C. W. **An Approach Toward a Rational Classification of Climate**. 38 v. *Geographical Review*, 1948. p 55-94.

UBALDO, M. O.; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. **Gestão de Resíduos Sólidos Geradores de Drenagem Ácida de Minas com o Uso de Coberturas Secas**. Brasília: UFRJ, 2006.

VAN GENUTCHEN, M. A close-form equation for predicting the hydraulic conditivy of unsaturated soils. **Soil Science Soc. of America Journal**. [S.l.], 1980. Vol.44. p.892-898.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; BERNARD, R. & HATFIELD, J.L. Spatial variability two transects of a bare soil. **Water Resources Research**, Washington, **18**(6): 1677-1686, 1982.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, **45**: 1040-1048, 1981.

WEBSTER, R. Automatic soil boundary location for transect data. **Mathematical Geology**, New York, **5**(1): 27-37, 1973.

WEBSTER, R. & BURGESS, T.M. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. **The Journal of Soil Science**, Oxford, **31**: 505-524, 1980.

WEBSTER, R. & CUANALO, H.E. de la C. Soil transects correlograms of north Oxfordshire and their interpretation. **The Journal of Soil Science**, Oxford, **26**(2): 176-194, 1975.

WILSON, W. G. **Soil Engineering Practice**. Geotechnical Special Publication, n°68. Edited by Sandra L. Houston and Delwyn G. Fredlund Published by the ASCE. 26f, Canadá, 1997.

WILSON, W. G. **Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems**. 1990. 464f. Tese(Doutorado em Engenharia Civil). University of Saskatchewan saskatoon, Saskatchewan, Canadá, 1990.

WITTE, R.; WITTE, S. J. **Estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 480p.

ANEXO – A (DIFRATOGRAMA)

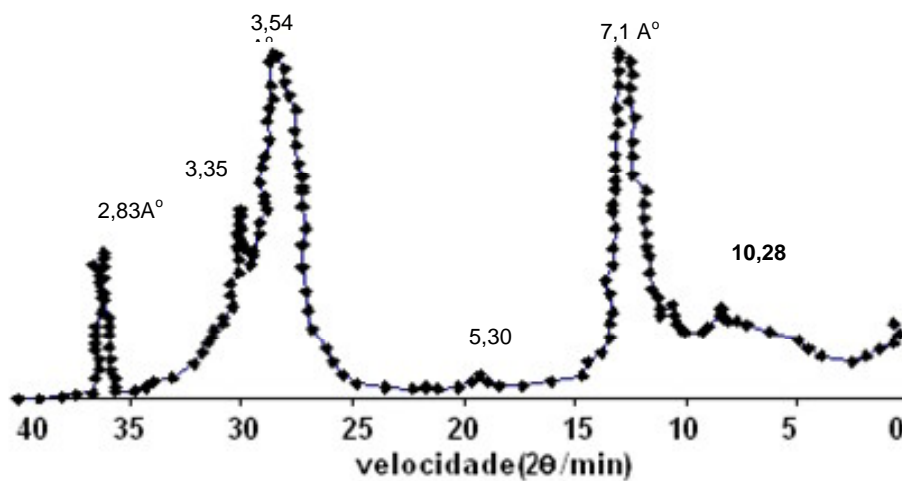


Figura A.1 – Saturada com potássio a 25 C° (prof. 0,25 m).

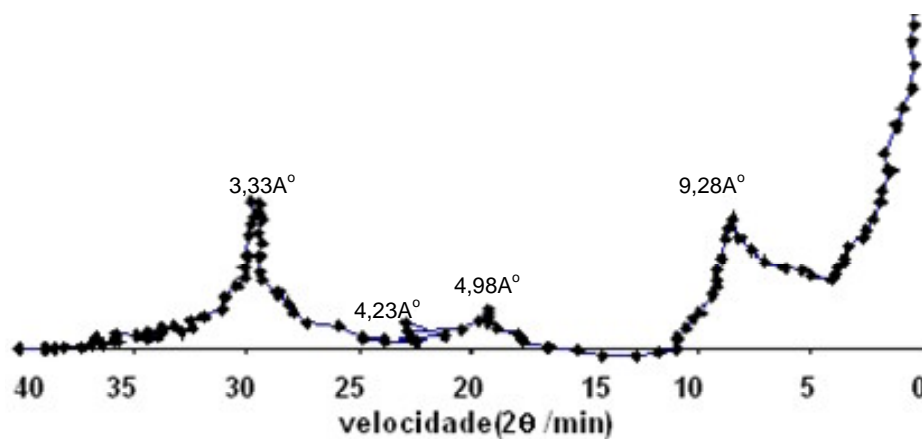


Figura A.2 – Saturada com potássio a 550 C° (prof. 0,25 m).

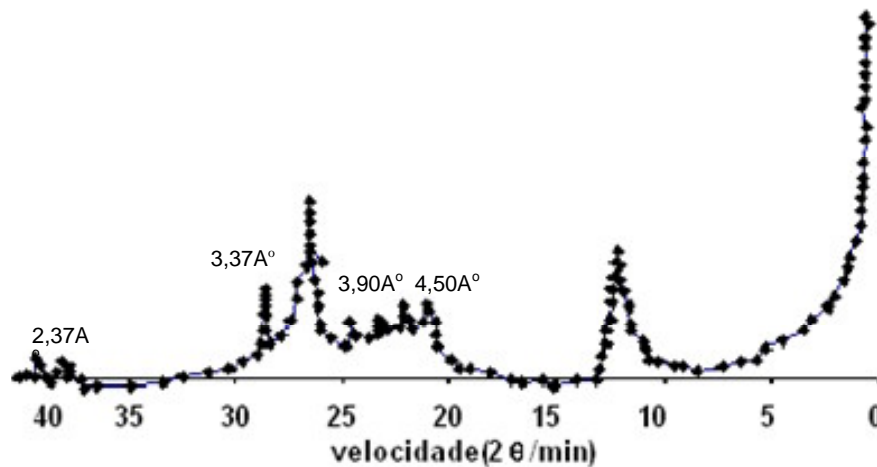


Figura A.3 – Saturada com magnésio e glicerol (prof. 0,25 m).

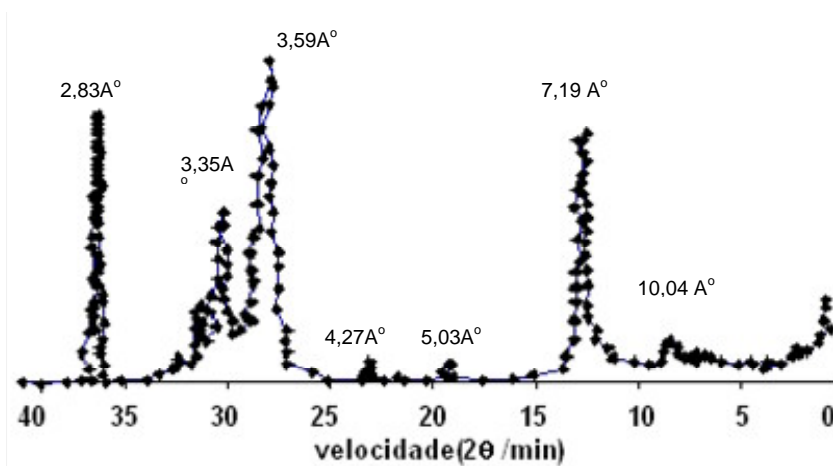


Figura A.4 – Saturada com potássio a 25 C° (prof. 0,50 m).

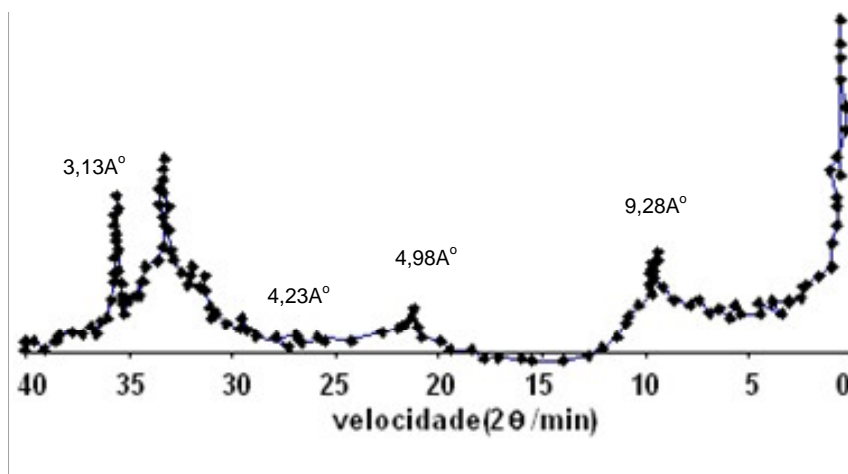


Figura A.5 – Saturada com potássio a 550 C° (prof. 0,50 m).

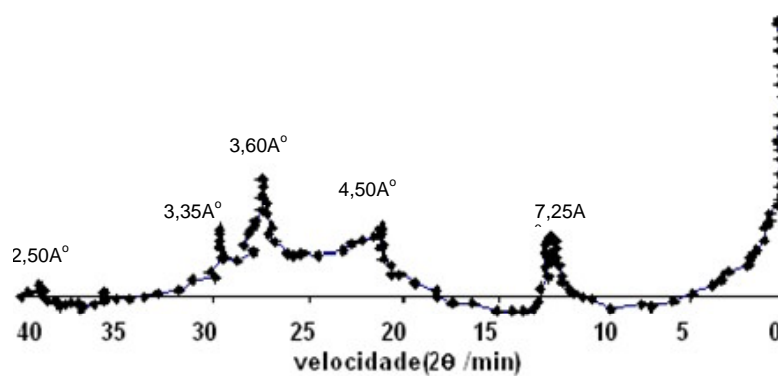


Figura A.6 – Saturada com magnésio e glicerol (prof. 0,50 m).

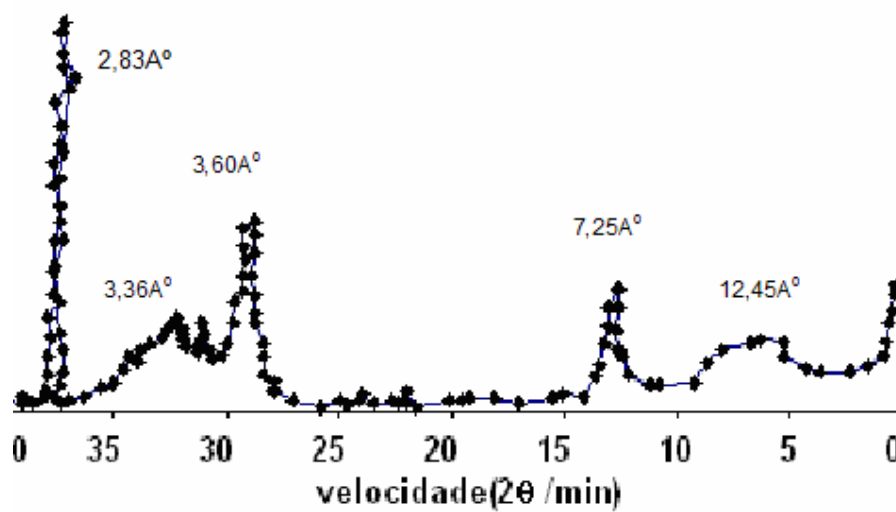


Figura A.7 – Saturada com potássio a 25 C° (prof. 1,00 m).

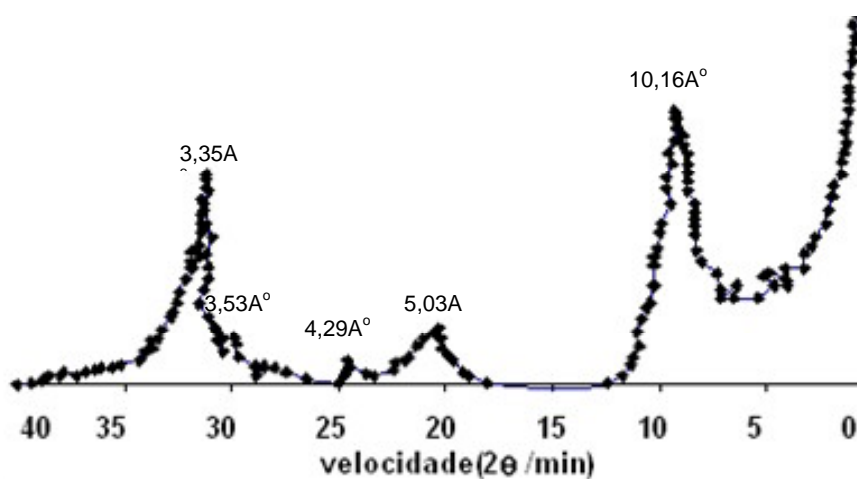


Figura A.8 – Saturada com potássio a 550 C° (prof. 1,00 m).

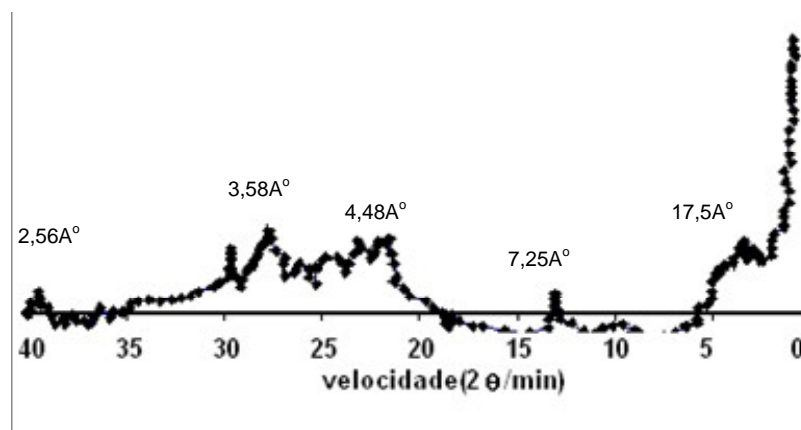


Figura A.9 – Saturada com magnésio e glicerol (prof. 1,00m).

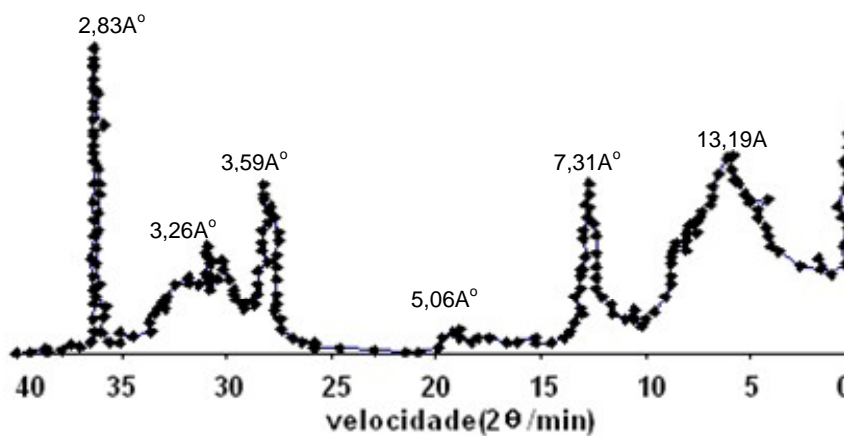


Figura A.10 – Saturada com potássio a 25 C° (prof. 3,50 m).

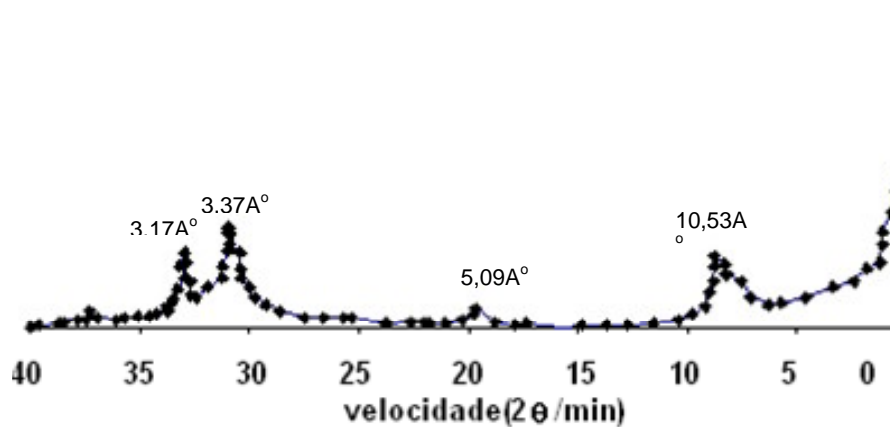


Figura A.11 – Saturada com potássio a 550 C° (prof. 3,50 m).

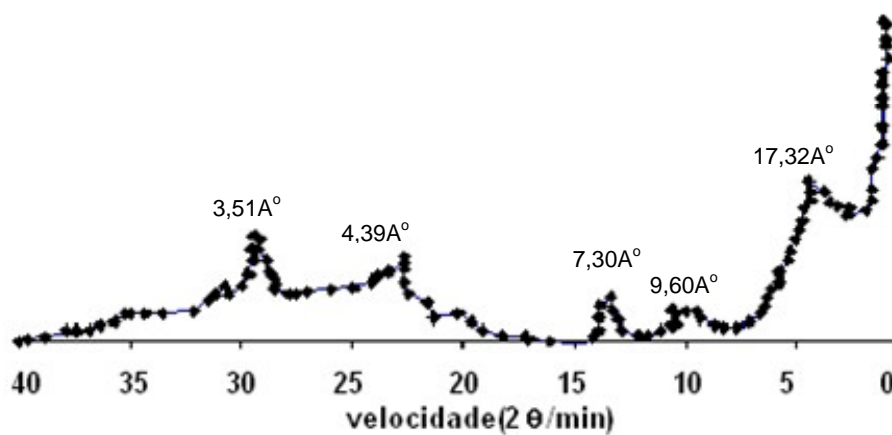


Figura A.12 – Saturada com magnésio e glicerol C° (prof. 3,50 m).

ANEXO – B (CURVAS GRANULOMETRICAS)

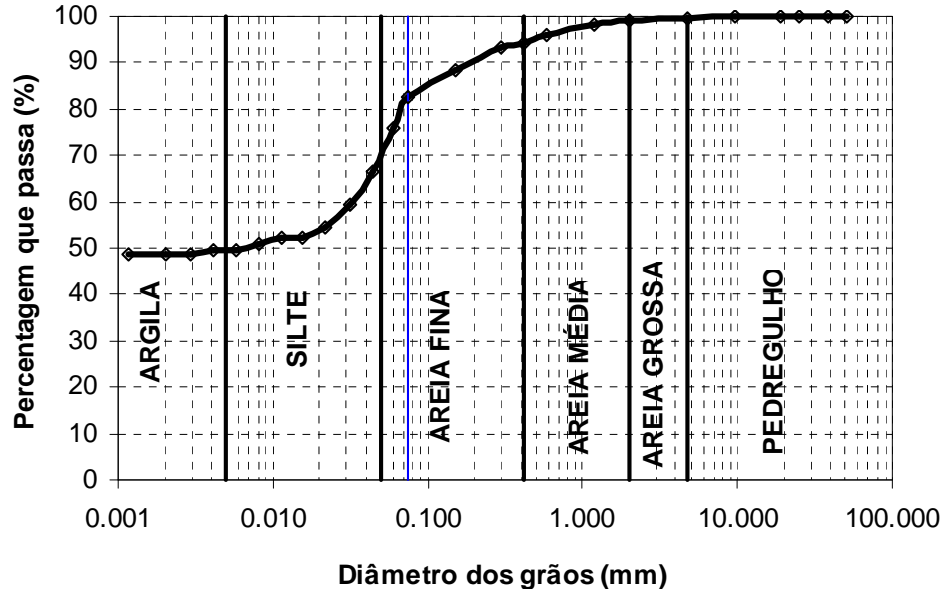


Figura B.1 – Distribuição granulométrica (Célula J; 1,5 m)

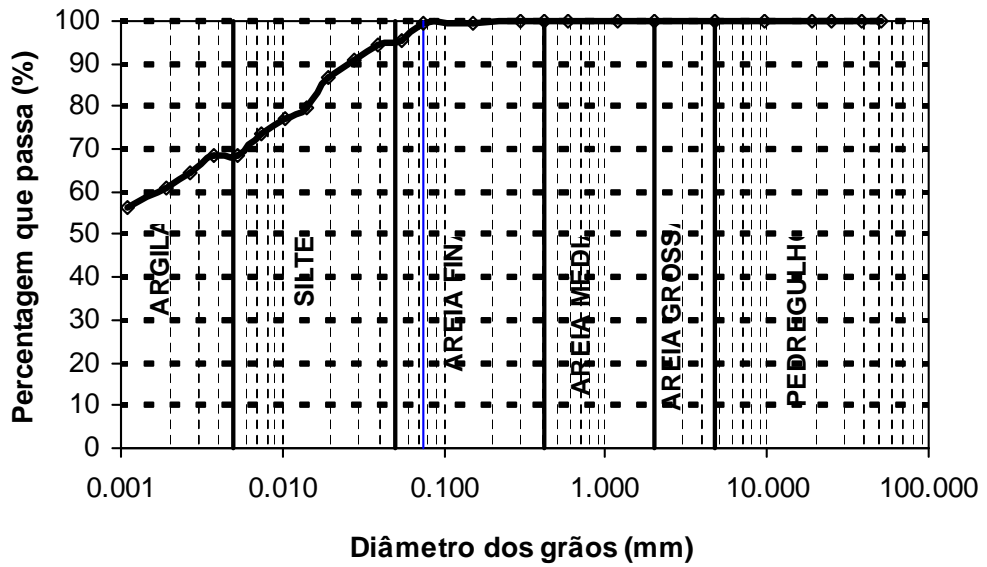


Figura B.2 – Distribuição granulométrica (Célula A3; 1,5 m)

ANEXO – C (CURVAS DE RETENCAO)

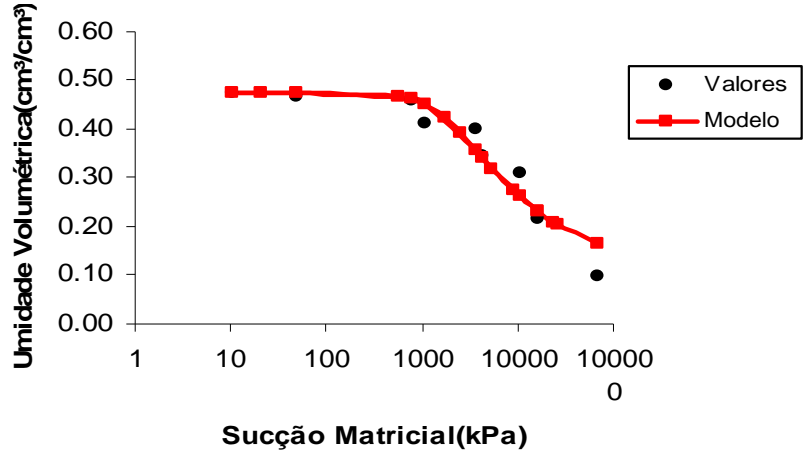


Figura C.1 – Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980)- Mualem (1976), (trajetória de secagem prof. 0.25).

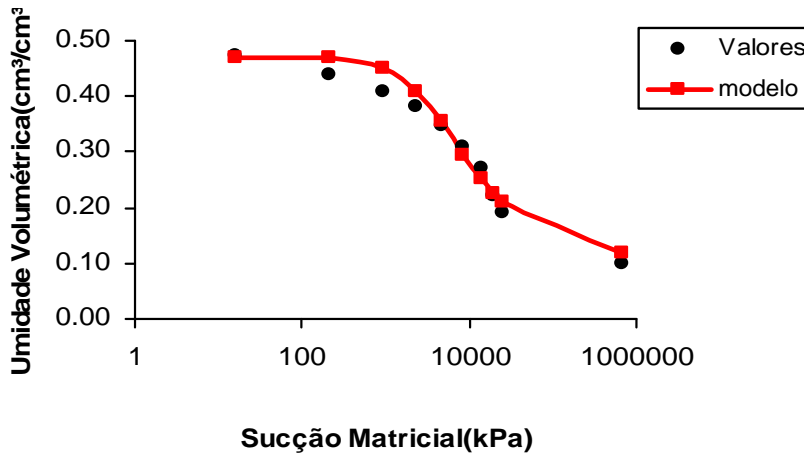


Figura C.2 – Ajuste ao modelo Genuchte(1980)- Mualem(1976),(trajetória de secagem 0.50m).

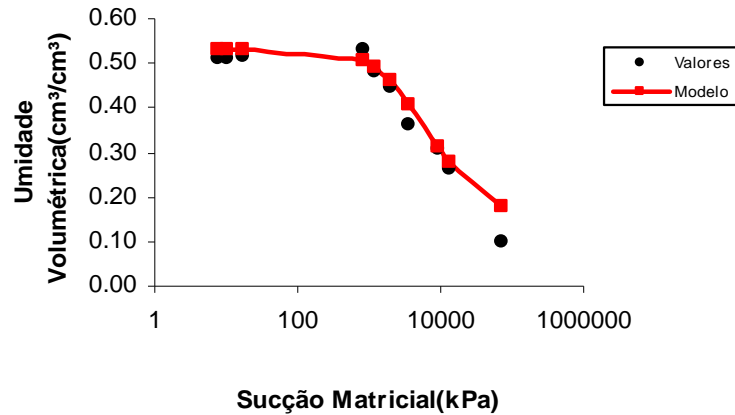


Figura C.3 – Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980) segundo as hipóteses de Mualem (1976), (prof. 1.00).

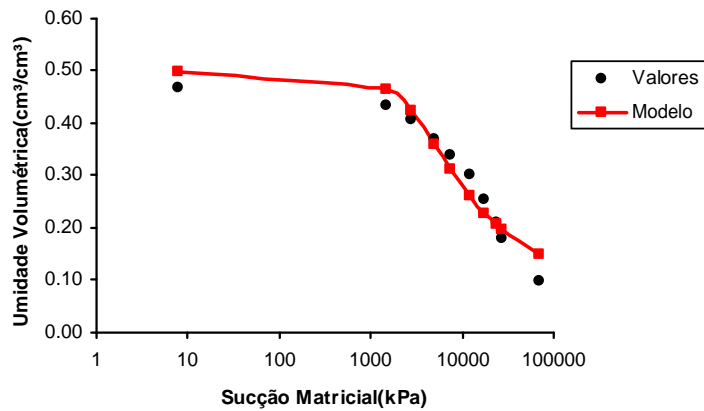


Figura C.4 – Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980) segundo as hipóteses de secagem 1976), (prof. 2.00).

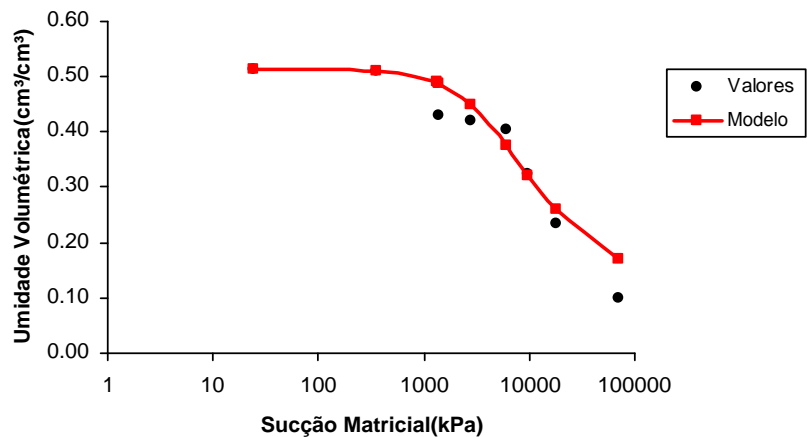


Figura C.5 – Ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchte (1980) segundo as hipóteses de Mualem (1976), (prof. 2.50).

ANEXO – D (UMIDADE VOLUMÉTRICA).

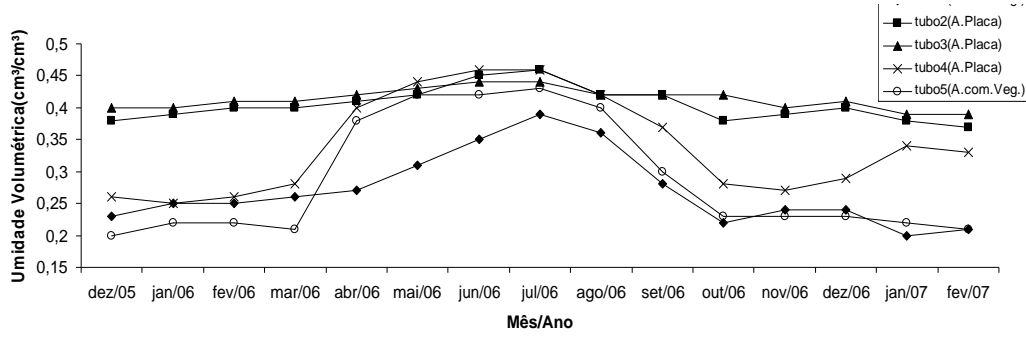


Figura D1 – Comportamento da umidade volumétrica 20 cm de profundidade.

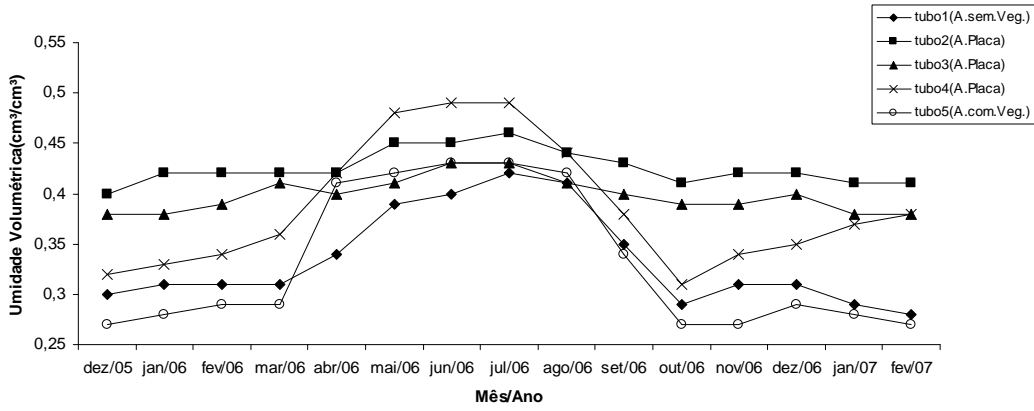


Figura D2 – Comportamento da umidade volumétrica 30 cm de profundidade.

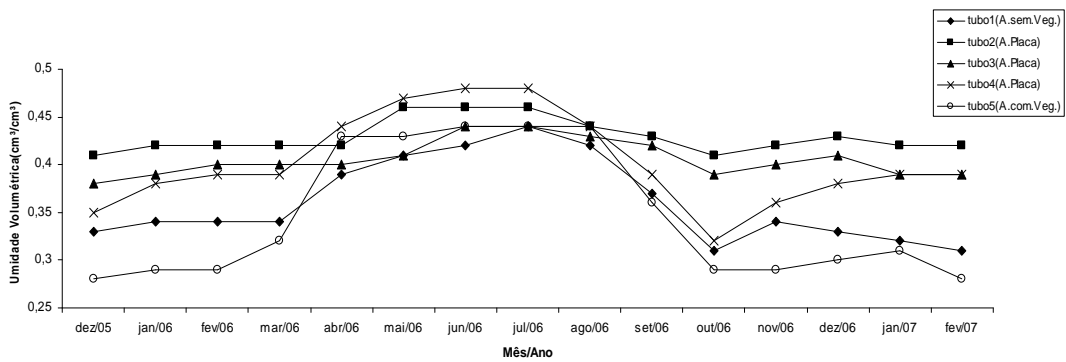


Figura D3 – Comportamento da umidade volumétrica 40 cm de profundidade.

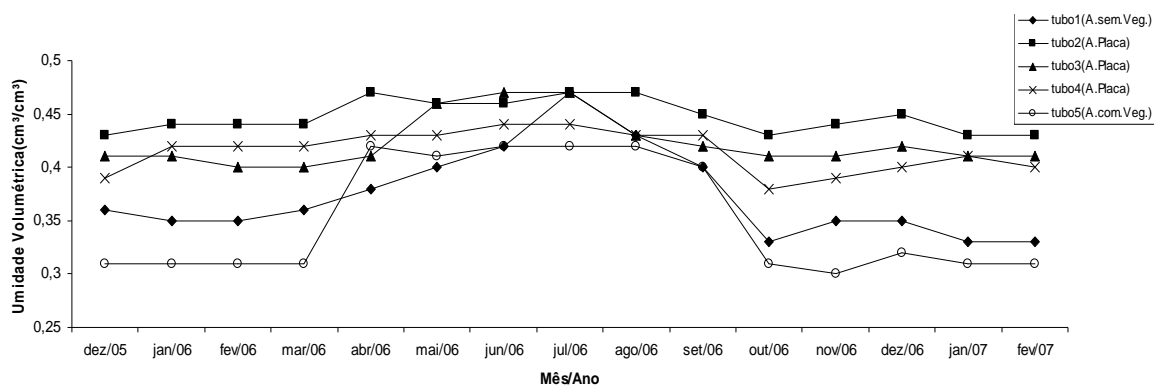


Figura D4 – Comportamento da umidade volumétrica 75 cm de profundidade.

ANEXO E (TABELAS ESTATÍSTICAS)

Tabela E1 – Parâmetros descritivos da umidade gravimétrica

TEOR DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA (%)						
Parâmetros Descritivos						
N.Valores	Média	D.Padrão	Amplitude	C..Variação	Pri.Quartil	Ter.Quartil
135	24,5	4,5	25	18,33	21,6	27,5
Kolmogorov-Smirnov			Valor Crítico	Resultado do teste		
0,06			0,11	Segue a normal com 95% de certeza		

Tabela E2 – Parâmetros descritivos da umidade volumétrica

UMIDADE VOLUMÉTRICA (cm³/cm³)						
Parâmetros Descritivos						
N.Valores	Média	D.Padrão	Amplitude	C..Variação	Pri.Quartil	Ter.Quartil
135	39,1	5,84	31,6	15,2	35,6	42,2
Kolmogorov-Smirnov			Valor Crítico	Resultado do teste		
0,08			0,11	Segue a distribuição normal		

Tabela E3 – Parâmetros descritivos do deslocamento médio

DESLOCAMENTO MÉDIO (mm)						
Parâmetros Descritivos						
N.Valores	Média	D.Padrão	Amplitude	C..Variação	Pri.Quartil	Ter.Quartil
36	36,34	19,4	73,7	53,28	19,2	49,5
Kolmogorov-Smirnov			Valor Crítico	Resultado do teste		
0,09			0,22	Segue a distribuição normal		

Tabela E4 - Parâmetros descritivos da sucção matricial

SUCÇÃO MATRICIAL (mm)						
Parâmetros Descritivos						
N.Valores	Média	D.Padrão	Amplitude	C..Variação	Pri.Quartil	Ter.Quartil
135	914,7	929,5	4227,2	101,6	258,4	1225,5
Kolmogorov-Smirnov			Valor Crítico	Resultado do teste		
0,07			0,12	Segue a distribuição log-normal		

Tabela E5 – Estudo estatístico.

Variáveis Estudadas	Estatística Usada	Parâmetros medidos	Justificativa
Caracterização Física	Estatística Descritiva	média, maior e menor valor, desvio padrão e coeficiente de variação.	Verificação da igualdade entre os limites de consistências e o índice de atividade por toda área
	Análise de Variância	Igualdade de médias entre as áreas	Verificação estatística da igualdade entre os valores por área.
Curva de Retenção	Teste Qui-Quadrado		Verificar o ajuste dos valores experimentais e do modelo
Umidade Volumétrica	Estatística Descritiva	média, maior e menor valor, desvio padrão e coeficiente de variação	Verificação da diferença de média entre valores por área.
	Análise de Variância para dois fatores e repetição	Influência dos fatores e entre eles	Verificação da igualdade estatística entre a média das áreas e verificação de fator mais influente
Umidade Gravimétrica	Estatística Descritiva	média, maior e menor valor, desvio padrão e coeficiente de variação	Verificação estatística da igualdade entre os valores por área.
	ANOVA para um fator	Igualdade de médias entre as áreas	Verificação estatística da igualdade entre os valores por área.
	Geoestatística	Semivariograma, krigagem	Geração de mapas, verificação de distância e dependência.
Sucção Matricial	Estatística Descritiva	média, maior e menor valor, desvio padrão e coeficiente de variação	Verificação da diferença de média entre valores por área.
	ANOVA para um e dois fatores		Verificação da igualdade estatística entre a média das áreas e verificação de fator mais influente
	Teste Tukey		Verificação de maiores valores médios
	Geoestatística		Geração de mapas, e gradientes
Temperatura	Estatística Descritiva	média, maior e menor valor, desvio padrão e coeficiente de variação	Verificação da diferença de média entre valores por área.
	ANOVA para um fator		Verificação estatística da igualdade entre os valores por área.
	Teste Tukey		Verificação de maiores valores médios
	Geoestatística (mapas)		
Deslocamento Vertical	Estatística Descritiva	média, maior e menor valor, desvio padrão e coeficiente de variação	Verificação da diferença de média entre valores por área.
	ANOVA para um único fator		Verificação estatística da igualdade entre os valores por área.
	Teste Tukey		Verificação de maiores valores médios
Análise Multivariada	Componentes Principais		Estudo multivariado do processo de expansão.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)