

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA INFILTRABILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL

JULIANA MARIA SERNA RESTREPO

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO
COORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM - 188/10

BRASÍLIA/DF: AGOSTO/2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA INFILTRABILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL

JULIANA MARIA SERNA RESTREPO

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO
COORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM - 188/10

BRASÍLIA/DF: AGOSTO/2010

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA INFILTRABILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL

JULIANA MARIA SERNA RESTREPO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADO POR:

JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)

MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(COORIENTADOR)

LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO
(EXAMINADOR INTERNO)

MARIA EUGÊNIA GIMENEZ BOSCOV, D.Sc. (USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA, AGOSTO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

RESTREPO, JULIANA SERNA

Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical, 2010.

xxii, 114p., 200 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, engenharia Civil, 2010)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Infiltração

2. Perfil de umidade

3. Ensaios de Campo

4. Ensaios Laboratoriais

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RESTREPO, J. S. 2010. Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical.

Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 188 /10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Juliana Maria Serna Restrepo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical

GRAU: Mestre

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado, emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Juliana Maria Serna Restrepo

SGAN 912, Modulo D, Ed. Park Ville bloco A, apto119.

CEP 70790 120- Brasília/DF – Brasil.

julimasere@hotmail.com

DEDICATORIA

A ti mamá, a ti papá a ustedes hermanos dedico este trabajo.
A ti mamá, por todos tus desvelos, por todas tus palabras de aliento
en los momentos mas tristes de mi vida, por no soltar mi mano a pesar de la distancia,
por estar siempre a mi lado, por ser modelo en mi vida, por siempre creer en mí, eres una madre ideal.
A ti papá, por tus silencios elocuentes que me calmaron dulcemente,
por quererme a pesar de mis locuras, por instruirme en la vida, por cumplir con tus deberes, porque nunca
me fallaste, porque contigo contar siempre puedo, por tu amor paternal,
hombres como tú hay pocos, eres un padre ideal.
A mis hermanos Paula, Mónica, Esteban y Juan, por esas miradas sabias y profundas, por su serenidad,
paciencia y tesón, por sus reproches y consejos porque nunca me fallaron y siempre cuidaron de mí.
A mis sobrinos Samuel, Juan Daniel, José Miguel y Eva, porque aunque no lo sepan tenerlos en mi vida me
hace despertar cada mañana y darle gracias a Dios, porque de todas las familias del mundo, tuve el honor
de nacer en la mejor.
Mi amor a ustedes será mi eterno agradecimiento.

.....

Dedico este trabalho a ti mãe, a ti papai e a vocês meus irmãos.
A ti mamãe, por todas as tuas noites de preocupação, por todas as tuas palavras de ânimo nos momentos
tristes, por segurar a minha mão apesar da grande distância, por estar sempre do meu lado, por sempre
acreditar em mim, por ser modelo na minha vida. Você é a mãe ideal.
A ti papai pelo teu silêncio eloqüente que me acalmou docemente, por me amar apesar da minha loucura, por
instruir-me, por fazer o seu dever e nunca me decepcionar. Sempre posso contar com você, com o amor de pai.
Existem poucos homens como você, você é um pai ideal.
Aos meus irmãos Paula, Moníca, Esteban e Juan, pelos olhares sábios e profundos, pela serenidade, paciência
e tenacidade, pelas críticas e conselhos. Vocês sempre cuidaram de mim.
Aos meus sobrinhos Samuel, Juan Daniel, José Miguel e Eva, porque embora não me conheçam, ter vocês na
minha vida, me faz acordar todas as manhãs e dar graças a Deus, porque de todas as famílias do mundo, eu
tive a honra de ter nascido na melhor.

Meu amor por vocês será minha eterna gratidão

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua presença constante em minha vida sem que eu precise pedir, pelo auxílio nas minhas escolhas e por me confortar nas horas difíceis. Agora vejo que me mostrou o caminho certo.

Ao meu orientador, Prof. José Camapum, por ter aceitado me orientar, por ser uma pessoa paciente e generosa, pela compreensão silenciosa dos momentos difíceis pelos quais passei, por sua dedicação, sensibilidade e apoio ao longo desta jornada, pelas palavras de incentivo e principalmente por me ensinar a acreditar e confiar em mim. Muito obrigada!

Ao Professor Manoel Porfirio pelos conselhos e sugestões dadas a este trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília por todo o conhecimento transmitido e por eventuais sugestões e críticas.

A minha professora particular Josi. Um simples obrigado é pouco, posso dizer que sem a tua ajuda esse trabalho teria se tornado mais difícil. Obrigada “Mãe”.

A minha grande amiga Paola. Dizer que admiro você é muito pouco, porque a sua amizade merece mais, sem você em meu caminho não haveria tantas coisas a contar, mas prefiro agradecer a Deus por sua amizade. Você consegue trazer ao mundo um grande carisma e um grande companheirismo. Você representa com nobreza a palavra AMIZADE. Obrigada por fazer parte de minha vida!

As minhas “irmãs de coração” Sandra, Andrelisa, Lorena, Larissa, Rafa, Ivon e Catalina. Obrigada por se preocuparem e torcerem por mim, já que estiveram sempre ao meu lado e me fizeram sentir em casa.

Aos grandes amigos Petrônio, Marcus, Fernando, Janaina, Jack, Jana, Robinson, Juan Carlos e a outros colegas que não citei aqui, mas que gostaria de dizer muito obrigado pelo carinho, amizade, paciência e incentivo. Valeu!

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia Vanilson, Ricardo e Thiago, pelo apoio na realização dos ensaios de campo e laboratório.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Segundo dados do INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, o grande processo de urbanização no Brasil ocorreu da segunda metade do século XX em diante. Na década de 70 a população urbana ultrapassou a rural e em 2000 esta já era de 138 milhões enquanto aquela se limitava a 31,8 milhões. Este incremento populacional gerou a impermeabilização crescente das bacias hidrográficas e a ocupação inadequada das regiões ribeirinhas dos cursos d'água, tornando-se a expansão urbana responsável por vários problemas socioambientais tais como, erosões e inundações.

Apesar dos avanços tecnológicos ainda assim não se conseguiu superar os problemas ambientais oriundos do processo de urbanização acelerada. No passado adotava-se como medidas de correção a construção de grandes obras hidráulicas com fim de remover rapidamente a água que se acumularia em locais importantes. Atualmente faz-se a opção por medidas mais racionais, que se utilizam do planejamento da ocupação e uso do solo impondo restrições à ocupação de áreas que podem ser naturalmente inundadas e buscando manter a água dentro da bacia por meio da adoção de técnicas apropriadas ao uso e infiltração das águas pluviais.

Na região Centro-Oeste estão sendo estudados dois tipos de dispositivos de infiltração: os poços de infiltração e as trincheiras de infiltração. Tanto em um caso como em outro, além da avaliação da capacidade de infiltração do solo, faz-se necessário analisar os seus reflexos no comportamento hidráulico e mecânico do maciço e as eventuais consequências geotécnicas capazes de comprometer a funcionalidade e a segurança das edificações vizinhas.

A capacidade de infiltração do solo varia em função de diferentes fatores tais como cobertura vegetal e tipo e estado do solo. Estes elementos definidores do estado do solo são aspectos internos como a porosidade, a distribuição dos poros e a umidade e externo como o clima. A sucção/capilaridade atuante no solo está diretamente associada a estes aspectos.

Nesta dissertação se buscou analisar a influência da umidade inicial e, portanto, da sucção na infiltrabilidade do solo. Dada a grande interação solo-atmosfera, a umidade inicial está diretamente associada às condições climáticas, daí a grande relevância do estudo para o entendimento da infiltrabilidade.

RESUMEN

Según datos del INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA-IBGE, el grande proceso de urbanización en Brasil ocurrió a partir de la segunda mitad del siglo XX. En la década de los años 70 la población urbana ultrapaso a la población rural , ya en el año 2000 esta alcanzo los 130 millones mientras que en la época de los 70 era de 31,8 millones. Este incremento generó el aumento de la impermeabilización de cuencas hidrográficas y la ocupación inadecuada de las regiones adyacentes a los cursos de agua, convirtiéndose en el principal factor del agravamiento de los problemas relacionados con el aumento de la contaminación, las inundaciones en las ciudades e aumento en la frecuencia de estas inundaciones. A pesar de los avances tecnológicos no se consiguió superar los problemas ambientales generados por el proceso de urbanización acelerada. En el pasado se preocupaban por las medidas correctivas e fueron construidas grandes obras hidráulicas para eliminar rápidamente el agua acumulada en sitios importantes. En la actualidad se opta por medidas más racionales como las restricciones para la ocupación de algunas áreas que pueden ser naturalmente inundadas y la introducción de nuevas medidas de compensación las cuales procuran favorecer los procesos hidrológicos que fueron modificados durante la urbanización, estas medidas actúan juntos con las estructuras convencionales existentes para facilitar el transporte del volumen de agua adicional del que se tenía previsto. En la región centro-oeste están siendo estudiados dos tipos e dispositivos de infiltración: Pozos de infiltración y trincheras de infiltración. Tanto en un caso como en otro además de la evaluación de la capacidad de infiltración del suelo, se necesita analizar las consecuencias en el comportamiento hidráulico y mecánico del suelo y las posteriores consecuencias geotécnicas que pueden comprometer la funcionalidad y la seguridad de las edificaciones vecinas. La capacidad de infiltración de un suelo varía en función de diferentes factores tales como cobertura vegetal, tipo y estado del suelo. Son elementos importantes para definir el estado del suelo aspectos internos como la porosidad, la distribución de poros e la humedad e aspectos externos como el clima. La succión y la capilaridad actuante del suelo están directamente asociadas a estos aspectos. En esta tesis se busco analizar la influencia de la humedad inicial y por tanto la succión en la capacidad de infiltración de un suelo, dada la grande interacción suelo atmosfera, la humedad inicial esta directamente asociada a las condiciones climáticas y de allí la grande importancia de este estudio para el mejor entendimiento de la infiltración de un suelo.

ABSTRACT

Based on records from INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE, the great urban development process in Brazil occurred in the second half of the twentieth century. In the seventies the urban population surpassed the rural; growing from 31.8 million to 130 million by the year 2000. This growth facilitated the undersealing process of the hydrographical basins and the inadequate human occupation of the regions adjacent to the water paths. The latter became the principal factor on problems related to contamination, flooding in urban areas and the significant increase in the frequency of these occurring.

Despite engineering and technological developments it has not been possible to overcome the environmental problems originated by the accelerated growth of urban areas. For example in the past, in order to promptly evacuate the water accumulated in important urban areas, massive hydraulic projects were built. However these days more rational solutions are implemented such as restrictions on occupation of certain zones that could be in risk of flooding and the introduction of new measurements to help normalising the hydrological processes that were disrupted during the urban developments. These solutions work together with the existing structures to facilitate the evacuation of additional water volumes that were not initially foreseen.

Two types of devices for infiltration are being studied in the centre-west region: infiltration wells and infiltration trenches. As well as the analysis of the infiltration properties of the soil, it is also required to analyse the consequences of the infiltration on the hydraulic and mechanic soil behaviour. Additionally, subsequent changes in the geotechnical characteristics of the soil are studied and analysed to understand how they interact with functionality and safety of neighbouring structures.

The infiltration characteristics vary in function of different factors such as vegetal coverage, type and state of the soil. Internal aspects like porosity and its distribution, humidity and climate factors are important elements when determining the state of the soil. Moreover, the suction and capillarity of the soil are directly associated with these aspects.

In this thesis the influence of the initial humidity, and also the suction, on the infiltration characteristics of the soil was studied. Due to the soil-atmosphere interaction, the initial humidity of the soil is directly related to the climate conditions, therefore the importance of this research project that aim to better understand the infiltration process on the soil.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - JUSTIFICATIVA	1
1.2 - OBJETIVOS	2
1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - INTRODUÇÃO	4
2.2 - O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO	4
2.3 - POPULAÇÃO MUNDIAL	5
2.4 - O BRASIL NO CENÁRIO MUNDIAL	7
2.5 - URBANIZAÇÃO E AGUAS URBANAS	9
2.5.1 - MUDANÇAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DEVIDO A IMPERMEABILIZAÇÃO	11
2.5.2 - CONCEITOS DE CANALIZAÇÃO E RESERVAÇÃO	13
2.5.3 - SISTEMAS CLÁSSICOS DE DRENAGEM URBANA	14
2.5.4 - TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS DE DRENAGEM	16
2.6 - DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO	18
2.6.1 - SOLOS NÃO SATURADOS	20
2.6.2 - TENSÃO SUPERFICIAL	21
2.6.3 - SUCCÃO	22
2.6.4 - MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA SUCCÃO	23
2.6.5 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	24
2.7 - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	27
2.7.1 - MEDIDAS DA PERMEABILIDADE	29
2.8 - INFILTRAÇÃO	34
2.8.1 - FATORES QUE INTERVÊM NA INFILTRAÇÃO	36
2.8.2 - VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO:	38
2.8.3 - CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO:	38
2.8.4 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE UM SOLO	39
CAPÍTULO 3	41
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 - INTRODUÇÃO	41
3.2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	41
3.3 - ENSAIOS DE CAMPO	46
3.3.1 - INFILTRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PELO MÉTODO DO REBAIXAMENTO EM FURO DE SONDAGEM À TRADO	46
3.3.2 - MEDIÇÃO DE UMIDADE PELO MÉTODO GRAVIMETRICO	47
3.3.3 - ENSAIO PANDA: PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE COM ENERGIA VARIÁVEL	52
3.4 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO	54
3.4.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	55
3.4.2 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SOLO NATURAL	56
3.4.3 - DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO	57
3.4.4 - PERMEABILIDADE A CARGA VARIÁVEL	59

CAPÍTULO 4	64
4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	64
4.1 - INTRODUÇÃO	64
4.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	64
4.2.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	64
4.2.2 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO.....	69
4.2.3 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SOLO.....	71
4.2.4 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	72
4.2.5 - PERMEABILIDADE	74
4.3 - ENSAIOS EM CAMPO	76
4.3.1 - MONITOREAMENTO DOS PERFIS DE UMIDADE NOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO	77
4.3.2 - ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PELO MÉTODO DO REBAIXAMENTO EM FURO DE SONDAJEM	101
4.3.3 - ENSAIO PANDA: PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE COM ENERGIA VARIÁVEL	107
5 - CONCLUSÕES	111
5.1 - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Proporção dos países mais populosos entre os anos 1980 e 2000, (U.S. Census Bureau International Data Base, acesso em novembro 2009).....	6
Figura 2.2 Evolução da população brasileira entre 2000 e 2007, (IBGE, Censo Demográfico 2007).....	8
Figura 2.3-Processos que ocorrem em uma área urbana (Hall, 1984 <i>apud</i> Porto <i>et al.</i> ,1993)	11
Figura 2.4- Impacto devido à urbanização no balanço hídrico (Schueler,1987).	12
Figura 2.5- Hidrogramas pré e pós-urbanização, (Schueler,1987).	13
Figura 2.6 – Alteração do fluxo de água em resposta da urbanização, (Schueler,1987).	13
Figura 2.7- Ilustração esquemática dos conceitos de reservação x canalização (Canholi, 2005).	14
Figura 2.8-Esquema da constituição do solo.....	19
Figura 2.9- Elemento de solo não saturado com fases de ar contínuo, (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993).	21
Figura 2.10- Água de um solo não saturado sujeita à capilaridade e adsorção, que combinadas produzem um potencial matricial, (Modificado de CRUZ, 1996).	22
Figura 2.11- Curva característica por umedecimento e secagem (Hillel, 1971).....	26
Figura 2.12- curvas características típicas de diferentes tipos de solo (Adaptado de Fredlund E Xing, 1994).....	26
Figura 2.13- Permeâmetro tipo molde de compactação (Daniel, 1994).....	30
Figura 2.14- Permeâmetro de parede rígida tipo célula de adensamento (Daniel,1994)	30
Figura 2.15-Permeâmetro que utiliza amostrador de parede fina, (Daniel,1994).....	31
Figura 2.16- Permeâmetro de parede flexível (modificado de Daniel et. al 1994).....	31
Figura 2.17-(a) disposição dos poços; (b) seção através do poço de bombeamento (Alonso, 1999).....	33
Figura 2.18- a) Perfil de frente de molhagem ou frente de molhagem; b) Perfil de infiltração, (modificado de BRANDÃO, SILVA E PRUSKI, 2004).	35
Figura 2.19- Ilustração da taxa de infiltração e da capacidade de infiltração, (modificado de Lima 1996).	38
Figura 2.20-Taxa de infiltração versus tempo, (Modificado de Gitirana Jr.2005).	39
Figura 3.1- Localização do Distrito Federal	42
Figura 3.2- Localização do Campus Darcy Ribeiro	43
Figura 3.3- Localização das áreas no Campus UnB, (modificado Silva, 2007)	45
Figura 3.4- Ensaio de rebaixamento em furo de sondagem a trado.	47
Figura 3.5-Perfil de profundidades.	48
Figura 3.6- Distribuição dos furos para retirada de amostras, controle de umidade e ensaios de infiltração	50
Figura 3.7– GPS Topográfico ProMark2, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.	51
Figura 3.8-Equipamento PANDA	53
Figura 3.9-Esquema do equipamento PANDA, (www.geotecniaambiental.cl, acesso jan, 2010).....	53
Figura 3.10- Retirada do blocos de amostras indeformadas.	55
Figura 3.11- Moldagem de amostras para realização do ensaio de Peso específico natural....	56

Figura 3.12– (a) - Equipamento Granulômetro da UnB; (b) - Deposição do material para a realização do ensaio.	56
Figura 3.13- lupa eletrônica “ProScope de alta resolução HR” da Avantgarde.....	57
Figura 3.14-Preparação dos corpos de prova umedecimento e secados ao ar	58
Figura 3.15- Moldagem do corpo de prova,.....	59
Figura 3.16- Montagem na câmara do triaxial e registros utilizados.....	60
Figura 3.17-Montagem do corpo de prova junto com as pedras porosas, os papéis filtro e a membrana.	62
Figura 4.1-Characterização do perfil do solo.	66
Figura 4.2-Curvas granulométricas das amostras para 1,00 e 2,00 m de profundidade com e sem ultrassom.	66
Figura 4.3-Curvas granulométricas das trincheiras 1 e 4 para 1,0 m de profundidade, Silva (2007).	67
Figura 4.4-Classificação SUCS com base nos limites de Atterberg.	68
Figura 4.5- Minerais ao longo da profundidade.	70
Figura 4.6-Distribuição dos principais minerais ao longo da profundidade.	70
Figura 4.7-Estrutura de solo para 1,0 e 2,0 m de profundidade com aumento de 100X e 400X	72
Figura 4.8-Curvas características do campo experimental da UnB, para 1,0 e 2,0 m de profundidade.....	73
Figura 4.9-Resultados dos ensaios de permeabilidade, Silva (2007).	75
Figura 4.10-Resultados ensaios de permeabilidade a carga variável.	76
Figura 4.11- Malha de amostragem das umidades.....	77
Figura 4.12-Dados de precipitação da estação automática do INMET Brasília DF (INMET,2009).....	79
Figura 4.13-Dados de precipitação acumulada 24h para os meses de agosto e setembro de 2009. (INMET,2009).....	80
Figura 4.14-Perfil de umidade antes e após do primeiro ensaio	81
Figura 4.15-Perfil de umidade antes do primeiro ensaio.	81
Figura 4.16-Perfil de umidade após o primeiro ensaio.	82
Figura 4.17– Perfil de umidade antes e após o primeiro ensaio.....	82
Figura 4.18-Isosucções antes e após o primeiro ensaio.	82
Figura 4.19-Dados de precipitação acumulada de 24h para o mês de setembro de 2009, INMET (2009).....	83
Figura 4.20- Perfil de umidade antes e após o segundo ensaio.....	84
Figura 4.21 – Perfil de umidade antes do segundo ensaio.	84
Figura 4.22– Perfil de umidade após o segundo ensaio.	85
Figura 4.23– Perfil de umidade antes e após o segundo ensaio.....	85
Figura 4.24– Isosucções antes e após o segundo ensaio	85
Figura 4.25-Precipitação acumulada em 24h para o mês de setembro de 2009, INMET (2009)	86
Figura 4.26- Perfil de umidade antes e após do terceiro ensaio.....	87
Figura 4.27– Perfil de umidade antes do terceiro ensaio.	87
Figura 4.28– Perfil de umidade após o terceiro ensaio.	88
Figura 4.29– Perfil de umidade antes e após o terceiro ensaio.	88
Figura 4.30- Isosucções antes e após o terceiro ensaio.....	88
Figura 4.31- Precipitação acumulada em 24h do mês de outubro de 2009, (INMET, 2009) ..	89
Figura 4.32- Perfil de umidade antes e após do quarto ensaio.....	90
Figura 4.33– Perfil de umidade antes do quarto ensaio.	90

Figura 4.34– Perfil de umidade após o quarto ensaio.	91
Figura 4.35– Perfil de umidade antes e após o quarto ensaio.	91
Figura 4.36- Isosucções antes e após o quarto ensaio	91
Figura 4.37- Precipitação acumulada em 24h desde 01 de novembro até 30 de novembro de 2009 (INMET, 2009).....	92
Figura 4.38- Perfil de umidade antes e após do quinto ensaio	93
Figura 4.39– Perfil de umidade antes do quinto ensaio.	93
Figura 4.40– Perfil de umidade após o quinto ensaio.	94
Figura 4.41– Perfil de umidade antes e após o quinto ensaio.	94
Figura 4.42- Isosucções antes e após o quinto ensaio	95
Figura 4.43- Umidade x Distancia x Tempo para as profundidades de 0,5	97
Figura 4.44- Umidade x Distancia x Tempo para as profundidades de 3,0 m	98
Figura 4.45- Umidade x Profundidade x Tempo para as distâncias de 0,5 m a partir do furo principal.....	99
Figura 4.46- Umidade x Profundidade x Tempo para as distâncias de 3,0 m a partir do furo principal.....	100
Figura 4.47- Síntese dos perfis de umidade a) 18 de set, b) 22 de set, c) 30 de set, d) 15 de out, e) 15 de nov.	102
Figura 4.48- Síntese das Isosucções a) 18 de set, b) 22 de set, c) 30 de set, d) 15 de out, e) 15 de nov.	103
Figura 4.49- taxa de infiltração em função dos tempos de ensaio acumulados	105
Figura 4.50- Taxas de infiltração correspondentes à média dos primeiros 30 cm de rebaixamento	106
Figura 4.51- Resistências obtidas para o furo No 01 antes e depois do ensaio.....	107
Figura 4.52- Resistências obtidas para o furo No 02 antes e depois do ensaio.....	108
Figura 4.53- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 01 ...	108
Figura 4.54- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 02 ...	109
Figura 4.55- Resistência a penetração com variação de umidade.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 10 países mas populosos do mundo entre os anos 1980 e 2009. (U.S. Census Bureau International Data Base, acesso em novembro 2009).....	6
Tabela 2.2 Municípios mas populosos em 2000 (IBGE, 2007)	8
Tabela 2.3- Municípios mais populosos em 2009 (http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/2009 . Acesso em novembro 2009)	9
Tabela 2.4- Funções e Efeitos das principais Medidas Compensatórias (Adaptado de Baptista <i>et al.</i> , 2005).....	17
Tabela 2.5- Métodos para medida de sucção (Vilar, 1997 apud Calle, 2000-modificado).....	24
Tabela 2.6- Vantagens e desvantagens dos permêmetros.	32
Tabela 3.1- Estágios e pressões utilizadas no ensaio.	62
Tabela 3.2- Tensões confinantes médias calculadas	62
Tabela 4.1- Características mineralógicas do perfil de solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (Carvalho, 1995) ...	69
Tabela 4.3- Taxa de Infiltração e Permeabilidade no campo da UnB, (Restrepo, 2010).....	104
Tabela 4.4- Taxa de Infiltração e Permeabilidade no campo da UnB, (Silva 2007).....	104

LISTA DE ABREVIACÕES

#	Abertura das peneiras;
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Ac	Área da bacia de contribuição
C	Coefficiente de escoamento;
c'	Coesão efetiva do solo no estado saturado;
CD	Com Defloculante;
cm/s	Centímetro por segundo;
CP	Corpo de Prova;
CU	Com Ultra-som;
DF	Distrito Federal;
e	Índice de Vazios;
e_0	Índice de Vazios inicial;
g	Gravidade;
i	Intensidade da chuva;
ϕ_0	Potencial osmótico ou de soluto;
ϕ_m	Potencial mátrico;
ϕ_g	Potencial gravitacional;
ϕ_a	Potencial pneumático;
ϕ_p	Potencial de consolidação;
k	Condutividade hidráulica saturada do solo;
k_{campo}	Permeabilidade em campo;
Kg	Kilograma;
k_{lab}	Permeabilidade de laboratório;
Km^2	Kilometro quadrado;
kN/m^2	Kilo-Newton por metro quadrado;
kN/m^3	Kilo-Newton por metro cúbico;
kPa	Kilo-Pascal;

k_v	Permeabilidade Vertical;
k_h	Permeabilidade Horizontal
m	Metro;
m^2	Metro quadrado;
m^3	Metro cúbico;
Mg	Magnésio;
mm	Milímetro;
MPa	Mega-Pascal;
mm/div	Milímetro por divisão;
mm/h	Milímetro por hora;
m/s	Metro por segundo;
η	Porosidade;
n°	Número;
NA	Nível do lençol freático;
NBR	Normas Brasileiras;
R	Raio de influência;
r	Raio;
SD	Sem Defloculante;
Sr	Saturação;
SU	Sem Ultra-som;
T	Período de retorno;
t	Duração da precipitação;
t_p	Tempo de percolação;
u_a	Pressão no ar existente nos poros;
UNB	Universidade de Brasília;
u_w	Pressão na água existente nos vazios do solo;
W	Umidade;
w_L	Limite de liquidez;
w_p	Limite de Plasticidade;
γ_n	Peso específico Natural;
γ_s	Peso específico das partículas sólidas;
$(\sigma - u_a)$	Tensão normal;

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

Cada cidade tem tendência a crescer em conjunto com o desenvolvimento do estado e do país onde está localizada. O acelerado processo de urbanização tem que encontrar soluções reais e permanentes para os diferentes problemas socioambientais, integrando uma diversidade de fatores que visem ao desenvolvimento integral e sustentável das cidades, satisfazendo às necessidades básicas de alimentação, saúde, educação, trabalho, habitação e cultura e garantindo a qualidade de vida da população. De acordo com esta visão não importam os grandes prédios ou extensas ruas e avenidas, deve-se garantir o desenvolvimento humano em um meio ambiente equilibrado e a preservação do ambiente natural. Isto pode ser conseguido com base em um planejamento estratégico envolvendo os setores público e privado e a participação da sociedade. Este planejamento é o único capaz de viabilizar o desenvolvimento urbano sustentável, o qual depende de cada país tem que acatar normas de equidade, previsão de serviços básicos e desenvolvimento social.

O grande processo de urbanização no Brasil ocorreu na segunda metade do século XX, do final dos anos 1960 até o final dos anos 1990, quando o país teve um incremento de 21% na sua população urbana, passando de 55% para 76%, o que conduziu à formação de 12 regiões metropolitanas e 37 aglomerações urbanas não-metropolitanas, que concentram 47% da população do país. Nas 12 áreas metropolitanas, residem 33,6% da população brasileira (52,7 milhões de habitantes), em extensos conglomerados que envolvem 200 municípios (Ipea/Unicamp-IE-Nesur/IBGE, 1999). Embora quase sempre se atribua às mudanças climáticas as catastrofes naturais que atingem as áreas urbanas e de expansão urbana, elas quase sempre estão associadas à ocupação e uso desordenado do solo, sendo o excesso de impermeabilização uma das principais fontes de problemas como os das inundações.

1.1 - JUSTIFICATIVA

A idéia de desenvolvimento e controle dos impactos quantitativos na drenagem se baseia muitas vezes no conceito de escoar a água precipitada o mais rápido possível fazendo em certos casos lançamentos inadequados com graves consequências para o corpo receptor. Segundo Urbonas (1993) este princípio foi abandonado nos países desenvolvidos no início da década de 1970. A consequência imediata dos projetos baseados neste conceito é o aumento

das inundações a jusante devido à canalização e concentração do fluxo superficial. Segundo Tucci (2000) na medida em que a precipitação ocorre, e a água não é infiltrada, este aumento de volume, da ordem de seis vezes, escoia pelos condutos. A irracionalidade dos projetos leva a custos diretos insustentáveis e indiretos irrecuperáveis, podendo o custo direto chegar a ser dez vezes maior do que o custo de amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma detenção. Como solução para este problema tem-se o que se conhece como soluções alternativas de drenagem, detenção e retenção as quais procuram favorecer os processos hidrológicos alterados durante a urbanização. Como parte destas alternativas se situam as técnicas de infiltração.

Diante do exposto, as alternativas de drenagem não convencionais são consideradas boas soluções para os problemas de inundações que ocorrem atualmente no Brasil e em outros países em desenvolvimento.

Dessa forma, e devido à escassez de pesquisas referentes ao assunto, é necessária a realização de estudos para compreender os mecanismos envolvidos na solução, ajudando assim, a definir uma melhor concepção das estruturas de infiltração, e a conhecer os riscos geotécnicos oriundos de suas implantações em solos tropicais.

1.2 - OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo geral avaliar as alterações de infiltrabilidade do solo em função das alterações de sucção que ocorrem em consequência da interação solo-atmosfera. Para simular tais alterações foram realizados ensaios de infiltração com diferentes intervalos de tempo entre eles. Para alcançar este objetivo geral definiu-se como objetivos específicos:

- Realizar ensaios de permeabilidade em laboratório sobre o solo submetido a diferentes tensões confinantes e gradientes hidráulicos;
- Definir as curvas características de retenção de água do solo, para a partir delas estimar a sucção *in situ* no momento da realização dos ensaios de infiltração;
- Realizar ensaios de infiltração em campo fazendo-se o controle das umidades presentes no perfil de solo antes e após a realização dos ensaios;

Verificar por meio de ensaios de penetração dinâmica tipo PANDA qual a influencia das variações de umidade do solo em consequência das infiltrações na resistência não drenada do perfil.

1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho é composto de oito capítulos:

O Capítulo 1 apresenta as justificativas e os objetivos que orientam este trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, destacando os resultados da urbanização sobre os efeitos das enchentes nas cidades.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados dos ensaios de laboratório e de campo.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e propõe sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentado um histórico do crescimento da população do Brasil e sua influência no processo de urbanização, com uma análise de alguns efeitos principais e secundários deste processo no sistema de drenagem das águas pluviais em meio urbano. Dentro deste contexto, expõe-se, de maneira sucinta, a evolução dos sistemas de drenagem urbana desde o final do século XX até a implantação de tecnologias alternativas de drenagem. Posteriormente, apresenta-se uma breve descrição das principais estruturas de infiltração para o controle de enchentes.

Após esta abordagem, é apresentada uma revisão das teorias sobre a dinâmica de solos não-saturados e sobre alguns conceitos que foram utilizados durante o desenvolvimento desta pesquisa. Finalmente, é abordado o processo de infiltração nestes solos, e algumas características importantes para o melhor entendimento deste processo.

2.2 - O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

A urbanização resulta fundamentalmente da transferência de pessoas do meio rural (campo) para o meio urbano (cidade). Assim, a idéia de urbanização está intimamente associada à concentração de muitas pessoas em um espaço restrito (a cidade) e na substituição das atividades primárias (agropecuária) por atividades secundárias (indústrias) e terciárias (serviços). Entretanto, por se tratar de um processo, costuma-se conceituar urbanização como sendo "o aumento da população urbana em relação à população rural", e nesse sentido só ocorre urbanização quando o percentual de aumento da população urbana é superior a da população rural.

Uma sociedade é considerada urbanizada quando a população urbana ultrapassa 50%, sendo assim, pode-se dizer que hoje o espaço mundial é predominantemente urbano.

Os países que têm um sistema de indústria maior e melhor estruturado são geralmente altamente urbanizados; porém, os países que apresentam um grande crescimento da população urbana em consequência do aumento da natalidade, do êxodo rural ou da migração da

população interiorana sem um vínculo direto com esse processo de industrialização são considerados subdesenvolvidos ou quando muito, em vias de desenvolvimento.

O processo de urbanização mundial teve início no século XVIII, em consequência da Revolução Industrial, a qual aconteceu primeiro no continente Europeu e depois nas demais áreas de desenvolvimento do mundo atual.

No caso do Terceiro Mundo, a urbanização é bem mais recente; esse processo só começou no século XX, depois da 2ª Guerra Mundial. Nesses países a expansão urbana vem ocorrendo de forma muito rápida, o que tem configurado uma urbanização atípica com consequências indesejadas para o espaço urbano. Ela modifica a utilização do solo, transforma a paisagem urbana e afeta a qualidade de vida de cada cidadão. Nelas as cidades crescem a uma taxa maior do que a própria capacidade que tem o governo de controlar e administrar esse crescimento, provocando a desorganização social, com carência de habitação, de estradas, de saneamento básico e de emprego.

2.3 - POPULAÇÃO MUNDIAL

Em 1800, só 1% da população mundial vivia nas cidades. Durante a primeira metade do século XX a população mundial cresceu 49% e a população urbana 240% e, na segunda metade, esse crescimento da urbanização foi ainda maior, quando a população urbana passou de 1.520 milhões de habitantes para 1.970 milhões no período entre 1.974 e 1.982. Este período é conhecido como um dos períodos onde o aumento da população mundial apresentou o ritmo de crescimento mais elevado da história.

No ano 1.900 o mundo tinha dezesseis cidades com população superior a 1 milhão de habitantes, já em 1.950 existiam 20 cidades com população superior a 2,5 milhões de habitantes. Destas, apenas seis (Xangai, Buenos Aires, Calcutá, Bombaim, Cidade do México e Rio de Janeiro) estavam situadas no Terceiro Mundo. Para o ano 2.015, as estimativas mostram que, das 26 aglomerações urbanas com mais de 10 milhões de habitantes, nada menos que vinte delas estarão no Terceiro Mundo. A Figura 2.1 apresenta a proporção dos países mais populosos entre os anos 1.980 e 2.000 e a Tabela 2.1 apresenta os 10 países mais populosos do mundo entre os anos 1980 e 2009.

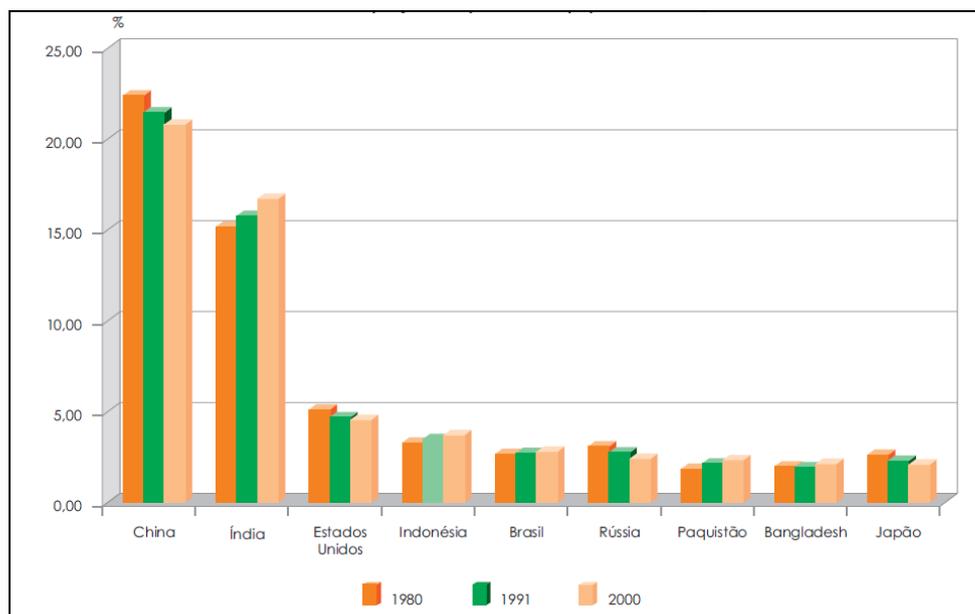


Figura 2.1 Proporção dos países mas populosos entre os anos 1980 e 2000, (U.S. Census Bureau International Data Base, acesso em novembro 2009).

Tabela 2.1 10 países mas populosos do mundo entre os anos 1980 e 2009. (U.S. Census Bureau International Data Base, acesso em novembro 2009).

PAISES	POPULAÇÃO (em milhões)			
	1980	1991	2000	2009
1.China	984.736.448	1.163.607.259	1.268.853.362	1.338.612.968
2.Índia	684.887.680	853.724.391	1.006.300.297	1.156.897.766
3.Estados Unidos	227.726.463	253.492.503	282.171.936	307.212.123
4.Indonésia	150.467.240	184.936.724	213.829.469	240.271.522
5.Brasil	123.019.627	153.583.960	176.319.621	198.739.269
6.Paquistão	85.219.120	118.787.839	147.558.692	174.578.558
7.Bangladesh	87.937.336	114.009.454	136.681.493	156.050.883
8.Nigéria	74.821.273	99.092.499	123.178.818	149.229.090
9.Rússia	139.038.848	148.298.707	146.709.971	140.041.247
10.Japão	116.807.312	123.946.268	126.729.223	127.078.679

De acordo com projeções do U.S. Census Bureau (2006), a população mundial aumentará em 2,5 bilhões de habitantes no curso dos próximos 41 anos, passando dos atuais 6,7 bilhões para 9,2 bilhões em 2050.

A maior concentração da população mundial encontra-se em quatro zonas densamente povoadas, a primeira se encontra na Ásia Oriental, especialmente no Japão, e ao este da China, onde se concentra mais que a quarta parte da população mundial. A segunda maior concentração se localiza na Ásia meridional, em países como a Índia, Indonésia, Bangladesh e

Paquistão em que mesmo a população rural encontra-se fortemente concentrada. A terceira zona de concentração é constituída por grande parte da Europa incluindo o centro-oeste da Rússia. A quarta e última zona densamente povoada se localiza na América, destacando-se a grande megalópole americana que se estende desde Boston até Washington. O Brasil, com mais de 190 milhões de habitantes, apresenta grandes concentrações populacionais em cidades do Sudeste, Nordeste e Sul do país.

2.4 - O BRASIL NO CENÁRIO MUNDIAL

Comparado com outros países latino-americanos, o Brasil não é um país excepcionalmente urbanizado. Em 1960, apenas 26% da população brasileira viviam em cidades com mais de 20 mil habitantes, número que para a Argentina era de 60%, para o Chile de 48% e para o Uruguai cerca de 40%. Como na maioria dos países do continente americano, o Brasil passa por um processo rápido de urbanização, que junto com uma das taxas de crescimento demográfico, mais altas do mundo (cerca de 3,5% ao ano) constitui um dos elementos mais importantes definidores da situação de quase sub-desenvolvimento em que se encontra atualmente.

A população vem experimentando sucessivos aumentos, tendo crescido quase dez vezes, ao longo do Século XX. A taxa média geométrica de crescimento anual no período de 1991-2000, de 1,63%, foi uma das mais baixas já observadas. O maior aumento da população do Brasil ocorreu durante a década de 50. Observou-se, naquele período, um acréscimo de 34,90% na população, correspondendo, em valores absolutos, a 18 milhões de habitantes.

Segundo os resultados publicados pela IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no Diário Oficial da União do dia 5 de outubro de 2007, dos 5435 municípios analisados no censo demográfico do ano 2007, o Brasil passou a ter 183,9 milhões de habitantes, 14 milhões de habitantes a mais que no último censo realizado no ano 2000. Para a primeira metade do ano 2009 o IBGE divulgou, as estimativas das populações residentes nos municípios brasileiros. De acordo com o levantamento, o país tem 191,5 milhões de habitantes espalhados pelas suas 27 unidades da federação.

As grandes regiões do país apresentaram crescimento, mas não houve alterações na sua hierarquia: o Sudeste ainda é a primeira região, seguida do nordeste, sul, norte e centro-oeste. Entre os estados, São Paulo lidera seguido de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Bahia e Rio Grande do Sul. Na Figura 2.2 se visualizam os dados desta contagem e nas Tabela 2.2 e

Tabela 2.3 se apresentam os municípios mais populosos para os anos 2000 e 2009 respectivamente.

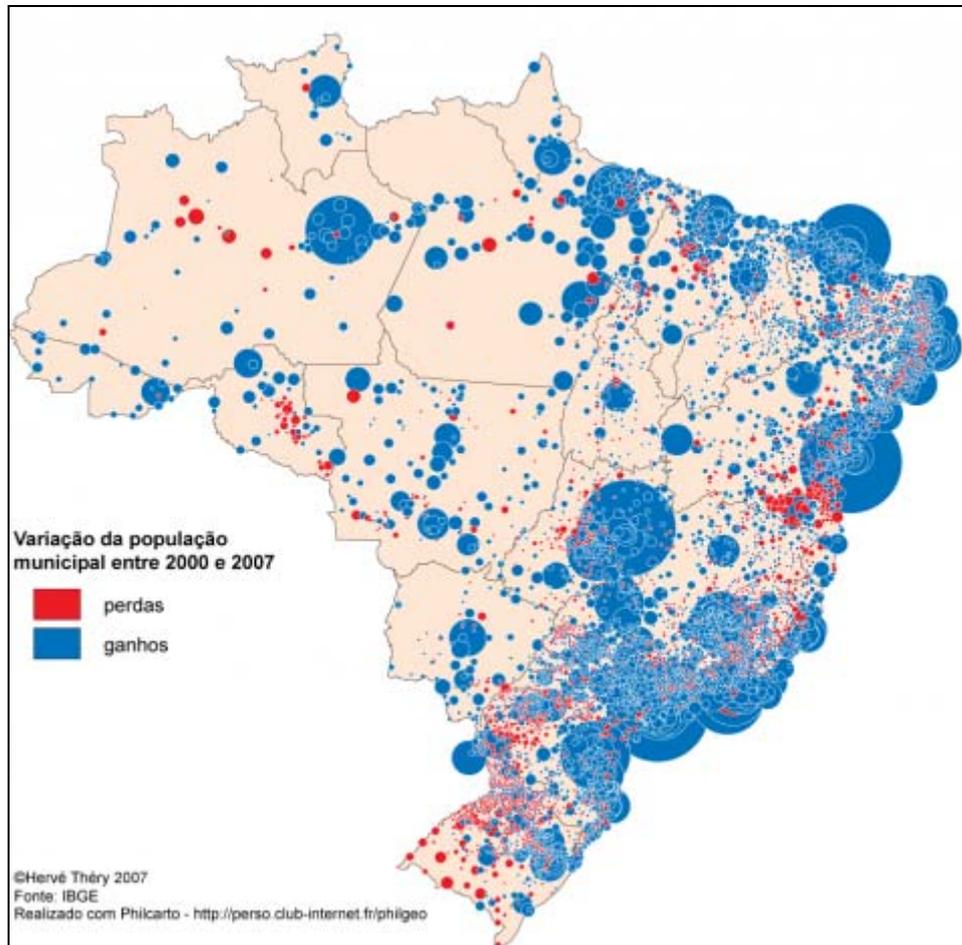


Figura 2.2 Evolução da população brasileira entre 2000 e 2007, (IBGE, Censo Demográfico 2007).

Tabela 2.2 Municípios mais populosos em 2000 (IBGE, 2007)

Municípios	População
São Paulo (SP)	10.434.252
Rio de Janeiro (RJ)	5.857.904
Salvador (BA)	2.443.107
Belo Horizonte (MG)	2.238.526
Fortaleza (CE)	2.141.402
Brasília (DF)	2.051.146
Porto Alegre (RS)	1.960.590
Curitiba (PR)	1.587.315
Recife (PE)	1.422.905
Manaus (AM)	1.405.835
Total	30.942.982

Tabela 2.3-Municípios mais populosos em 2009 (<http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/2009>.
Acesso em novembro 2009)

Municípios	População
São Paulo (SP)	11.037.593
Rio de Janeiro (RJ)	6.186.710
Salvador (BA)	2.998.056
Brasília (DF)	2.606.885
Fortaleza (CE)	2.505.552
Belo Horizonte (MG)	2.452.617
Curitiba (PR)	1.851.215
Manaus (AM)	1.738.641
Recife (PE)	1.561.659
Belém (PA)	1.437.600
Total	37.376.528

2.5 - URBANIZAÇÃO E AGUAS URBANAS.

Todo o processo de urbanização por que passou o Brasil nas últimas décadas não se fez acompanhar do desenvolvimento urbanístico necessário, gerando nas áreas de expansão urbana bolsões de pobreza com graves problemas socioambientais. O excesso de impermeabilização, a falta de sistemas de drenagem urbana apropriados ou com lançamentos inapropriados tem gerado, dentre outros, problemas de erosão e inundação.

Segundo Bertoni e Tucci (2003) a urbanização representa uma das maiores manifestações da atividade humana, sendo caracterizada pela elevada concentração populacional nas áreas urbanas. É evidente que existem dois padrões na evolução da população urbana: o pequeno crescimento ou mesmo decréscimo na maioria dos países ricos e um contínuo e rápido crescimento nos países mais pobres.

Repetindo os erros das capitais, as cidades de médio porte apresentam um crescimento urbano caracterizado pela expansão irregular das periferias em desobediência aos Planos Diretores das Cidades e às normas de ocupação e uso do solo. A falta de políticas públicas adequadas, a ausência do poder público, a falta de efetividade das normas e a deficiência na educação ambiental formal e não formal têm sido as principais causas da expansão urbana desordenada e dos conseqüentes problemas socioambientais gerados. Essas áreas problema são ocupadas sendo feito predominantemente por populações de baixa renda. Quase sempre não se dispõe de avaliações prévias de risco, predominando as ações do Estado apenas quando da

ocorrência das catástrofes naturais. Para evitar o crescimento desordenado das cidades e a ocorrências destas catástrofes, o Poder Público deve garantir a efetividade da legislação, promover o planejamento urbano, educar ambientalmente a população e controlar o uso e ocupação do solo.

A urbanização traz consigo importantes mudanças no uso e ocupação do solo, gerando desmatamentos, obstrução ou destruição das drenagens naturais e impermeabilização excessiva do solo. Esta última além de trazer importantes impactos hidrológicos para a bacia hidrográfica, dá origem a alagamento e inundações e provoca o transbordamento da água nas calhas de drenagem natural.

Segundo Andoh - Declerck,(1997) e Makropoulos *et al.*(1999) numa bacia não urbanizada ocorre o sistema natural de controle distribuído. A vegetação, as depressões naturais, os planos de inundação e solos permeáveis, que fazem parte do sistema natural de controle distribuído, aumentam a infiltração, a retenção temporária e a evapotranspiração na bacia hidrográfica propiciando o equilíbrio ambiental. A natureza utiliza essas características para armazenar e atenuar o escoamento antes de lançá-lo para os cursos de água. Esses mecanismos naturais e os benefícios hidrológicos são quebrados pela urbanização.

Segundo ASCE e WEF (1992), citados em Galvão *et al.*(2000), a porcentagem de áreas impermeabilizadas numa bacia urbana oscila entre 10 e 100%. Nos locais de baixa densidade residencial estão compreendidos entre 10 e 30%, entre 30 e 60% nas zonas de densidade residencial elevada e entre 80 a 100% nas zonas centrais e comerciais de aglomerados urbanos.

Segundo Montenegro e Tucci (2005) os principais impactos da urbanização são:

- Aumento das vazões máximas e de sua frequência, decorrente do aumento da capacidade de escoamento por meio de condutos e canais e da impermeabilização do solo;
- Aumento da erosão, da produção de sedimentos e resíduos sólidos;
- Deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, em virtude da lavagem das ruas, do transporte de material sólido e das ligações clandestinas de esgoto (águas servidas) aos sistemas de drenagem da água pluvial;
- Redução do volume de infiltração;
- Devido à substituição da cobertura vegetal ocorre uma redução da evapotranspiração.

A Figura 2.3 mostra os impactos devidos à urbanização e como se inter-relacionam os diversos processos que ocorrem na área urbana.

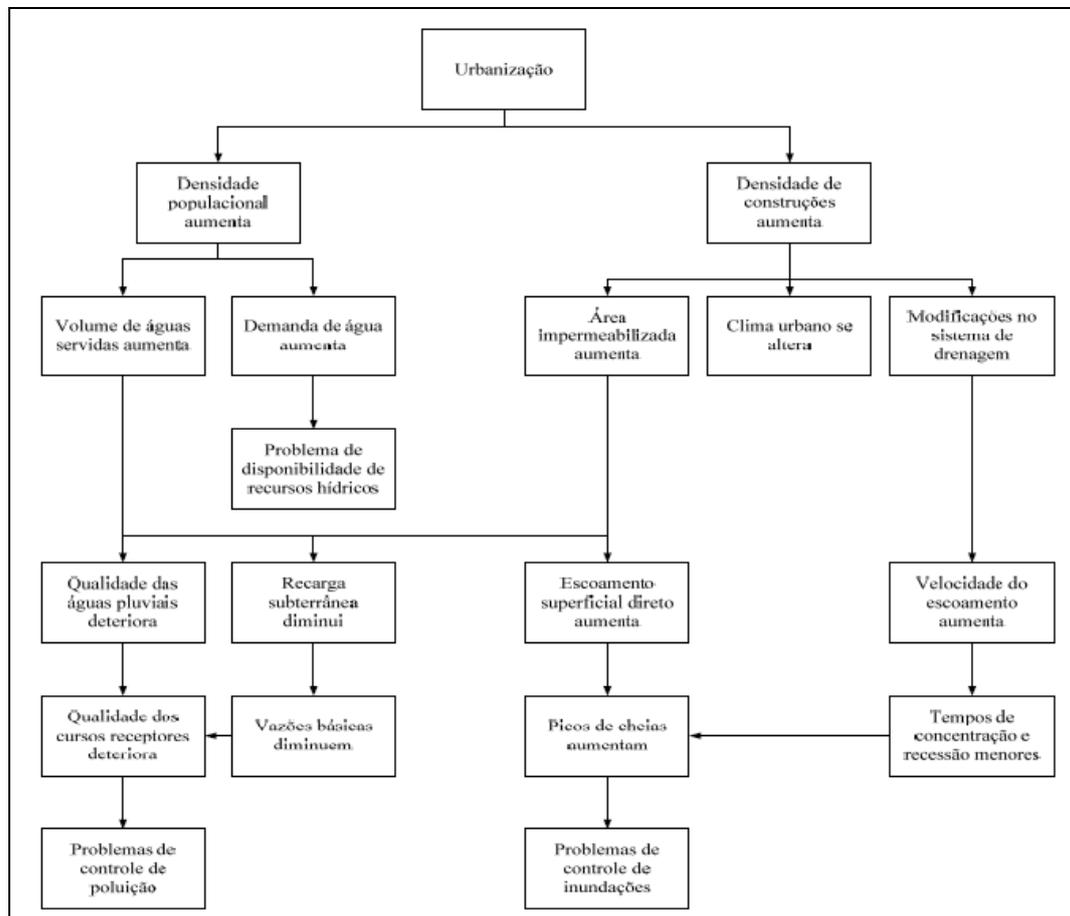


Figura 2.3-Processos que ocorrem em uma área urbana (Hall, 1984 *apud* Porto *et al.*.,1993)

2.5.1 - MUDANÇAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DEVIDO A IMPERMEABILIZAÇÃO.

A impermeabilização vem desenvolvendo um papel importante, na determinação das condições dos corpos de água existentes em uma região, e este processo é um atributo inevitável da urbanização.

A Figura 2.4, ilustra quatro situações caracterizando alterações importantes do balanço hídrico devido ao incremento e forma com que se dá a impermeabilização superficial. Tem-se que em terrenos naturais o escoamento superficial usualmente é muito baixo ou praticamente nulo, devido a fato de que água da chuva infiltra no solo ou retorna a atmosfera por meio da evapotranspiração ou transpiração. Nos terrenos antropisados, o predomínio de áreas

impermeáveis termina por impedir esses processos naturais ampliando enormemente o escoamento superficial.

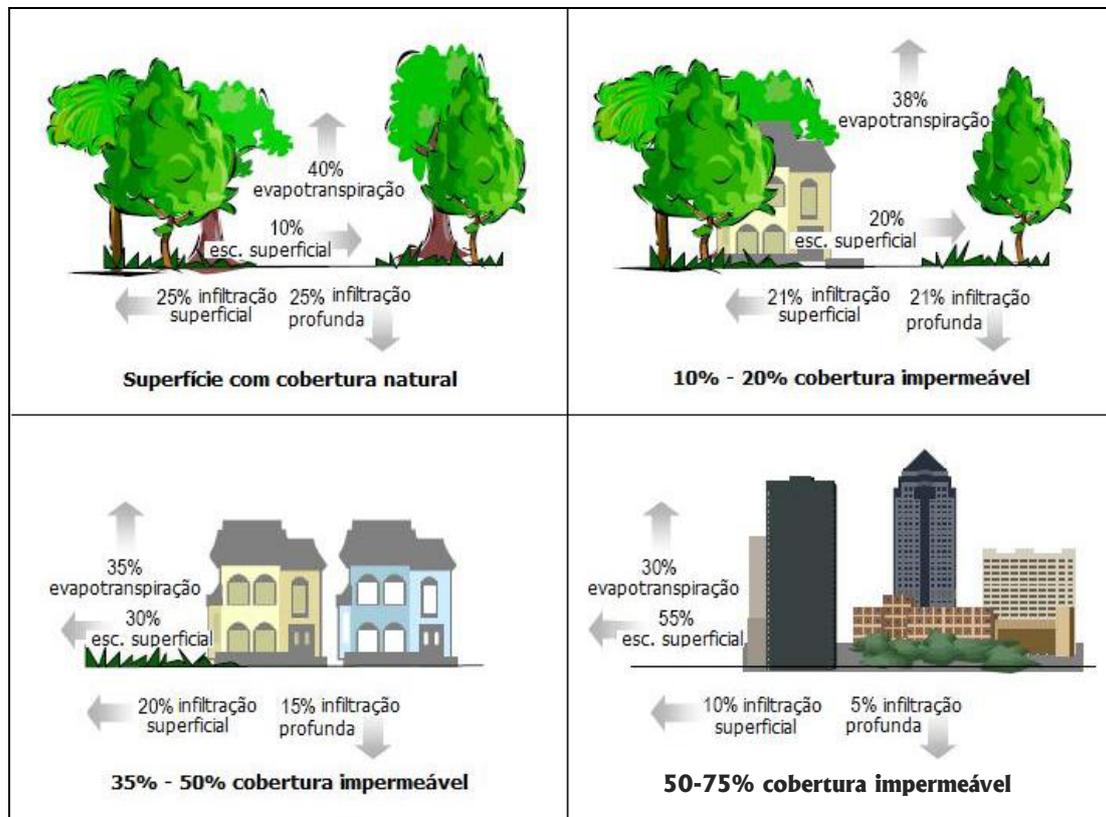


Figura 2.4- Impacto devido à urbanização no balanço hídrico (Schueler,1987).

Na Figura 2.5, Schueler, (1994) apresenta os hidrogramas comparando o fluxo da água para grandes e pequenas enchentes antes e depois da urbanização. Na situação antes da urbanização, o hidrograma registra uma curva mais suave com maior escoamento de base, pico menor e menos rápido e diminuição gradual. Após a urbanização, a vazão de pico é antecipada no tempo e esta é maior e mais rápida, ocorrendo o aumento do volume escoado. A Figura 2.6 mostra as alterações na geometria do fluxo da água em resposta à urbanização.

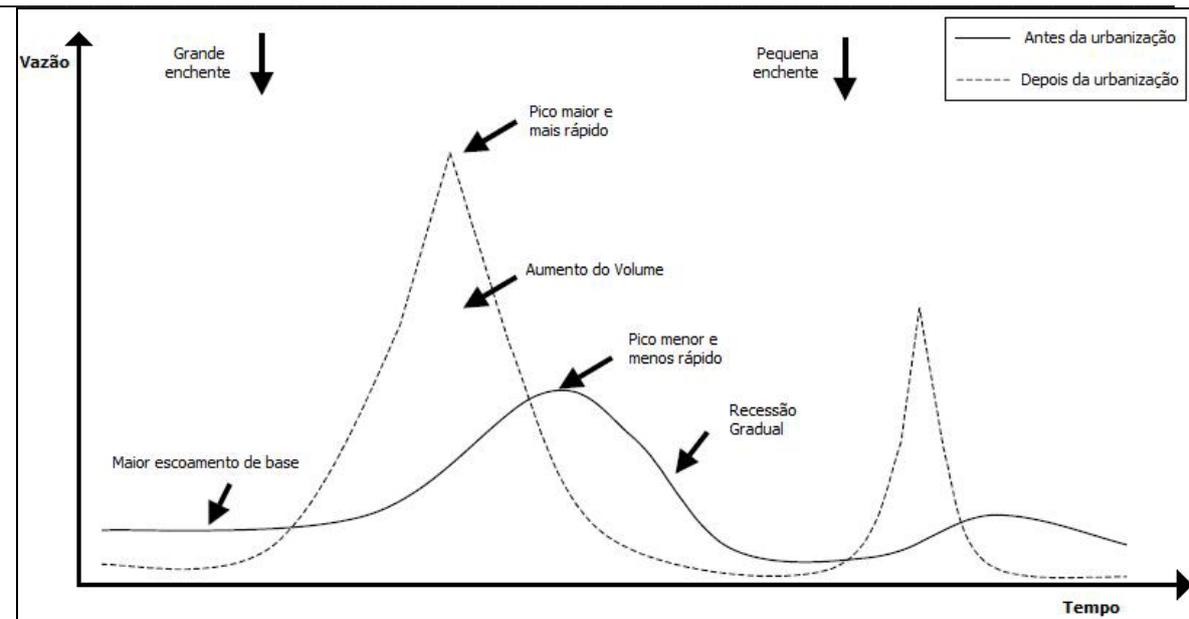


Figura 2.5- Hidrogramas pré e pós-urbanização, (Schueler,1987).

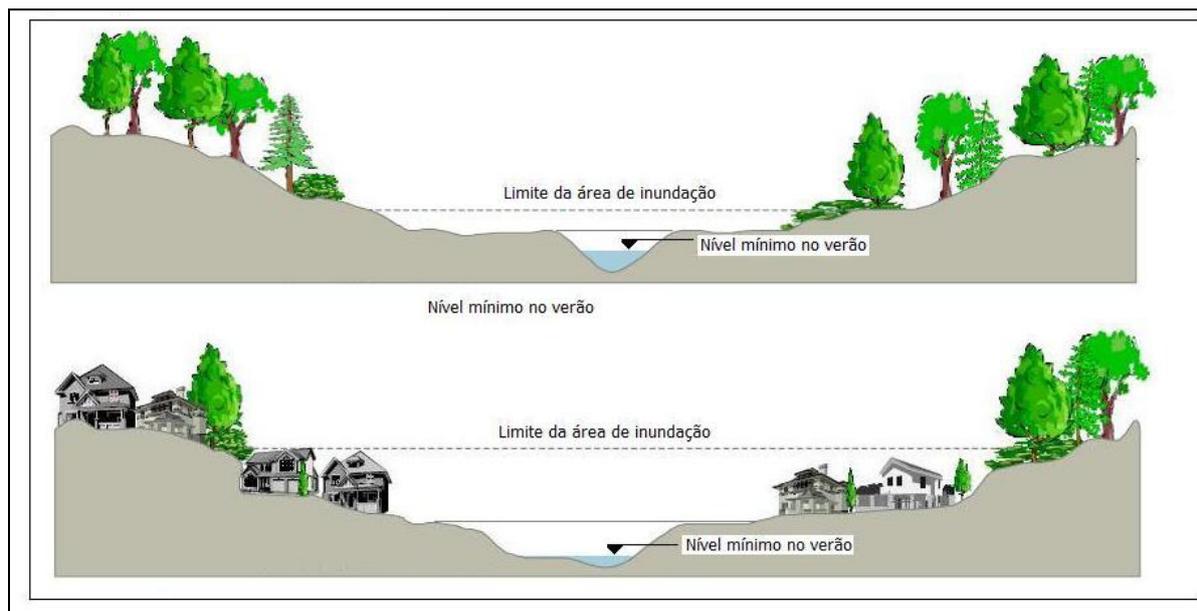


Figura 2.6 – Alteração do fluxo de água em resposta da urbanização, (Schueler,1987).

2.5.2 - CONCEITOS DE CANALIZAÇÃO E RESERVAÇÃO

Segundo Welsh (1989), apud Canholi, 2005, as diretrizes gerais de projeto de drenagem urbana podem ser classificadas segundo os conceitos de canalização e reservação. O conceito de canalização adota a recomendação da rápida evacuação das águas pluviais e servidas das áreas urbanas por meio de condutos, preferencialmente subterrâneos, como forma de conservar os preceitos higienistas, sem a presença nociva da água à superfície das ruas, ao mesmo tempo em que efetuaria a prevenção de doenças de veiculação hídrica. Esta prática,

considerada convencional, foi amplamente utilizada em todo o mundo e principalmente no Brasil. Ela está voltada para a implantação de galerias e canais de concreto, ao tamponamento dos córregos, à retificação de traçados e aumento de declividades de fundo e demais intervenções, que visavam, prioritariamente, promover o afastamento rápido dos escoamentos superficiais das águas pluviais e, ainda, o aproveitamento dos fundos de vale como vias de tráfego. Já o conceito de reservação foca suas ações na contenção da água na própria bacia adotando medidas globais e localizadas de forma combinada e complementar. A Figura 2.7 explicita a distinção entre os dois conceitos.

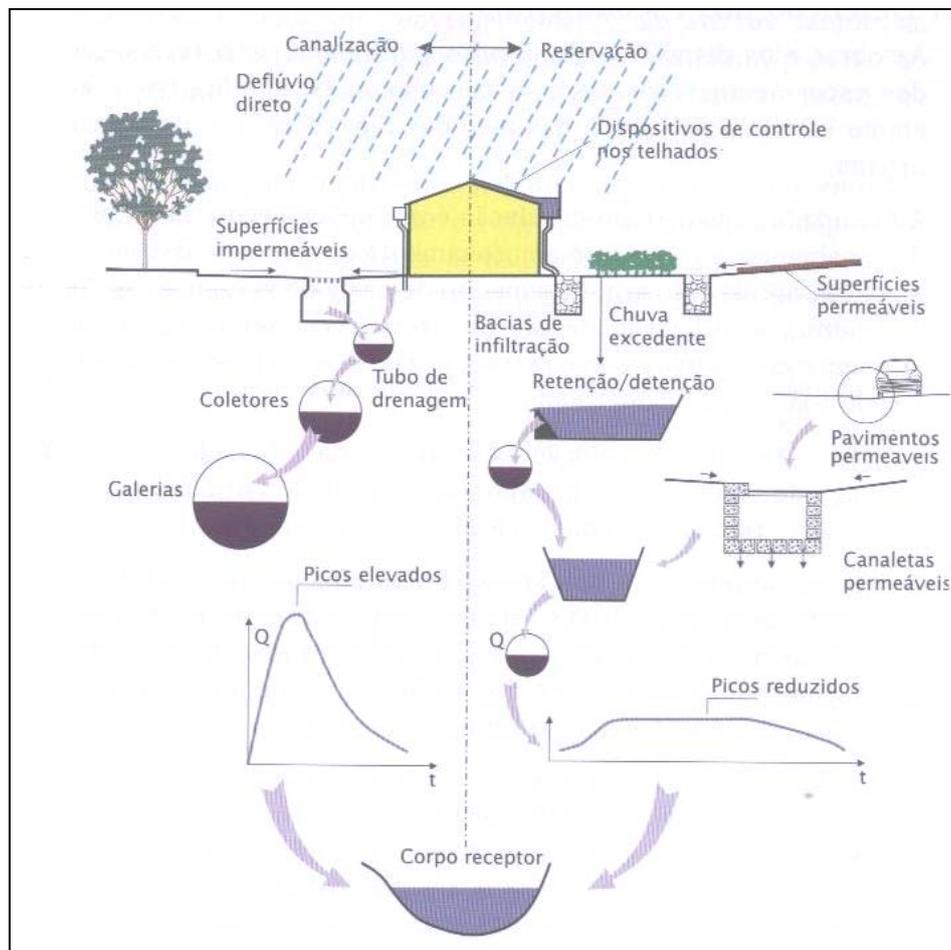


Figura 2.7- Ilustração esquemática dos conceitos de reservação x canalização (Canholi, 2005).

2.5.3 - SISTEMAS CLÁSSICOS DE DRENAGEM URBANA.

A implantação da drenagem urbana tem passado por várias fases, as quais tiveram como objetivo a implementação da urbanização preservando os caminhos naturais do escoamento e priorizando a infiltração. Esse processo é denominado de desenvolvimento sustentável

(Tucci, 2007). A primeira fase deste processo é conhecida como Pre-Higienista a qual finalizou no início do século XX. Nesta fase, as águas urbanas eram conduzidas para fossas e sumidouros ou para a drenagem existente e levadas até o corpo de água mais próximo sem nenhum tipo de tratamento ou coleta, gerando inundações, doenças, epidemias e conseqüentemente grande mortalidade. Antes dos anos 70, durante a fase Higienista, o transporte de esgoto passou a ficar distante dos habitantes e o escoamento foi canalizado reduzindo as doenças, rios contaminados, impactos nas nascentes de água e reduzindo as inundações. Aparece entre os anos 70 e 90 a fase Corretiva, implementando os tratamentos para esgotos domésticos e industriais e o amortecimento do escoamento trazendo como resultado a recuperação de rios, restando à poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental. Por último, depois dos anos 90, tem início a fase de desenvolvimento sustentável onde são projetados tratamentos terciários, e a minimização do escoamento superficial das águas pluviais. Esses novos tratamentos preservam o sistema natural, reduzem as inundações e melhoram a qualidade de vida.

Segundo Baptista e Nascimento (1996), apud Baptista *et al.*, 2005, a urbanização intensa observada ao longo do século XX evidenciou os limites das soluções clássicas de drenagem urbana, conforme descrito a seguir:

- Ao retirar rapidamente as águas pluviais das áreas urbanas transferem-se os problemas de inundação para jusante;
- Como resultado, novas obras de drenagem devem ser construídas a jusante, gerando custos que devem ser arcados por toda comunidade;
- A canalização de cursos d'água gera na população a falsa idéia de segurança no que diz respeito a inundações, facilitando a ocupação das áreas ribeirinhas. A ocorrência de inundações nessas áreas resulta em perdas humanas e em prejuízos econômicos consideráveis;
- Normalmente as soluções clássicas não contemplam os problemas de qualidade de água. São comuns os problemas de inadequação do funcionamento do sistema de drenagem causados por deposição de sedimentos, que têm origem em processos erosivos intensificados pela urbanização ou por deficiências nos sistemas de limpeza urbana, e;
- Finalmente, as soluções clássicas conduzem, muitas vezes, a situações irreversíveis que limitam outros usos presentes ou futuros da água em meio urbano.

2.5.4 - TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS DE DRENAGEM

Devido a essa realidade, novas abordagens foram desenvolvidas, sobretudo na América do Norte e na Europa. Trata-se do conceito de tecnologias alternativas ou compensatórias de drenagem (*Best Management Practices – BMP*), que buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e a preservação ambiental. Essas alternativas abordam os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como base de estudo. A compensação é feita pelo controle da produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização e evitando-se sua transferência rápida para jusante (Baptista *et al.*, 2005a).

Essas tecnologias alternativas, também conhecidas como medidas não convencionais normalmente visam incrementar o processo da infiltração; reter os escoamentos em reservatórios; ou retardar o fluxo nas calhas dos córregos e rios. Também são adotadas as medidas destinadas a proteger as áreas baixas e derivar os escoamentos (Canholi, 2005).

Segundo Brito (2006), essas técnicas apresentam diversas vantagens em relação à solução clássica não só em termos quantitativos pela redução das vazões a jusante, mas também em termos qualitativos, colaborando com a melhoria da qualidade das águas superficiais.

As técnicas compensatórias permitem a convivência com a água no meio urbano, integrando-se o meio ambiente à cidade, de forma a compensar os efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico e podem ser aplicadas em escalas de diferentes magnitudes, sendo compostas por ações individuais e localizadas e também por grandes intervenções coletivas. A Tabela 2.4 descreve algumas das principais técnicas compensatórias com suas funções e efeitos.

Tabela 2.4- Funções e Efeitos das principais Medidas Compensatórias (Adaptado de Baptista *et al.*, 2005)

Obra	Característica Principal Função	Função	Efeito
Pavimento Poroso	Pavimento com camada de base porosa como reservatório	Armazenamento temporário da chuva no local do próprio pavimento. Áreas externas ao pavimento podem também contribuir.	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado pelo pavimento e por eventuais áreas externas
Trincheira de infiltração	Reservatório linear escavado no solo preenchido com material poroso	Infiltração no solo ou retenção, de forma concentrada e linear, da água da chuva caída em superfície limítrofe	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área adjacente
Vala de infiltração	Depressões lineares em terreno permeável	Infiltração no solo, ou retenção, no leito da vala, da chuva caída em áreas marginais	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área vizinha
Poço de Infiltração	Reservatório vertical e pontual escavado no solo	Infiltração pontual, na camada não saturada e/ou saturada do solo, da chuva caída em área limítrofe	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado na área contribuinte ao poço
Micro-reservatório	Reservatório de pequenas dimensões	Armazenamento temporário do esgotamento pluvial de áreas impermeabilizadas próximas	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial de áreas impermeabilizadas
Telhado reservatório	Telhado com função reservatório	Armazenamento temporário da chuva no telhado da edificação	Retardo do escoamento pluvial da própria edificação
Bacia de detenção	Reservatório vazio (seco)	Armazenamento temporário e/ou infiltração no solo do escoamento superficial da área contribuinte	Retardo e/ou redução do escoamento da área contribuinte
Bacia de retenção	Reservatório com água permanente	Armazenamento temporário e/ou infiltração no solo do escoamento superficial da área contribuinte	Retardo e/ou redução do escoamento da área contribuinte
Bacia subterrânea	Reservatório coberto, abaixo do nível do solo	Armazenamento temporário do escoamento superficial da área contribuinte	Retardo e/ou redução do escoamento da área contribuinte
Conduitos de armazenamento	Conduitos e dispositivos com função de armazenamento	Armazenamento temporário do escoamento no próprio sistema pluvial	Amortecimento do escoamento afluenta à macro-drenagem
Faixas gramadas	Faixas de terreno marginais a corpos d'água	Áreas de escape para enchentes	Amortecimento de cheias e infiltração de contribuições laterais

Baptista et al. (2005) classificam estas técnicas em três tipos distintos, conforme sua posição de implantação, que podem ser:

- Distribuída ou na fonte: é o tipo de controle que atua sobre o lote, praças e passeios, são exemplos os poços de infiltração, valas ou valetas de armazenamento ou infiltração, os telhados armazenadores, entre outros;
- Na microdrenagem: é o controle que age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos; são exemplos desse grupo de técnicas os pavimentos porosos, as trincheiras de infiltração, entre outros;
- Na macrodrenagem: no controle sobre os principais riachos urbanos, são exemplos as bacias de retenção e retenção, ou infiltração.

As medidas compensatórias também podem ser organizadas, de acordo com a sua ação sobre hidrograma em cada uma das partes das bacias mencionadas anteriormente, em:

- Infiltração e percolação: normalmente, cria-se espaço para que a água tenha maior infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o fluxo subterrâneo para retardar o escoamento superficial;
- Armazenamento: através de reservatórios que podem ser de tamanho adequado para uso numa residência ou terem porte apropriado para a macrodrenagem urbana. O efeito do reservatório urbano é o de reter parte do volume do escoamento superficial, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo;
- Aumento da eficiência do escoamento: através de condutos e canais, drenando áreas inundadas.
- Diques e estações de bombeamento: soluções tradicionais de controle localizado de enchentes em áreas urbanas que não possuam espaço para amortecimento de inundação.

2.6 - DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

O solo é um meio físico que é composto em condição saturada por duas fases, sólida (mineral ou orgânica) e líquida (solução eletroquímica de água com gás dissolvido), e em condição não saturadas por três fases, sólida, líquida e gasosa (vapor de água e outros gases de composição variável segundo o meio). Uma quarta fase tem sido introduzida nos solos não saturados, é a correspondente à membrana contráctil formada na fronteira entre

as fases líquida e gaseosa devido à interrupção da fase líquida. A Figura 2.8 apresenta um esquema dos principais constituintes do solo.

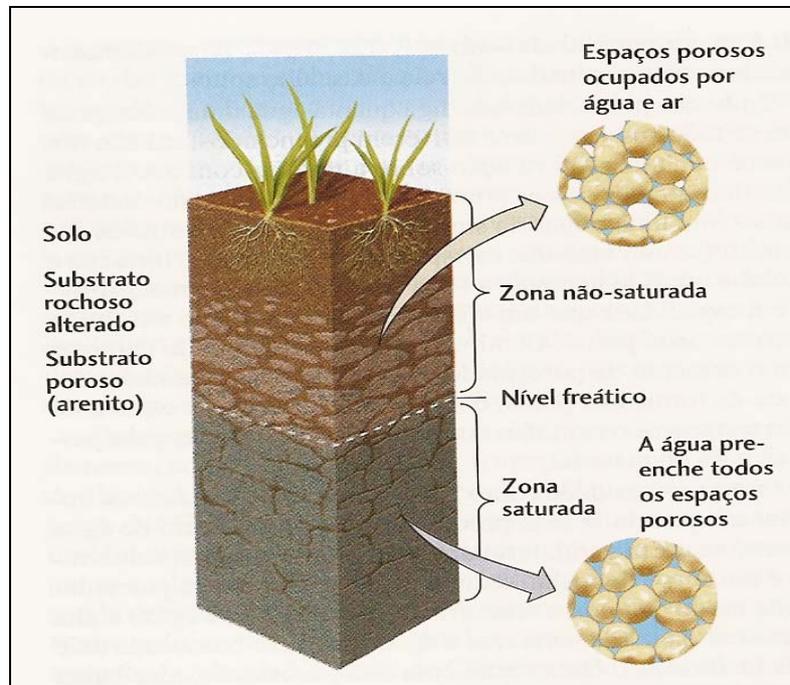


Figura 2.8-Esquema da constituição do solo, (Da Costa, 2004)

O fluxo da água no solo ocorre tanto na condição saturada e como na não saturada. O que faz a água fluir é o diferencial de energia que surge entre dois pontos da massa de solo. O fluxo da água termina sendo um meio condutor importante tanto de contaminantes como de compostos químicos solubilizados, ao mesmo tempo, a própria química do fluido e do meio podem contribuir para o mecanismo de fluxo. De um modo geral, na geotecnia a preocupação se restringe quase sempre ao fluxo oriundo, seja de diferença de potencial gravitacional (energia externa), seja da diferença de potencial de retenção de água (sucção/capilaridade, energia interna). Esta pesquisa volta-se para a busca do entendimento da contribuição conjunta das duas formas de energia para o fluxo que ocorre quando da infiltração da água no solo. Embora a qualidade da água, como se depreende do exposto, exerça influência sobre o fluxo, tal influência não será aqui analisada.

O arranjo estrutural assume grande importância no fluxo. Nos perfis de intemperismo o ele está ligado ao nível de alteração que o solo sofreu assumindo grande importância o modo como os poros se distribuem. Geralmente, os solos profundamente intemperizados apresentam, devido à formação de agregados, distribuição de poros predominantemente

bimodal com presença de macro e de microporos, sendo que esta bimodalidade tende a desaparecer na medida em que diminui o grau de alteração do solo. A inexistência de agregados nos solos saprolíticos finos, os conduzem a uma distribuição de poros bem graduada. A presença de pacotes de argila nestes solos não chega a conduzi-los a uma distribuição de poros bimodal.

A distribuição de poros bimodal faz com que o fluxo se dê predominantemente pelos macroporos inviabilizando a associação da permeabilidade com o índice de vazios ou com a porosidade global. Também a forma da curva característica de retenção de água é distinta interferindo no fluxo em meio não saturado.

2.6.1 - SOLOS NÃO SATURADOS

O clima assume papel fundamental na formação dos solos não saturados. Com a atuação da energia térmica proveniente do sol e da energia eólica proveniente do vento a água existente no solo é retirada por meio de processos comuns no ciclo hidrológico como a evaporação ou e a transpiração. Com a atuação dessa energia os solos mais superficiais tendem a apresentarem-se na forma não saturada. O nível de dessaturação e a profundidade que este atinge no perfil de solo, além de depender das próprias características do perfil e das fazes que o compõe, depende também do balanço hídrico local.

Como já pontuado, inicialmente os solos não saturados foram considerados como um sistema trifásico, constituído por partículas sólidas e água e/ou ar no seus vazios (Lambe e Whitman , 1969). Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), existe uma quarta fase que é a interface entre a água e o ar (membrana contrátil), como mostra a Figura 2.9

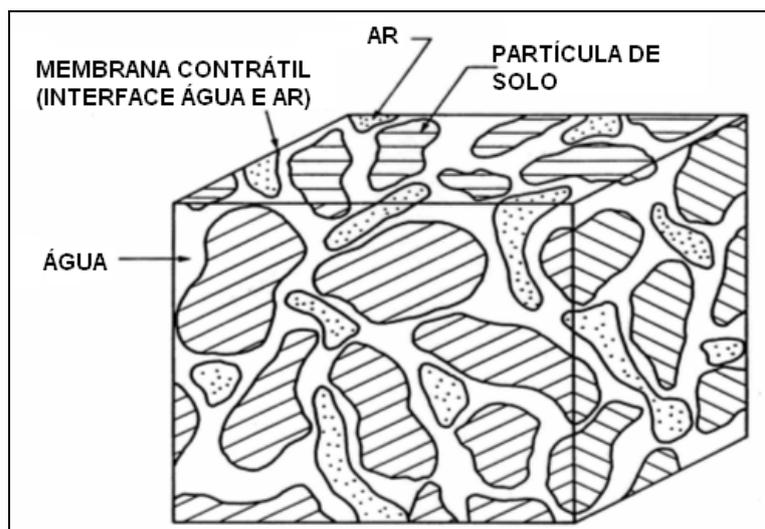


Figura 2.9- Elemento de solo não saturado com fases de ar contínuo, (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

2.6.2 - TENSÃO SUPERFICIAL.

A interface ar-água, ou membrana contrátil possui uma propriedade importante chamada tensão superficial. Esta propriedade tem a capacidade de gerar uma tensão de tração causada pelas forças intermoleculares atuando dentro dessa membrana contrátil. A molécula de água na membrana contrátil está sujeita a um conjunto de forças não equilibradas com resultante para o interior do sistema água. Para que a membrana fique em equilíbrio é gerada uma tensão elástica ao longo de toda a membrana contrátil (Fredlund e Rahardjo, 1993). A Figura 2.10 mostra a molécula no interior da fase água e na interface água-ar. Em solos não saturados, a curvatura do menisco é dada pela diferença de pressão entre as fases ar e água. A diferença entre estas pressões é chamada sucção matricial.

Como contextualizado, esta sucção matricial teria natureza capilar. É preciso que se entenda, no entanto, que nos solos argilosos a ela se soma a parcela de sucção oriunda das forças de adsorção. Daí, muitas vezes, quando essa contribuição das forças de adsorção é muito importante, se tem pouca influência das variações da porosidade nas curvas características de retenção de água traçadas colocando a sucção como uma função da umidade gravimétrica do solo.

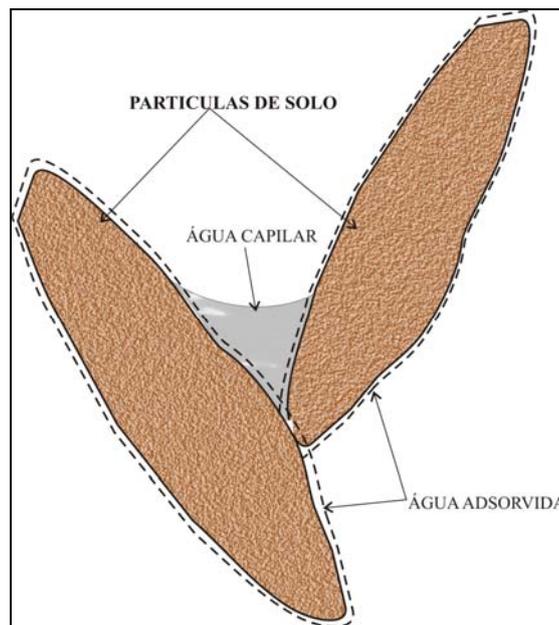


Figura 2.10- Molécula no interior da fase água e na interface água-ar, (Modificado de CRUZ, 1996).

2.6.3 - SUCÇÃO

A sucção tem grande importância na compreensão do comportamento mecânico e hidráulico e da deformabilidade dos solos não saturados.

Schofield (1935), *apud* Sharma (1998), definiu sucção como uma deficiência de pressão no líquido contido nos poros de um solo não saturado. Esta deficiência possibilita ao solo não saturado absorver água quando este se encontra na pressão atmosférica.

Camapum de Carvalho e Benevelli (2003) definem sucção como a quantidade de energia por unidade de volume necessária para se retirar a água do meio poroso, o que corresponde à capacidade do solo de reter água.

Aitchison *et al.* (1965), define por meio da Equação 2.1 o potencial de sucção total como função de:

ϕ_o = potencial osmótico ou de soluto, correspondente à pressão osmótica da água do solo;

ϕ_m = potencial mátrico, resultante de forças capilares e de adsorção;

ϕ_g = potencial gravitacional, determinado pela elevação do ponto considerado em relação ao nível de referencia;

ϕ_a = potencial pneumático, que corresponde a pressão na fase gasosa;

ϕ_p = potencial de consolidação, que corresponde à parcela de sobrecarga aplicada no terreno que é transmitida a pressão de água intersticial.

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m + \phi_g + \phi_a + \phi_p \quad (\text{Equação 2.1})$$

Admitindo que não exista um processo de adensamento e que o ar existente nos poros do solo esteja ligado com a atmosfera, as parcelas de potencial pneumático e de consolidação podem ser desprezadas. Considerando-se o nível de referência igual ao nível do solo analisado também pode ser desprezado o potencial gravitacional, reduzindo a equação (2.1) à equação (2.2).

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m \quad (\text{Equação 2.2})$$

Assim, os potenciais mátricos e os osmóticos podem ser tratados pelas suas pressões correspondentes que são respectivamente, a sucção mátrica e a sucção osmótica e a sucção total é a soma das parcelas mátrica e osmótica conforme definido na equação (2.3).

$$S_t = S_m + S_o \quad (\text{Equação 2.3})$$

Edil *et al.* (1981), por meio de ensaios triaxiais com sucção controlada, verificou que o comportamento mecânico do solo não saturado é afetado basicamente pela sucção mátrica. Fredlund (1979); Alonso *et al.* (1987) consideram também que a componente sucção mátrica seja suficiente para descrever o comportamento de resistência dos solos não saturados já que esta depende da estrutura e da composição do solo, e é definida como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios ($u_a - u_w$) e que tende a desaparecer com a saturação. A parcela osmótica depende da concentração química da água do solo, acreditando-se que esta não contribua significativamente para sua resistência ao cisalhamento ou que esta só contribua em condições específicas.

2.6.4 - MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA SUCCÃO.

Existem diversos métodos de campo e de laboratório que permitem medir a sucção. Estes métodos relacionam a sucção como vários parâmetros visando obter a curva característica do solo. Os instrumentos que medem a sucção podem ser divididos em duas categorias

- Diretos: Medem a quantidade de energia da água nos poros
- Indiretos: Medem parâmetros como umidade relativa, resistividade e condutividade os quais são relacionados com a sucção atuante por meio de uma equação de calibração.

Apresenta-se na Tabela 2.5 algumas técnicas utilizadas para a determinação da sucção em solos. A única técnica que será utilizada neste trabalho será a do papel filtro.

Tabela 2.5-Métodos para medida de sucção (Vilar,1997 apud Calle, 2000-modificado)

Técnica	Realizado em	Tipo de sucção	Tipo de medida		Observação
			Faixa de medida	Tipo de medida	
Funil de pedra porosa	Lab	Matricial	0-70	Direta	Para baixas sucções. Sucção aplicada diretamente à amostra
Tensiômetros	Lab/campo	Matricial	0-70	Direta	Tempo de resposta em função da pedra porosa
Blocos porosos	Lab/campo	Matricial	10-1000	Indireta	Histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções. Longo tempo de resposta. Fácil deterioração do material
Placa de pressão	Lab	Matricial	20-1500	Direta	A capacidade depende da pedra porosa (pressão de entrada de ar). Utiliza a técnica de translação de eixos.
Psicrômetro	Lab/campo	Total e osmótica	100-8000	Direta	Mais recomendada para laboratório. Depende de rigoroso controle de temperatura
Membrana de pressão	Lab	Matricial	Até 10000	Direta	Emprega a técnica de translação de eixos. Emprega membrana de celulose..
Papel filtro	Lab	Matricial e total	Todos os valores	Indireta	Precisa de máxima precisão na pesagem
Sensor de condutividade elétrica	Laboratório	Matricial	0-1800		

2.6.5 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O objetivo principal da determinação da curva característica é a obtenção da relação entre a água presente nos poros do solo e sua sucção.

A determinação da curva característica é fundamental para o entendimento do comportamento do solo não saturado, pois representa a capacidade do solo de armazenar água quando submetido a diferentes valores de sucção. A técnica do papel filtro tem se mostrado muito útil para a obtenção dessa curva e vem sendo bastante utilizada em função da simplicidade, do baixo custo e da possibilidade de medir-se sucção total ou mátrica em amplos limites. O volume de água presente no solo é quantificado em termos do teor de umidade volumétrico (θ), que é a relação entre o volume de água e o volume total da amostra; teor de umidade gravimétrico (ω), que é a relação entre o peso da quantidade de água e o peso dos sólidos; ou em termos do grau de saturação (S_r) que é a relação entre o volume de água e o volume de vazios presentes no solo. Fredlund e Xing (1994) sugerem o uso da umidade volumétrica para expressar a quantidade de água contida nos vazios. Camapum de Carvalho et al. (2002) mostraram, no entanto, que a representação da curva

característica como uma função da umidade gravimétrica cria maior homogeneidade das mesmas ao longo de um perfil de intemperismo.

Na natureza, o solo está constantemente sujeito a ciclos de secagem e umedecimento, antes, durante e depois da chuva ou devido às flutuações do nível das águas subterrâneas. Durante esses ciclos, como quase sempre o período de tempo é insuficiente para que ocorra o reequilíbrio de energia, há diferenças na sucção medida nos processos de enchimento e esvaziamento dos poros do solo, resultando que a curva descrita por um terreno durante a fase de umedecimento não é a mesma que a observada na fase de secagem. Este fenômeno é conhecido como *histerese*, ou seja, para o mesmo teor de umidade no solo, a água está retida com uma energia diferente segundo o processo adotado para a variação da umidade do solo. É preciso que se entenda, no entanto, que a histerese não é nada mais nem nada menos que o resultado da falta de equilíbrio de energia, pois esta só ocorreria em grandes espaços de tempo e na natureza antes que esse equilíbrio tenha lugar, novas alterações de umidade surgem.

De acordo com Presa (1982), este efeito de histerese pode ser atribuído aos seguintes fatores:

- Geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais.
- Influência do ângulo de contato solo-água, que devido à rugosidade da superfície do grão, que varia segundo avanço ou recuo do menisco;
- Ocorrência de ar aprisionado nos poros, reduzindo o teor de umidade no processo de umedecimento;
- História de secagem e umedecimento do material;
- Liberação gradual do ar dissolvido na água.

A Figura 2.11 ilustra a determinação da curva característica em laboratório segundo os seguintes os procedimentos de secagem e de umedecimento. Nesses casos se tem:

- Por secagem ou desidratação: quando a mostra previamente saturada é exposta a potenciais matriciais crescentes, o que implica ir diminuindo a umidade do solo;
- Por umedecimento, molhagem ou hidratação: quando uma amostra seca tem o potencial matricial reduzido gradualmente, incrementando-se a umidade.

A forma mais comum de se determinar a curva de retenção de água do solo é por secagem.

Os principais fatores que interferem na forma da curva característica de sucção dos solos são:

- Composição granulométrica do solo: Solos granulares tendem a apresentar perda brusca de umidade, quando a sucção ultrapassa um determinado valor de entrada de ar dos macroporos. Isso se deve a uniformidade dos poros. Em geral, quanto maior for a fração de argila maior será o teor de umidade para o mesmo valor de sucção. Essa alta retenção de água nas argilas é devida principalmente ao efeito das forças de adsorção. Solos argilosos geralmente apresentam uma variação gradual da sucção com o teor de umidade devido à graduação dos poros. A Figura 2.12 apresenta as curvas características típicas de solos com diferentes granulometrias.

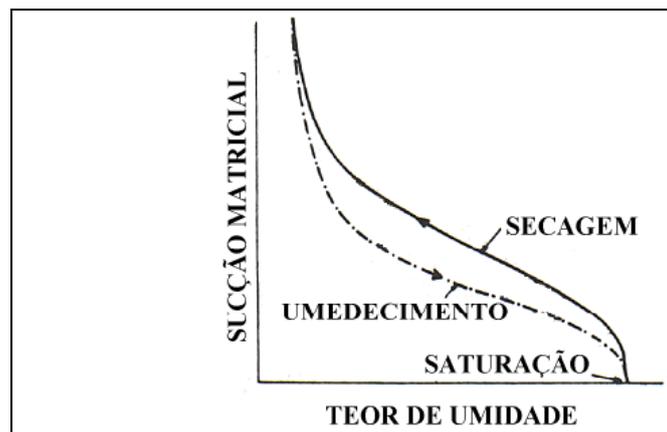


Figura 2.11- Curva característica por umedecimento e secagem (Hillel, 1971)

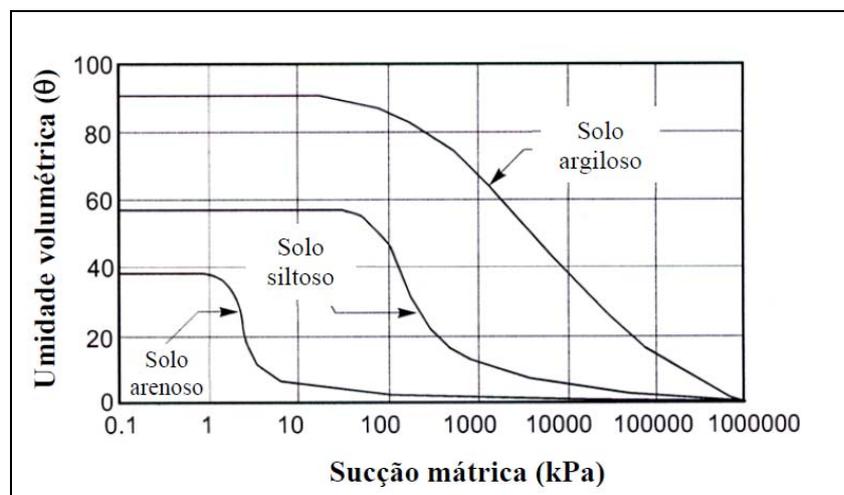


Figura 2.12- curvas características típicas de diferentes tipos de solo (Adaptado de Fredlund E Xing, 1994)

- Mineralogia das partículas: A influência se dá pelo fato dos argilo-minerais apresentarem diferentes forças de adsorção. Os solos expansivos requerem atenção especial, pois com a variação da sucção ocorre também a variação do volume de água inter camadas do mineral e não apenas inter partículas.
- Estrutura do solo: O sistema de poros controla as forças capilares, sendo que no caso dos solos profundamente intemperizados a sua distribuição condiciona a forma da curva característica conforme mostrado por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004).
- Temperatura: Seu incremento causa uma diminuição na tensão superficial na interface solo-água, diminuindo a curvatura do menisco e conseqüentemente a sucção.

2.7 - CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Segundo Cordão Neto, (2005) o comportamento hidráulico de solos não saturados está relacionado à capacidade de armazenamento e à facilidade de transporte de fluidos através do elemento de solo. Esta dificuldade pode estar relacionada fenomenologicamente a duas propriedades. A primeira seria a condutividade hidráulica ou permeabilidade e a segunda seria a curva característica do solo.

A condutividade hidráulica ou permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo “coeficiente de permeabilidade (k)”. Para solos saturados este coeficiente pode ser assumido constante, situação que não ocorre para solos não saturados. A condutividade hidráulica dos solos não saturados depende dos mesmos fatores que influenciam a permeabilidade dos solos saturados. Entretanto, autores como Tavenas et al. (1983) e Smiles et al. (1985) admitem que a salinidade e a temperatura também interferem de forma significativa no processo.

Em um solo saturado que perde água até transformar-se em um solo não saturado, e que continua a diminuir seu grau de saturação, o ar vai progressivamente substituindo a água dos poros. Durante este processo de perda de umidade, pode ocorrer também a retração dos poros, diminuindo a condutividade hidráulica ou a permeabilidade do solo.

Os principais fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade são: granulometria, índice de vazios, composição químico-mineralógica, características do fluido, estrutura e macro-estrutura.

- Granulometria: O tamanho das partículas que constituem os solos influencia no valor de “k”. Nos solos pedregulhosos sem finos (partículas com diâmetro superior a 2mm), por exemplo, o valor de “k” é superior a 0,01cm/s; já nos solos finos (partícula com diâmetro inferior a 0,074mm) os valores de “k” são bem inferiores a este valor. É preciso, no entanto, que se leve em conta a textura no estado natural, pois muitas vezes, como é o caso dos solos profundamente intemperizados, as partículas de argila encontram-se agregadas dando origem à macroporosidade e comportamento hidráulico mais próximo do das areias.
- Índice de vazios: A permeabilidade dos solos esta relacionada com o índice de vazios, logo, com a sua porosidade. Quanto mais poroso for um solo, maior será o índice de vazios, por conseguinte, mais permeável (para argilas moles, isto não se verifica). Aqui também, faz-se necessário uma distinção para os solos tropicais profundamente intemperizados, pois neles, os vazios sendo constituídos por macro e microporos e sendo que fluxo ocorre predominantemente pelos macroporos a permeabilidade não apresenta relação satisfatória com a porosidade ou índice de vazios global.
- Composição mineralógica: A predominância de alguns tipos de minerais na constituição dos solos tem grande influência na permeabilidade. Por exemplo, argilas moles que são constituídas, predominantemente, de argilo-minerais (caulinitas, ilitas e montmorilonitas) possuem um valor de “k” muito baixo, que varia de 10^{-7} a 10^{-8} cm/s. Já nos solos arenosos e cascalhos sem finos, que são constituídos, principalmente, de minerais silicosos (quartzo) o valor de “k” é da ordem de 1,0 a 0,01cm/s. Ou seja, a atividade superficial do mineral tem grande influência na permeabilidade.
- Estrutura: É o arranjo das partículas. Nas argilas atuam forças internas de natureza eletromagnéticas que aliadas às forças externas são definidoras da estrutura do solo que é por natureza complexa. Nas areias o arranjo estrutural é mais simplificado, constituindo-se por canalículos, interconectados onde a água flui mais facilmente.
- Fluido: O tipo de fluido que se encontra nos poros. Nos solos, em geral, o fluido é a água com gases (ar) dissolvidos. Mas mesmo tratando-se de água, suas características terminam por interferir no fluxo, principalmente no caso das argilas devido à atividade superficial desses minerais.

- Macro-estrutura: Principalmente em solos que guardam as características do material de origem (rocha mãe) como diaclases, fraturas, juntas, estratificações. Estes solos constituem o horizonte C dos perfis de solo, também denominados de solos saprolíticos.
- Temperatura: Quanto maior for a temperatura, menor a viscosidade da água e, portanto, mais facilmente ela escoar pelos vazios do solo com correspondente aumento do coeficiente de permeabilidade; k é inversamente proporcional à viscosidade da água. Por isso, os valores de k são referidos à temperatura de 20°C de modo a uniformizar a informação.

2.7.1 - MEDIDAS DA PERMEABILIDADE

Existem diversos métodos e ensaios utilizados em laboratório e campo para se determinar o coeficiente de permeabilidade do solo.

A) ENSAIOS DE LABORATORIO

Dentro das técnicas de ensaios de laboratório, os aparelhos para determinar a condutividade hidráulica são os permeômetros, que por sua variedade podem ser classificados em permômetros de parede rígida ou parede flexível. Os permeômetros de parede rígida são utilizados para ensaio de materiais granulares (solos não coesivos), com uma alta condutividade hidráulica. Já os permeômetros de parede flexível são utilizados para materiais com baixa condutividade hidráulica como argilas e materiais cimentados (por exemplo, rochas e solo-cimento).

No permômetro de parede rígida o corpo de prova é contido em uma caixa ou tubo rígido, e o fluido percolante o atravessa axialmente. Daniel (1994) descreve os três tipos de permômetros de parede rígida a seguir:

- Tipo molde de compactação: Este é constituído por um cilindro fixo entre duas placas (tampas) em suas extremidades e vedadas com anéis de borracha. No topo e na base são colocados materiais drenantes (Figura 2.13). Esse equipamento é mais usado para solos compactados. O fluxo que existe entre a parede do permômetro e o corpo de prova é reduzido devido à compactação do material no próprio molde.
- Tipo célula de consolidação: Permite o controle das tensões no corpo de prova, este ensaio é feito dentro de uma célula de consolidação onde o fluxo de água do corpo de prova é conectado a um sistema de medida como se apresenta na Figura 2.14.

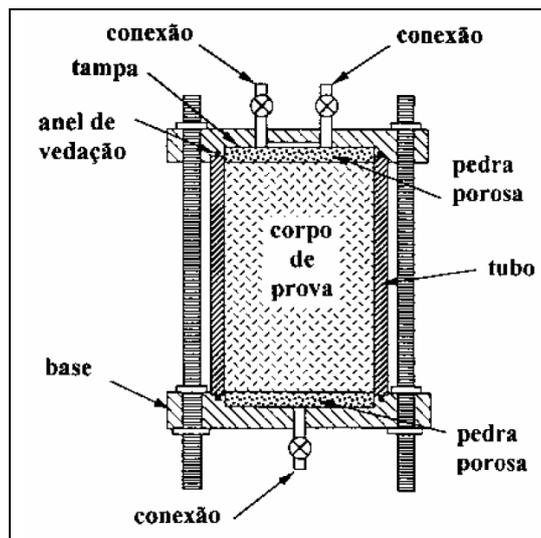


Figura 2.13- Permeômetro tipo molde de compactação (Daniel, 1994)

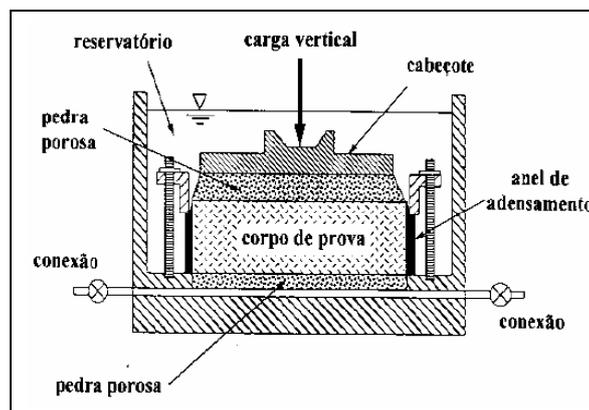


Figura 2.14- Permeômetro de parede rígida tipo célula de adensamento (Daniel,1994)

- Permeômetro do tipo tubo amostrador: O permeômetro do tipo tubo amostrador trata-se de um tubo que recolhe amostras indeformadas em campo. Várias vezes este tubo é cortado no laboratório e fixado entre as placas, sendo o corpo de prova percolado com líquidos diretamente no interior do tubo, Figura 2.15.

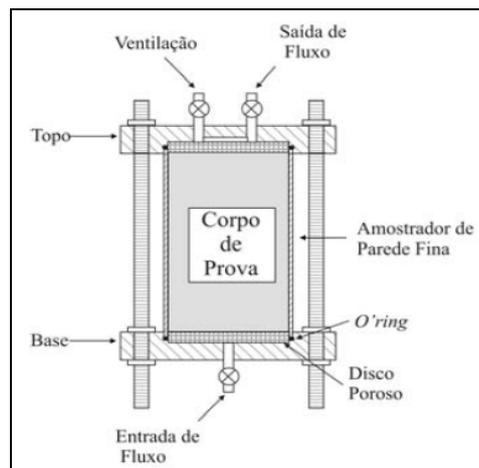


Figura 2.15-Permeâmetro que utiliza amostrador de parede fina, (Daniel,1994)

O permeâmetro de parede flexível consiste de uma câmara simplificada adaptada ao ensaio de permeabilidade. A Figura 2.16 mostra o desenho esquemático de um permeâmetro de parede flexível.

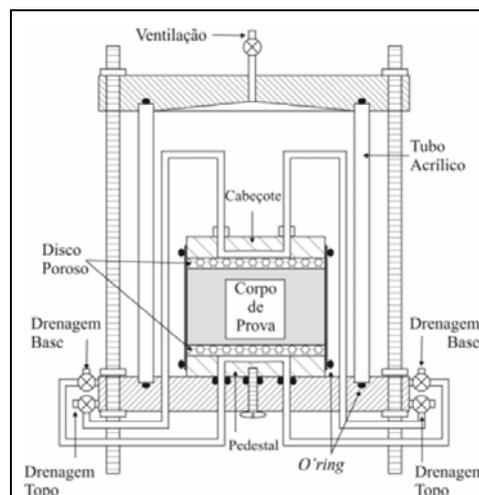


Figura 2.16- Permeâmetro de parede flexível (modificado de Daniel et. al 1994)

Neste ensaio, o corpo de prova colocado no interior da célula triaxial é envolvido por uma membrana, e disposto entre a base e o pedestal, sendo confinado entre pedras porosas, na parte superior e inferior. A célula triaxial é preenchida com água, aplicam-se tensões de confinamento, que comprimem a membrana flexível e o corpo de prova. Desta forma o fluxo lateral entre a membrana e o corpo de prova é minimizado. Uma linha de drenagem é conectada na parte inferior do corpo de prova onde entrará o fluxo d'água, e outra na parte superior onde sairá o fluxo.

Na Tabela 2.6 é apresentada uma comparação indicando as vantagens e desvantagens dos permêametros apresentados em parágrafos anteriores.

Tabela 2.6-Vantagens e desvantagens dos permêametros.

Tipo de permêametro	Vantagens	Desvantagens
Parede rígida	Simplicidade de construção, operação e baixo custo da célula; podem ser aplicadas as tensões verticais nulas se desejado	Problemas de fluxo lateral nas amostras; sem controle da tensão horizontal; não é possível confirmar o grau de saturação pelo parâmetro B;
Parede flexível	Saturação da amostra por contrapressão e tem-se a possibilidade de verificar o parâmetro $B = \Delta u / \Delta \sigma$; possibilidade de controle das tensões principais; realização de ensaios com materiais de baixa condutividade hidráulica; ensaios mais rápidos; a membrana que envolve a amostra reduz o risco de percolação lateral devido à tensão de confinamento aplicada; as mudanças volumétricas e deformações podem ser medidas	Os custos da célula e dos equipamentos envolvidos para realização dos ensaios são elevados; problemas de compatibilidade química da membrana com líquidos utilizados na percolação; dificuldades de execução do ensaio com tensões de compressão muito baixas; problemas de difusão através da membrana

Os ensaios utilizando os permeâmetros são calculados considerando a lei de Darcy e, basicamente, existem duas formas de conduzi-los:

- Ensaios a carga constante: onde a carga hidráulica é mantida constante e a vazão correspondente é medida. Este ensaio é o mais indicado para materiais arenosos que possuem condutividades hidráulicas elevadas;
- Ensaios a carga variável: onde a carga hidráulica varia com o tempo e a medição da vazão é feita a partir das medidas da variação do nível de água. Usado principalmente para determinação da condutividade hidráulica de solos argilosos, os quais, sendo praticamente impermeáveis, são atravessados por uma quantidade de água muito pequena durante o ensaio.

B) ENSAIOS EM CAMPO

Segundo Daniel, (1987) os ensaios de laboratório ao serem comparados com ensaios de campo apresentam as seguintes vantagens: controle nas condições de contorno (saturação, nível de tensões efetivas, carga hidráulica e direção de fluxo), menor tempo de ensaio e custo, possibilidade de medidas de anisotropia. Os ensaios de campo, no entanto, sofrem um menor efeito escala, já que por mais cuidadosos que sejam os ensaios de permeabilidade em laboratório, representam somente pequenos volumes de solo em pontos específicos de uma grande massa. Portanto, a validade da aplicação dos valores obtidos em

laboratório aos problemas de percolação e drenagem *in situ* dependerá de como possam ser considerados representativos da massa de solo.

Há uma diversidade de opções de ensaios de campo para determinação da condutividade hidráulica dos solos. Estes ensaios podem ser feitos em furos de sondagem, em poços ou em cavas; aproveitando piezômetros e utilizando equipamentos e arranjos especiais, como os infiltrômetros (Vilar, 1997).

Segundo Trautwein e Boutwell (1994), Daniel & Stephen(1994), dos diferentes tipos de ensaios, duas são as técnicas mais usadas: infiltrômetro de anel duplo, e os ensaios em furos de sondagem.

- Ensaio de bombeamento: Trata-se de um ensaio de grande uso para a determinação da permeabilidade *in situ* de camadas de areia e pedregulho localizadas abaixo do nível d'água. O 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 d'água em piezômetros colocados nas proximidades. O custo do ensaio de bombeamento é relativamente alto e, portanto, deve sempre ser precedido por investigações que estabeleçam a natureza geral das formações. Ver Figura 2.17.

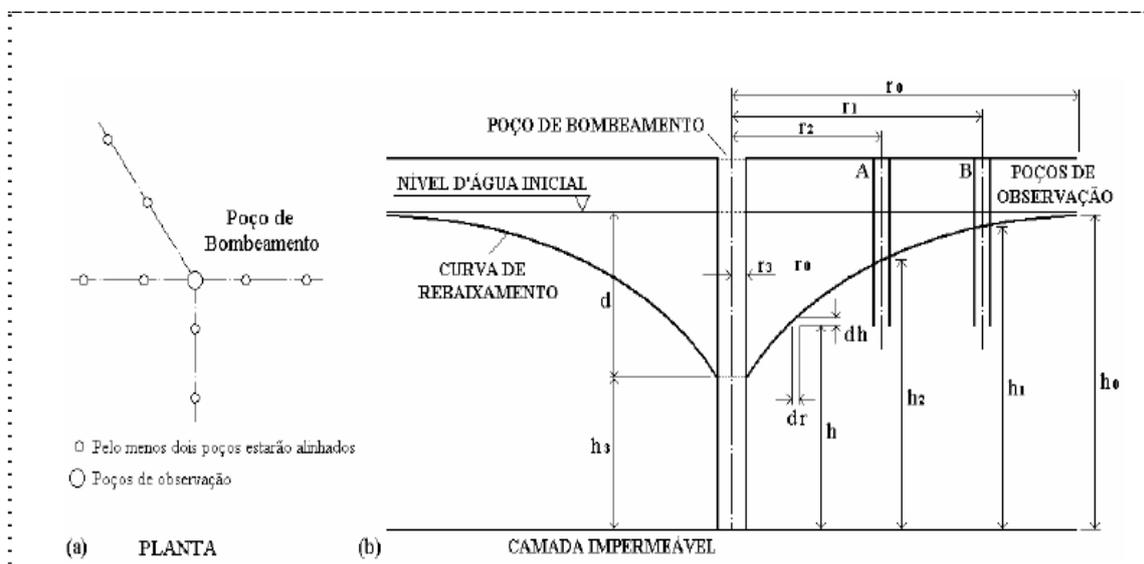


Figura 2.17-(a) disposição dos poços; (b) seção através do poço de bombeamento (Alonso, 1999)

- Ensaio de infiltração em furos de sondagem: Este ensaio é realizado através das perfurações que são feitas durante a etapa de investigações de campo (SPT, por exemplo). É um ensaio de custo baixo quando comparado com o ensaio de

bombeamento. No momento das análises é necessário especial cuidado para não utilizar fórmulas erradas já que as mesmas são deduzidas para o cálculo da permeabilidade aplicáveis somente aos casos específicos.

- Ensaio com piezômetros: Na engenharia geotécnica, piezômetros são instrumentos amplamente utilizados para monitoramento de poro pressões em encostas naturais, taludes, obras de terra, etc. Os ensaios com piezômetro são empregados para a determinação do k em solos naturais e camadas compactadas. Tendo como principal vantagem a sua simplicidade e rápida execução.
- Ensaio de perda d'água sob pressão (ensaio Lugeon): Permite obter informações quantitativas sobre a circulação da água em rochas fissuradas, com o objetivo de julgar as possibilidades de consolidação por injeções.

2.8 - INFILTRAÇÃO

Infiltração é o fenômeno de penetração da água no solo nas camadas próximas a superfície do terreno. Portanto, é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no interior do maciço. Segundo Gilson *et al.*, (2005) as principais fontes de água que podem ser consideradas para infiltrar são geradas pela chuva, degelo e irrigações.

Segundo Brandão *et al.* (2006) na medida em que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade. A dificuldade de saturação se associa a colocação da fase ar sob pressão positiva o que tende a criar uma barreira contra a infiltração.

A Figura 2.18a mostra um perfil de solo inundado com o avanço da frente de molhagem e a Figura 2.18b mostra as zonas de saturação, transmissão, umedecimento demarcando a frente úmida.

Numa análise do perfil tem-se:

- Zona de saturação – é a única dentre as águas da superfície que propriamente constitui a água subterrânea, cujo movimento se deve também à ação da gravidade, obedecendo às leis do escoamento subterrâneo, $S = 1$;
- Zona de transição – sofre uma redução da umidade w com a profundidade e a condutividade hidráulica k é variável;
- Zona de transmissão – a condutividade é constante e pode sofrer um aumento da umidade, na fronteira superior, dado ao avanço da frente de molhagem;
- Zona de umedecimento – decresce a umidade e a condutividade.

A chamada linha de frente úmida, frente de molhagem ou ainda frente de umedecimento é o limite visível da movimentação da água no solo, na qual existe elevado gradiente hidráulico devido à variação abrupta da umidade, sendo este mais acentuado em solos inicialmente muito secos. Esta linha delimita a região umedecida da região seca (Brandão *et al.* (2004). Cedergren (1977), afirmou que sempre que uma zona de saturação se move no solo, existe uma franja ao longo da qual o solo está mudando de um estado úmido ou seco para um estado saturado ou de um estado saturado para um estado não saturado. Dentro da zona de saturação a condição da continuidade do fluxo é satisfeita para o fluxo transiente.

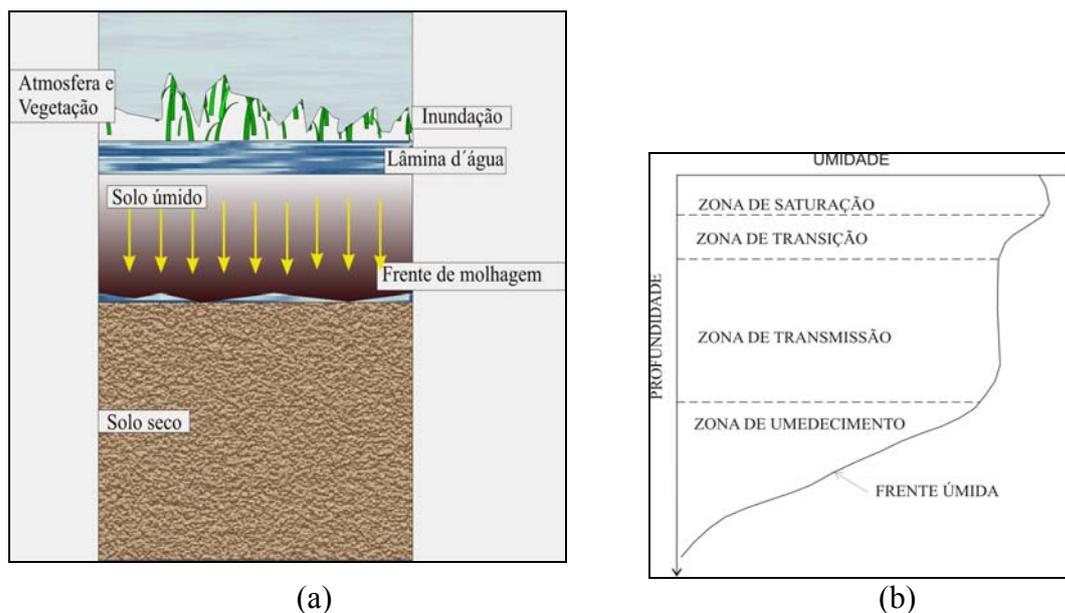


Figura 2.18- a) Perfil de frente de molhagem ou frente de molhagem; b) Perfil de infiltração, (modificado de BRANDÃO, SILVA E PRUSKI, 2004).

No caso dos poços e trincheiras de infiltração, assim como no caso do ensaio de infiltração propriamente dito, como o usado na presente pesquisa, as condições fronteiriças do fluxo mudam em relação ao que acaba de ser exposto. O fluxo passa agora predominantemente a radial, e lateralmente a fase ar sendo contínua e estando em contato com a atmosfera minimiza o efeito de seu confinamento não a colocando sob pressão positiva.

2.8.1 - FATORES QUE INTERVÊM NA INFILTRAÇÃO.

Os seguintes fatores intervêm na infiltração:

- Tipo de solo: A capacidade de infiltração varia diretamente com a porosidade e com o tamanho das partículas do solo. Nos solos tropicais profundamente intemperizados ela também varia significativamente com a distribuição de poros. As características presentes em pequena camada superficial, com espessura da ordem de 1 cm, tem grande influência sobre a capacidade de infiltração (Pinto *et al.* 1976).
- Umidade do solo: Quando a água é aplicada em um solo seco, não há movimento descendente dessa água até que as partículas do solo estejam envolvidas por uma fina película d'água. As forças de atração molecular e capilar fazem com que a capacidade de infiltração inicial de um solo seco seja muito alta. A medida que a água percola, a camada superficial vai ficando semi-saturada, fazendo com que as forças de capilaridade diminuam, diminuindo também a capacidade de infiltração, que tende a um valor constante após algumas horas. Outro aspecto há que ser considerado neste caso, com a infiltração, a sucção máxima que caracterizava o solo inicialmente se afasta do ponto de infiltração fazendo com que o gradiente oriundo da sucção diminua, e por consequência diminua a própria capacidade de infiltração do maciço.
- Cobertura vegetal: Uma cobertura vegetal densa como grama ou floresta tende a promover maiores valores de infiltração, devido ao sistema radicular que proporciona a formação de pequenos túneis e que retira umidade do solo através da transpiração. A cobertura vegetal evita ainda a compactação do solo e reduz o fluxo superficial favorecendo a infiltração .
- Inclinação do terreno: em declividades acentuadas a água corre mais rapidamente, diminuindo o tempo de infiltração. Terrenos planos, suaves e ondulados, apresentam declives inferiores a 8%, e apresenta boa conservação do solo. Os terrenos

moderadamente ondulados e ondulados possuem declives de 8% a 13% e 13% a 20%, respectivamente. Os terrenos com declives acima de 8% estão sujeitos à erosão, na classificação dos solos para uso em agronomia.

- Chuva: Chuvas intensas saturam rapidamente a camada superficial do solo, ao passo que chuvas finas e demoradas levam mais tempo para saturá-la. Porém, quanto à infiltrabilidade faz-se necessário avaliá-la em função do grau de saturação. Sabe-se que durante uma precipitação a sucção reduz de valor, no entanto, é prematuro concluir que esta sucção vá se anular. Para que a sucção seja eliminada totalmente, a chuva precisa prolongar durante um longo tempo e a intensidade da precipitação precisa aproximar-se do coeficiente de permeabilidade saturada do solo na superfície. Considerando-se a intensidade pluviométrica como constante (I), pode-se relacionar a variação da sucção em um perfil de solo e com permeabilidade no estado saturado (K_s), com o tempo. Dois casos são apresentados a seguir:

a) Intensidade pluviométrica menor do que o coeficiente de permeabilidade saturado do solo ($I < K_s$).

Neste caso, não há água suficiente para a formação de uma frente de saturação, mas apenas de uma frente úmida que eleva a umidade do solo em seu interior do valor inicial para um valor final, que corresponde à umidade para a qual a condutividade hidráulica iguala a velocidade de infiltração. Neste caso a sucção não irá se anular e sim permanecer em um valor correspondente a esta umidade final (Figura 3-5, a).

b) Intensidade pluviométrica maior ou igual ao coeficiente de permeabilidade saturado do solo ($I > K_s$).

Nesta situação, a abundância de água na superfície propicia a formação de uma frente de saturação, responsável pela elevação da umidade do solo em seu interior, até a máxima umidade possível de ser atingida por percolação. A sucção irá se anular na superfície e a diferença entre a quantidade de água da precipitação menos a capacidade de infiltração do solo irá escoar superficialmente.

- Permeabilidade do solo: A condutividade hidráulica determina a capacidade de transmitir água e a curva característica determina a capacidade de armazenar água no solo. Em um solo saturado que perde água até transformar-se em um solo não saturado,

e que continua a diminuir seu grau de saturação, o ar vai progressivamente substituindo a água dos poros. Durante este processo de perda de umidade, pode ocorrer também a retração dos poros, diminuindo a condutividade hidráulica ou a permeabilidade do solo.

2.8.2 - VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO:

É a velocidade média com que a água atravessa o solo, ou seja, é a vazão dividida pela área de escoamento. A área inclui a projeção dos poros por onde escoar a água e a projeção da área dos grãos. A velocidade de filtração não é um bom parâmetro para avaliar a infiltração, pois depende somente da permeabilidade (K) e do gradiente hidráulico (dh/dt). A infiltração, por sua vez, depende também de condições de contorno, sendo melhor utilizar o conceito de capacidade de infiltração como parâmetro de medida.

2.8.3 - CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO:

É a taxa máxima que um solo é capaz de absorver de água, sob uma dada condição. Geralmente é expressa em mm/h. A Figura 2.19 registra, por coluna, cinco fases de uma chuva A, B, C, D e E. Na figura a curva pontilhada delimita a quantidade de chuva que infiltra da parcela que escoar superficialmente. Toda vez que esta capacidade for superada ocorrerá o escoamento superficial, como mostram as colunas A e E. Quando a intensidade de chuva for menor do que o valor, então a infiltração ocorre a uma taxa menor, referida como “taxa real de infiltração” ou simplesmente infiltração.

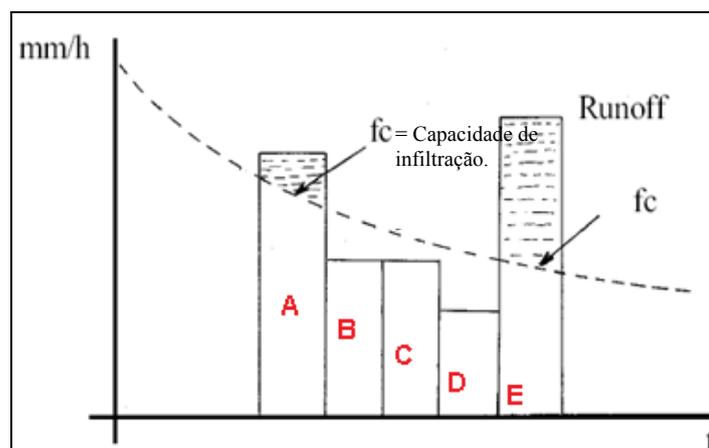


Figura 2.19- Ilustração da taxa de infiltração e da capacidade de infiltração, (modificado de Lima 1996).

De maneira geral, na condição de solo seco, a taxa de infiltração apresenta um alto valor inicial e gradativamente vai diminuindo durante uma chuva prolongada, até que atinge um valor constante de capacidade final de infiltração. Horton (1933) mostrou que durante um período de constante precipitação, a taxa de infiltração decresce com o tempo. Além disso Horton (1933) também mostrou que há uma curva limite que representa a infiltração máxima em relação ao tempo, considerando que há sempre água disponível para ser infiltrada, como mostra a Figura 2.20. Rubin et al. (1964), citados por Freeze e Cherry (1979) mostraram que a capacidade de infiltração final, nas curvas de Horton, é numericamente equivalente ao coeficiente de permeabilidade do solo saturado.

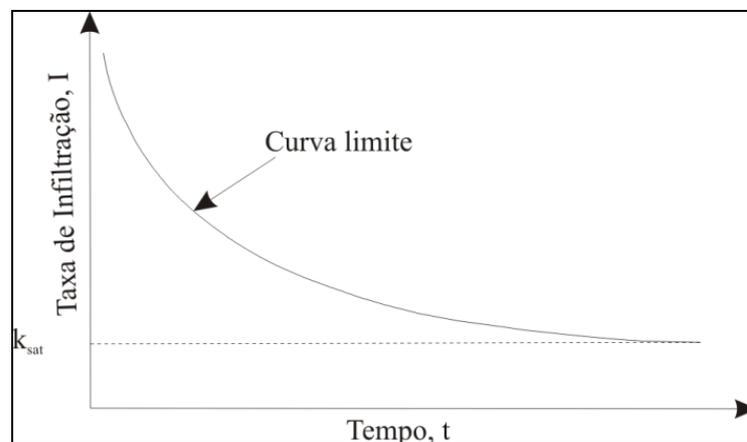


Figura 2.20-Taxa de infiltração versus tempo, (Modificado de Gitirana Jr.2005).

2.8.4 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE UM SOLO.

A capacidade de infiltração de um solo pode ser determinada por meio de:

- Infiltrômetros: Os infiltrômetros são aparelhos para determinação direta da capacidade de infiltração do solo. Consistem de tubos ou qualquer outro limite projetado para isolar uma seção do solo. Geralmente são formados por dois cilindros concêntricos. A razão da existência do cilindro externo é prover a quantidade de água necessária ao umedecimento lateral, atenuando o efeito da dispersão da água no tubo interno. A água é adicionada nos dois compartimentos, sendo mantida, continuamente, uma lâmina d'água de 5 mm em ambos. A taxa com que a água infiltra é média no cilindro interno.
- Método do índice: Este método supõe uma taxa de infiltração constante ao longo do tempo. Embora seja uma aproximação grosseira da taxa real de infiltração, pode ser

utilizado sem introduzir grandes erros em estudos de cheias, pois usualmente ocorrem quando o solo já esta umedecido por chuvas anteriores. Conhecendo-se a precipitação e o escoamento superficial, em uma bacia pode-se calcular por diferença, a capacidade de infiltração da mesma.

CAPÍTULO 3

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada nesta pesquisa, assim como a descrição do local onde foram realizados os ensaios de campo, e os procedimentos utilizados nos ensaios de campo e de laboratório.

3.2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A cidade de Brasília se encontra localizada no Planalto Central Brasileiro, na região Centro-Oeste inserida na unidade federativa do Distrito Federal. Possui a área de 5.788,1 Km², cujos limites estão definidos ao norte pelo paralelo 15°30'S, ao sul pelo paralelo 16°03'S, ao oeste pelo rio Descoberto, e a leste pelo rio Preto (Figura 3.1).

Como características principais o clima do Distrito Federal apresenta duas estações bem definidas: uma seca (maio a setembro) e outra chuvosa (outubro a abril). A temperatura média anual é de 21°C, com máxima histórica de 35,8°C e mínima histórica de 1,6°C. As mudanças de estações geram as condições favoráveis para que ocorra alteração do solo, através de processos de oxidação, lixiviação e carregamento de partículas. O solo formado apresenta estrutura com características peculiares e comportamento geotécnico bastante distinto sendo o processo de formação denominado laterização e ao produto final, solo laterítico. (Silva,1992).

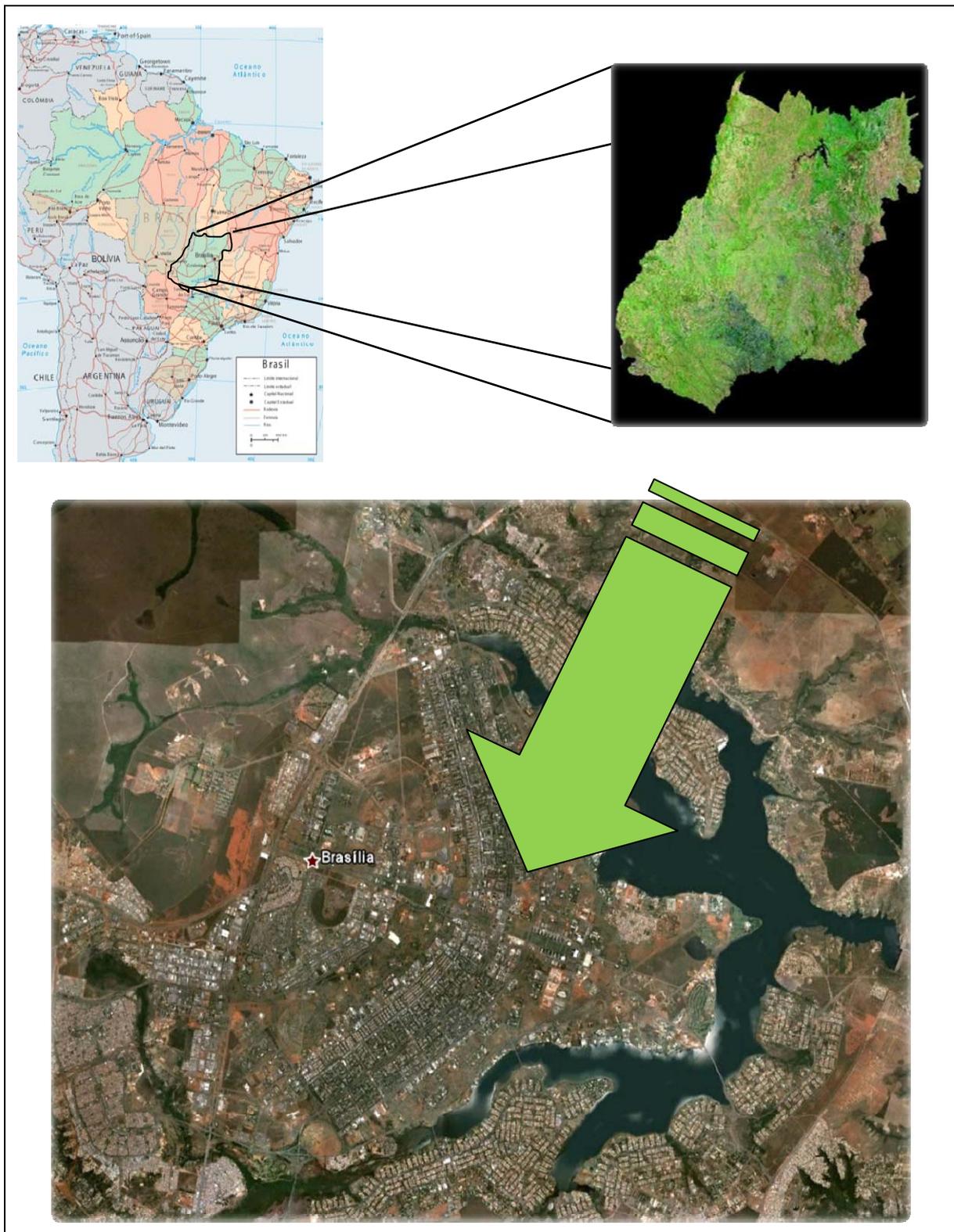


Figura 3.1- Localização do Distrito Federal

O local escolhido para o estudo se localiza no Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília (Figura 3.2). Este local foi previamente definido durante a

dissertação de mestrado, “Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração” (Silva, 2007).

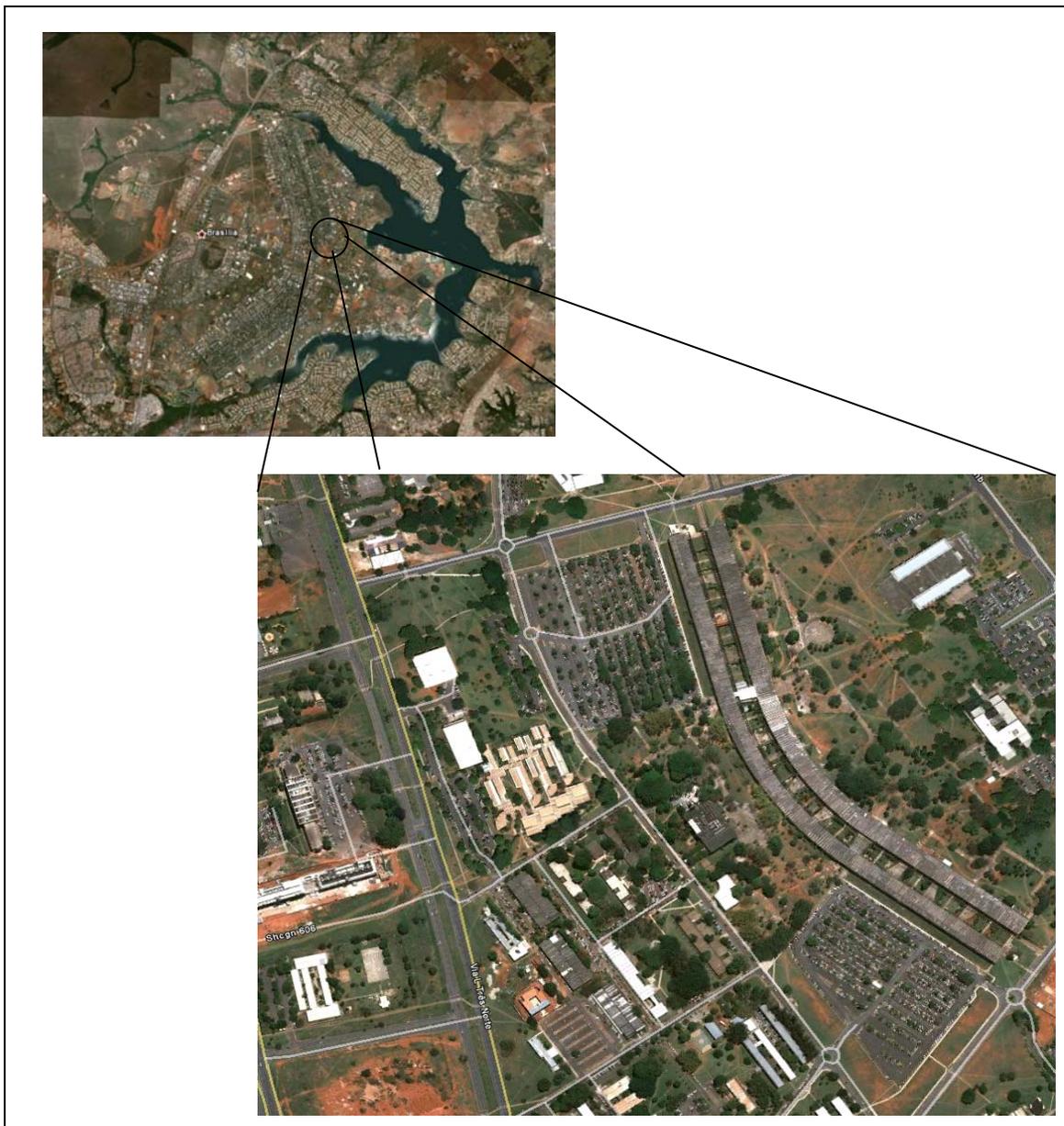


Figura 3.2- Localização do Campus Darcy Ribeiro

Durante a pesquisa de Silva (2007) foram feitos ensaios de caracterização, como umidade natural do solo, umidade higroscópica, peso específico, análise granulométrica, índices de consistência, análise mineralógica e estrutural por meio de microscopia. Os solos foram classificados segundo a metodologia MCT expedita. Além disso, foram realizados ensaios de permeabilidade, pinhole, de erodabilidade, de colapso e de adensamento

unidimensional. Os ensaios foram realizados em três áreas diferentes (Figura 3.3), situada dentro do Campus Universitário conforme apresentado a seguir:

- Área No1. Área localizada próxima à Faculdade de Música,
- Área No2. Espaço localizado próximo Via L3, em frente ao Prédio da Sismologia UnB,
- Área No3. Campus Experimental área localizada no Programa Graduação em Geotecnia próximo Via L3 e lateralmente ao prédio da Sismologia UnB.

Para a presente pesquisa foi selecionada a área No2 devido às características do perfil de solo serem representativas dos solos regionais e pela proximidade da área experimental em que é desenvolvida a tese de doutorado da Engenheira Joseleide versando sobre o tema trincheiras de infiltração.

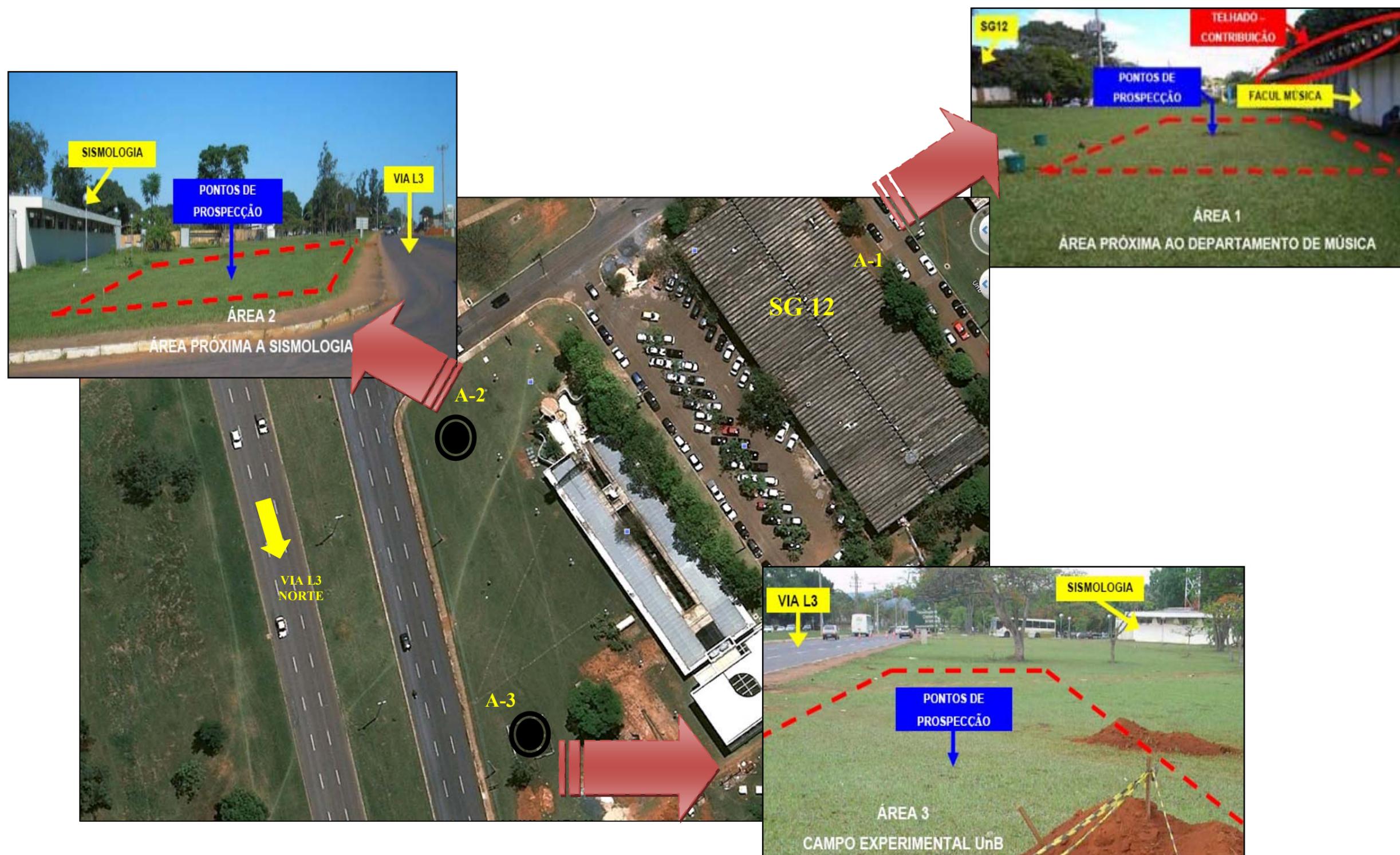


Figura 3.3- Localização das áreas no Campus UnB, (modificado Silva, 2007)

3.3 - ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo foram realizados em cinco etapas durante esta pesquisa, cada etapa diferenciada da anterior pelas condições iniciais de umidade do solo. Para a determinação da capacidade de infiltração de campo, foram executados: ensaios de infiltração em profundidade pelo método do rebaixamento em furo de sondagem à trado o qual permite obter os valores médios de infiltração seguindo o procedimento de ensaio No 04 da ABGE 1996. Para o monitoramento da frente de umedecimento, foram realizadas coletas de amostras a diferentes profundidades, antes e após os ensaios de infiltração, e determinadas as umidades em laboratório pelo método gravimétrico da estufa. Os ensaios PANDA foram realizados seguindo o procedimento descrito na SN 670/02 tiveram por objetivo verificar as alterações do comportamento mecânico em função da infiltração.

3.3.1 - INFILTRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PELO MÉTODO DO REBAIXAMENTO EM FURO DE SONDAÇÃO À TRADO.

Os ensaios de permeabilidade em furos de sondagens consistem na medida da vazão absorvida ou retirada, em função da aplicação de uma carga ou descarga, respectivamente. As cargas são diferenciais de pressão, induzidas por colunas d'água, resultantes de injeção d'água no furo; as descargas são diferenciais de pressão provocadas por retirada d'água do furo.

Durante esta pesquisa foram executados cinco ensaios de rebaixamento a carga variável. Utilizando um trado manual de 10 cm de diâmetro escavou-se um furo até a profundidade de 2,0m. Em cada ensaio preencheu-se o mesmo furo com água oriunda da rede de abastecimento até o topo superior. Com a utilização de uma régua fixou-se o nível superior em 0,0cm correspondendo ao tempo de ensaio $t=0$. Em seguida, fez-se as leituras dos tempos em que ocorriam rebaixamentos de 5cm até atingir o rebaixamento total de 30 cm (Figura 3.4). Quando o nível da água atingia esta profundidade preenchia-se o nível d'água até o topo e repetia-se o procedimento até obter-se tempos de infiltração aproximadamente constantes, ou seja, quando já não eram observadas variações progressivas nos valores lidos.



Figura 3.4- Ensaio de rebaixamento em furo de sondagem a trado.

3.3.2 - MEDIÇÃO DE UMIDADE PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Para o monitoramento da frente de umidade antes e após do ensaio de infiltração foram feitos ensaios gravimétricos em amostras coletadas utilizando-se um trado manual introduzido em pré-furos executados pelo ensaio PANDA. Embora existam vários métodos diretos e indiretos para medições de umidade, alguns mais rápido que outros, o método gravimétrico é um dos mais exatos e geralmente eleito como referência dos demais. Dada a proximidade do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília optou-se por sua utilização.

Na área estudada foram feitos 39 furos a trado manual, 38 destes furos, denominados furos de inspeção de umidade, foram escavados com diâmetro de $\phi=0,05\text{m}$ em linha reta até uma profundidade de 3,5m em pré-furos deixados pelo ensaio PANDA. Esses pontos em linha reta foram distribuídos radialmente a partir do furo central de infiltração sendo que os realizados depois do ensaio de infiltração se situavam em sentido oposto aos realizados após o ensaio de infiltração. Para cada ensaio de infiltração foram feitas as coletas em perfis localizados à 0,50 m, 1,50 m, 2,50 m e 3,50 m do ponto ensaiado. A coleta de amostras iniciava-se a partir do perfil mais distante do ponto ensaiado. Além destes, furos foi escavado mais um furo com diâmetro de $\phi= 0,10\text{m}$, e profundidade de 2,0 m denominado furo principal de infiltração,

onde foram realizados os ensaios de infiltração antes mencionados. Nos furos de inspeção para determinação dos perfis de umidade foram retiradas amostras a cada 0,50 m de profundidade a partir da superfície até atingir a profundidade de 3,50m (Figura 3.5).

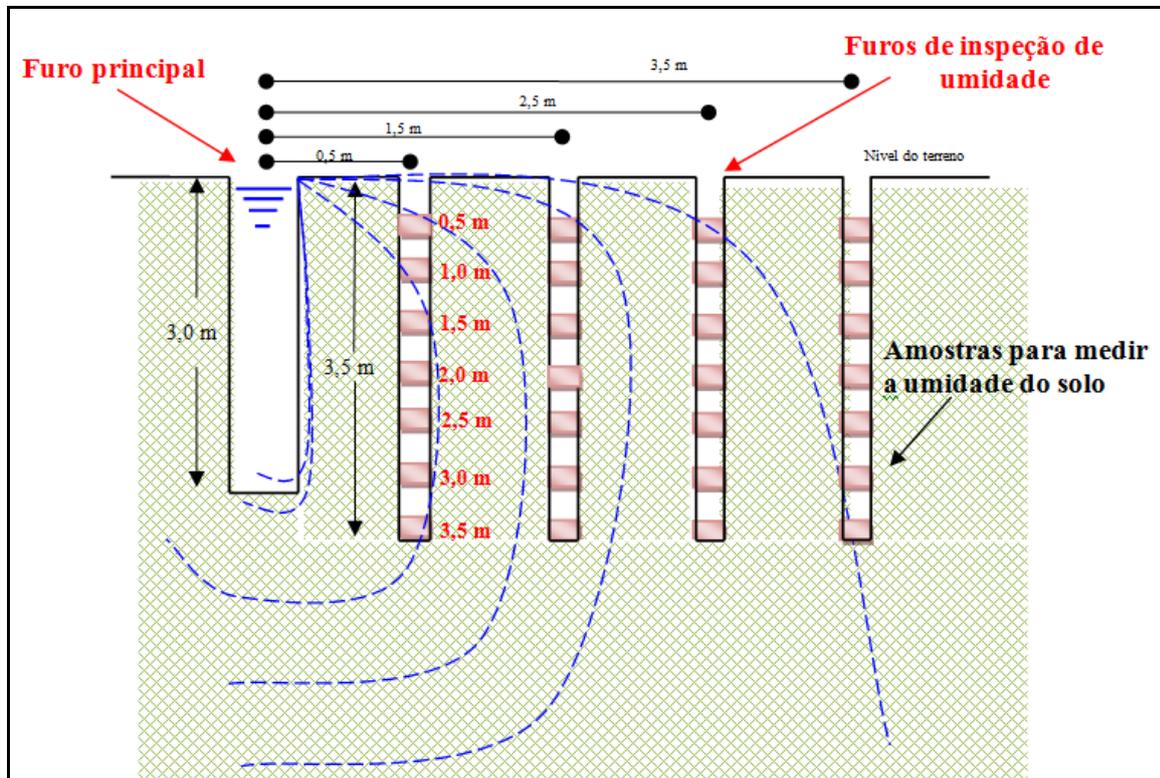


Figura 3.5-Perfil de profundidades.

Estes 39 furos de amostragem foram realizados em 5 etapas diferentes. A primeira etapa teve início no dia 18 de setembro de 2009, a jornada de trabalho começou às 9 horas da manhã e terminou às 18 horas. Neste dia foi feito o furo principal e 6 furos de inspeção de umidade, 3 destes furos foram escavados antes da realização no ensaio de rebaixamento no furo principal, e os outros 3 restantes foram feitos após a realização do ensaio. A coleta de amostras de solo para o controle de umidade foi realizada em perfil conforme ilustrado na Figura 3.5. As amostras foram colocadas em sacos plástico e em seguida os mesmos foram hermeticamente fechados e conduzidos ao Laboratório de Geotecnia para determinação dos teores de umidade pelo método gravimétrico. Após as retiradas das amostras os furos de inspeção foram preenchidos com uma mistura de cimento e bentonita em proporção 1:2. Este procedimento seguiu por mais 4 etapas, com a diferença que foram escavados 8 furos de inspeção em vez de 6, sendo 4 antes e 4 depois do ensaio de rebaixamento, esta mudança se deu devido à necessidade de se estender por mais 1,0 m em planta, o campo de ação da água. Estas etapas e

o programa para as retiradas de amostras seguiram a distribuição de pontos apresentada no esquema da Figura 3.6.

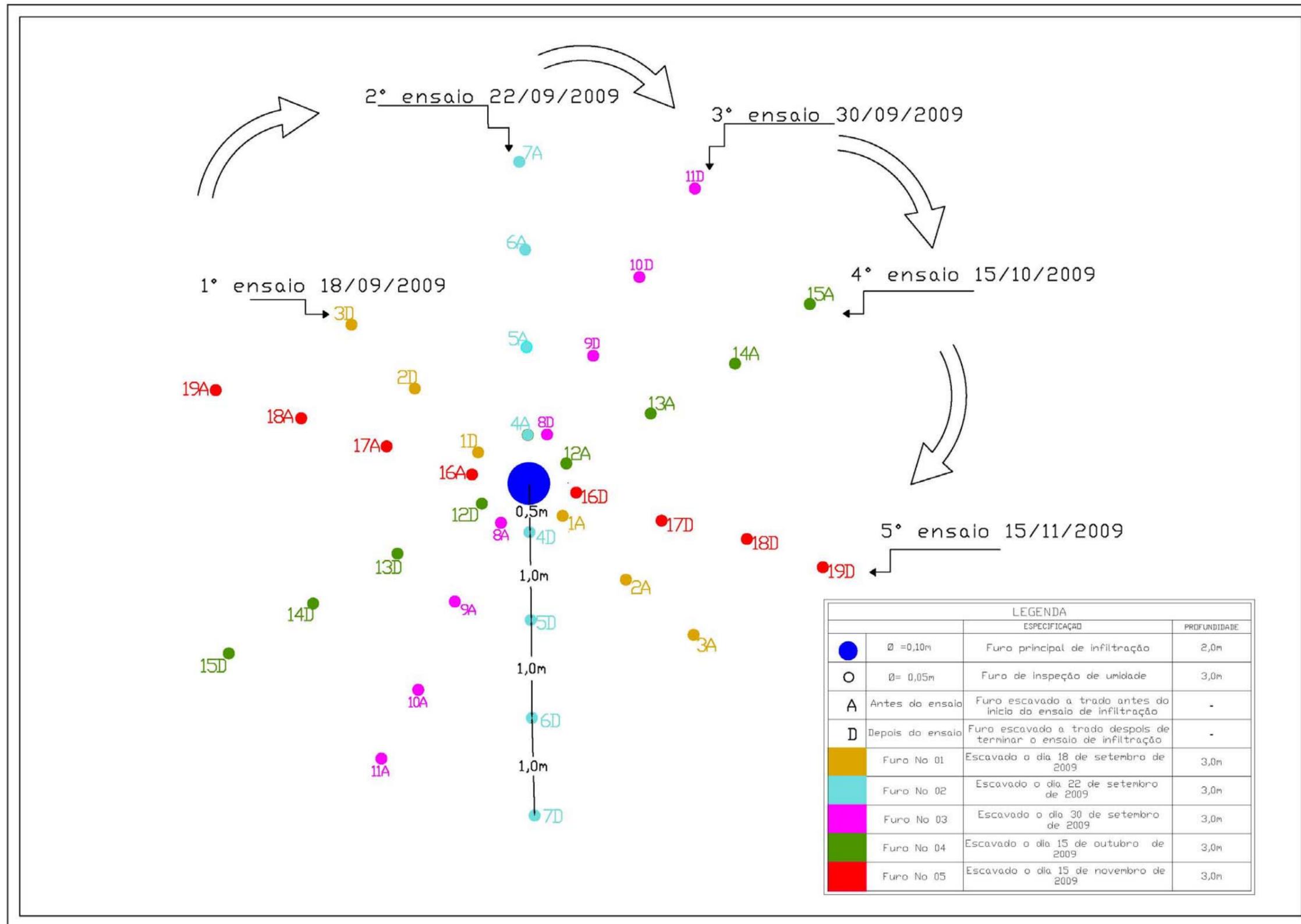


Figura 3.6- Vista em planta da distribuição dos furos para retirada de amostras, controle de umidade e ensaios de infiltração, em planta

Com objetivo de verificar a localização final exata de cada furo, depois de terminar o programa de ensaios em campo, optou-se por medir as coordenadas topográficas com a utilização do GPS topográfico de precisão ProMark2, o qual é um sistema GPS completo que oferece tanto navegação quanto levantamento de precisão. O sistema ProMark2 inclui dois ou mais receptores GPS, antenas e todos os componentes necessários para a produção de dados com um levantamento de qualidade em um tempo mínimo. Utiliza tripé padrão ou de altura fixa para posicionar os componentes do sistema nos pontos a serem levantados. O receptor ProMark2 coleta sinais de transmissão de satélites e armazena estas informações em sua memória interna. Os dados coletados são extraídos do receptor através de um cabo serial e enviados a um computador para serem pós-processados. O sistema opera em conjunto com o software de pós-processamento Ashtech Solutions, O Ashtech Solutions é um software completo, fácil de usar que gerencia e processa os dados brutos do GPS, fornecendo dados de posicionamento precisos e apresentando os resultados em formato de relatórios facilmente entendidos. A Figura 3.7 mostra o equipamento. O tempo de parada em cada furo foi de 2 min, tempo suficiente para um bom levantamento



Figura 3.7– GPS Topográfico ProMark2, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

3.3.3 - ENSAIO PANDA: PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE COM ENERGIA VARIÁVEL

Foram realizados ensaios com o equipamento PANDA nos 21 dos 39 furos escavados no local de trabalho até uma profundidade de 3,00m, nos demais casos uma pane no equipamento impediu a realização do ensaio, estes ensaios foram realizados antes e depois do ensaio de infiltrabilidade com o objetivo de correlacionar a resistência de ponta do solo com a variação do perfil de umidade.

O penetrômetro dinâmico portátil PANDA (*Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté*) é aplicado a investigações do solo e controle do processo de compactação de obras geotécnicas. O equipamento fornece a resistência de ponta designada como q_d , expressa em MPa. Durante o processo de cravação do cone podem ser usadas três diferentes pontas cônicas que variam em relação a sua área de ponta: 2cm^2 , 4cm^2 e 10cm^2 . O equipamento apresenta como principais vantagens a rápida montagem do aparato, um razoável poder de penetração, a facilidade de manuseio e um sistema automático de aquisição de dados (Figura 3.8). A profundidade máxima de penetração é aproximadamente de 7,00m. Em termos de valores máximos de resistência de ponta recomenda-se limitar a 20 e 30 Mpa. O ensaio é descrito pela SN 670/02.

Durante o ensaio a velocidade do martelo é medida junto com o impacto sendo que para isso é utilizado um sensor de deformação situado no capacete colocado sobre a haste e que recebe diretamente os golpes (Figura 3.9).

O conjunto formado pelas hastes e pela ponta é encaixado em um suporte que serve de guia para as hastes. Este se encontra unido a um sistema de controle de altura o qual deve ser alocado na superfície onde será realizado o ensaio, prendendo-se a correia que sai dele ao capacete localizado no topo do equipamento.



Figura 3.8-Equipamento PANDA

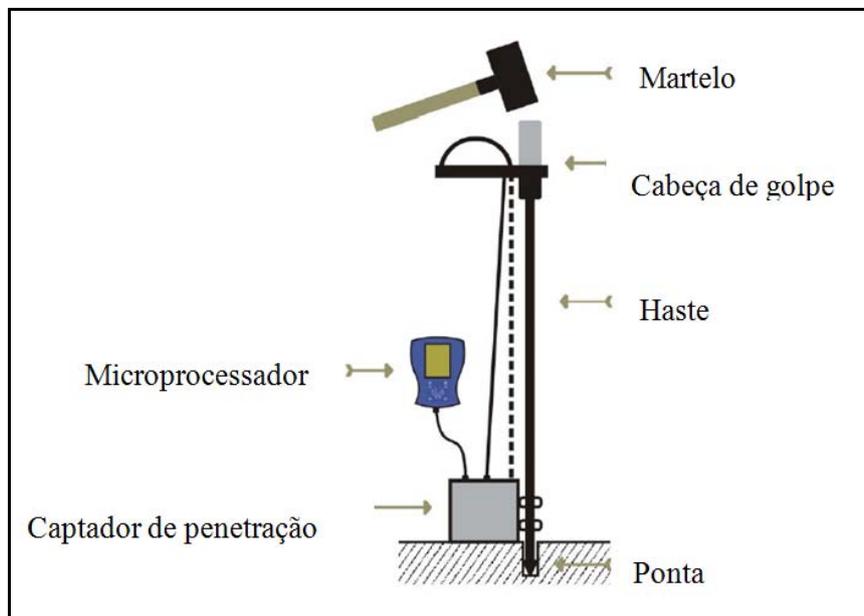


Figura 3.9-Esquema do equipamento PANDA, (www.geotecniaambiental.cl, acesso jan, 2010)

Os dados tanto de energia de cravação como de profundidade de cravação são registrados em um pequeno microprocessador que por sua vez calcula a resistência de ponta q_d . Os valores registrados pelo microprocessador durante o ensaio podem ser transferidos para um computador onde os dados são tratados utilizando-se o software PANDA, programa desenvolvido especificamente para o equipamento.

3.4 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

O programa de ensaios realizados em laboratório, bem como os procedimentos utilizados, foram elaborados visando determinar as características geotécnicas e a capacidade de infiltração dos solos a partir do estudo do comportamento hidráulico do solo no seu estado natural.

Nesta pesquisa os ensaios de laboratório foram realizados, conforme as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram coletados blocos de amostras indeformadas, com dimensões de 30 cm x 30 cm nas profundidades de 1,0 e 2,0m. No momento da retirada dos blocos os mesmos foram envoltos com parafina para a proteção contra perda de umidade conforme a ABNT,1986 (Figura 3.10). Foram retirados dois blocos no campo experimental, destes blocos foram moldados corpos de prova os quais foram submetidos a uma série de ensaios para análise das propriedades físicas, na realização dos ensaios de permeabilidade e ensaio de sucção pelo método do papel filtro.

A descrição do perfil de solo do campo experimental da UnB apresentada por Guimarães (2002), divide-o em três horizontes:

- 0 a 3,5m: areia silto-argilosa porosa, com predominância de gibbsita, macroporos e; muitos agregados e IP médio de 10. Destaca-se que as profundidades de 3 e 4m correspondem à zona de transição. Esta zona corresponde ao trecho de maior bioturbação, e na qual ocorrem as maiores variações de umidade ao longo do ano;
- 3,5 a 8,5m :zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o solo residual mais jovem a 8,5m. Neste trecho, o teor de gibbsita, a porosidade e a macroporosidade vão paulatinamente diminuindo. A profundidade de 8m corresponde à zona de transição;
- 8,5m : profundidade a partir da qual o solo assume textura mais siltosa, com aumento do IP e uma estrutura com distribuição de poros mais homogênea.



Figura 3.10- Retirada do blocos de amostras indeformadas.

As amostras foram coletadas, na camada de argila arenosa vermelha escura, pertencente ao horizonte de areia silto-argilosa porosa à profundidades de 1,0 e 2,0 m.

3.4.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios de caracterização física foram realizados conforme os seguintes procedimentos:

- Umidade natural e umidade higroscópica do solo foram realizadas de acordo com a norma NBR,6457/ABNT,1986. Para a determinação da umidade natural utilizou-se solo nas condições de amostragem, e para a umidade higroscópica utilizou-se solo seco ao ar após 24 horas.
- Peso específico dos sólidos (γ_s) foi determinado conforme prescrição da norma NBR 6508/ABNT, 1984. Utilizou-se na determinação a fração que passou na peneira N° 10 (# 2mm), sendo γ_s determinado pela média dos três valores obtidos.
- Peso específico natural (γ_n), foi determinado segundo a NBR 2887/ABNT, 1988, método da balança hidrostática, moldando-se três amostras irregulares por cada bloco (Figura 3.11). O valor final foi obtido pela média aritmética dos três valores encontrados no ensaio.
- Granulometria por Peneiramento e Sedimentação realizada seguindo a norma da NBR 7181/ABNT, 1984, por meio de peneiramento ou pela combinação de sedimentação e peneiramento.
- Granulometria no Granulômetro a Laser, como característica principal do equipamento utilizado, tem-se a operação em uma faixa granulométrica variando de 0,5 a 900 μm . O equipamento é composto por três peças fundamentais, a unidade óptica, a unidade de preparação da amostra e um sistema de aquisição de dados acoplado ao microcomputador

conectado à unidade de ensaio (Figura 3.12). Este aparelho permite a execução de ensaios utilizando-se o dispositivo de ultra-som, cujo objetivo é o de deflocular e desagregar as partículas aglomeradas ou por ligações cimentícias ou por outro mecanismo de ligação. Segundo Manso (1999), o granulômetro a laser pode aclarar os problemas com o traçado das curvas granulométricas, perpassando pela possibilidade de minimizar a descontinuidade do gráfico na interface fração grossa com a fração fina. A utilização do software pelo sistema permite o pós-processamento dos dados e a definição da curva granulométrica das partículas.

- Limite de liquidez, prescrito pela NBR 6459/ABNT, 1984. O limite de liquidez é obtido por meio do equipamento de Casagrande.
- Limite de plasticidade, prescrito pela NBR 7180/ ABNT, 1984.



Figura 3.11- Moldagem de amostras para realização do ensaio de Peso específico natural.



Figura 3.12– (a) - Equipamento Granulômetro da UnB; (b) - Deposição do material para a realização do ensaio.

3.4.2 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SOLO NATURAL

A caracterização estrutural do solo foi realizada usando uma lupa eletrônica “ProScope de alta resolução HR” da Avantgarde (Figura 3.13) . Foram obtidas, para fins de comparação, imagens do solo natural para as profundidades de 1,0 e 2,0 metros com aumento de 100X e 400X.



Figura 3.13- lupa eletrônica “ProScope de alta resolução HR” da Avantgarde

3.4.3 - DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO

O método baseia-se na hipótese de que o papel filtro alcança equilíbrio de sucção por meio do fluxo de umidade que ocorre do solo para o papel. O procedimento de ensaio prevê a determinação da relação entre umidade gravimétrica e sucção das amostras de solo sendo a curva obtida conhecida como curva característica de retenção de água. Esta curva pode ainda ser definida com a sucção em função da umidade volumétrica ou do grau de saturação (S_r). O método de ensaio consiste em posicionar o papel-filtro com curva característica conhecida em contato com a amostra de solo e selar o conjunto para evitar evaporação. O método convencional utiliza dois discos de papel filtro sobrepostos, desprezando-se o papel que fica em contato com a amostra na determinação da umidade e por consequência da sucção. No Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília se utiliza três discos de papel filtro, desprezando-se o que se encontra em contato com a amostra e pesando-se separadamente os outros dois, sendo que primeiro deve ser pesado o papel central. A alteração metodológica objetiva oferecer ao papel central melhor condição de equilíbrio e o papel externo servirá ainda para repor a determinação da sucção no caso de eventual erro de pesagem no papel filtro central. Para a definição da curva característica foram confeccionados 13 corpos de prova para cada bloco. Depois de determinado o teor de umidade inicial do solo, era estimada a quantidade de água a ser adicionada ou retirada de cada corpo de prova levando-se em consideração uma faixa de teor de umidade entre o valor residual e o de saturação de modo a se obter uma boa distribuição dos pontos no traçado da curva característica. Vale lembrar que

nesse procedimento, os corpos de prova partiram da sua umidade natural e a partir dela, alguns corpos de prova foram secos ao ar e outros umedecidos por gotejamento Figura 3.14



Figura 3.14-Preparação dos corpos de prova umedecimento e secados ao ar

Quando se atingiu a umidade desejada os corpos de prova foram pesados, colocou-se os papéis filtro e envolveu-se o conjunto com filme de PVC e com papel alumínio para que não ocorresse perda de umidade. Segundo Marinho (1995), para o papel filtro Whatman No 42 a umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, isto permite medições de sucção matricial de 0 a 29MPa, sendo esta a máxima sucção matricial que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo. As amostras foram acondicionadas em uma caixa de isopor fechada por um período de 15 dias para que ocorresse a equalização das umidades para o nível de sensibilidade da balança utilizada. Passado este período foi feita a pesagem dos papéis filtro úmidos os quais foram retirados com uma pinça e imediatamente pesados em balança com sensibilidade de leitura de 0,0001g. É importante ressaltar o cuidado que se deve ter durante a pesagem do papel filtro, já que o intervalo entre a retirada do mesmo da amostra e a colocação na balança deve ser muito curto para evitar que ocorra perda de umidade. Depois de serem pesados os papéis são colocados na estufa com temperaturas entre 100 e 110°C por um mínimo de 2 horas. Após a retirada dos papéis filtro, determina-se o índice de vazios final destes corpos de prova pelo método da balança hidrostática para se obter a saturação.

3.4.4 - PERMEABILIDADE A CARGA VARIÁVEL.

De acordo com a NBR 14545/ABNT, 2000 o permeâmetro de parede flexível é um equipamento utilizado para a determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos, cujo valor seja menor ou igual a 10^{-5} m/s. Os corpos de prova podem ser utilizados talhados ou moldados obtidos de amostras indeformadas ou compactadas respectivamente (Figura 3.15). Com este ensaio o fluxo preferencial nas paredes do permeâmetro é eliminado, diminuindo o tempo de saturação da amostra e a saturação é mantida durante todo o ensaio. A câmara do permeâmetro é a mesma utilizada nos ensaios de compressão triaxial como se apresenta na Figura 3.16, onde o corpo de prova é posicionado entre duas pedras porosas e papéis filtro para evitar o carregamento de finos.



Figura 3.15- Moldagem do corpo de prova,



Figura 3.16- Montagem na câmara do triaxial e registros utilizados.

Além disso, antes de fechar a câmara o corpo de prova é revestido por uma membrana de látex impermeável e flexível, cuja função é separar a pressão externa da pressão neutra da amostra (Figura 3.17). A dupla drenagem no cabeçote e no pedestal tem como finalidade facilitar a saturação das pedras porosas e das linhas condutoras de fluxo. De acordo com a norma NBR 1545/ABNT, 2000 o sistema para aplicação e medição das cargas hidráulicas é constituído por um reservatório de água e por uma bureta blindada para ser capaz de suportar as pressões aplicadas. Além disso, são utilizados tubos manométricos, mangueiras, conexões e válvulas. O ensaio foi realizado utilizando-se corpos de prova com aproximadamente 10 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro, moldado a partir da amostra indeformada coletada a uma profundidade de 1,0m (Figura 3.15). Após a aferição das medidas e pesagem, o corpo de prova foi colocado na câmara, como apresentado na Figura 3.16. O ensaio foi realizado em três fases: saturação, adensamento e permeabilidade. Para a fase de saturação, após a montagem, encheu-se a câmara e iniciou-se a percolação ascendente da água no corpo de prova por no mínimo 24 horas. Após este período a câmara foi ligada a duas fontes de tensão responsáveis pelo confinamento do corpo de prova e imposição do gradiente hidráulico pretendido.

Os registros apresentados na Figura 3.16 foram numerados 1 e 2: o registro 1 controlava o acesso de pressão confinante, o registro 2 controlava a imposição do gradiente hidráulico. Primeiramente foi imposta a tensão confinante ao corpo de prova mantendo-se as linhas de drenagem abertas para sua completa consolidação. A consolidação foi admitida como 100 % quando a variação volumétrica, que era acompanhada pela quantidade de água expelida pelo corpo de prova em uma bureta, ficasse constante ao longo do tempo.

Após esta etapa foram iniciadas as medidas de permeabilidade. Aplicou-se, então, um gradiente hidráulico da base para o topo do corpo de prova e fez-se a medida da quantidade de água percolada por intervalo de tempo. O ensaio foi realizado em oito estágios, começando com uma tensão confinante de 20 kPa e sendo concluído com a tensão confinante de 300 kPa. As medidas de permeabilidade em cada estágio de pressão confinante foram realizadas variando-se o gradiente hidráulico aplicado, sendo a pressão no topo do corpo de prova mantida como nula, variou-se a pressão em sua base de 10 em 10 Kpa, até atingir a pressão de 110 kPa. Destaca-se que em cada estágio de pressão confinante, a cada incremento de pressão na base, era incrementada, em igual valor, a pressão na câmara com a idéia de se manter constante a pressão confinante efetiva. No entanto, considerando-se que a pressão neutra na base do corpo de prova é diferente da presente no topo tem-se aí uma variação da tensão confinante ao longo do corpo de prova. Como aproximação, calculou-se então as tensões confinantes médias ao longo do corpo de prova, considerando-se que no topo a pressão neutra era nula e na base a aplicada para se obter o gradiente hidráulico desejado. A Tabela 3.1 apresenta os estágios juntamente com as pressões utilizadas e na Tabela 3.2 se apresentam as tensões confinantes médias calculadas para cada gradiente aplicado.

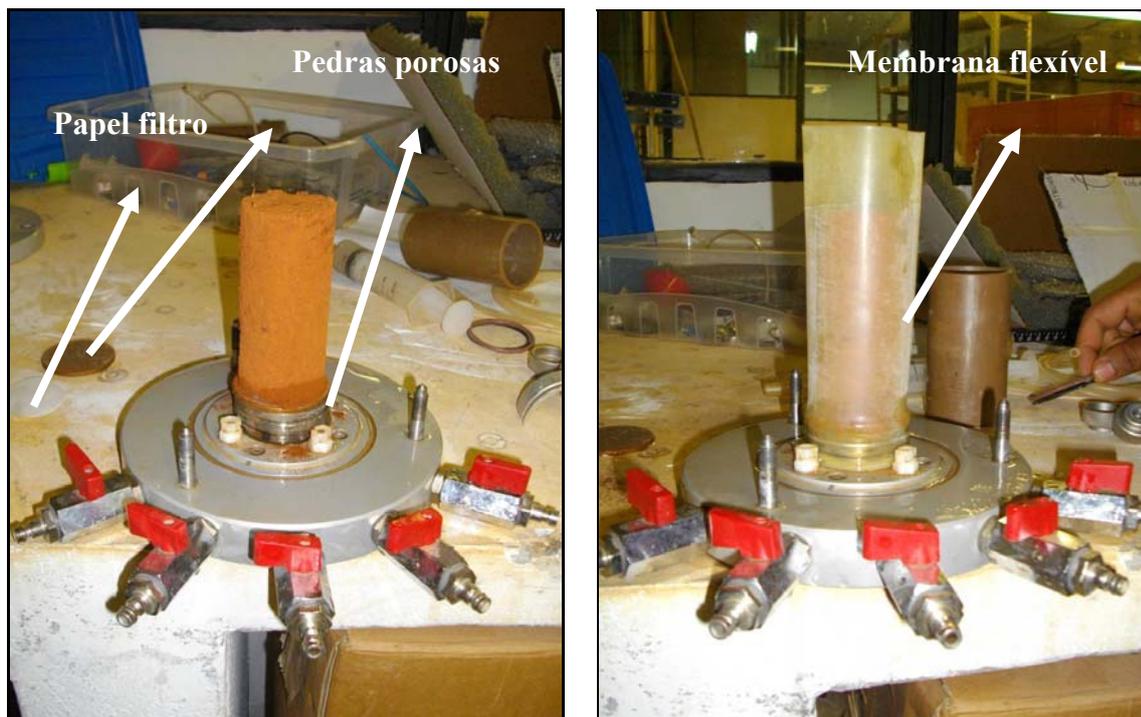


Figura 3.17-Montagem do corpo de prova junto com as pedras porosas, os papéis filtro e a membrana.

Tabela 3.1-Estágios e pressões utilizadas no ensaio.

Estagio No	Pressão primeira etapa		Pressão oitava e última etapa	
	Câmara (kPa)	Base(kPa)	Câmara (kPa)	Base(kPa)
1	30	10	130	110
2	50	10	150	110
3	70	10	170	110
4	90	10	190	110
5	110	10	210	110
6	160	10	260	110
7	210	10	310	110
8	310	10	410	110

Tabela 3.2- Tensões confinantes médias calculadas

Gradiente (u_t-u_b)									
20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Pressão confinante média $\bar{\sigma}$ (kPa)									
30	35	40	45	50	55	60	65	70	
50	55	60	65	70	75	80	85	90	
70	75	80	85	90	95	100	105	110	
90	95	100	105	110	115	120	125	130	
110	115	120	125	130	135	140	145		

U_t = Pressão no topo U_b = Pressão na base $\bar{\sigma} = \sigma_c - ((u_t - u_b) / 2)$ σ_c = Pressão de célula

Visando quantificar a interferência do adensamento promovido pelo aumento do gradiente hidráulico na permeabilidade da amostra em cada estágio, foi realizado o descarregamento do corpo de prova após atingir o último incremento de pressão.

CAPÍTULO 4

4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de laboratório realizados para caracterização do solo ao longo do perfil. São também apresentados os ensaios com o penetrômetro dinâmico PANDA e os resultados de campo correspondentes ao monitoramento dos perfis de umidade em cada uma das etapas dos ensaios de infiltração.

4.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

São apresentados nessa seção os resultados dos ensaios de laboratório para análise e caracterização física, mineralógica, estrutural e hidráulica do perfil de solo estudado.

4.2.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física das amostras foi feita a partir da determinação dos teores de umidade natural, dos ensaios de limites de Atterberg (limites de liquidez, limites de plasticidade) e dos ensaios de granulometria. A Figura 4.1 apresenta a síntese dos ensaios de caracterização em relação à profundidade.

Carvalho *et al.* (1996) realizaram análises microscópicas em uma amostra coletada a 2,0 m de profundidade, mostrando que em relação ao estado natural, a imersão em água gera certa desagregação do solo, que é ampliada pelo uso do defloculante, sem que, no entanto, ela seja total. Guimarães (2002) considera que o uso de defloculante torna-se importante no caso de percolação por fluídos específicos como é o caso do proveniente de sumidouros sanitários e lagoas de estabilização. Diante do exposto, conclui-se que o ensaio de granulometria com defloculante levará a resultados que não refletem o comportamento real do solo natural, mas que poderão ajudar a revelar o grau de agregação e, por conseguinte, de intemperização dos solos. Estes ensaios com o uso de defloculante não foram, no entanto, objeto dessa pesquisa.

Nesta pesquisa, foram realizados, ensaios de caracterização no granulômetro a laser com e sem o uso de ultrassom considerando que a ação do ultrassom provoca uma quebra dos

agregados por meio de ação mecânica, distintamente daquela de origem química, imposta pela ação do defloculante. As curvas granulométricas obtidas estão apresentadas na Figura 4.2.

Ao ser submetida ao ensaio de granulométrica no granulômetro a laser sem o uso de ultrassom a amostra coletada a 1,0 m de profundidade revelou a predominância da fração areia em detrimento das frações silte e argila, apresentando, respectivamente, os seguintes percentuais 67%, 24,6% e 1,4%. A fração pedregulho também chamou atenção nesta amostra de solo apresentando o percentual de 6%. Destaca-se, porém, ser comum na área o aparecimento de uma camada superficial rica em pedregulho.

Ao ser submetida à ação do ultrassom a fração argila aumentou para 35,3%, ocorrendo redução equivalente na fração areia. Destaca-se que não foram verificadas variações relevantes nos percentuais de silte. Portanto, o solo é constituído por agregados de argila que contribuem para o aumento do teor da fração areia, característica comum nos solos regionais profundamente intemperizados. Este elevado grau de agregação contribui para a elevação da permeabilidade do perfil de solo.

A amostra de solo coletada a 2m de profundidade apresentou para todas as frações, exceto a de pedregulho, quando ensaiada sem o uso de ultrassom, percentuais muito semelhantes aos da amostra coletada a 1 m de profundidade. Todavia, quando submetida à ação do ultrassom a amostra de 2m apresentou característica granulométrica distinta. Ocorreu igualmente redução acentuada da fração areia, porém, com aumento mais relevante da fração silte e menor da fração argila. Destaca-se, que o ultrassom nem sempre gera a desagregação total do solo, pois muitas vezes os agregados que resistem à ação do ultrassom não resistem à do defloculante e vice-versa, ou seja, no caso em discussão pode estar ocorrendo que parte da fração silte registrada a 2m de profundidade seja formada por agregados que resistem à ação do ultrassom.

Observa-se, portanto, que quando analisadas em suas condições naturais, as amostras apresentam característica granulométrica areno-siltosa. Por outro lado, quando analisadas sob a influência do ultrassom elas apresentam, respectivamente para as profundidades de 1m e 2m características granulométricas areno-argilosa e silto-arenosa. Logo, o uso do ultrassom revelou, em ambas as amostras, um solo altamente intemperizado com a formação de agregados de argila e silte sob a forma de fração areia.

Destaca-se que mesmo com o uso do ultrassom e um aumento relativo de argila e silte os percentuais de areia continuaram relevantes

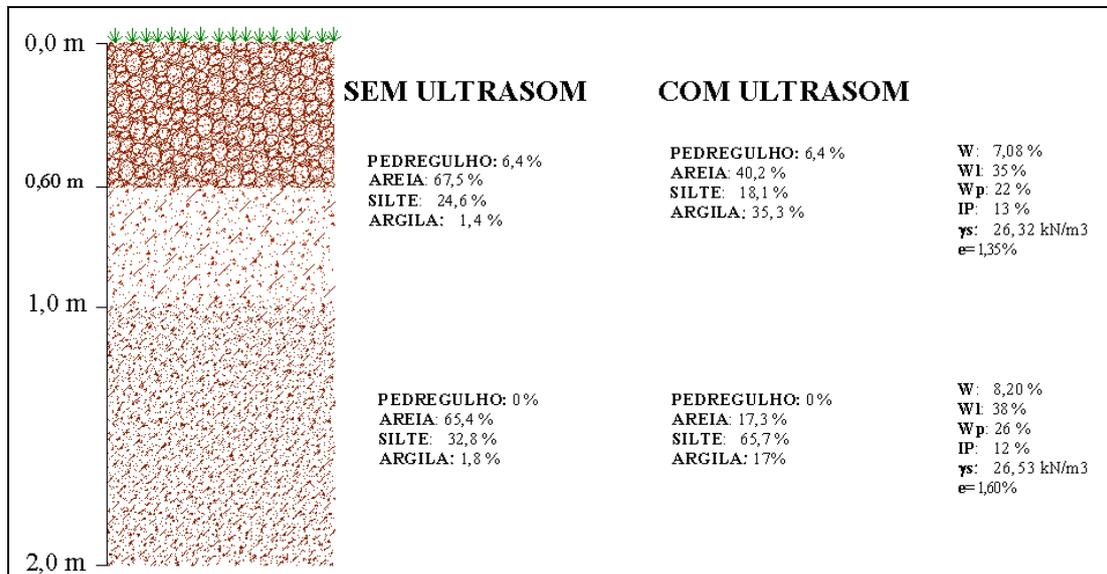


Figura 4.1- Caracterização do perfil do solo.

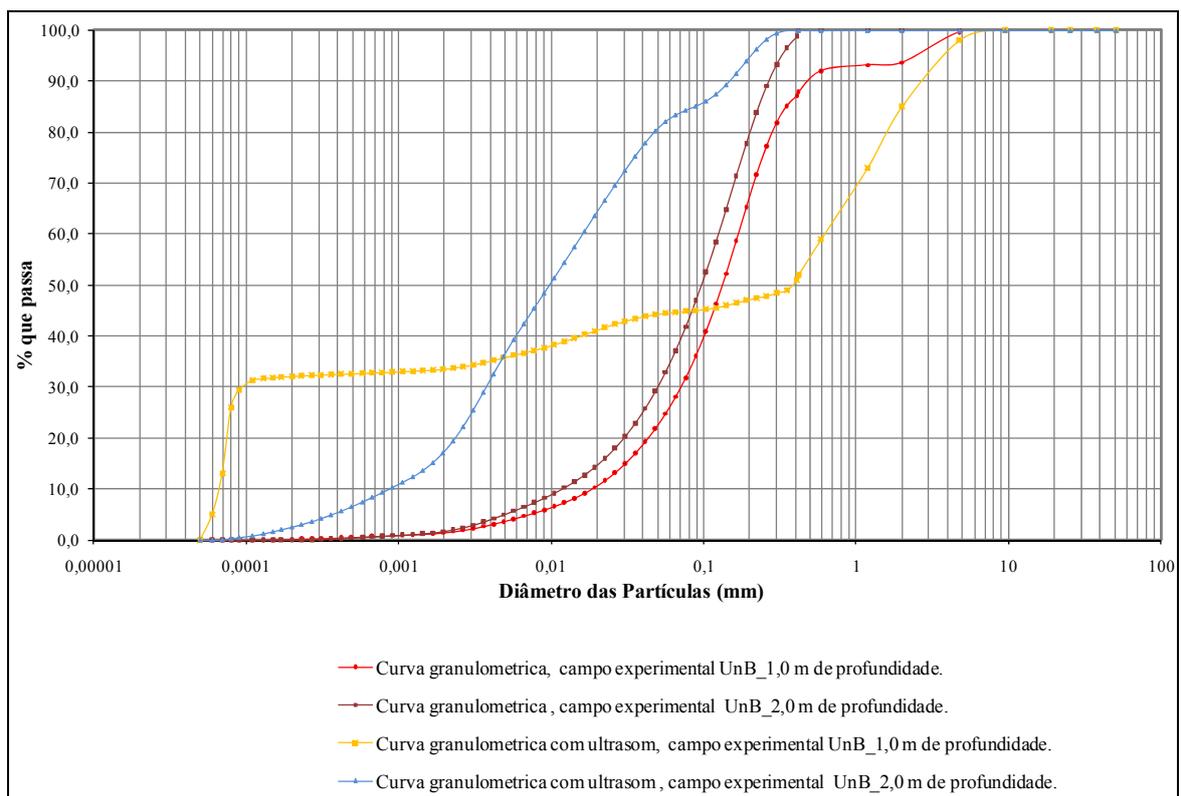


Figura 4.2- Curvas granulométricas das amostras para 1,00 e 2,00 m de profundidade com e sem ultrassom.

Os resultados obtidos por Silva (2007) ao estudar perfis de solo do mesmo local mostram que só parte da desagregação ocorre com o uso apenas do ultra-som, ou seja, faz-se necessário o uso também do defloculante para que a desagregação seja completa (Figura 4.3).

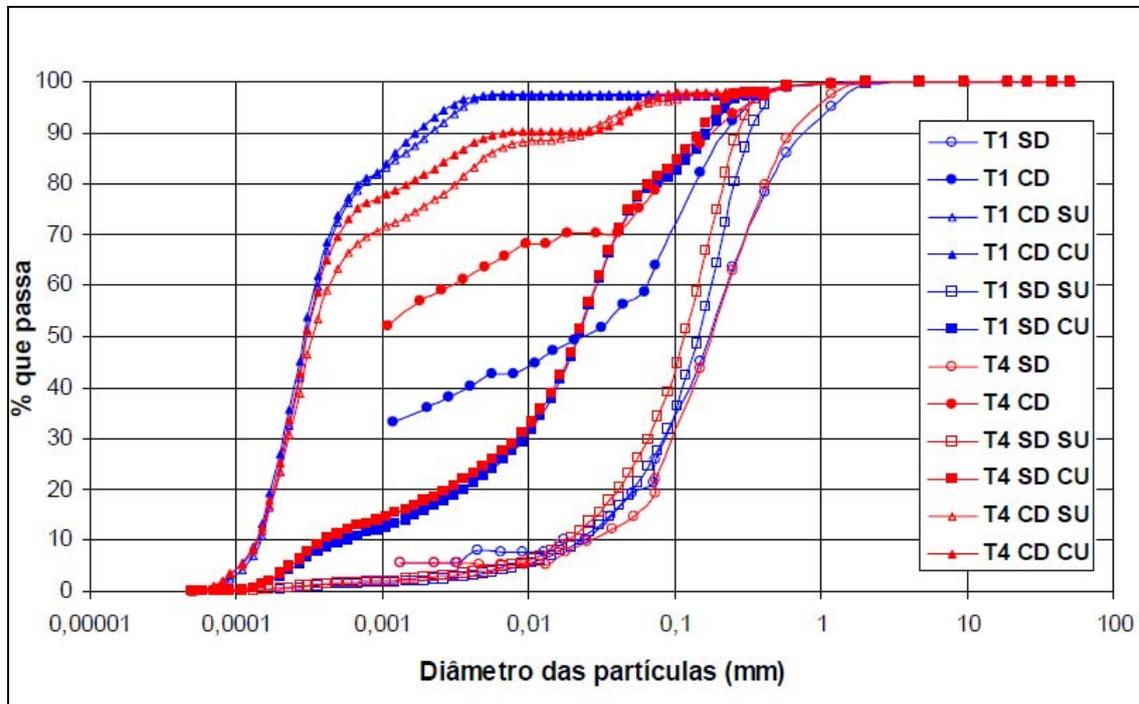


Figura 4.3-Curvas granulométricas das trincheiras 1 e 4 para 1,0 m de profundidade, Silva (2007).

Destaca-se nas Figura 4.2 e 4.3, uma semelhança de comportamento entre os resultados apresentados pelas trajetórias das curvas oriundas da presente pesquisa e aquelas obtidas por Silva (2007). Apesar da semelhança entre as curvas granulométricas obtidas nas duas pesquisas, percebe-se que para a profundidade de 1,00 m, os perfis de solo não são granulometricamente iguais. Isso se deve provavelmente a variações das alterações pedológicas mais relevantes na camada mais superficial.

Na Figura 4.4 são apresentados os limites de Atterberg obtidos por Silva (2007) e na presente pesquisa. A plotagem comparativa dos valores de índice de plasticidade (IP) e limite de liquidez (W_L) na carta de plasticidade indica que o solo de até 1,0m de profundidade pode ser classificado pelo sistema SUCS como uma argila de baixa plasticidade. O solo a 2,0m pode ser classificado como silte de baixa plasticidade. Porém, a grande proximidade dos resultados na carta de plasticidade aponta para solos fronteiros e semelhantes.

Esse comportamento de baixa plasticidade está associado ao alto grau de intemperismo sofrido pelo solo, solo profundamente intemperizado, e à presença de percentuais relevantes da fração areia.

Na Figura 4.4 também se apresenta o comparativo do Índice de Atividade entre os solos estudados nas duas pesquisas tendo os valores sido obtidos fazendo-se uso da fração argila determinada com o uso de ultra-som. Este índice reflete o potencial eletro-magnético do solo e representa a propriedade que transmite em maior ou menor grau um comportamento argiloso ao solo. Os resultados obtidos para as amostras coletadas a 1,0m e 2,0m de profundidade indicam tratar-se no presente caso de solo inativo. A baixa atividade das amostras ensaiadas reflete o elevado grau de intemperização pelo qual passou o solo não restando resquícios de argilominerais do tipo 2:1. Destaca-se que a desagregação total do solo conduziria ao aumento da fração argila e por consequência, à redução do coeficiente de atividade de Skempton.

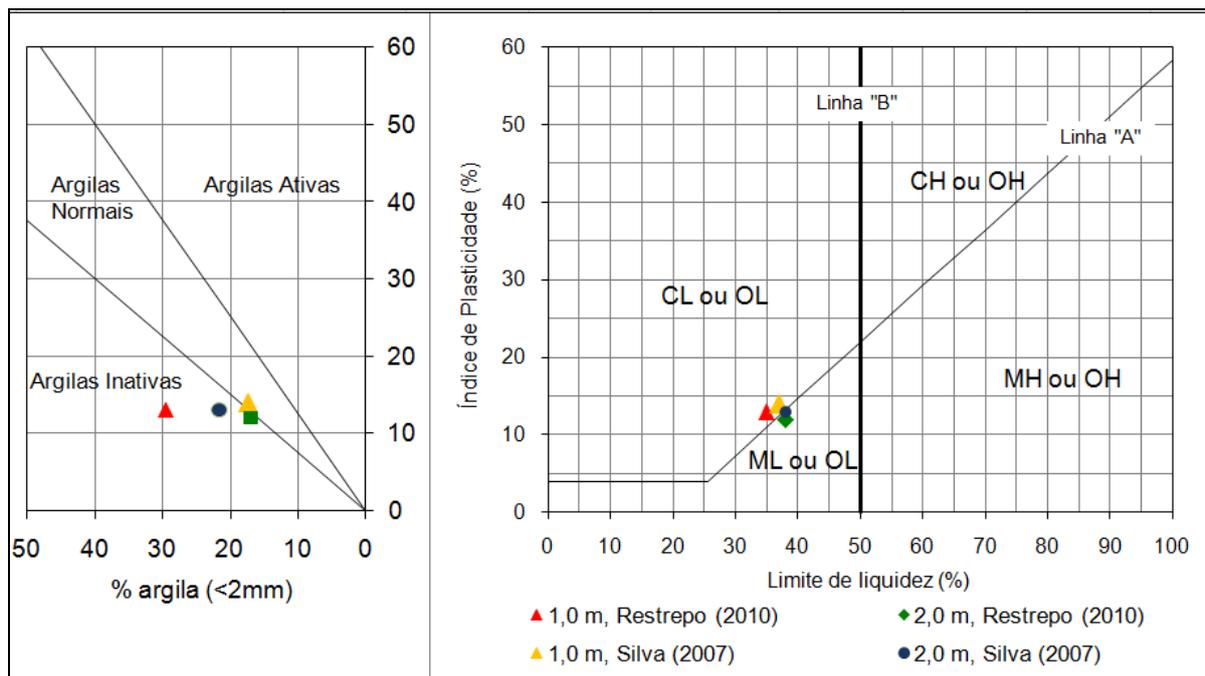


Figura 4.4-Classificação SUCS com base nos limites de Atterberg.

O solo estudado apresenta um peso específico dos sólidos para a profundidade de 1,0 m de 26,32 kN/m³ e para a de 2,0 m de 26,53 kN/m³, percebendo-se, portanto, que não houve grande variação deste índice físico ao longo das profundidades analisadas.

Em geral, esses solos superficiais apresentam, devido ao intemperismo físico-químico, elevada porosidade. As amostras ensaiadas apresentaram porosidade variando de 57% ($e=1,35$) na amostra coletada a 1,0 m de profundidade, a 61% ($e=1,60$) na amostra coletada a 2,0 m de profundidade.

4.2.2 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO.

Os resultados das análises mineralógicas, realizadas por Carvalho (1995) utilizando o método de difratometria de raios- X são apresentados na Tabela 4.1 e nas Figura 4.5e Figura 4.6.

Tabela 4.1- Características mineralógicas do perfil de solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (Carvalho, 1995)

Mineral (%)	Profundidade (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
gibbsita	39,2	41,7	38,7	43,3	36,6	27,1	9,1	3,7	0	0
caolinita	8,3	6,9	5,4	8,7	11,7	17,5	27,1	41,1	30,9	37,1
quartzo	32,5	29,4	37,6	22,1	29,4	15,7	28,9	9,4	27,6	22,5
hematita	6,8	6,9	6,7	10,1	10,8	14,1	14,4	13,7	11,9	14,1
goethita	3,5	3,4	4,7	4,4	0	0	0	0	0	0
anastásio	5,9	6,9	4,1	5,9	7,4	7,9	7,3	5,1	7,2	0
rutilo	3,8	4,9	3,1	5,5	4,1	6,5	3,8	6,6	0	0
ilita	0	0	0	0	0	6,9	5,7	7,9	7,1	11,2

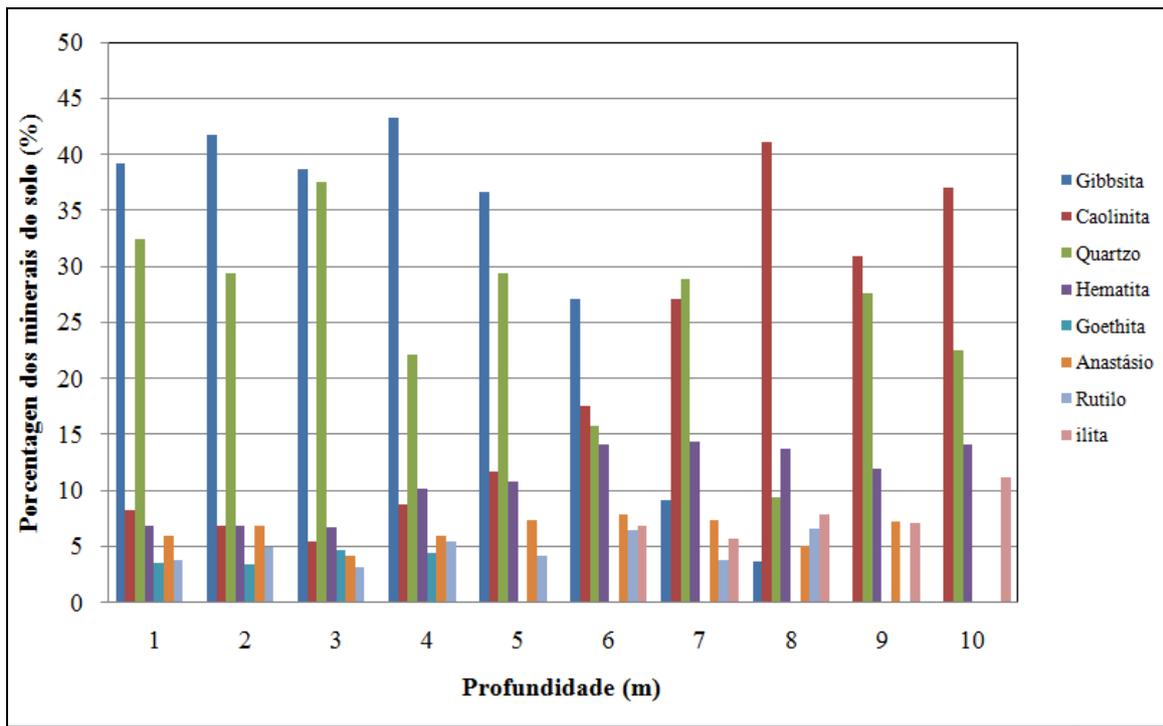


Figura 4.5- Minerais ao longo da profundidade.

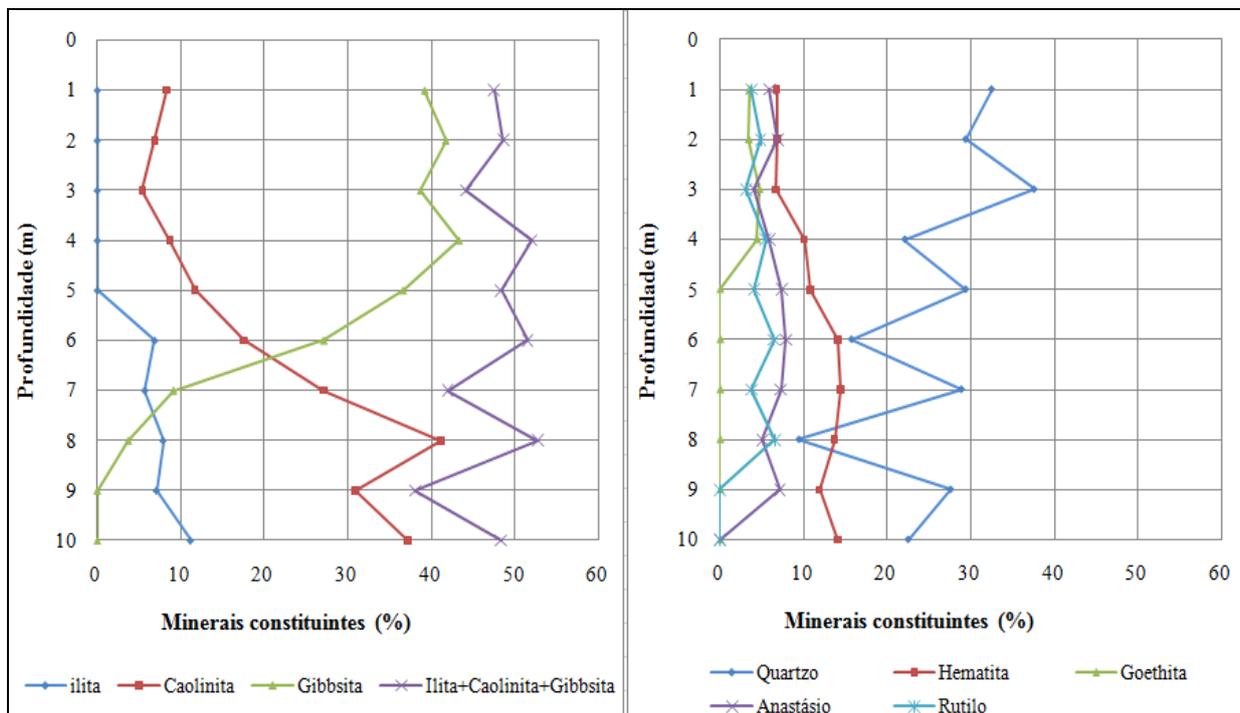


Figura 4.6-Distribuição dos principais minerais ao longo da profundidade.

As análises permitiram a identificar a presença dos seguintes minerais no perfil de solo: gibbsita, caulinita, quartzo, hematita, goethita, anastásio, rutilo e ilita. O elevado teor do mineral gibbsita na camada mais superficial indica um processo de intemperização e

laterização acentuado. A ilita só se faz presente a partir da profundidade de 6m. A constância no somatório dos teores de caulinita, gibbsita e ilita ao longo da profundidade apontam para um perfil de solo residual. Nessa análise fica caracterizado o típico processo de laterização presente na região de cerrado

A presença da goethita nos quatro primeiros metros indica ser essa zona mais susceptível a hidratação do ferro. Verifica-se que se somados os teores de goethita com os de hematita mostrados na Figura 4.6 se obtém certa constância ao longo da profundidade, corroborando assim, com a idéia de que a condições de hidratação são mais favorecidas na superfície

Segundo Martins (1998), citado por Cardoso *et al.* (1998), a abundância de gibbsita é comum nos solos do DF, caracterizando as camadas mais superficiais da região que sofreram essencialmente o processo de alitização em áreas com solos bem drenados. Araki (1997) verificou estudando outro perfil de solo da cidade de Brasília, que este tipo de característica não representa tendência isolada. Lima (2003) mostrou, para perfis de intemperismo na região do Distrito Federal, a predominância de caulinita, gibbsita e quartzo, seguido de goethita e, raramente, ilita, que é preservada apenas nos níveis menos alterados.

4.2.3 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SOLO

Araki (1997) afirma que os solos tropicais possuem micro-agregações de argila que geram uma variação nos teores das frações granulométricas. Estas agregações são causadas pela acidez e refletem o intemperismo sofrido pelo solo. Guimarães (2002) afirma que as propriedades físicas e o comportamento mecânico dos solos tropicais estão quase sempre associados à micro-estrutura desenvolvida no processo de alteração a que foram submetidos.

De acordo com a Figura 4.7 observa-se que o solo a 1m e a 2m de profundidade é marcado por uma estrutura porosa que aponta para uma distribuição bimodal dos poros com presença predominante de macro e de microporos. Esse tipo de estrutura conjugada com a alta porosidade presente no solo caracteriza uma propensão a elevada permeabilidade e capacidade de infiltração. Dada a forma como se dá a presença de micro e macroporos no solo, tanto a permeabilidade como a capacidade de infiltração não podem ser diretamente relacionados à porosidade ou ao índice de vazios global do solo.

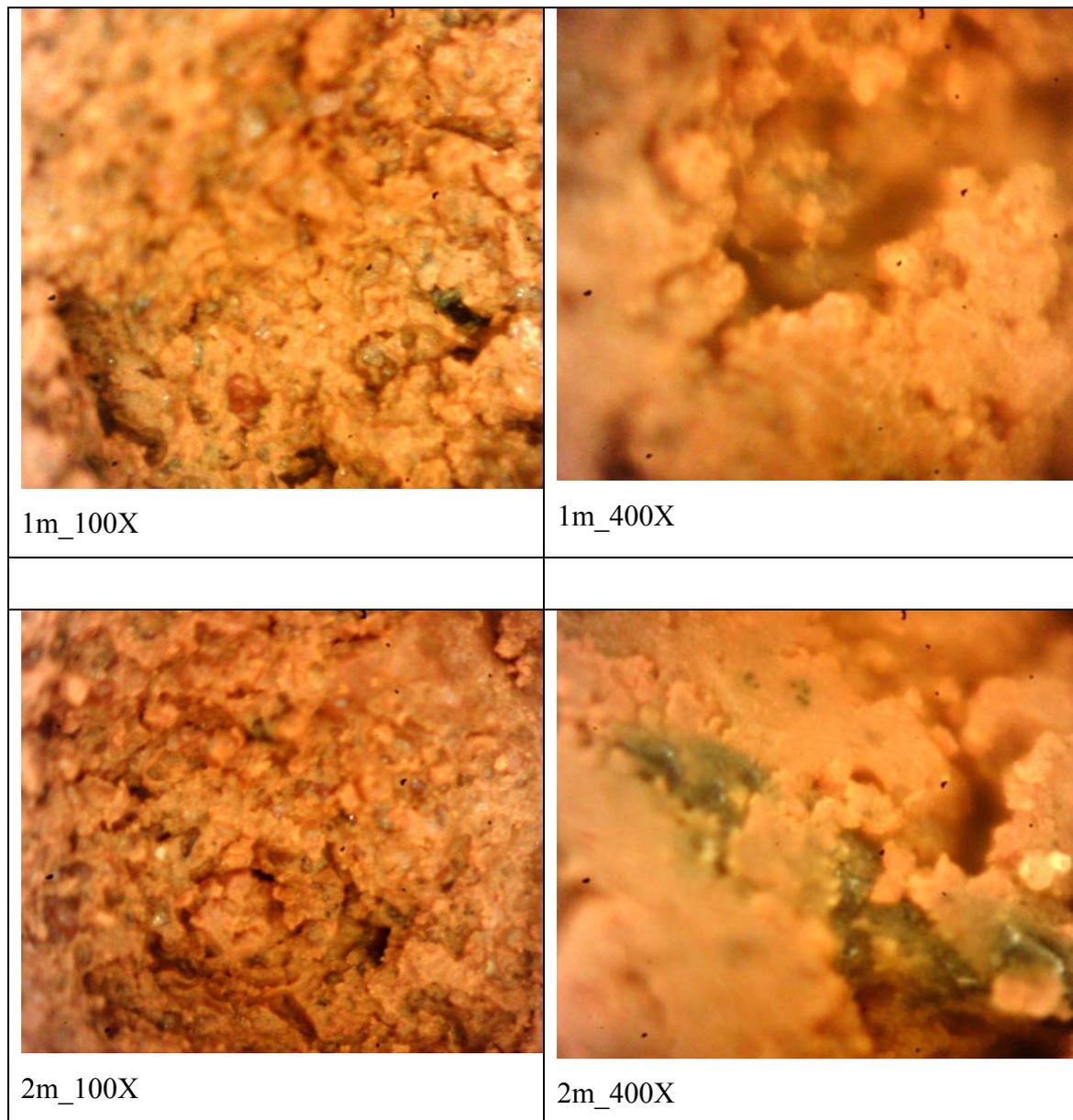


Figura 4.7-Estrutura de solo para 1,0 e 2,0 m de profundidade com aumento de 100X e 400X

4.2.4 - CURVA CARACTERÍTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.

A Figura 4.8 mostra as curvas características de sucção mátrica obtidas para as profundidades de 1,0 e 2,0 m segundo a trajetória mista de secagem e umedecimento, realizadas a partir da umidade natural. As curvas características de retenção de água têm a forma atrelada ao tamanho e distribuição dos poros, ou seja, ao arranjo estrutural.

Para a curva característica referente à profundidade de 1,0 m pode-se observar um deslocamento quando comparada com a curva de 2,0 m, conservando-se, no entanto, um certo paralelismo entre elas. Esse deslocamento reflete o maior volume de macroporos e o menor

volume de microporos para a profundidade de 1m. O maior volume de macroporos nessa camada pode estar associado a uma maior lixiviação sofrida e o menor volume de microporos só se explicaria pelo fato de parte deles se encontrarem na massa eventualmente lixiviada.

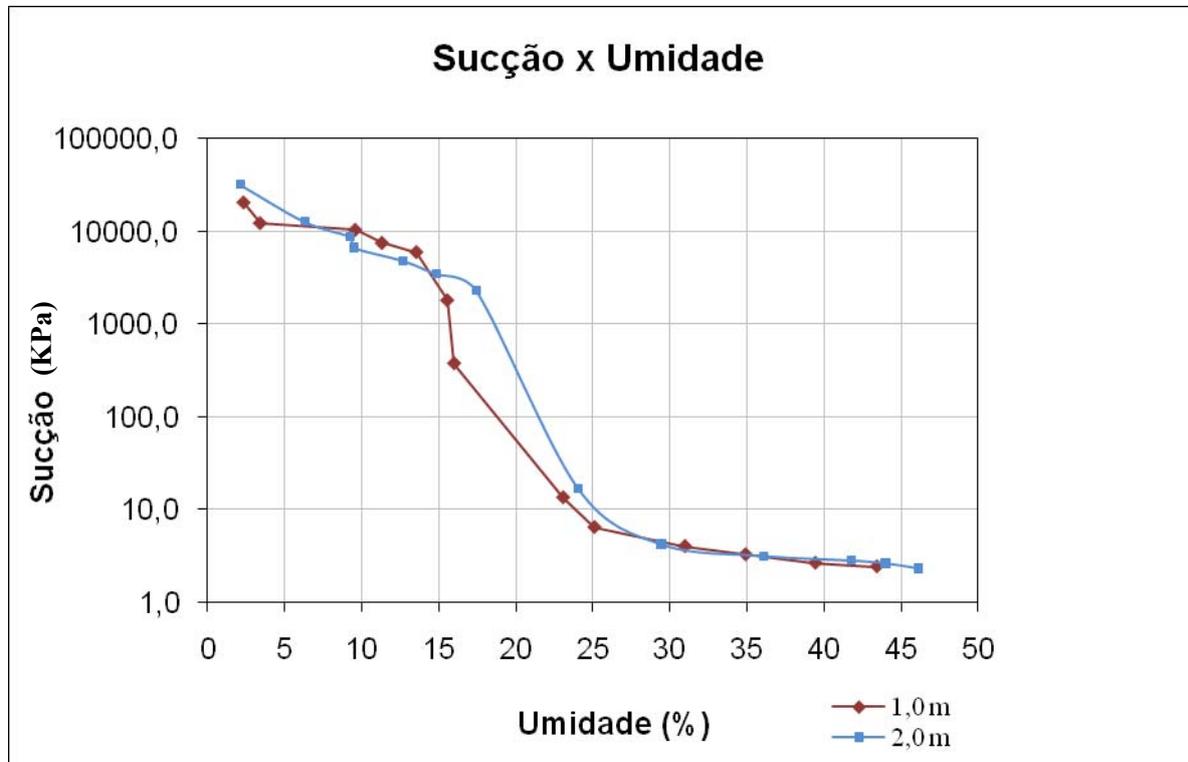


Figura 4.8-Curvas características do campo experimental da UnB, para 1,0 e 2,0 m de profundidade.

Verifica-se que as curvas características são típicas de solos tropicais, ou seja, bimodal, conforme apresentado por Camapum de Carvalho & Leroueil (2000). Segundo esses autores a distribuição bimodal de poros nos solos tropicais se deve ao intemperismo e a acidez, que são responsáveis pela formação de agregações de partículas cimentadas ou não por óxidos e hidróxidos de alumínio e/ou ferro, que por sua vez se ligam uns aos outros, seja por estes mesmos cimentos ou por pontes de argila. Segundo hipóteses dos mesmos autores, os solos com distribuição bimodal de poros apresentam dois pontos de entrada de ar na curva característica de retenção de água. O primeiro refere-se à entrada de ar nos macroporos, para pequenos valores de sucção, onde a partir deste ocorre grandes variações de umidade e por consequência do grau de saturação para pequenas variações de sucção; e o segundo diz respeito à entrada de ar nos microporos, para valores de sucção mais elevados.

Segundo Aubertin et al. (1998), citado por Guimarães (2002), espera-se que o ponto de entrada de ar varie entre 0,2 kPa a 1 kPa em areias grossas, 1 kPa a 3,5 kPa em areias médias, 3,5 kPa a 7,5 kPa em areias finas, 7 kPa a 25 kPa em siltes e mais de 25 kPa nas argilas.

Conforme Camapum de Carvalho et al. (2002) e Guimarães (2002), para esse perfil de solo se teria de 0,0 a 3,0m o predomínio marcante de microporos no interior dos agregados e macroporos entre eles, sendo que a partir dessa profundidade a importância dos macroporos diminuiria até praticamente desaparecer a partir do oitavo metro. Para 9,0 e 10,0m, a distribuição de poros tenderia a ser melhor graduada desaparecendo assim o aspecto marcante da bimodalidade.

Observa-se que a sucção de entrada de ar nos macroporos está em torno de 5 kPa; a umidade do término de entrada de ar dos macroporos é crescente com a profundidade variando de 30 a 45% e a umidade de entrada de ar nos microporos, de forma geral, também é crescente com a profundidade variando de 14 a 25%, com uma sucção de entrada de ar nos microporos em torno de 4000 kPa. No entanto, a umidade para os dois pontos apresenta pouca variação com a profundidade, não apresentando tendência definida. Para os solos tropicais profundamente intemperizados típicos da região, a entrada de ar dos macroporos se situa entre 5 e 10 kPa e a dos microporos entre 500 e 10.000 kPa (Guimarães 2002). Pode se dizer que estes valores estão coincidindo com perfil de solo típico do campo experimental.

4.2.5 - PERMEABILIDADE

Apresenta-se a seguir os resultados de permeabilidade obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa de Silva (2007). Os ensaios foram realizados sobre amostras coletadas a 1,00, 1,80 e 2,50 m de profundidade em duas das trincheiras objeto do estudo de Silva (2007). Para as amostras coletadas a 1,00 e 1,80 m de profundidade os ensaios foram realizados com amostra talhada na horizontal (fluxo horizontal) e para a profundidade de 2,50 m na vertical (fluxo vertical). Da Figura 4.9, pode-se ver que as permeabilidades horizontais obtidas por meio de permeômetros de carga variável e carga constante variam para o primeiro metro, entre $1,2 \times 10^{-4}$ e $1,4 \times 10^{-4}$ cm/s e entre $6,4 \times 10^{-4}$ e $9,9 \times 10^{-4}$ cm/s para a profundidade 1,80m. Na profundidade 2,50 m obteve-se permeabilidade variando entre $6,1 \times 10^{-4}$ cm/s (permeômetro à carga variável) e $6,2 \times 10^{-4}$ cm/s (permeômetro à carga constante). Os resultados obtidos pelas

duas técnicas de ensaio foram muito semelhantes, o que aponta para a exatidão dos valores obtidos.

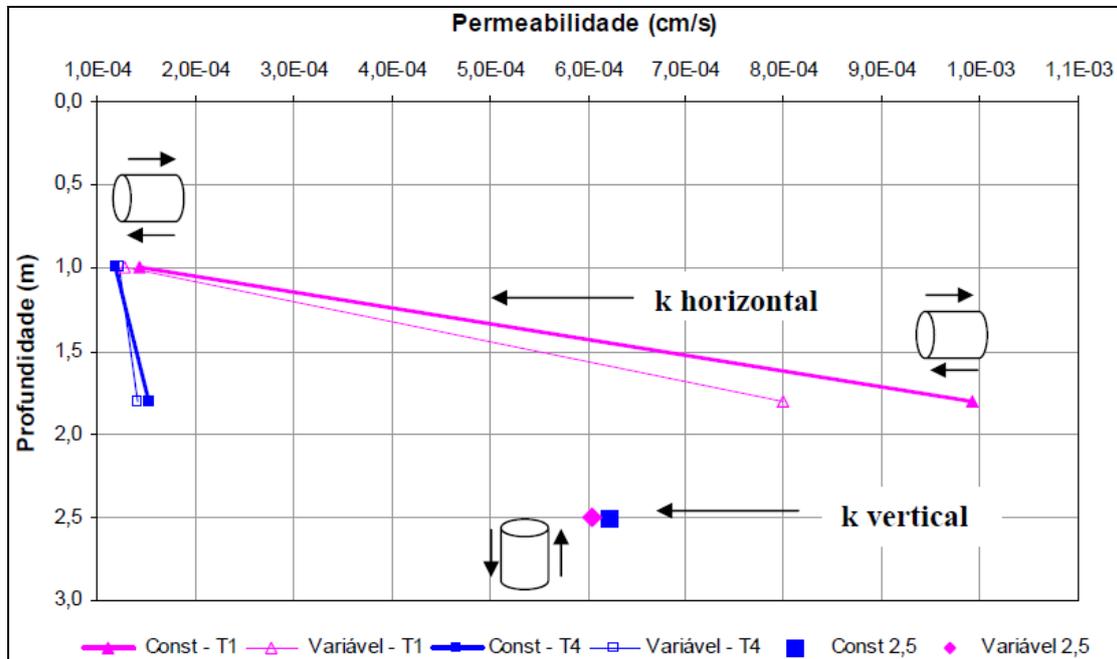


Figura 4.9-Resultados dos ensaios de permeabilidade, Silva (2007).

Na presente pesquisa optou-se por estudar a influência do gradiente e da tensão confinante na permeabilidade. O estudo objetivou averiguar qual seria o efeito do gradiente imposto ao solo pela sucção em sua permeabilidade e que nível a tensão confinante a afetaria.

Os resultados obtidos na presente pesquisa para a profundidade de 1,0 m estão plotados na Figura 4.10, onde se apresentam as mudanças nos valores de permeabilidade para os diferentes incrementos de gradiente e tensões confinantes médias ao longo do corpo de prova. Nesses ensaios ocorreu uma imprecisão metodológica que merece ser considerada na avaliação dos resultados. No procedimento de ensaio adotado, inicialmente se aplicava a tensão de célula correspondente à tensão confinante mais a contra-pressão na base do corpo de prova. Em seu topo a contra-pressão era mantida nula estabelecendo-se assim o fluxo da base para o topo do corpo de prova. Tal procedimento, no entanto, implicava no fato de que na base do corpo de prova a tensão confinante era igual à pressão de célula menos a contra-pressão enquanto no topo ela era igual à própria pressão de célula uma vez que a contra-pressão era nula.

Verifica-se então na Figura 4.10, que à medida que a tensão confinante media aumentava a permeabilidade diminuía o que se explica facilmente pela redução do índice de vazios durante o processo de consolidação da amostra. Verifica-se também que houve uma tendência para o valor de coeficiente de permeabilidade (k) se manter, praticamente, constante ao longo do tempo, o que significa que não houve carreamento das partículas mais finas de solo, nem colmatção dos vazios durante o ensaio.

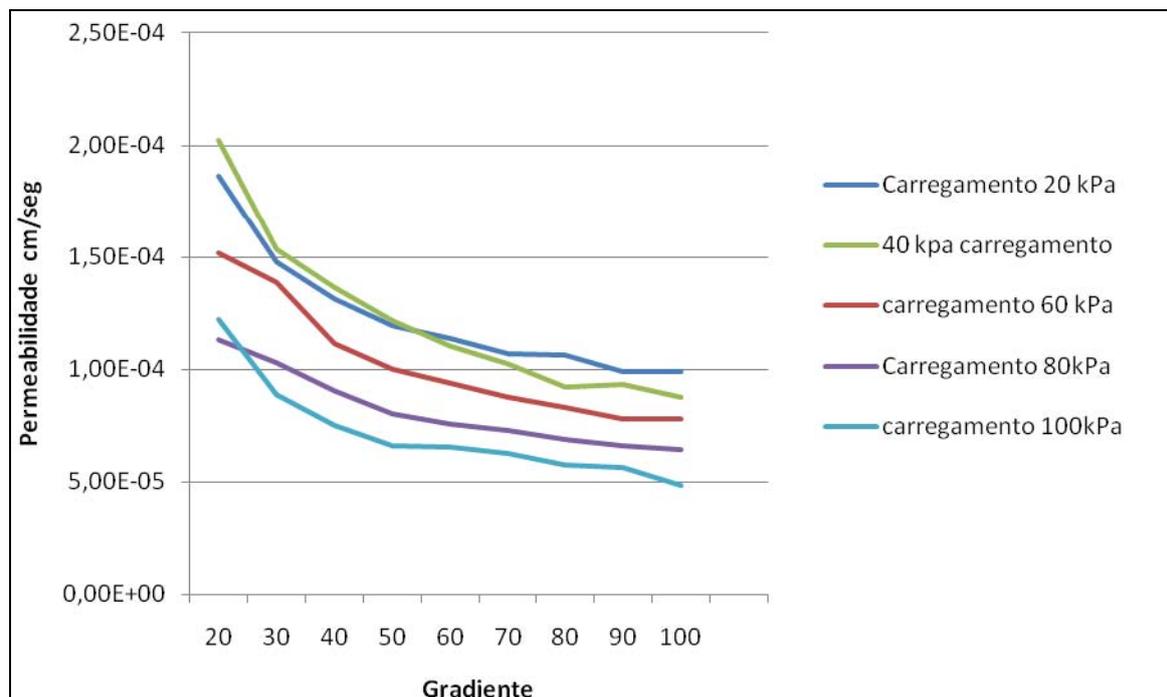


Figura 4.10-Resultados ensaios de permeabilidade a carga variável.

4.3 - ENSAIOS EM CAMPO

Os ensaios de campo realizados durante esta pesquisa foram desenvolvidos em cinco etapas, começando no dia 18 de setembro de 2009, e finalizando no dia 15 de novembro de 2009. Esse referencial no tempo é importante, pois a umidade dos solos naturais estão associadas ao nível de precipitação e evaporação e, portanto, à estação climática. Durante este período foram feitos ensaios de infiltração no perfil de solo estudado pelo método do rebaixamento em furo de sondagem à trado. O furo de sondagem utilizava 3m de profundidade e 0,10m de diâmetro. Para medir as variações de umidade antes e após cada ensaio de infiltração foram realizadas coletas de amostras a diferentes profundidades. As umidades,

como descrito no capítulo 3, “Matérias e Métodos”, foram determinadas pelo método gravimétrico. Como complemento a estes ensaios foram realizados ensaios PANDA para determinar a variabilidade da resistência de ponta do solo ao longo da profundidade antes e após os ensaios de infiltração. Estes ensaios objetivaram verificar a influência das variações de umidade no comportamento mecânico do solo no que tange à resistência à penetração.

4.3.1 - MONITORAMENTO DOS PERFIS DE UMIDADE NOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

A coleta de amostras para a realização do monitoramento da umidade, antes e após os ensaios de infiltração, seguiu o perfil apresentado na Figura 4.11. No total foram 38 furos de inspeção de umidade nos quais coletaram-se um total de 228 amostras, retiradas a cada 0,50 m até a profundidade de 3,0m. A partir dos dados amostrais, foi possível gerar uma superfície contínua, expressa por mapas, por meio de métodos de interpolação. Nesse caso, a geoestatística é usada como ferramenta auxiliar, visto que permite estabelecer um modelo de semivariograma que melhor descreve a variabilidade espacial dos dados, o qual é usado no processo de interpolação. É importante que o modelo ajustado represente a tendência da semivariância em relação à distância, sendo a *krigagem* o método de interpolação que confere maior exatidão às estimativas obtidas (Johann et al., 2004).

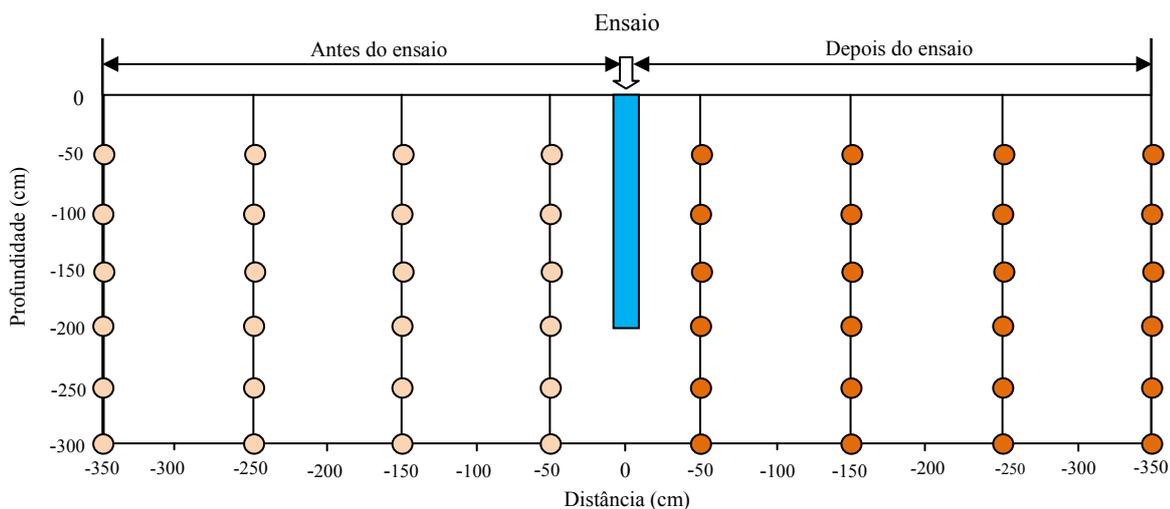


Figura 4.11- Malha de amostragem das umidades

Para aplicação deste método de interpolação foi utilizado o programa *Surfer 8* (*Golden Software Inc*). O *Surfer* é um programa de mapeamento georreferenciado de superfície em 3D

(tridimensional) e de contorno, desenvolvido pela *Golden Software*, que cria ou importa, arquivos para que sejam internamente processados. Por se tratar de espacialização de dados, os arquivos originais do Surfer são do tipo tabelas em formato Excel ou equivalente, possuindo sempre três colunas de variáveis, XYZ. Convencionalmente as duas primeiras colunas, X e Y, referem-se sempre às coordenadas da posição geográfica e a terceira será da variável profundidade Z, alvo da espacialização. Esses arquivos são importados e visualizados inicialmente em uma folha de trabalho "*Worksheet*", na qual os dados são gerados e convertidos para o formato ".*dat*" da *Golden Software Data*. Posteriormente, dentro do módulo Grid \Rightarrow Data, é gerada uma *grade* através de métodos estatísticos, convertendo assim o arquivo, para o formato específico tipo ".*grd*".

Buscando monitorar de maneira efetiva os volumes armazenados/infiltrados do solo, foi necessário um melhor controle das variáveis que interferem diretamente neste monitoramento. Para isto, foram coletados os dados meteorológicos na estação automática do INMET, denominada Brasília-DF. A estação foi aberta para leitura dos dados no dia 7 de maio de 2000 e encontra-se localizada nas seguintes coordenadas: latitude: $-15,7894^\circ$, longitude: -47.9256° e uma altitude de 1.159,54 m. Esta é a estação mais próxima do local do experimento o qual esta localizado nas seguintes coordenadas latitude: $-15,4556^\circ$, longitude: -47.5223° . A Figura 4.12 apresenta os valores das chuvas acumuladas e o número de dias com chuva para todos os meses do ano 2009.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) o clima de Brasília se apresenta como semi-seco com duas estações bem definidas: a seca e a úmida, a primeira, de abril a meados de outubro e a segunda, de meados de outubro a março. Invariavelmente, o mês mais seco do ano em termos de umidade relativa é agosto e o mês mais frio é julho.

Durante o período de seca a temperatura durante o dia é alta, mas há uma queda à noite. Entre abril e maio acentua-se mais a queda de temperatura à noite, com mínimas de 15 graus. Nesse período, as chuvas diminuem e a umidade do ar também começa a cair. De maio até julho as chuvas são escassas. As temperaturas à noite e de madrugada variam de 10 a 15 graus. A umidade do ar cai e a temperatura varia consideravelmente, com muito frio pela manhã, calor à tarde e frio à noite. A partir de agosto até outubro começa o período de seca intensa, as chuvas são ocasionais. A umidade do ar chega aos níveis mais baixos atingindo algumas vezes o valor de 10%. Há um aumento na temperatura durante o dia com quedas à noite. Para

a estação chuvosa há calor, e chuvas e com temperaturas máximas de 28 a 32 graus e mínimas de 20 a 25 graus. Este período é geralmente de chuvas e calor intensos. No início de novembro começa o período de chuvas com trovoadas e com altas temperaturas.

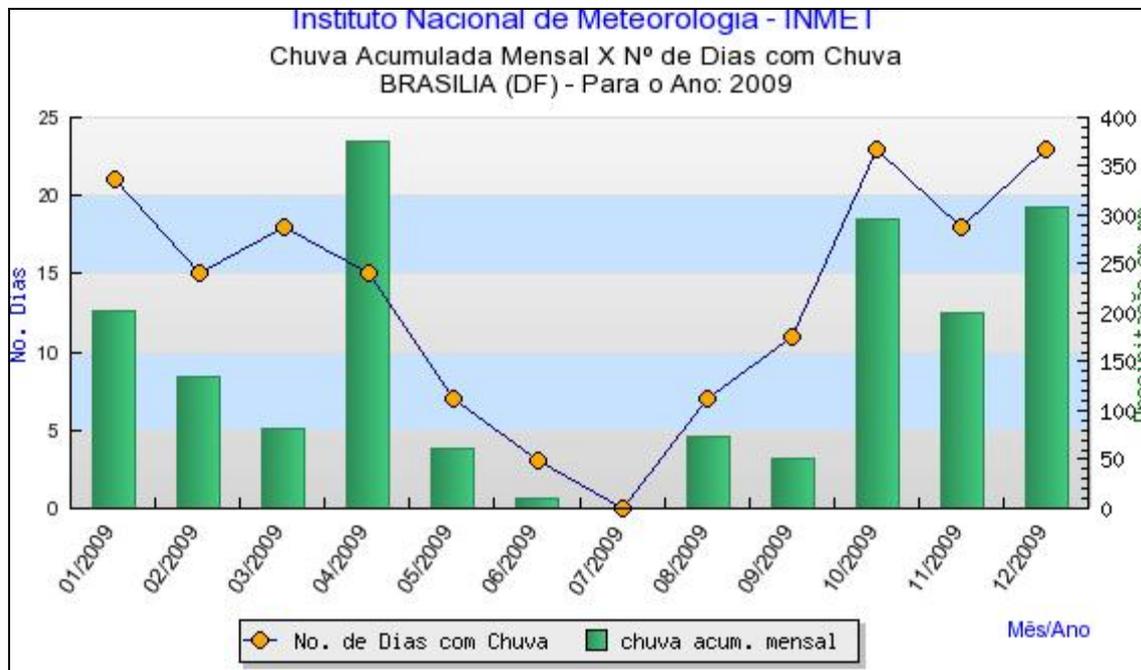


Figura 4.12-Dados de precipitação da estação automática do INMET Brasília DF (INMET,2009)

DESENVOLVIMENTO DAS ETAPAS DOS ENSAIOS DE CAMPO

• Primeira etapa, 18 de Setembro de 2009

O primeiro ensaio foi realizado no dia 18 de setembro de 2009 considerado como o dia 0. Até esta data o que consta nos históricos de chuvas segundo o INMET no último mês que antecede os ensaios, foram chuvas rápidas e de pouca intensidade. No dia do ensaio houve à tarde 0,2 mm de chuva segundo a estação automática do INMET Brasília DF, e a temperatura máxima alcançou os 30° C. A Figura 4.13 apresenta a precipitação acumulada em 24h, desde o dia 01 de agosto até o dia 30 de setembro de 2009. Depois de obter os resultados de umidade para este dia, verifica-se nas Figura 4.14 e Figura 4.17 que o perfil de umidade não sofreu muitas mudanças da superfície até 3,0 m, com exceção do furo nº 01, localizado à 1m de distância do furo principal de infiltração, para o qual se constatou significativo aumento de umidade a partir da profundidade de 1m. Pela Figura 4.17 observa-se, também, que o comportamento dos perfis de umidade segue tendência parecida para os furos restantes. Como um comparativo adicional apresenta-se na Figura 4.18 as curvas de Isosucções, ou seja,

o valor de sucção obtidas das curvas características e correspondentes a cada unidade encontrada no campo, reiterando assim a pouca influência que teve o ensaio de infiltração após uma distancia de 1,0 m do furo principal.

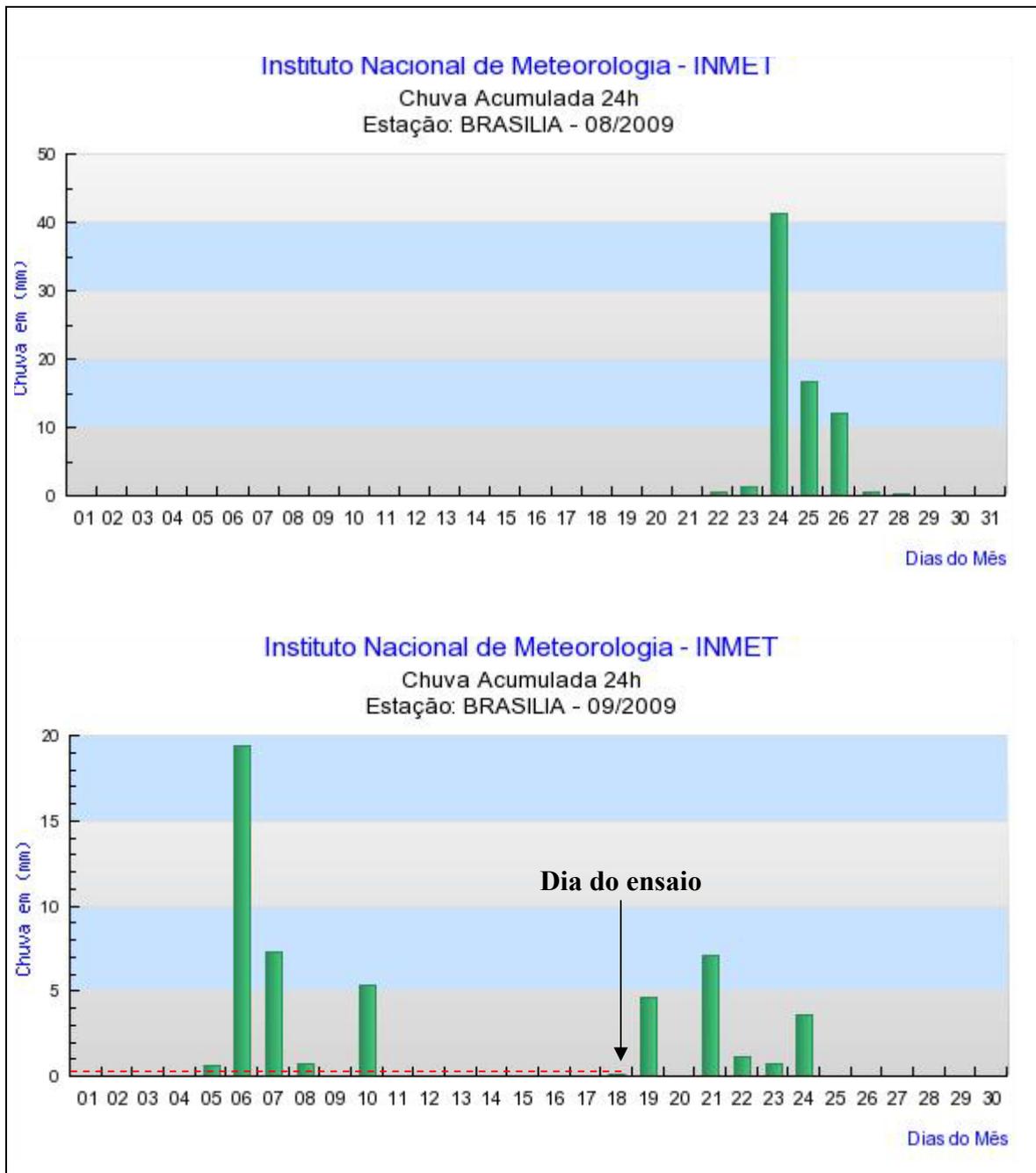


Figura 4.13-Dados de precipitação acumulada 24h para os meses de agosto e setembro de 2009. (INMET,2009)

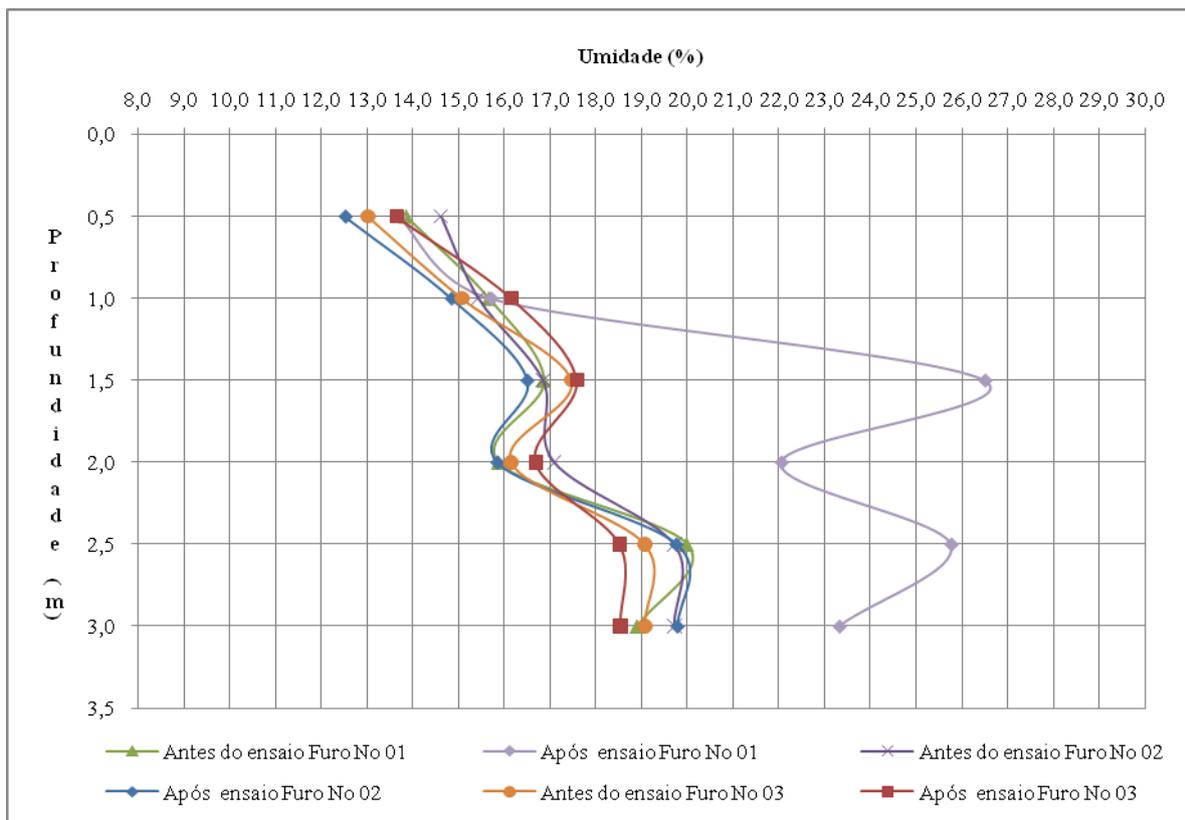


Figura 4.14-Perfil de umidade antes e após do primeiro ensaio

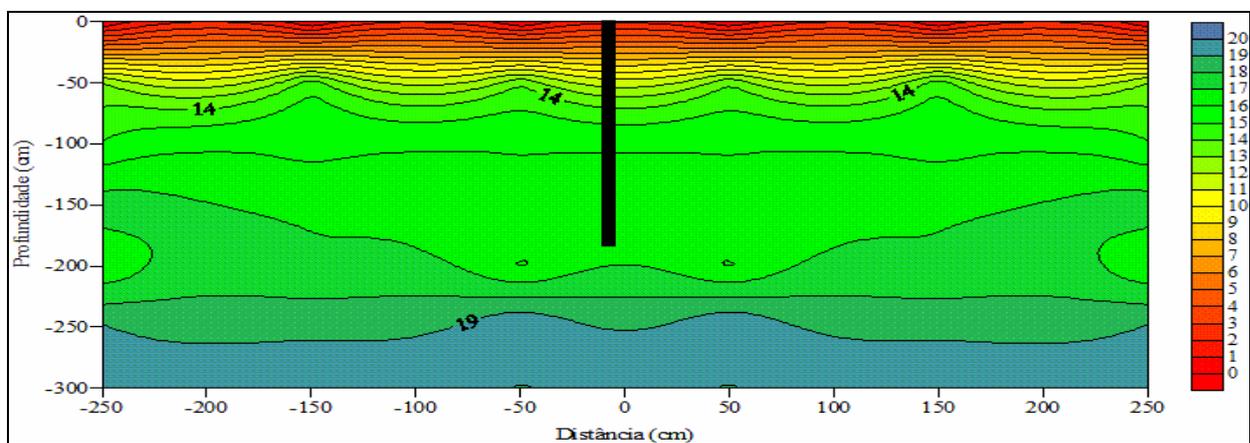


Figura 4.15-Perfil de umidade antes do primeiro ensaio.

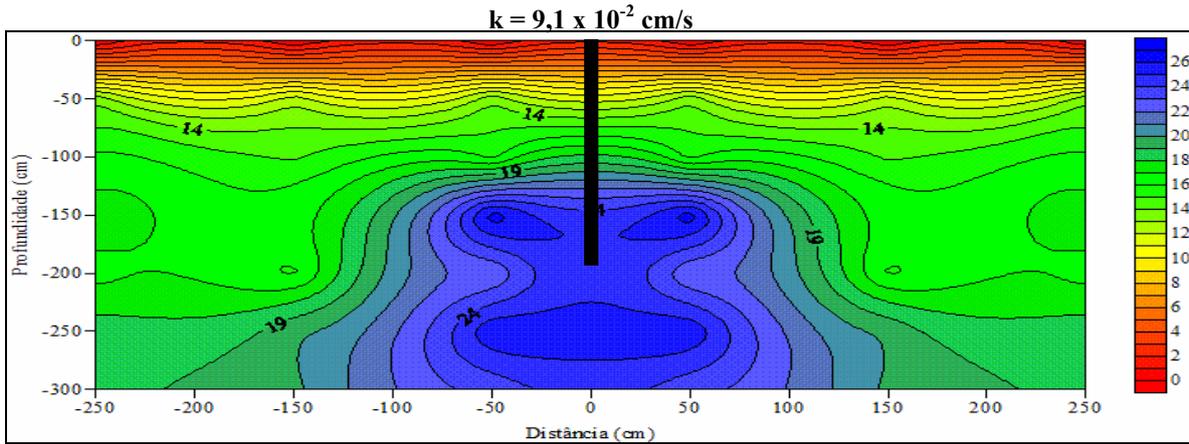


Figura 4.16-Perfil de umidade após o primeiro ensaio.

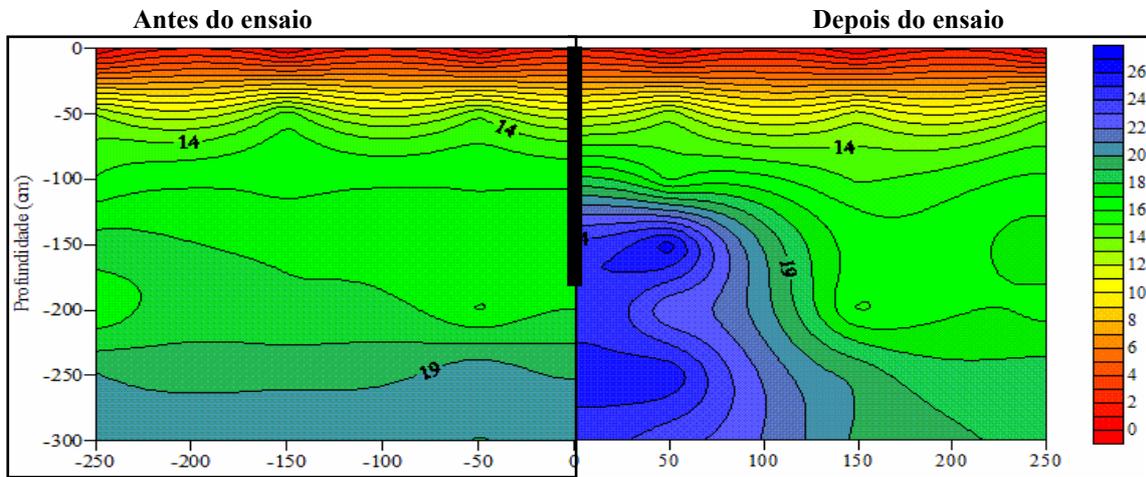


Figura 4.17- Perfil de umidade antes e após o primeiro ensaio.

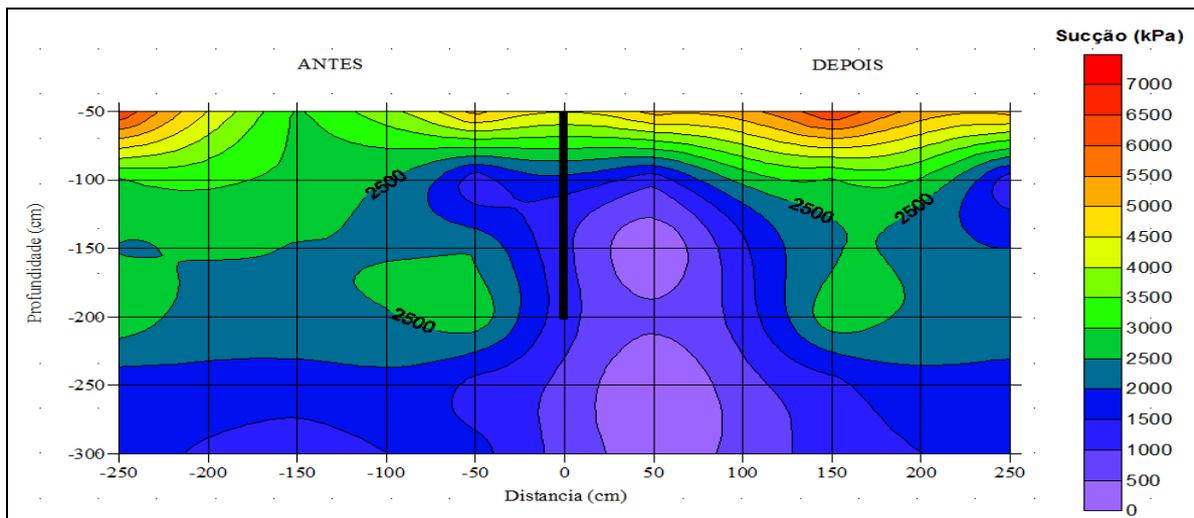


Figura 4.18-Isosucções antes e após o primeiro ensaio.

- **Segunda etapa, 22 de Setembro de 2009.**

O segundo ensaio foi realizado no dia 22 de setembro de 2009, 4 dias depois do primeiro ensaio. Até esta data consta nos históricos do INMET um acréscimo de precipitação com períodos de chuvas rápidas entre o dia 18 e 24 de setembro. No dia do ensaio houve 1,0 mm de chuva segundo a estação automática do INMET Brasília DF, e a temperatura máxima alcançou os 23° C. A Figura 4.19 apresenta a precipitação acumulada em 24h, desde o dia 01 de setembro até o 30 de setembro de 2009 segundo os dados do INMET. Após o ensaio de infiltração foi identificado um aumento de umidade na região mais profunda entre 2,5 e 3,0 m de profundidade, com influência até 2,8 m de distância do eixo principal (Figura 4.20 a Figura 4.23). Na Figura 4.20 pode-se ver também que o comportamento da curva umidade versus profundidade segue tendência semelhante para todos os furos sem exceção. Como um comparativo adicional, depois de se obter os resultados de umidade antes e após o ensaio determinou-se a partir das curvas características de retenção de água e apresentou-se na Figura 4.24 as curvas de Isosucções. Verifica-se comparativamente, que o perfil de umidade antes do ensaio sofreu influência do ensaio anterior interferindo na forma das curvas de Isosucções encontradas.

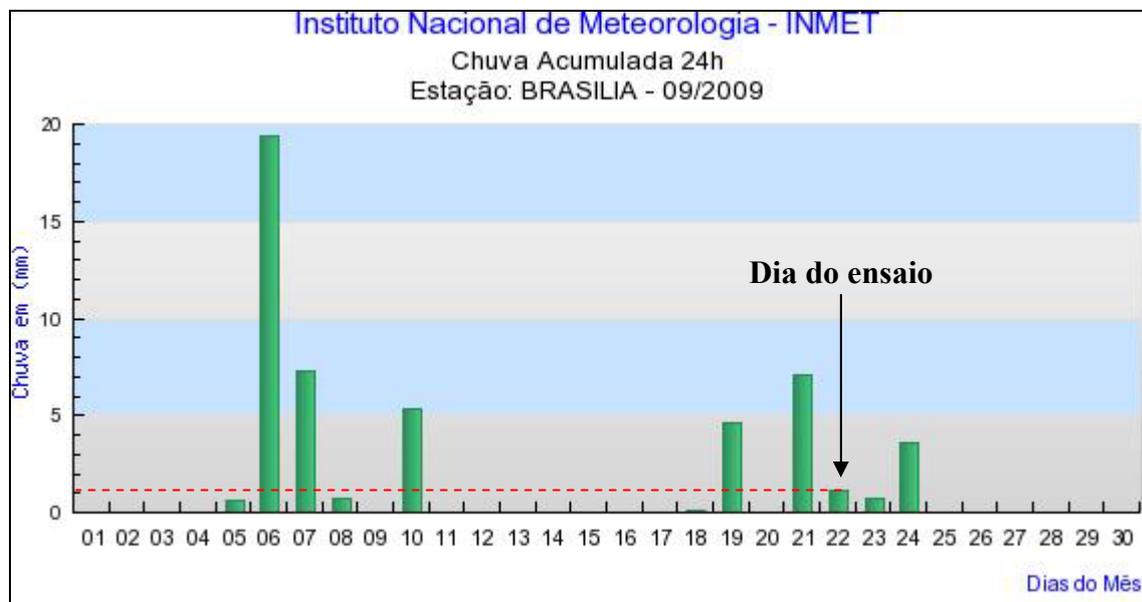


Figura 4.19-Dados de precipitação acumulada de 24h para o mês de setembro de 2009, INMET (2009)

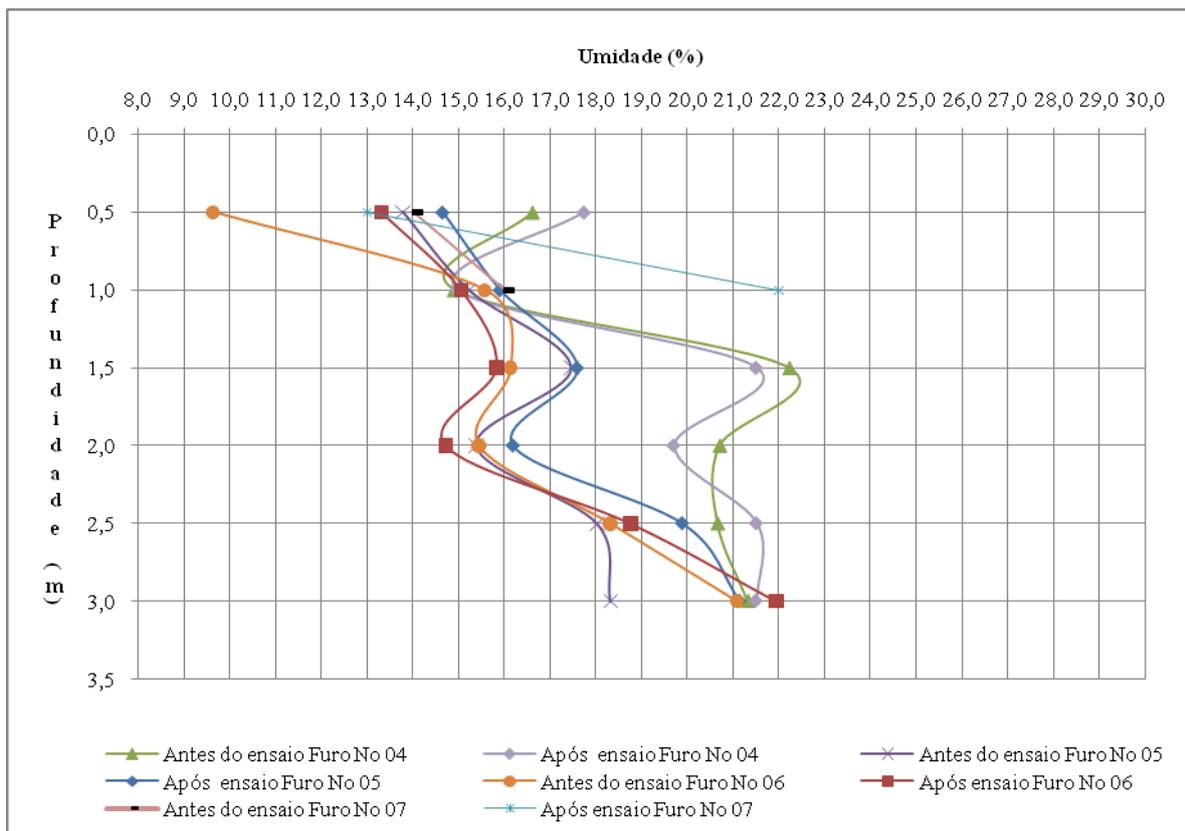


Figura 4.20- Perfil de umidade antes e após o segundo ensaio

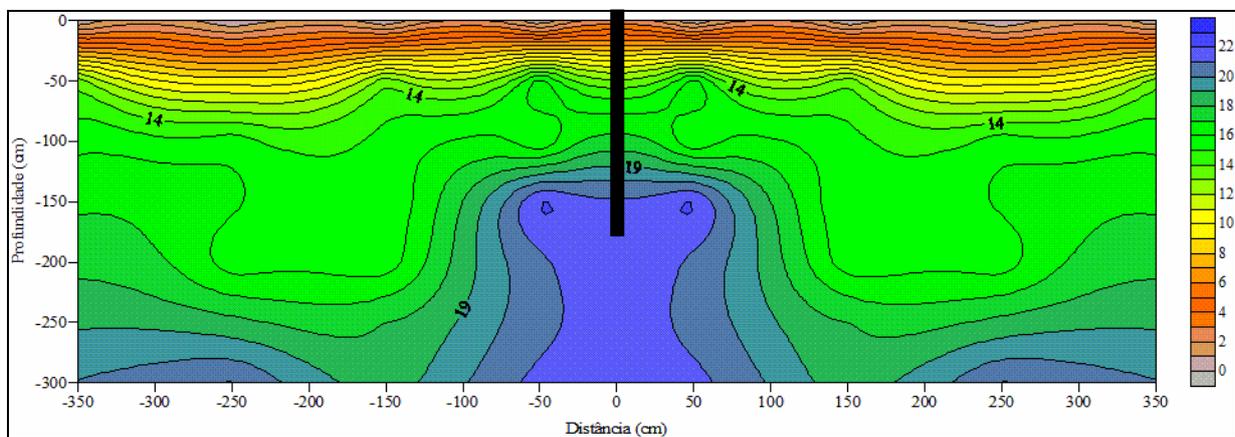


Figura 4.21 – Perfil de umidade antes do segundo ensaio.

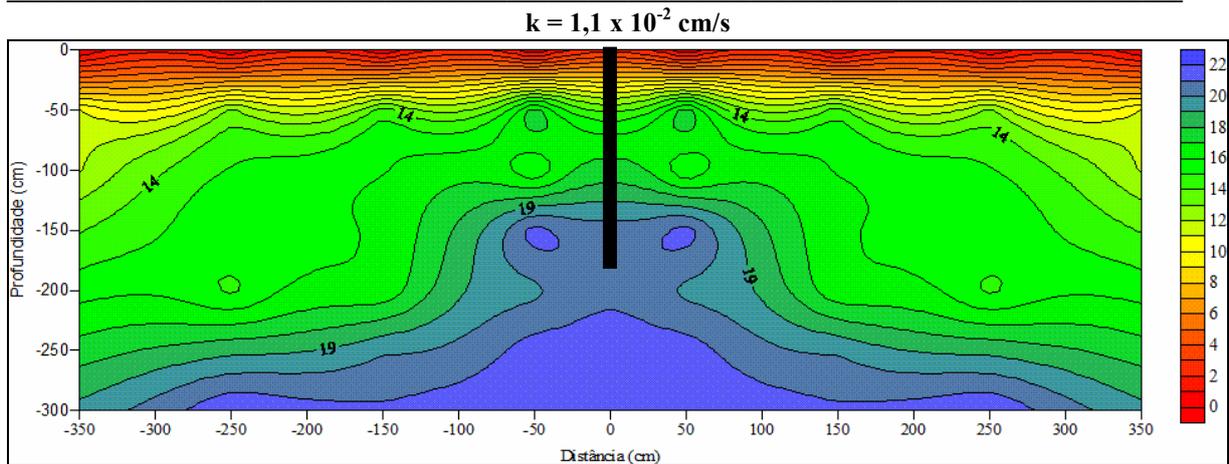


Figura 4.22– Perfil de umidade após o segundo ensaio.

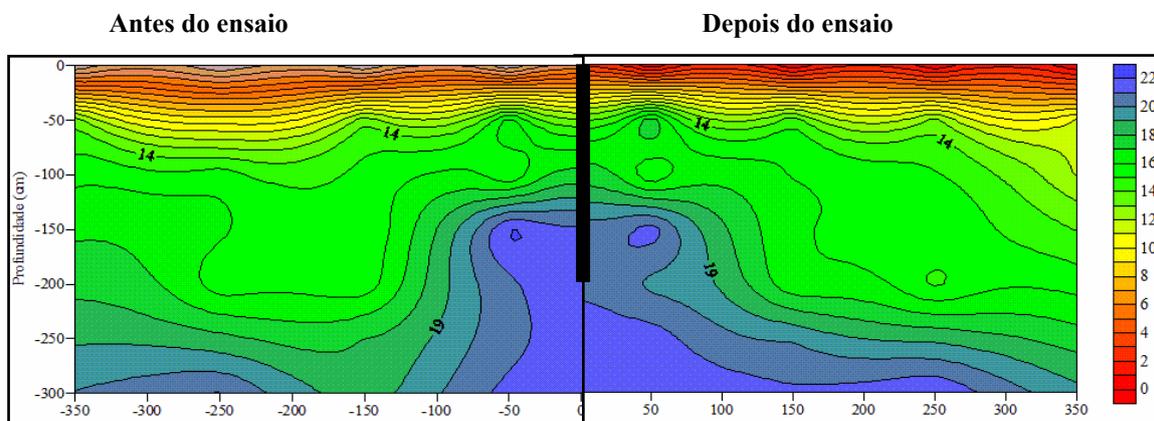


Figura 4.23– Perfil de umidade antes e após o segundo ensaio.

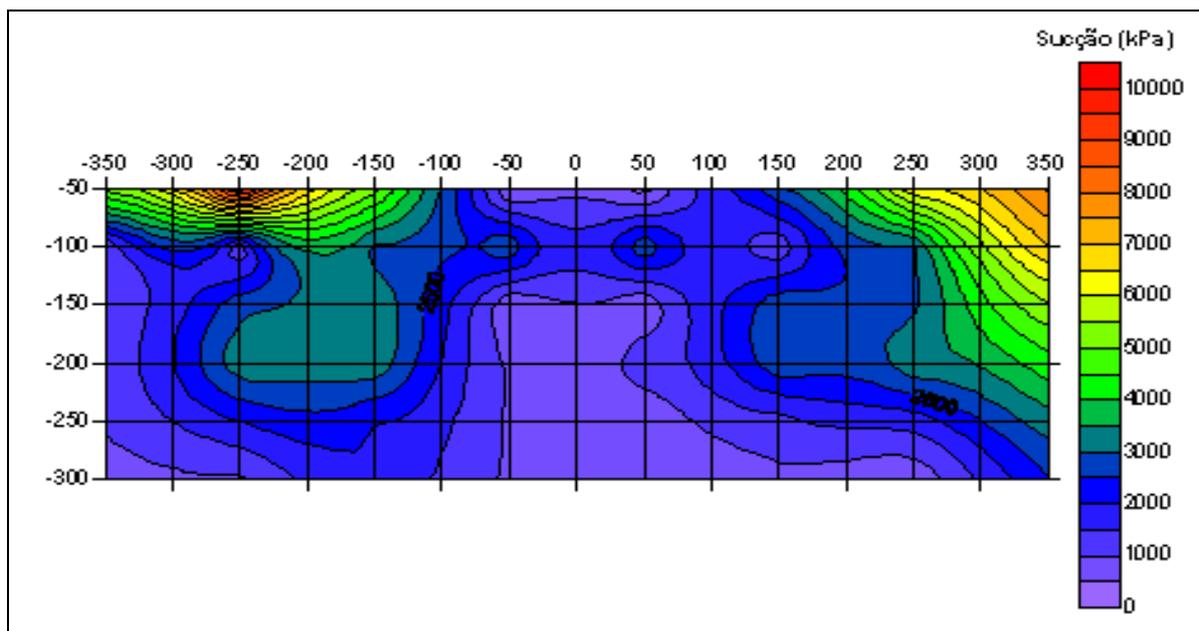


Figura 4.24– Isosucções antes e após o segundo ensaio

- **Terceira etapa, 30 de Setembro de 2009**

O terceiro ensaio foi realizado no dia 30 de setembro de 2009, oito dias depois do segundo ensaio e doze dias após o primeiro. Consta nos históricos do INMET uma estiagem de chuvas entre os dias 25 e 30 de setembro, no dia do ensaio não houve chuva na região, e a temperatura alcançou os 30° C, na Figura 4.25 se apresenta a precipitação acumulada em períodos de 24h no mês de setembro de 2009.

Depois de obter os resultados de umidade para este dia antes e após o ensaio de infiltração, verifica-se nas Figura 4.26 a Figura 4.29 que em perfil a umidade aumentou na região mais próxima ao furo do ensaio, e de modo semelhante à segunda etapa se observou uma leve influência do ensaio anterior por meio da forma da distribuição de umidade e pelas próprias umidades encontradas. Como comparativo adicional se apresenta na Figura 4.30 a distribuição das Isosucções encontradas para esta terceira etapa. Observa-se que houve uma mudança no perfil de umidade no período decorrido do segundo ensaio para o terceiro, mudança esta indicada pela aproximação das umidades mais elevadas da superfície (0,50 m da superfície), o que não foi observado no perfil analisado depois do segundo ensaio (1,20 m da superfície, Figura 4.23). Este aumento de umidade pode ser atribuído à precipitação ocorrida no local de ensaio apontando ainda para a ação do furo de ensaio como ponto de drenagem da água de chuva em seu entorno.

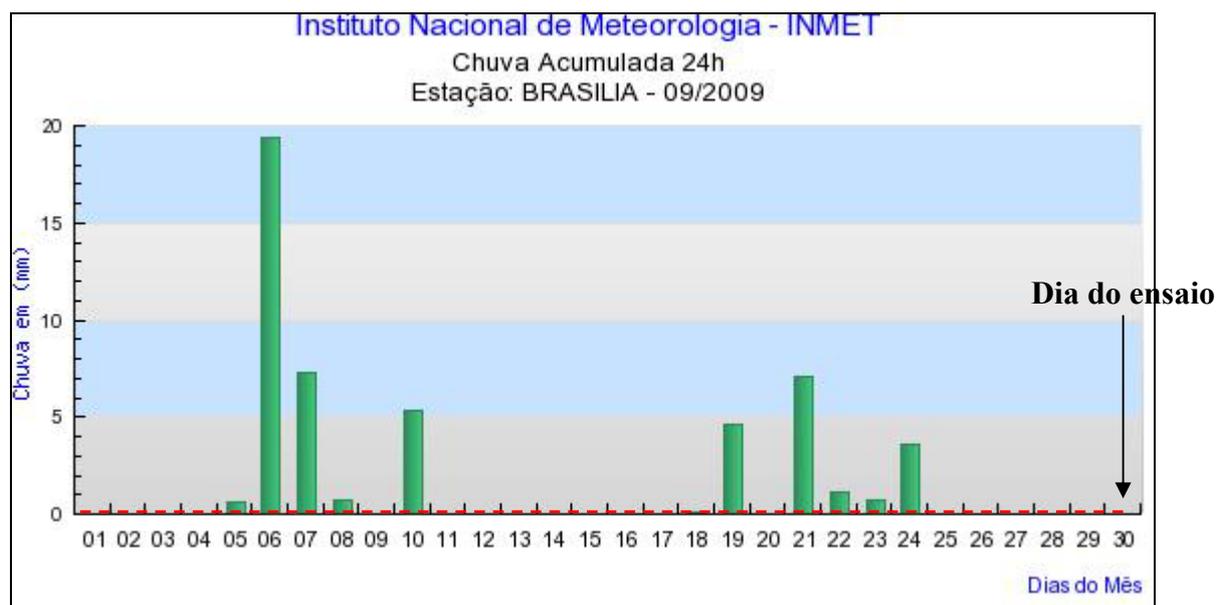


Figura 4.25-Precipitação acumulada em 24h para o mês de setembro de 2009, INMET (2009)

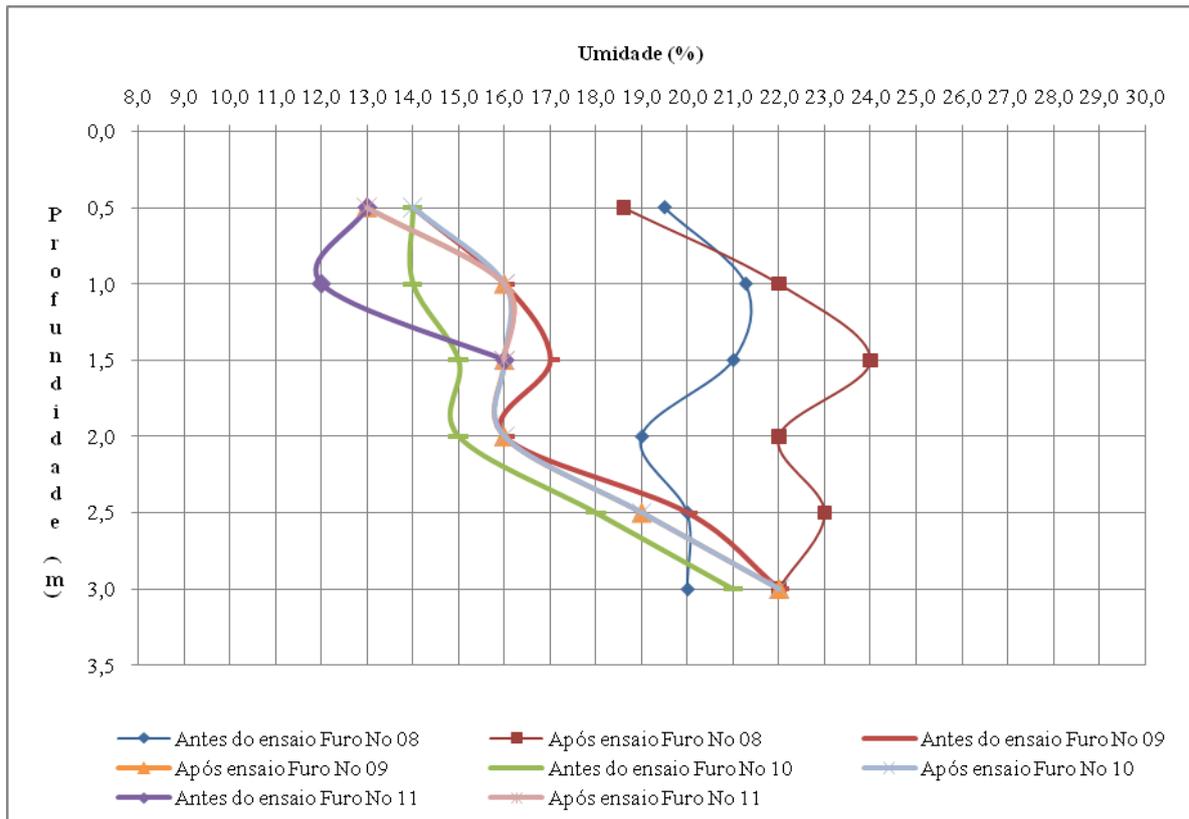


Figura 4.26- Perfil de umidade antes e após do terceiro ensaio

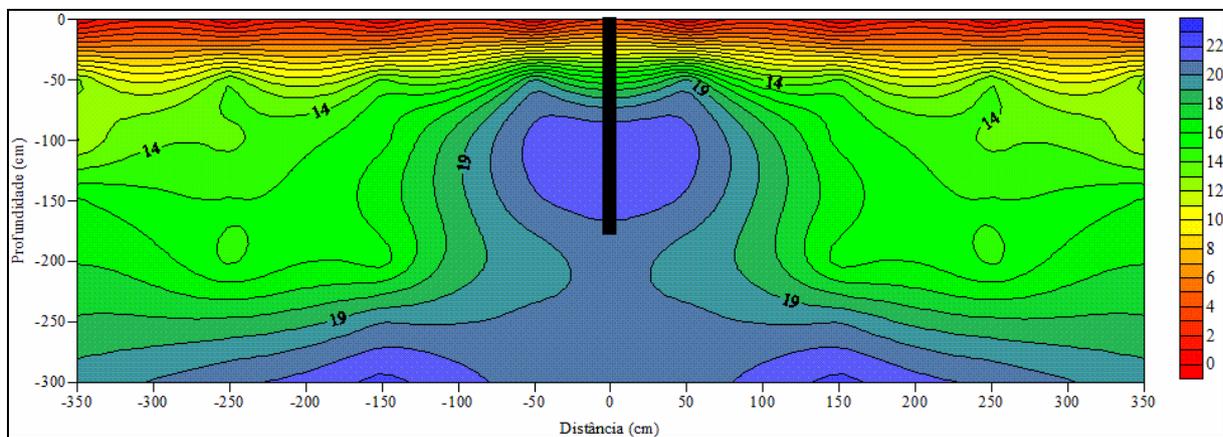


Figura 4.27- Perfil de umidade antes do terceiro ensaio.

- **Quarta etapa, 15 de Outubro de 2009**

O quarto ensaio foi realizado no dia 15 de outubro de 2009, portanto, quinze dias depois do terceiro ensaio, vinte e três dias após o segundo e vinte e sete dias após o primeiro. Os históricos do INMET apresentam um acréscimo de precipitação a partir do dia 05 de outubro, mas no dia do ensaio não houve chuvas na região e a temperatura máxima alcançou os 28° C. Na Figura 4.31 se apresenta a precipitação acumulada em períodos de 24h no mês de outubro.

Nos perfis de umidade obtidos antes do ensaio foi observada a influência dos ensaios de infiltração anteriores (Figura 4.32 a Figura 4.35). Comparando-se os resultados de umidade obtidos antes e após o ensaio de infiltração, verifica-se um aumento de umidade na região mais próxima ao furo do ensaio. Como um comparativo adicional se apresenta na Figura 4.36 as Isosucções encontradas para esta quarta etapa, observa-se que não houve uma mudança significativa no perfil de umidade do terceiro ensaio para o quarto.

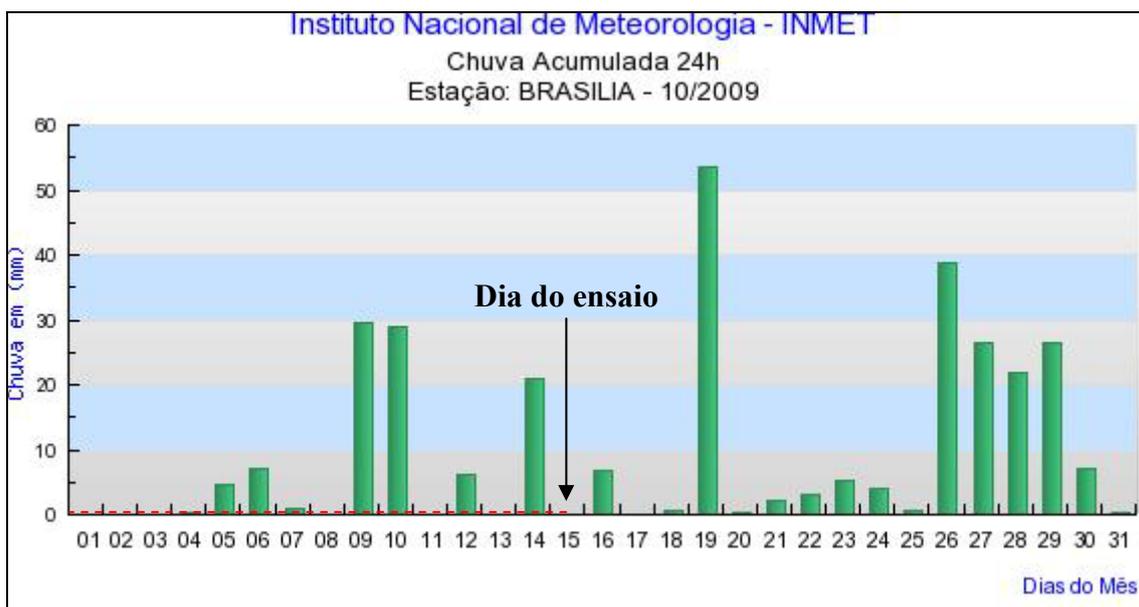


Figura 4.31- Precipitação acumulada em 24h do mês de outubro de 2009, (INMET, 2009)

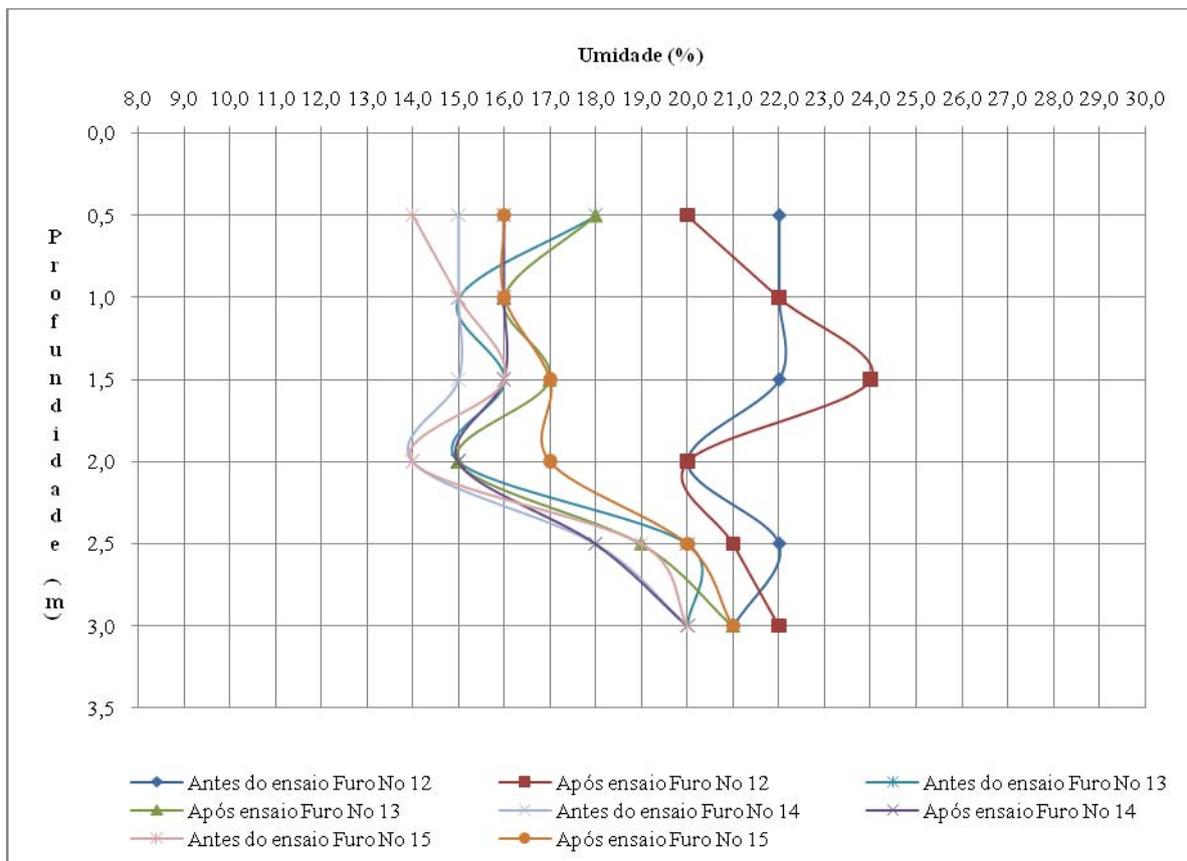


Figura 4.32- Perfil de umidade antes e após do quarto ensaio

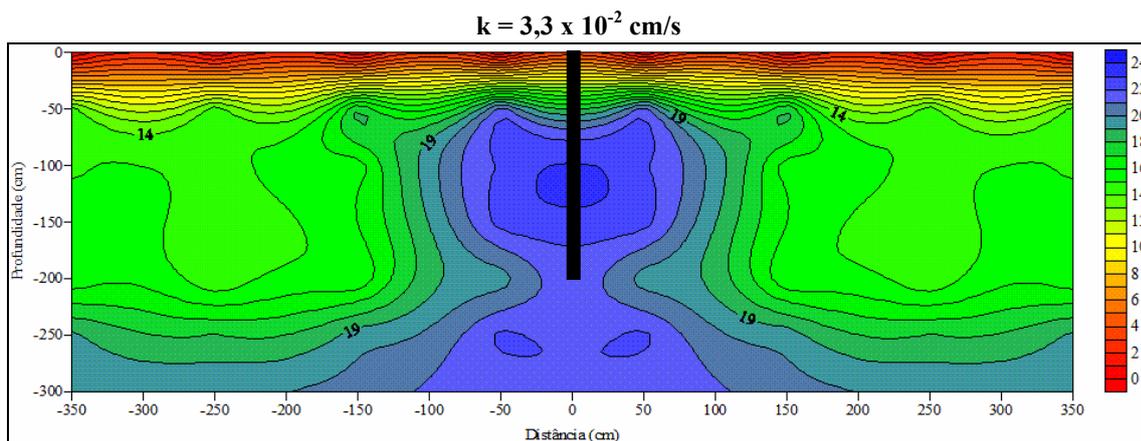


Figura 4.33- Perfil de umidade antes do quarto ensaio.

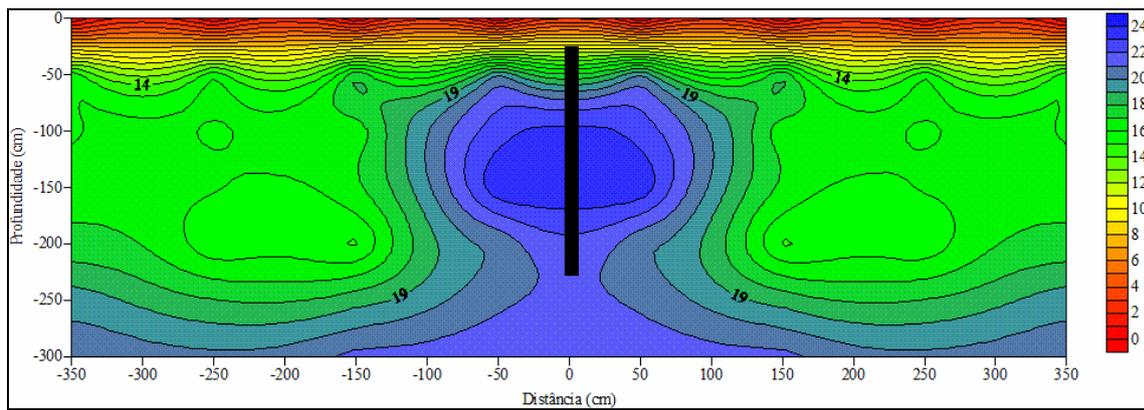


Figura 4.34– Perfil de umidade após o quarto ensaio.

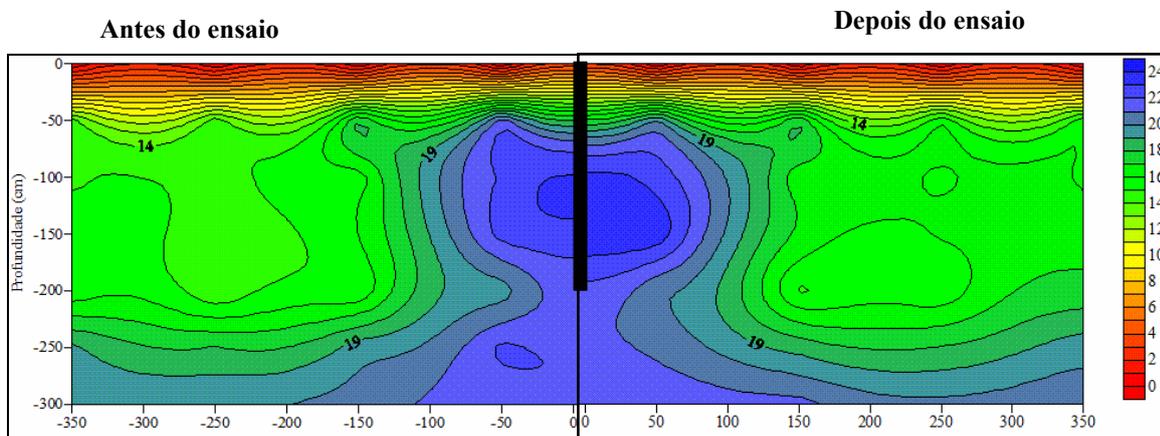


Figura 4.35– Perfil de umidade antes e após o quarto ensaio.

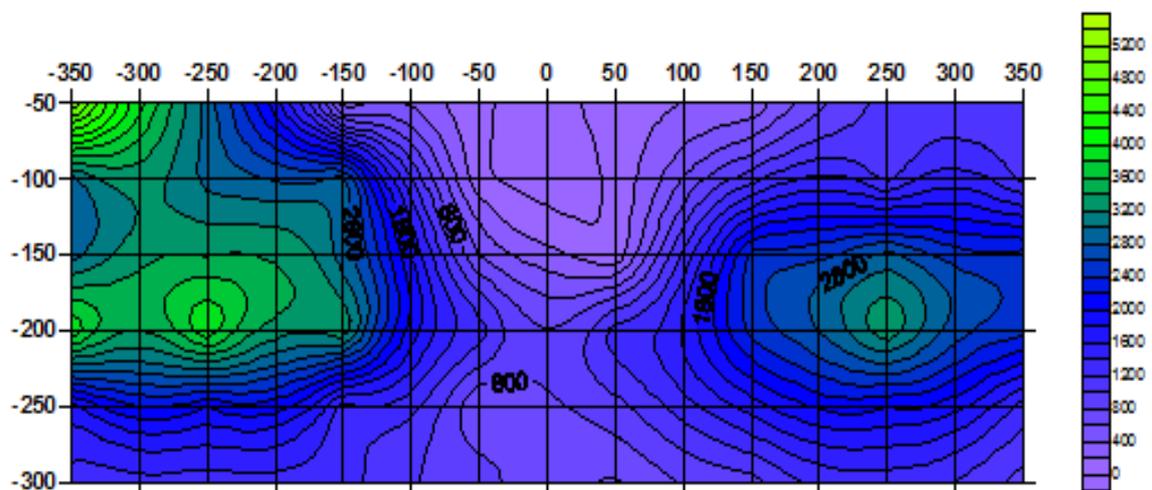


Figura 4.36- Isosucções antes e após o quarto ensaio

- **Quinta etapa, 15 de Novembro de 2009 (DIA 30)**

O quinto e ultimo ensaio foi realizado no dia 15 de novembro de 2009, este dia foi denominado como dia 30 e corresponde, portanto, a trinta dias após o quarto ensaio, quarenta e cinco dias após o terceiro, cinquenta e três após o segundo e cinquenta e sete após o primeiro. Consta nos históricos do INMET um incremento de chuvas entre os dias 15 de outubro e 15 de novembro, no dia do ensaio não houve registro de chuva na região e a temperatura máxima alcançou os 31° C . Na Figura 4.37 se apresenta a precipitação acumulada em períodos de 24h desde 01 de novembro até 30 de novembro de 2009.

Depois de obter os resultados de umidade para este dia antes e após o ensaio de infiltração, verifica-se nas Figura 4.38 a Figura 4.41 que o perfil de umidade antes do ensaio foi influenciado seja pelos ensaios de infiltração anteriores, seja pelas precipitações ocorridas no intervalo entre o quarto e quinto ensaio ou o que é mais provável, por ambos. Na Figura 4.38 e na Figura 4.42 se observa que as umidades e as Isosucções não foram muito diferentes antes e após do ensaio.

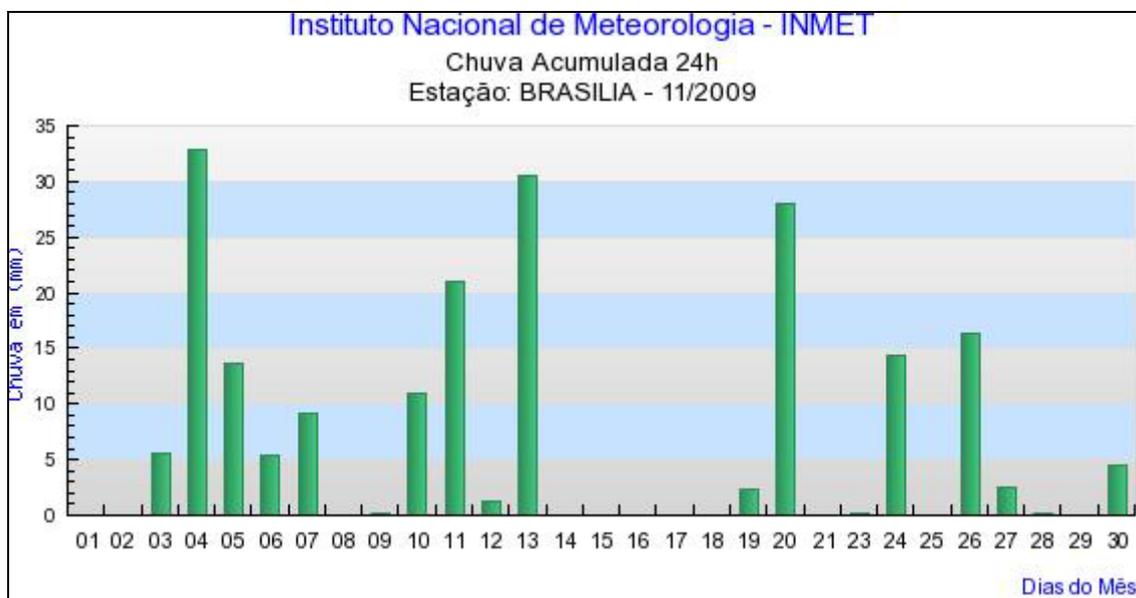


Figura 4.37- Precipitação acumulada em 24h desde 01 de novembro até 30 de novembro de 2009 (INMET, 2009)

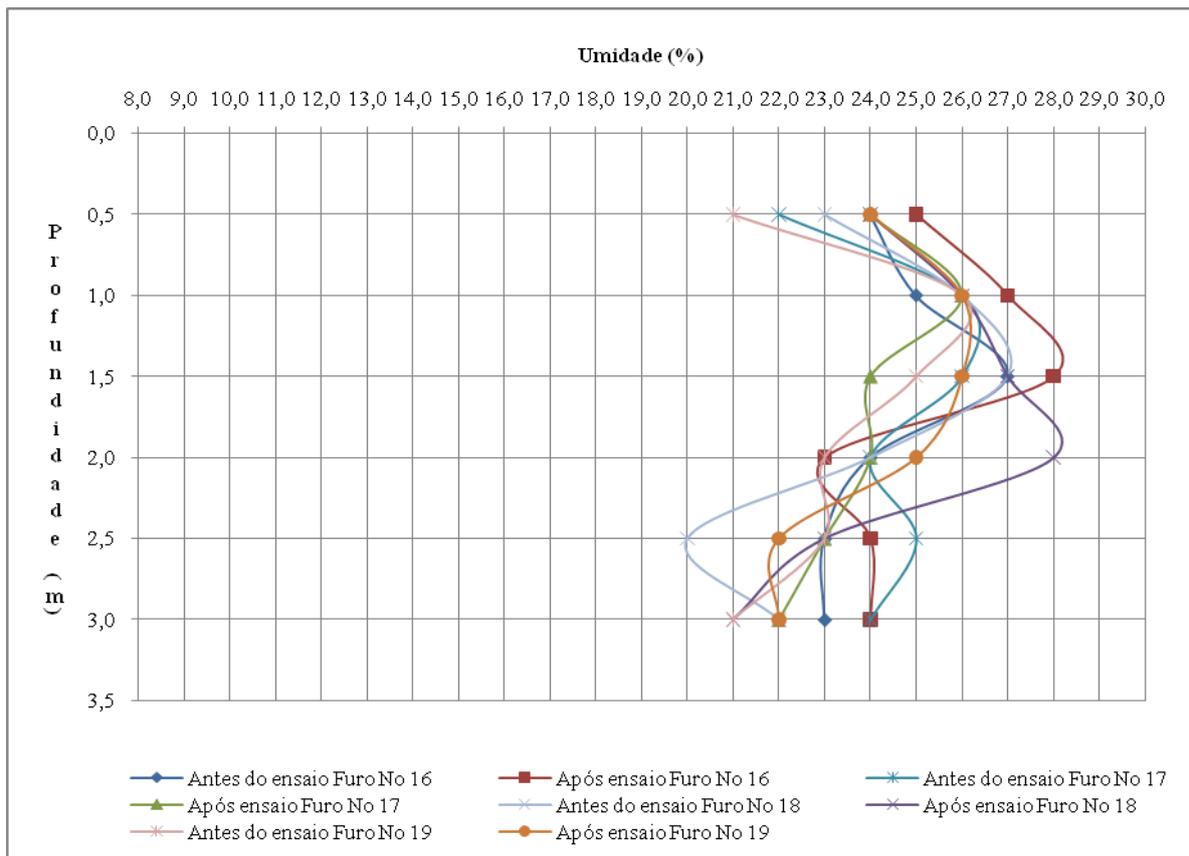


Figura 4.38- Perfil de umidade antes e após do quinto ensaio

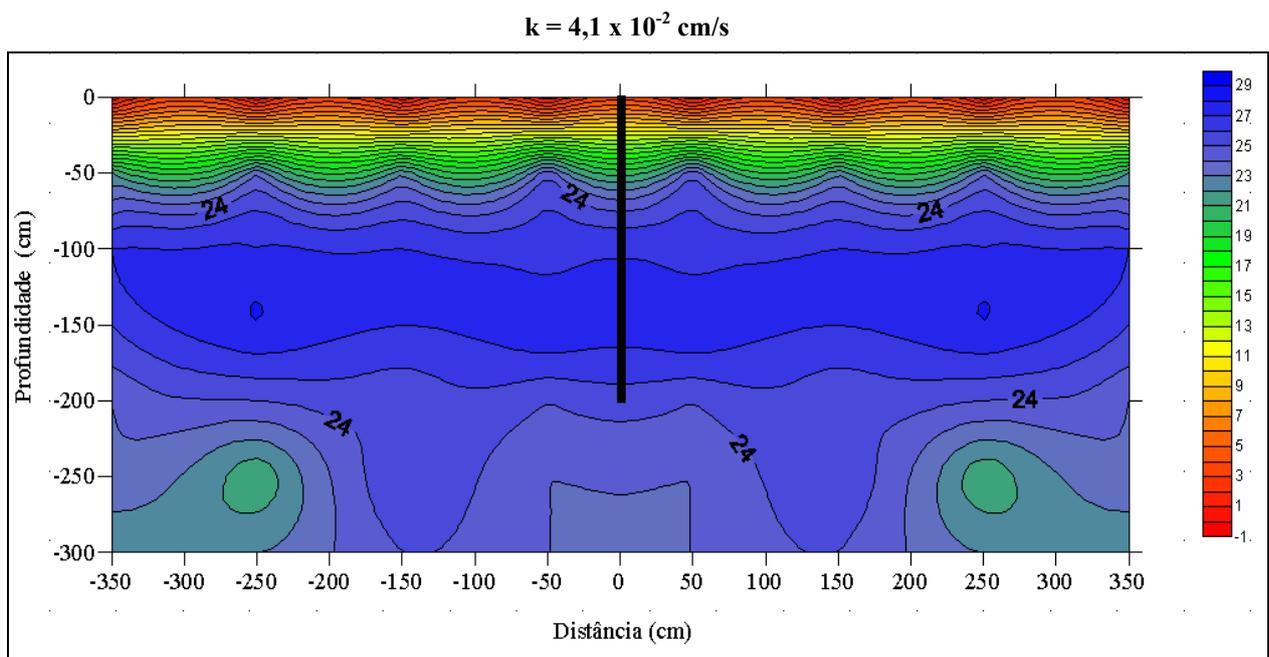


Figura 4.39- Perfil de umidade antes do quinto ensaio.

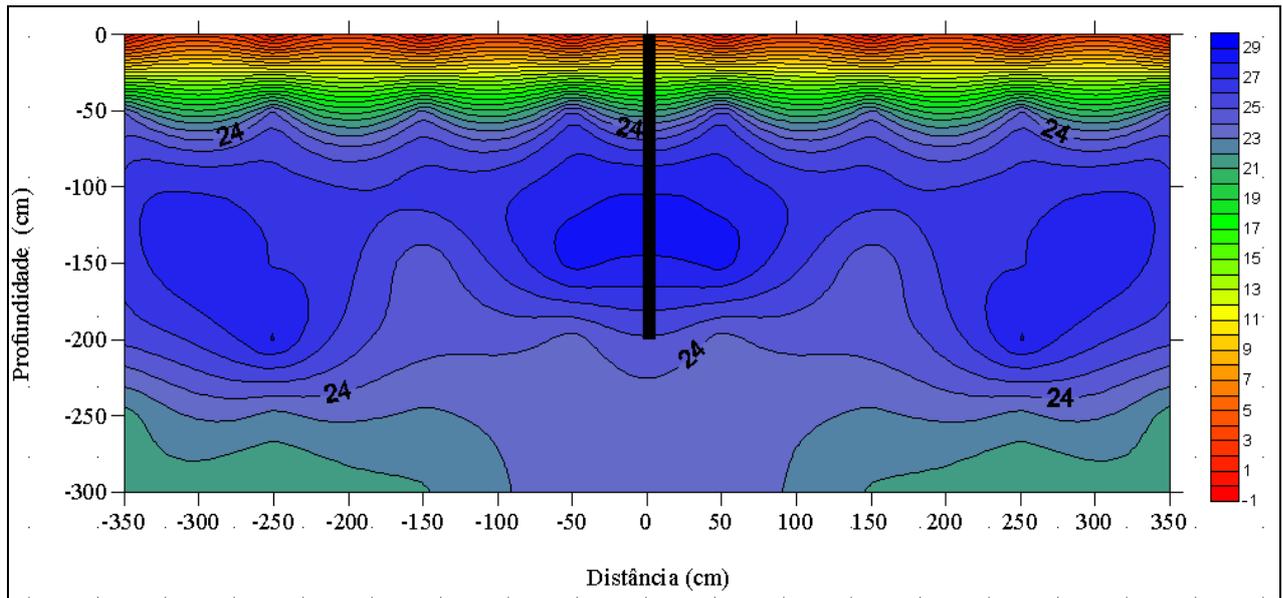


Figura 4.40– Perfil de umidade após o quinto ensaio.

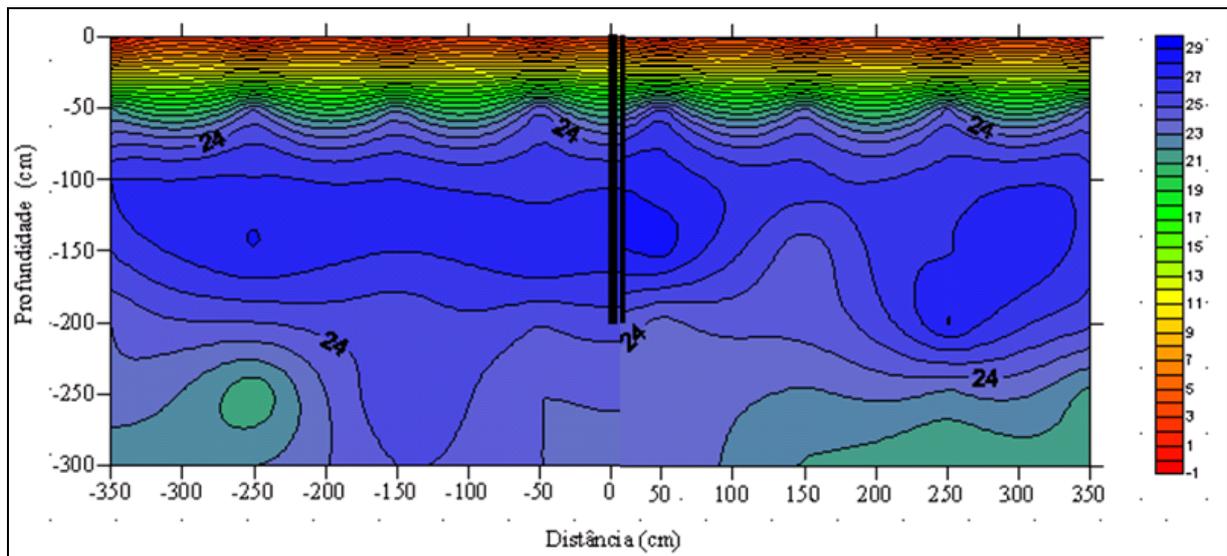


Figura 4.41– Perfil de umidade antes e após o quinto ensaio.

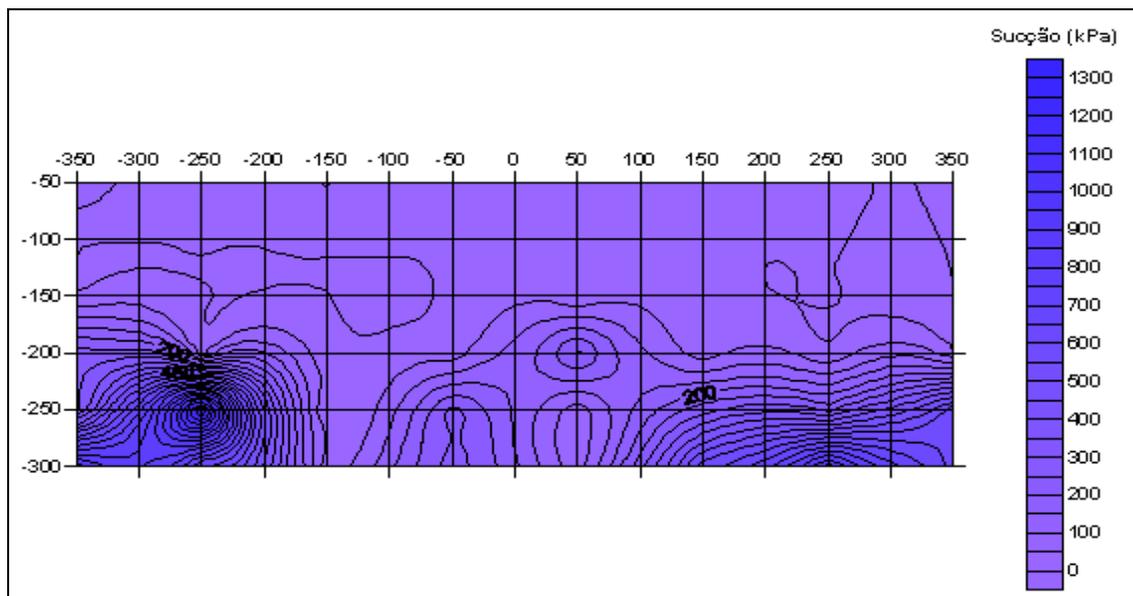


Figura 4.42- Isosucções antes e após o quinto ensaio

Como uma análise adicional se apresentam nas Figura 4.43 e Figura 4.44 as variações da umidade para diferentes profundidades e distâncias.

A Figura 4.43 e a Figura 4.44 apresentam no eixo Y as datas em que foi realizado cada ensaio, no eixo X se apresentam as distâncias a partir do furo principal; as distâncias negativas representam os ensaios realizados antes do ensaio de infiltração e as distâncias positivas representam os ensaios feitos depois do ensaio de infiltração, finalmente o eixo Z apresenta as umidades encontradas para as profundidades analisadas. A figura mostra os resultados para as profundidades de 0,5 e 3,0 m.

Segundo a Figura 4.43 e Figura 4.44 observou-se que para a profundidade de 0,50 m a umidade teve um incremento considerável a partir do segundo ensaio (22/09/2009) e o efeito de saturação do solo alcançou só os primeiros 0,50m de distância do furo principal, mas a partir do terceiro ensaio (30/09/2009) este incremento de umidade começa a ser percebido nas distâncias mais afastadas do furo principal. Para a profundidade de 3,0 m o efeito do ensaio teve resultados notáveis desde o primeiro dia (18/09/2009) até o final do programa de ensaios (15/11/2009). Deve se ter em conta que as chuvas que aconteceram entre 19 e 24 de setembro com uma precipitação acumulada total de 16,6mm podem ter afetado os valores de umidade encontrados para os dias seguintes ao da realização do primeiro ensaio.

Nas Figura 4.45 e Figura 4.46 as variações de umidade para diferentes distâncias do furo principal. No eixo Y foram plotados os valores das profundidades estudadas, os valores

negativos correspondem às profundidades para as umidades antes do ensaio de infiltração, e os valores positivos correspondem às profundidades para as umidades após do ensaio de infiltração, no eixo X se apresentam as datas em que foi realizado cada ensaio. Pode se notar que antes da realização do ensaio para a distância de 0,5 m e até 3,0m de profundidade a umidade variava entre 10% e 16%, já após o ensaio nota se que para 1,25 m de profundidade o ensaio não teve muita incidência mas a partir de 1,30 m até 3,0 m de profundidade a umidade começou a se incrementar saindo de 18% até alcançar 27% no dia 15 de novembro.

Para a distancia de 3,0m do furo principal pode se observar que o efeito do ensaio começou a partir dos 2,25 metros. Já para os dois últimos dias de ensaio pode se notar que as umidades se incrementaram em todas as profundidades estudadas. Deve-se ter em conta que as chuvas que aconteceram entre 19 e 24 de setembro com uma precipitação acumulada total de 16,6mm podem ter afetado os valores de umidade encontrados para os dias seguintes ao da realização do primeiro ensaio.

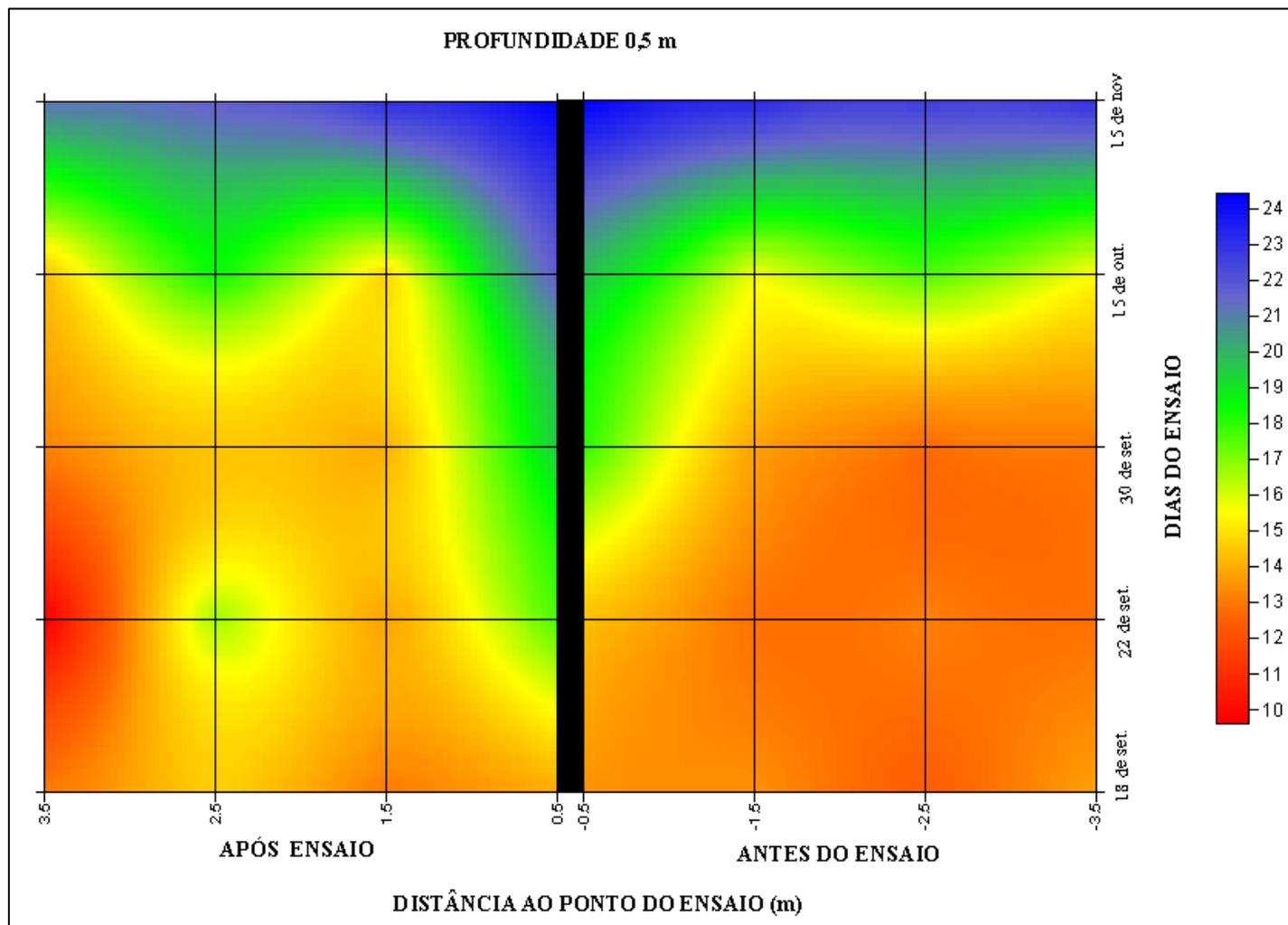


Figura 4.43-Umididade x Distancia x Tempo para as profundidades de 0,5, em planta

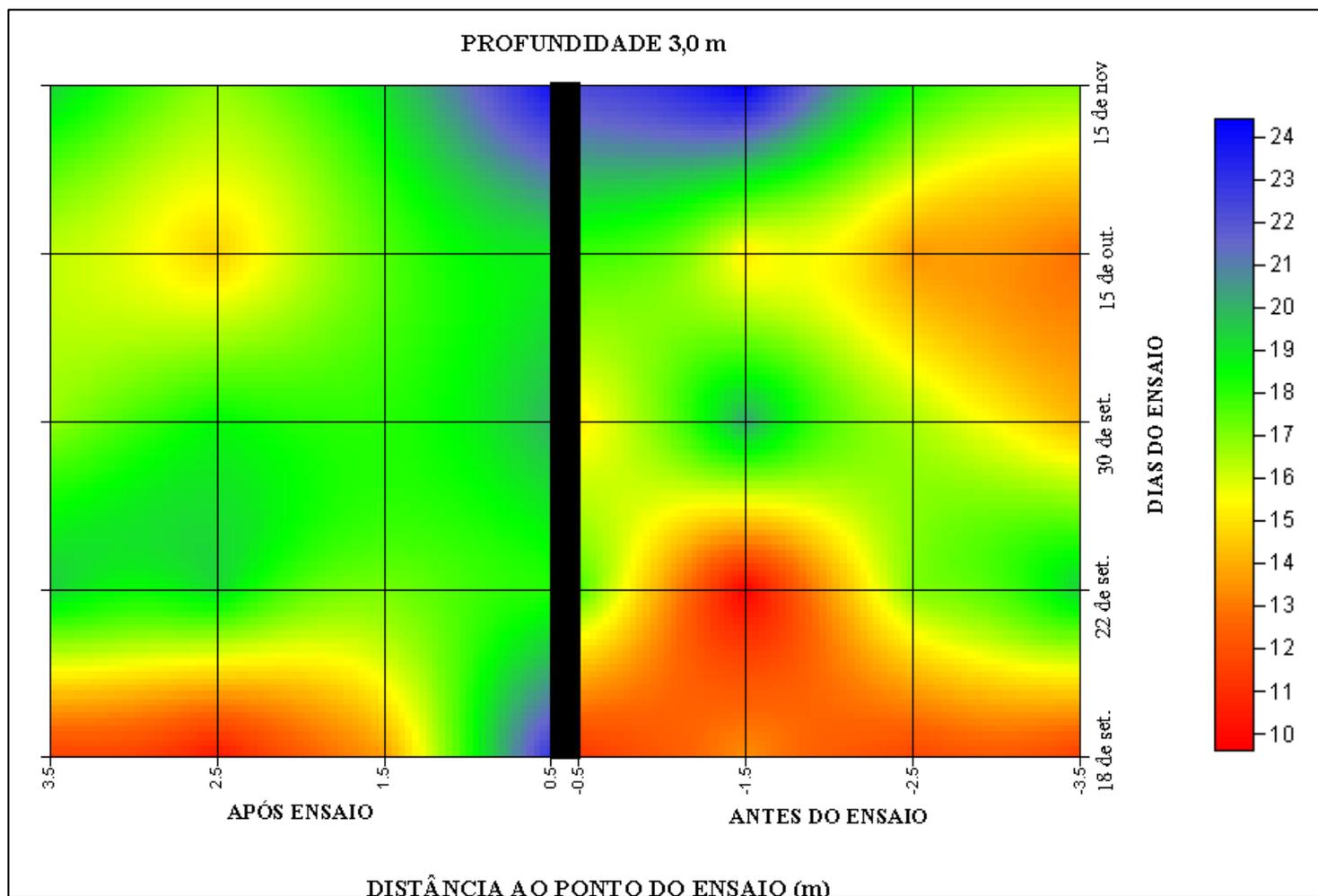


Figura 4.44-Umididade x Distancia x Tempo para as profundidades de 3,0 m

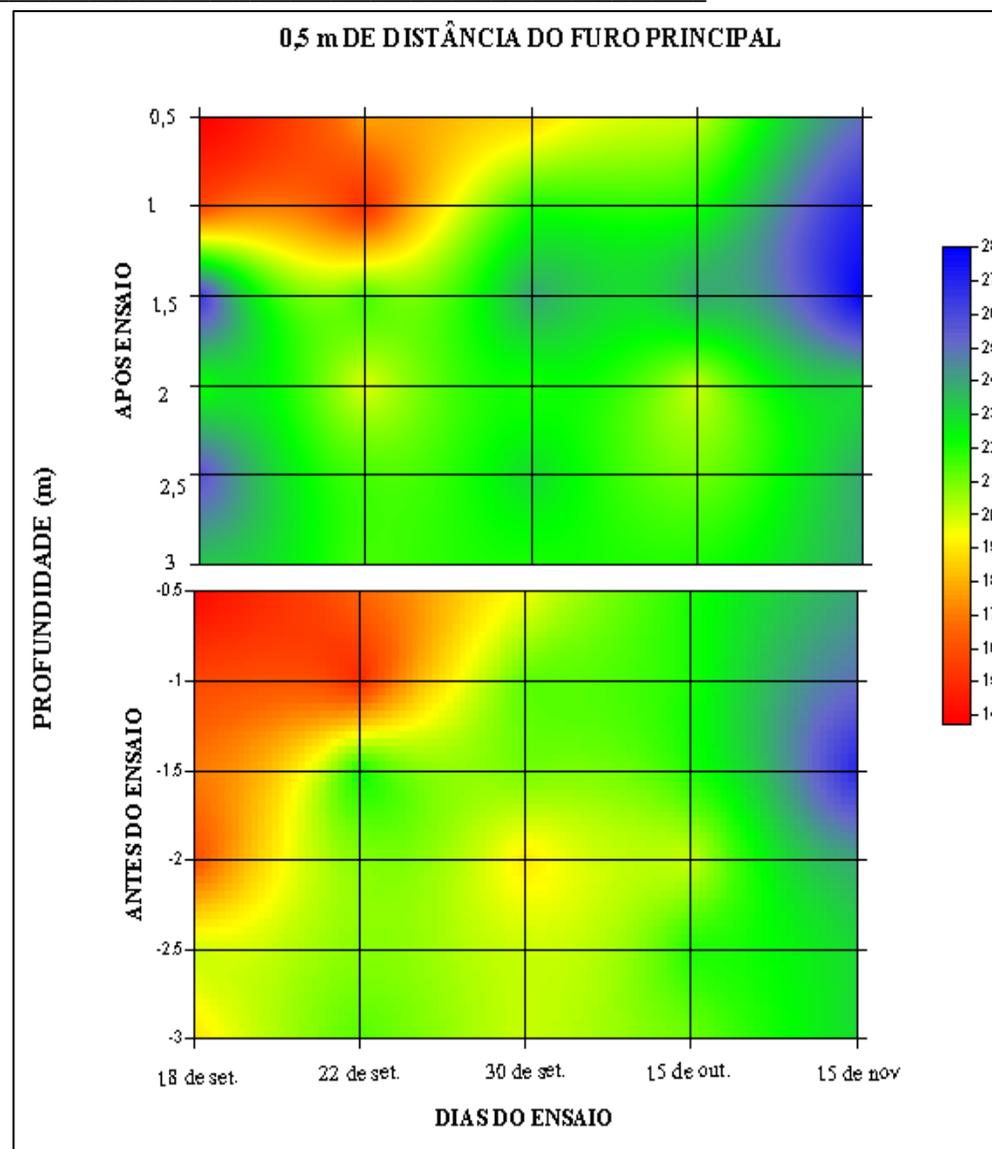


Figura 4.45- Umidade x Profundidade x Tempo para as distâncias de 0,5 m a partir do furo principal

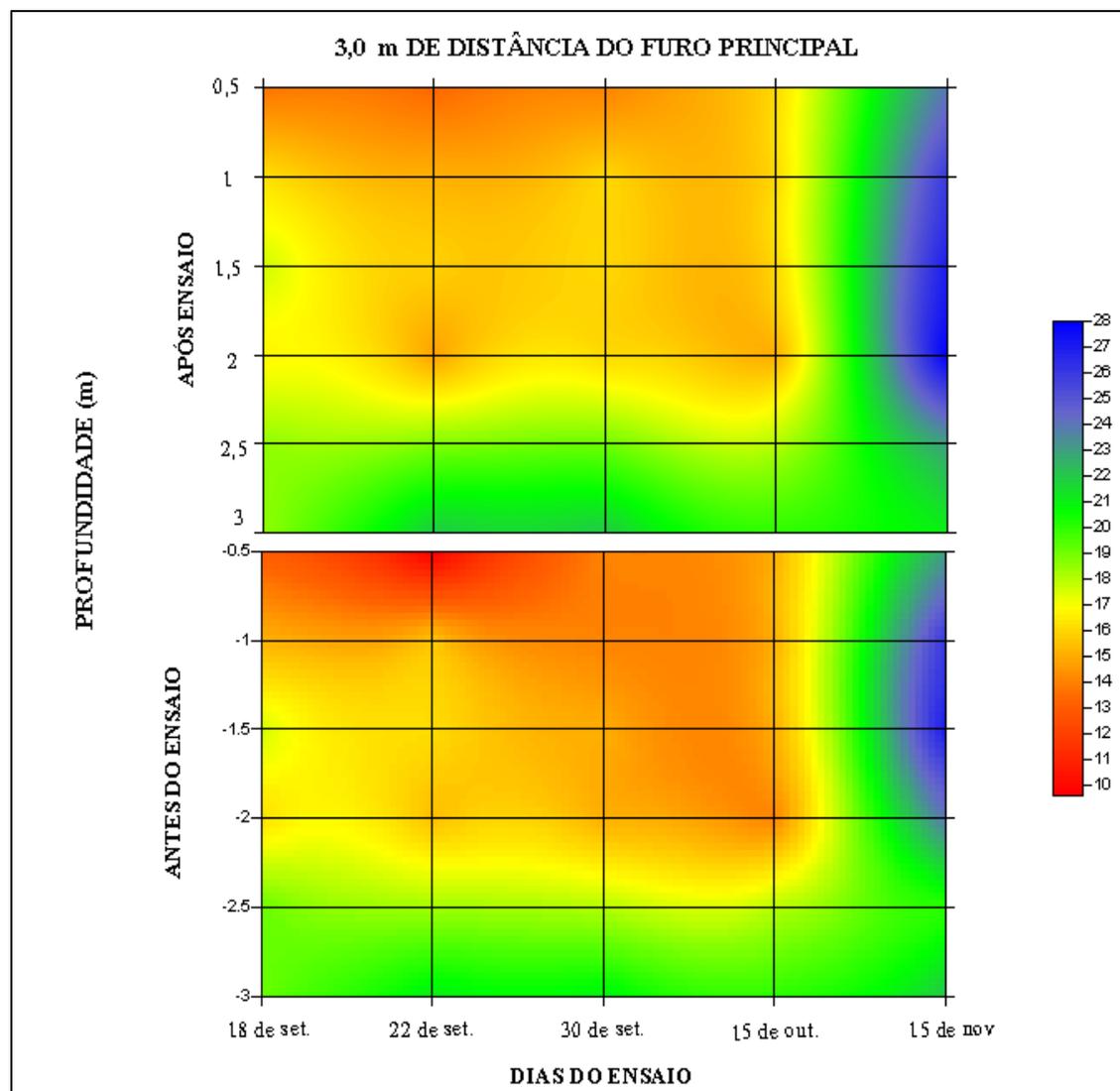


Figura 4.46- Umidade x Profundidade x Tempo para as distâncias de 3,0 m a partir do furo principal

A Figura 4.47 e Figura 4.48 mostra a síntese dos perfis de umidade e as Isosucções, obtidos nos ensaios de infiltração. Verifica-se dessa figura que o avanço da frente de umedecimento tende a aumentar à medida que o solo vai se tornando mais úmido e a sucção diminuindo próximo ao ponto de infiltração

4.3.2 - ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO EM PROFUNDIDADE PELO MÉTODO DO REBAIXAMENTO EM FURO DE SONDAGEM

Na presente pesquisa foram executados cinco ensaios a carga variável no mesmo furo de sondagem com 3,0m de profundidade e 10 cm de diâmetro. Na execução do ensaio o furo foi preenchido com água até o topo e realizadas leituras a cada 5cm de rebaixamento até uma profundidade de 30 cm em cada ensaio. Quando o nível da água atingia esta profundidade repunha-se o nível d'água inicial e repetia-se o procedimento até obter-se tempos de infiltração aproximadamente constantes, ou seja, quando já não era observada variação progressiva nos valores lidos. Na Tabela 4.2 se apresentam os resultados de taxa de infiltração e permeabilidade assim como as datas em que foram realizados os cinco ensaios.

A

Tabela 4.3 apresenta os resultados de infiltração obtidos por Silva (2007) realizados no final do mês de março de 2006, os quais foram feitos por trechos de escavação de 0,50 m de profundidade. Para cada trecho preencheu-se o furo com água até o topo superior (instante inicial), mantendo-se tal nível durante cerca de 10 min. para a “saturação” do solo e em seguida fazendo-se o ensaio.

Analisando os dados obtidos por Silva (2007) pode-se observar que o valor do coeficiente de permeabilidade do campus da UnB, manteve-se na mesma ordem de grandeza de um local para o outro e de uma data para outra.

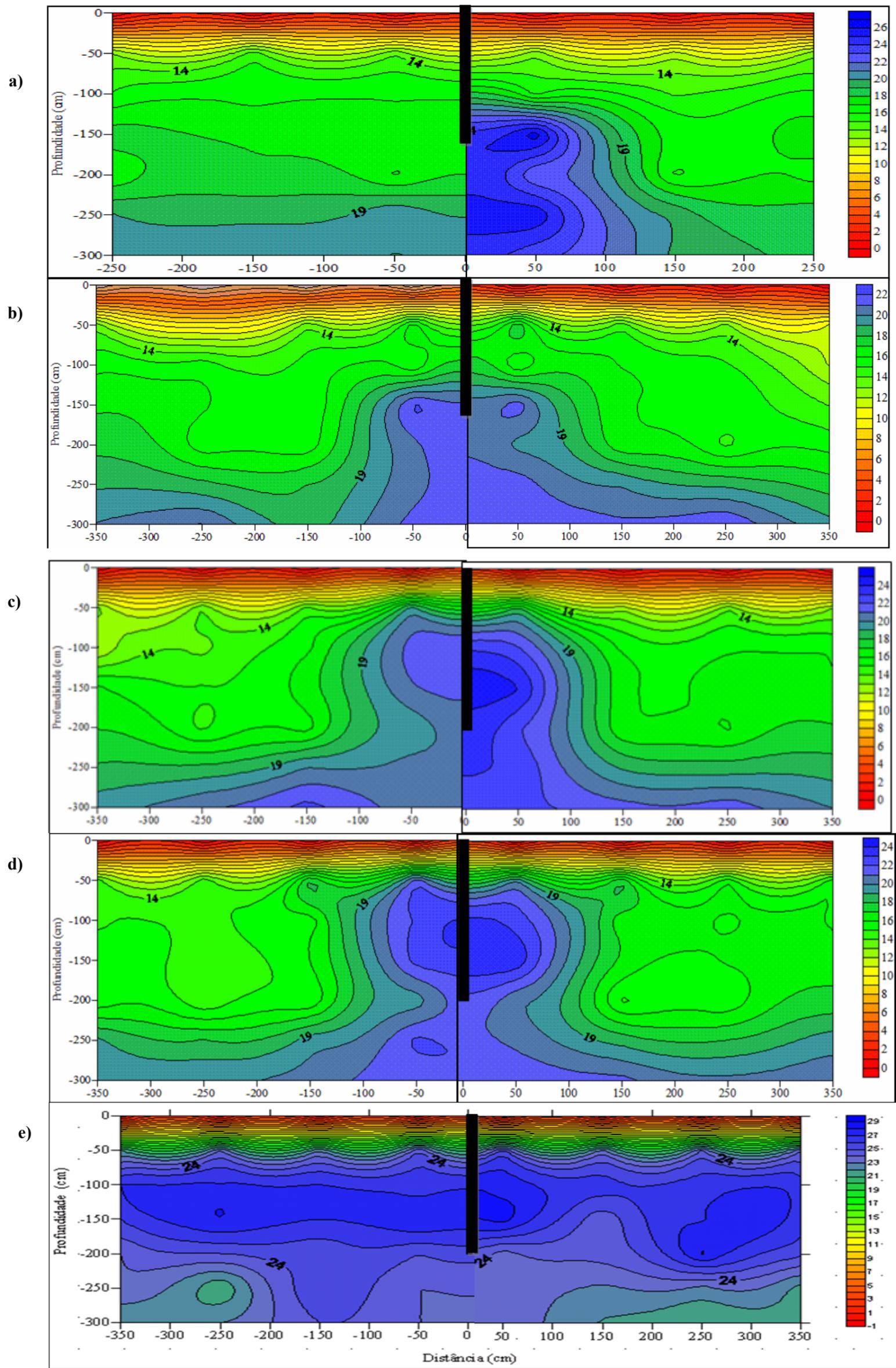


Figura 4.47- Síntese dos perfis de umidade a) 18 de set, b) 22 de set, c) 30 de set, d) 15 de out, e) 15 de nov.

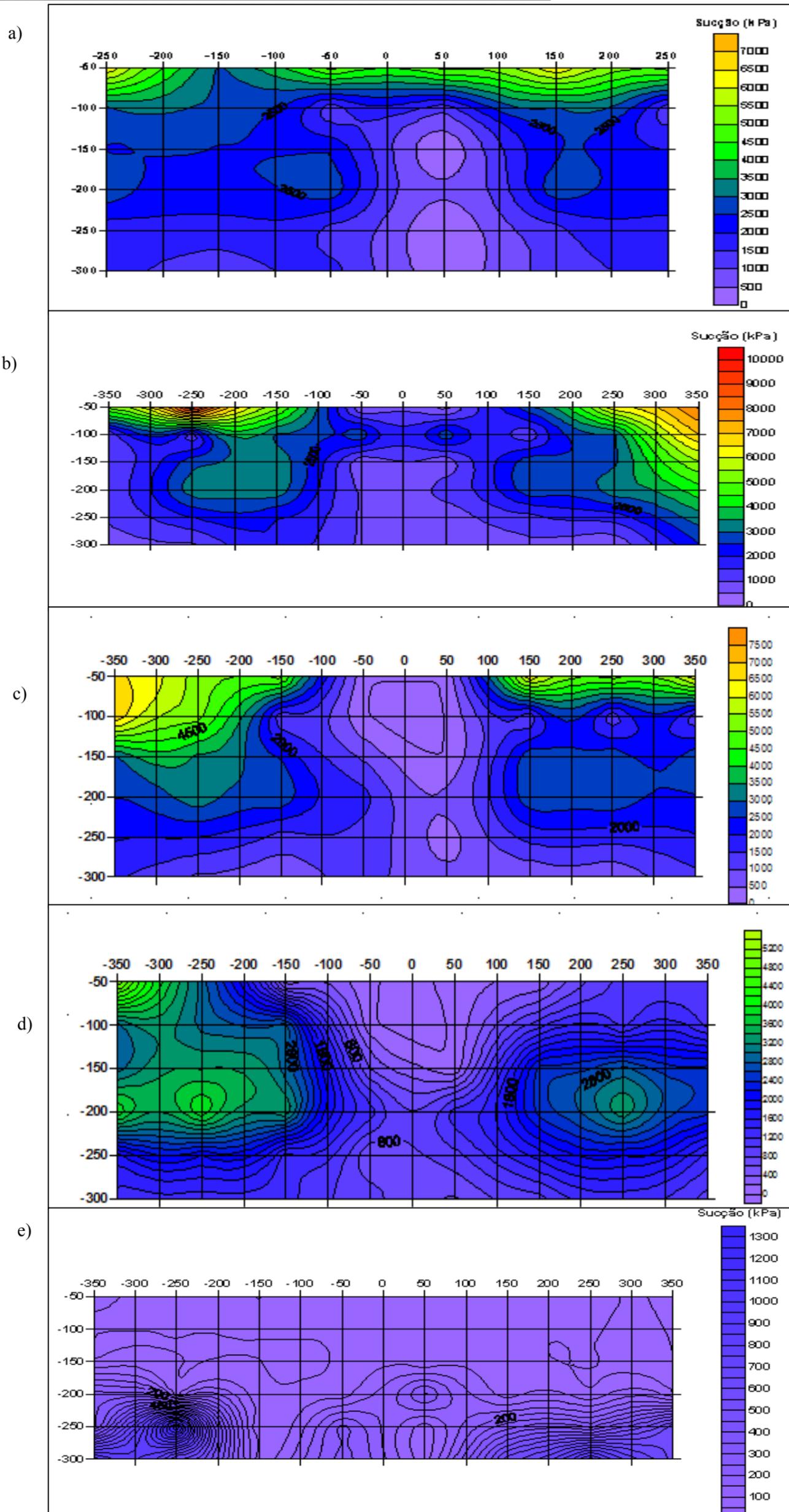


Figura 4.48- Síntese das Isosucções a) 18 de set, b) 22 de set, c) 30 de set, d) 15 de out, e) 15 de nov.

Tabela 4.2- Taxa de Infiltração e Permeabilidade no campo da UnB.

Data	ΔH (mm)	ΔT (hora)	Permeabilidade de campo (cm/s)
18/set	50	0,004	$9,1 \times 10^{-2}$
22/set	50	0,031	$1,1 \times 10^{-2}$
30/set	50	0,017	$2,1 \times 10^{-2}$
15/out	50	0,018	$3,3 \times 10^{-2}$
15/nov	50	0,016	$4,1 \times 10^{-2}$

Tabela 4.3- Taxa de Infiltração e Permeabilidade no campo da UnB, (Silva 2007).

Profundidade (m)	Permeabilidade de Campo (cm/s)
0	$4,72 \times 10^{-3}$
0,5	$1,79 \times 10^{-2}$
1,0	$6,50 \times 10^{-2}$
1,5	$3,50 \times 10^{-2}$
2,0	$1,85 \times 10^{-2}$
2,5	$1,77 \times 10^{-2}$
3,0	$1,17 \times 10^{-2}$

A Figura 4.49 mostra o ajuste da taxa de infiltração em função dos tempos de ensaio acumulados para todos os experimentos realizados nas diferentes datas. Observa-se que embora no primeiro ensaio a última leitura de infiltração se aproximasse da penúltima ainda seria necessário continuá-lo para que se atingisse a efetiva estabilização da taxa de infiltração, indicando assim a necessidade de melhor análise na definição do critério que define o término do ensaio. O fato dos resultados não terem seguido a cronologia da execução dos ensaios na conformação da tendência, por exemplo, o segundo ensaio ter apresentado menor capacidade de infiltração que o primeiro, mas também menor que o terceiro, aponta para a influência da umidade inicial e, portanto, da sucção na capacidade de infiltração do solo.

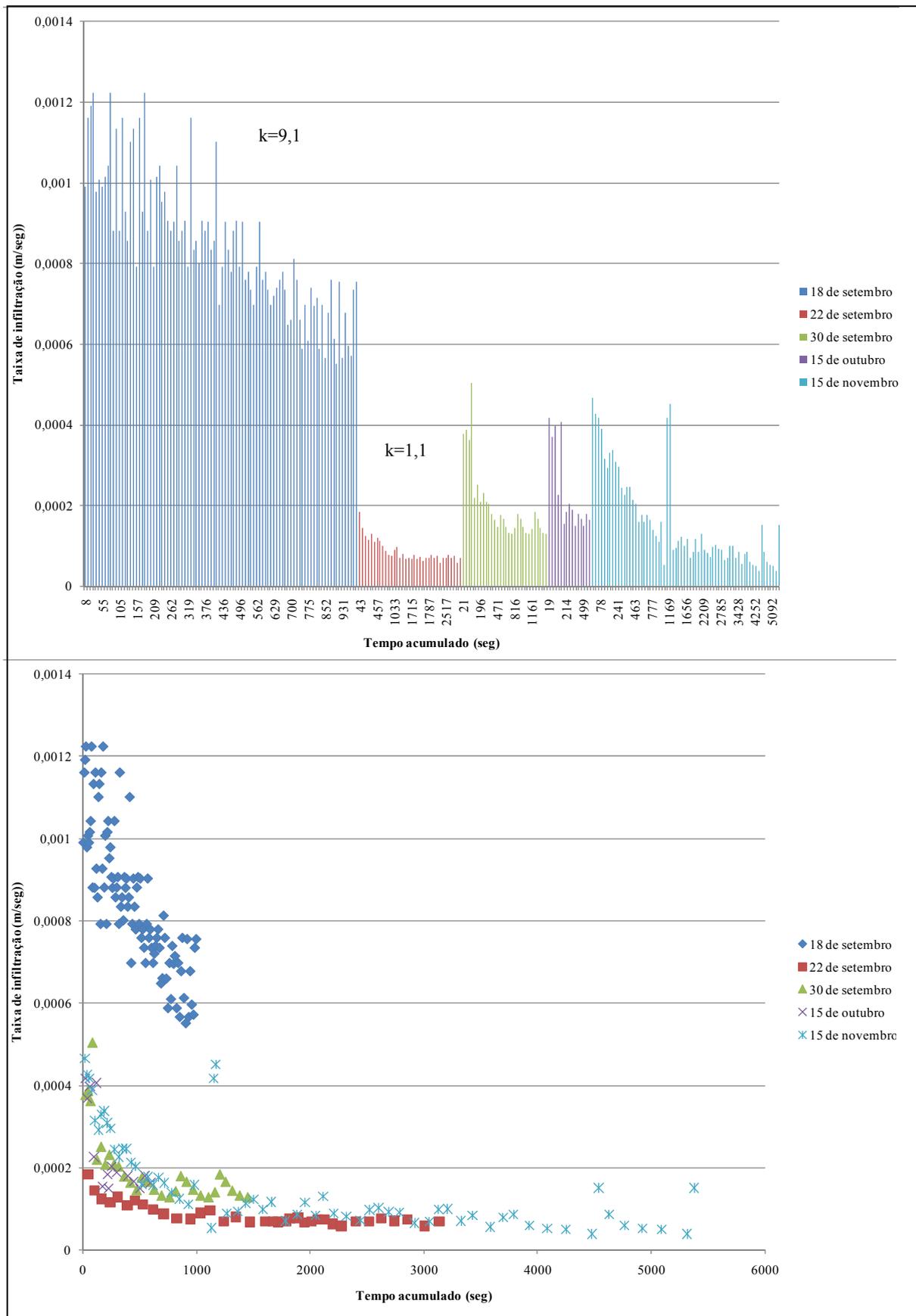


Figura 4.49- taxa de infiltração em função dos tempos de ensaio acumulados

A Figura 4.50, obtida plotando-se as taxas de infiltração correspondentes à média dos primeiros 30 cm de rebaixamento no furo de ensaio versus a sucção média estimada a partir das curvas características definidas para as profundidades de 1m e 2m, mostra a tendência da taxa de infiltração aumentar com a sucção presente no perfil de solo. Destaca-se que as sucções foram obtidas fazendo-se uso da média das umidades iniciais determinadas para as profundidades de 1 m e 1,5 m quando se fez uso da curva característica definida para 1 m de profundidade, e utilizando-se a média das umidades iniciais determinadas para as profundidades de 2 m e 2,5 m quando se fez uso da curva característica definida para 2 m de profundidade. Cabe destacar que a geometria do problema correspondente a infiltração em furo de sondagem, aqui adotada, é diferente da situação correspondente ao fluxo superficial no qual pode ocorrer o efeito de tamponamento devido à presença do ar obstruindo a passagem da água. Destaca-se ainda que a relação apresentada na Figura 4.50 é aproximada, pois não se dispõe de umidades ou medidas de sucção mais próximas do furo de infiltração.

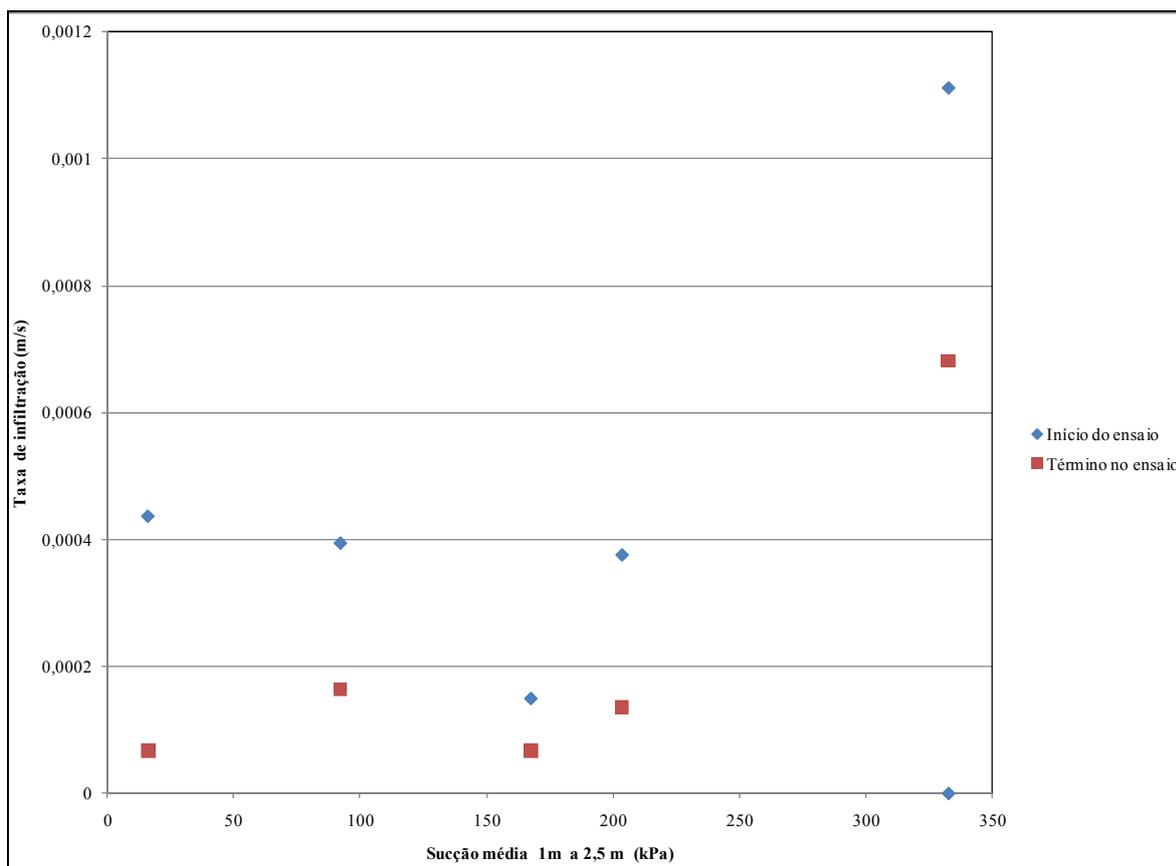


Figura 4.50- Taxas de infiltração correspondentes à média dos primeiros 30 cm de rebaixamento

4.3.3 - ENSAIO PANDA: PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE COM ENERGIA VARIÁVEL

Foram realizados ensaios com o equipamento PANDA em 21 dos 39 furos de amostragem executados no local de trabalho até uma profundidade de 3,00m objetivando a determinação dos teores de umidade. Estes ensaios foram realizados antes e após as infiltrações de 0 dia, 4 dias, e 8 dias. Nos demais casos uma pane no equipamento impediu a realização do ensaio.

As Figura 4.51 e Figura 4.52 ilustram os gráficos obtidos para dois dos ensaios realizados. Os demais resultados são apresentados no apêndice A. Em alguns perfis, observa-se picos de maior resistência entre as profundidades de 0,0 m até 0,75m. Esses picos geralmente se devem à presença de pedregulhos nos solos como foi mencionado no item 4.2.1 os quais encontram-se em camada que apresenta espessura média de 0,6 m dentro do campo experimental. Silva (2007), durante a sua pesquisa encontrou esta camada de cascalho localizada entre 0,4 e 1,0 m na área 01, entre 0,2 e 0,75 m na área 02 e entre 0,1 e 0,6 m na área 3.

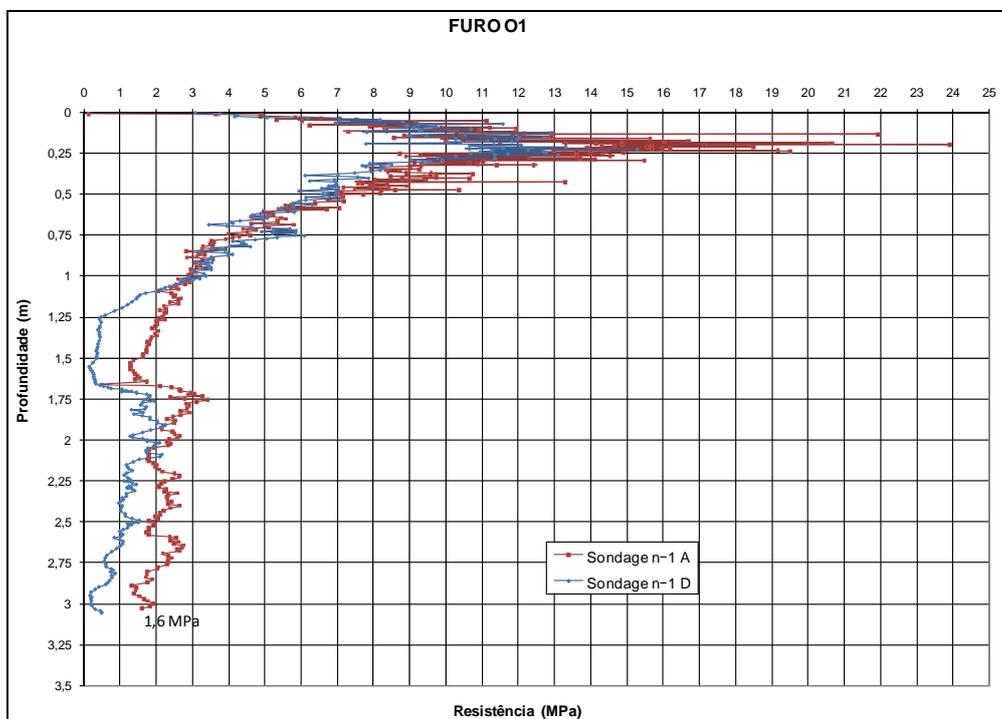


Figura 4.51- Resistências obtidas para o furo No 01 antes e depois do ensaio

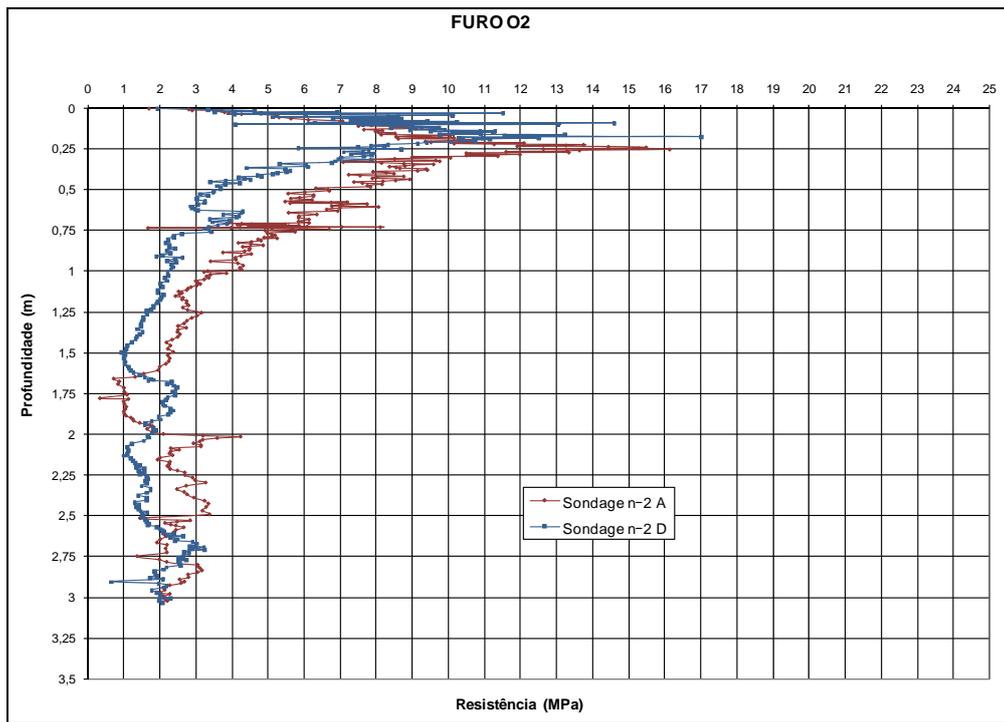


Figura 4.52-Resistências obtidas para o furo No 02 antes e depois do ensaio

As Figura 4.53 e 4.50 ilustram os gráficos de variação da resistência e da umidade em função da profundidade. Os demais resultados são apresentados no apêndice A.

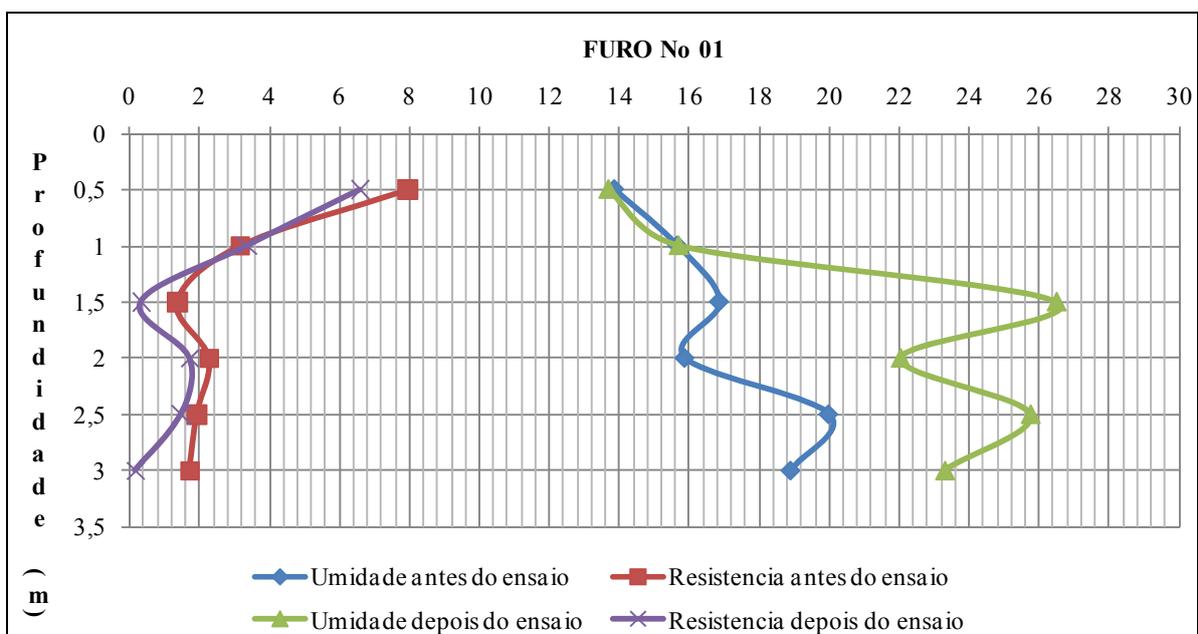


Figura 4.53-Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 01

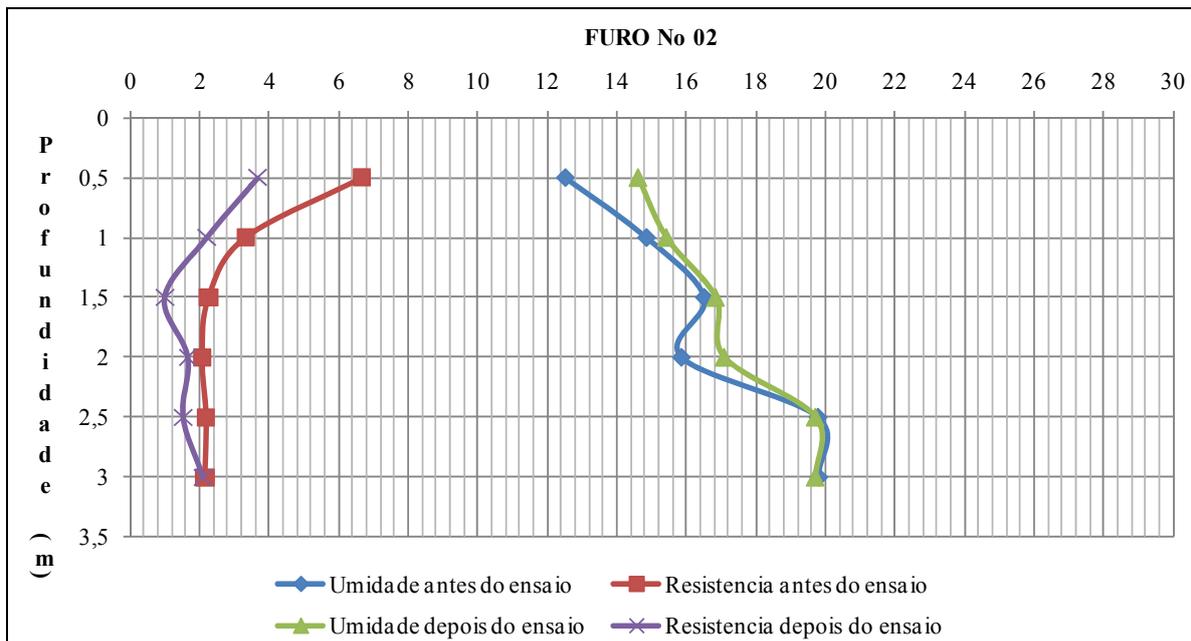


Figura 4.54- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 02

A Figura 4.55 mostra que a resistência a penetração no ensaio Panda tende a se estabilizar para umidades superiores a de entrada de ar nos microporos. Para umidades inferiores a esta a resistência a penetração aumenta de modo significativo com a redução da umidade. Esperava-se que o aumento de resistência se desse à medida que a umidade diminuísse a partir do término da entrada de ar nos macroporos e que para umidades inferiores a de entrada de ar dos microporos essa resistência tendesse a se estabilizar.

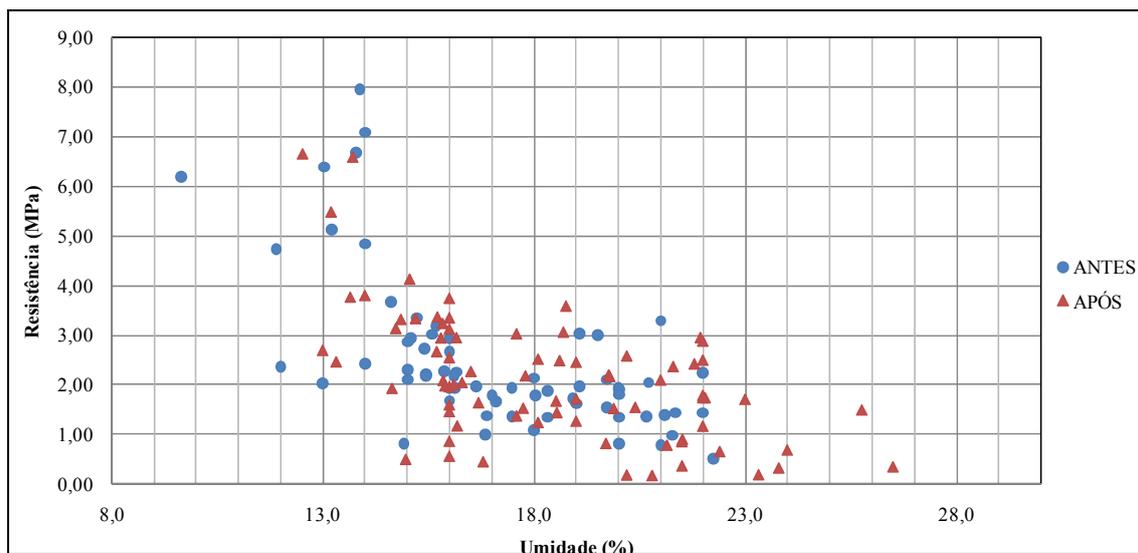


Figura 4.55-Resistência a penetração com variação de umidade.

Este comportamento coloca em evidência, por um lado, que no domínio das sucções atuantes no solo em condições de umidade superiores a de entrada de ar dos microporos a resistência à penetração do solo não varia muito confirmando assim o comportamento geralmente verificado nos ensaios SPT. Para umidades superiores a de entrada de ar dos microporos a água atuaria dissipando a energia aplicada na penetração do cone, ou agiria como lubrificante fazendo com que praticamente não ocorra ganho de resistência com o aumento de sucção até que esta atinja o domínio dos microporos. Por outro lado, os resultados colocam ainda em evidência, que para umidades inferiores a de entrada de ar dos microporos, ou os elos formados por eventuais pontes de argilas entre os agregados passam a contribuir de modo significativo para a resistência à penetração ou, o que é também provável, ao assumir grande rigidez com o aumento da sucção e estes agregados passem a se comportarem como areia, ampliando-se a resistência com o aumento da densidade relativa.

5 - CONCLUSÕES

O solo que foi utilizado durante a pesquisa quando analisado em suas condições naturais, apresentou textura areno-siltosa. Por outro lado quando analisado com o uso do ultrassom apresentou respectivamente, para as profundidades de 1m e 2m, características granulométricas areno-argilosa e silto-arenosa. Logo, o uso do ultra-som revelou, em ambas as amostras, um solo altamente intemperizado com a formação de agregados de argila e silte sob a forma de fração silte e areia para as profundidades de 1 m e 2 m, respectivamente.

A caracterização estrutural do solo permitiu observar que o solo a 1m e a 2m de profundidade é marcado por uma estrutura porosa que aponta para uma distribuição bimodal dos poros. Esse tipo de estrutura conjugada com a alta porosidade presente no solo caracteriza uma propensão a elevada permeabilidade.

Os ensaios para definição da curva característica de retenção de água pela técnica do papel filtro realizados sobre as amostras coletadas a 1,0m e 2,0m de profundidade apresentaram resultados típicos de solos tropicais profundamente intemperizados, ou seja, marcadas por distribuição de poros bimodal. As formas das curvas características de retenção de água obtidas para as duas profundidades foram muito semelhantes, apenas com pequeno deslocamento entre elas. Esse deslocamento se deve provavelmente ao fechamento dos meso e principalmente dos macroporos pelas variações cíclicas da sucção ao longo do tempo mais severas à 1m que a 2 m de profundidade. A presença do solo granular no topo do perfil contribui para a maior efetividade dessa ação cíclica da sucção com as variações climáticas. As condições iniciais do solo e a forma da curva característica das camadas superiores, devem exercer considerável influencia no mecanismo de infiltração, merecendo estudos mais detalhados.

Os ensaios de permeabilidade com variação de tensões em laboratório, apesar de não ter sido controladas as variações de porosidade, nem as variações da área, apontam para valores de permeabilidade semelhantes às de campo. A permeabilidade encontrada em laboratório tende como esperado devido às variações de porosidade a diminuir com o aumento da tensão confinante média.

Na área estudada foram feitos 39 furos a trado manual considerando varias etapas com uma duração de dois meses começando no dia 18 de setembro de 2009 e terminando o dia 15 de novembro de 2009. Com relação ao monitoramento das umidades antes e depois do ensaio de infiltração, os gráficos realizados utilizando o programa *Surfer 8.0* permitiram identificar o modo como avançava a frente de umedecimento no campo. Os resultados mostram que a infiltração ocorre com mais intensidade na porção inferior do furo principal, apontando assim para a grande relevância de se preservar a infiltrabilidade na base das trincheiras e poços nesse solos porosos colapsíveis tendo em vista a elevada permeabilidade vertical dos solos regionais. A frente de saturação ocorre em forma de “bulbo” começando pela profundidade maior e distribuindo-se até alcançar as profundidades mais próximas da superfície. Deve-se levar em conta que os efeitos das chuvas podem ter afetado os resultados das umidades depois do primeiro ensaio.

Com base nos resultados obtidos do ensaio PANDA acredita-se que o estado de sucção do solo e particularmente do agregado exerce grande influência na resistência a penetração do cone sendo que esta apresenta grande aumento à medida que a umidade se torna inferior a de entrada de ar dos microporos. O aumento da umidade poderia atuar ainda facilitando a quebra das ligações cimentíceas entre os agregados. Essas conclusões são importantes e devem ser melhor analisadas à luz de mais resultados, pois estaria apontando para a deficiência do ensaio na avaliação do comportamento dos solos finos em condições de umidade superiores a de entrada de ar dos microporos.

Os ensaios de infiltração realizados *in situ* forneceram valores de permeabilidade semelhantes aos obtidos em laboratório. Os resultados obtidos apontam para a grande influencia da umidade inicial do solo na taxa de infiltração.

5.1 - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se para pesquisas futuras:

- Ampliar o estudo para outros tipos de solo;
- Realizar monitoramento da umidade por meio de sensores térmicos de maneira que se possa ter leituras contínuas de variação de umidade ao longo do tempo.
- Simular numericamente o movimento da água no solo durante os ensaios de infiltração;

- Comparar os resultados dos ensaios em campo com o modelo numérico elaborado, a partir dos resultados de laboratório.
- Monitoramento dos dados climatológicos a partir de uma estação meteorológica localizada próximo à área de pesquisada.

BIBLIOGRAFIA.

ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Liquidez – **NBR 6459/84**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 6 p.

ABNT (1984). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – **NBR 7180/84**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 3 p.

ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica – **NBR 7181/84**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 13 p.

ABNT (1986). Solo – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. – **NBR 9604/86**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ.

ABNT (1988). Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas (método da balança hidrostática) – **NBR 10838/88**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 4 p.

ABNT (1990). Ensaio de adensamento unidimensional – **NBR 12007/90**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 13 p.

ABNT (1998). Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinhole test) – **NBR 14114/98**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/ RJ, 8 p.

ANDOH, R. Y. G. E DECLERCK, C. (1997). “**A cost effective approach to stormwater management Source control and distributed storage.**” Water Science and Technology, Vol. 36, nº 8-9, pp. 307-311.

ARAKI, M. S. (1997). **Aspectos Relativos às Propriedades dos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-040A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.

BATISTA, M.B. E PINTO COELHO, M.M.L. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 1ª ed. Belo Horizonte, Editora UFMG MG, 2002.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N. E BARRAUD, S. (2005a). **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Primeira Edição. Porto Alegre, RS. ABRH, 266 p.

BAPTISTA, M.; BARRAUD, S.; ALFAKIH, E.; NASCIMENTO, N.; FERNANDES, W. E MOURA, P. (2005b). “**Performance-costs Evaluation for Urban Storm Drainage**”. Water Science and Technology. 51(2). 99-107.

BARRAUD, S.; AZZOUT, Y.; CRES, F. N. E CHOCAT, B. (1999). “**Selection Aid of Alternative Techniques in Urban Storm Drainage – Proposition of an Expert System**”. Water Science and Technology. 39(4). 241-248.

BERTONI, J. C. E TUCCI, C. E. M. (2003). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Primeira Edição. Porto Alegre, RS. ABRH, 150p.

BRANDÃO, V. SANTOS, PRUSKI, F.F., SILVA, D. D. **Infiltração da Água no Solo**. 2.ed. Viçosa, MG. Editora UFV. 2004.

BRITO, D. (2006). **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – PTARH. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília. 117 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. **Curva Característica de Sucção Transformada**. Solos e Rochas, 27(3): 231-242, 2004.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Notas de Aula do Curso de Solos Tropicais ministrado em Furnas para alunos de Mestrado em Geotecnia**. Convênio UnB/UFMG/Furnas. Goiânia, GO. 2004.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. de et. al. **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**, Editores: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; SILVA MELO, M. T. da, 1.ed. Brasília DF, FINATEC, 2006. 464p. cap.2.

CANHOLI, A. P. (2005). **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo, SP. Oficina de Textos, 302 p.

CARDOSO, F. B. F. (1995). **Análise Química, Mineralógica e Micromórfologica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso**. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-026A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140 p.

CASTRO, L. M. A.; BAPTISTA, M. B. E CORDEIRO NETTO, O. M. (2004). “**Análise Multicritério para Avaliação de Sistemas de Drenagem Urbana – Proposição de Indicadores e de Sistemática de Estudo**.” Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. 9(4). 5-19.

CORDÃO NETO, M. P. (2005). **Análise hidro-mecânica de barragens de terra construídas com materiais colapsíveis**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 028/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.

E.U.A.. Environmental Protection Agency. (2005). **National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas**. Washington, DC.

E.U.A.Federal Emergency Management Agency. (1981). **Design Guidelines for Flood Damage Reduction**. Washington, DC. 101 p.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1999). **Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. Prefeitura do Município de São Paulo, São Paulo, SP. 289 p.

FREDLUND, D. G. e RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wile & Sons, Inc. New York, 1993. 517p.

GALVÃO, A.; VALÉRIO, P.; MATOS, R. **As Soluções de Controlo na Origem como Estratégia de Gestão Integrada de Águas Pluviais em Meio Urbano**, Publicado no Boletim Lisboa Urbanismo, Boletim nº 9, 2000. 6p.

GUIMARÃES, R. C. (2002). **Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas escavadas**. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-090A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, M.; FREDLUND, D. G. **Infiltration-runoff boundary conditions in seepage analysis**. Anais da 58th Canadian Geotechnical Conference, 2005.

GITIRANA JR, G. DE F. N; FREDLUND, MURRAY D. e FREDLUND, DELWYN G. **Previsão de Curvas Características de um Perfil de Solo Colapsível de Brasília Utilizando Curvas Granulométricas**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas. Curitiba, PR. 2006. 6p.

GITIRANA JR, G. DE F. N. Fluxo em Solos não Saturados e o Processo Erosivo. In: **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**, Editores: CAMAPUM DE CARVALHO, J. SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; SILVA MELO, M. T. da, 1.ed. Brasília DF, FINATEC, 2006. 464p. cap.9.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico (2006) e Projeções da População Urbana e Rural**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 06 nov. 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico (2005) e Projeções da População Urbana e Rural**, 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 06 nov. 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA , INMET. Disponível em <http://www.inmet.gov.br>, Acesso em: Nov 2009-Março 2010.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York, Jon Wiley & Sons. 1969. 553p

LEROUEIL, S. **Critical state soil mechanics and the behaviour of real soils. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics**, Balkema, Rotterdam, 1997, pp. 41-80

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera**. Piracicaba:, 1995. 497p.

MARINHO, F.A.M. **Medição de Sucção em Solos**. 3º Simpósio Brasileiro de Solos Saturados, Rio de Janeiro, RJ, 1995. 2, 373-397.

MONTENEGRO, M. H. E TUCCI, C. E. M. (2005) “**Saneamento ambiental e águas pluviais.**”Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Brasília, DF, 7-20.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2ª Ed. Oficina de Texto. São Paulo. SP. 2002. 355p.

PORTO, R. L., FILHO, K. Z., TUCCI, C. E. M., BIDONE, F. (1993). “**Drenagem Urbana**” In:Tucci, C. E. M. (ed.) Hidrologia : Ciência e Aplicação. UFRGS, Porto Alegre,Brasil, 952p.

SCHUELER, T.R. 1994. **Developments in Sand Filter Technology to Improve Stormwater Runoff Quality. Watershed Protection Techniques**, pag 47-54.

SILVA, JOSELEIDE PEREIRA (2007), **Estudos Preliminares para a implantação de trincheiras de infiltração**. Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-154/07, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155 p.

SOUZA, V. C. B. (2002). **Estudo Experimental de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração do Escoamento superficial**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 127p.

TUCCI, C.E.M; GENZ, F. **Controle do Impacto da Urbanização**. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R. L.L; BARROS, M.T. (Org) Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Da Universidade – UFRGS – Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Capítulo 7, 1ª Ed. 1995. p 278-347.

TUCCI, C. E. M. (2004). “**Controle de Enchentes.**” In: Tucci, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Terceira Edição. UFRGS Editora, ABRH, Porto Alegre, RS, 621-658.

TUCCI, C. E. M. (2007). **Inundações Urbanas**. Primeira Edição. Porto Alegre, RS. ABRH/RHAMA, 393 p.

TUCCI, C. E. M. (2003)C. “**Processos Hidrológicos e os Impactos do Uso do Solo**”
In:Tucci, C. E. M. e Braga, B. (eds.)Clima e Recursos Hídricos no Brasil. ABRH,Porto Alegre, Brasil,31-75.

URBONAS, B.; STAHLRE, P., (1993). **Stormwater. Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 447 p.**

APÊNDICE A

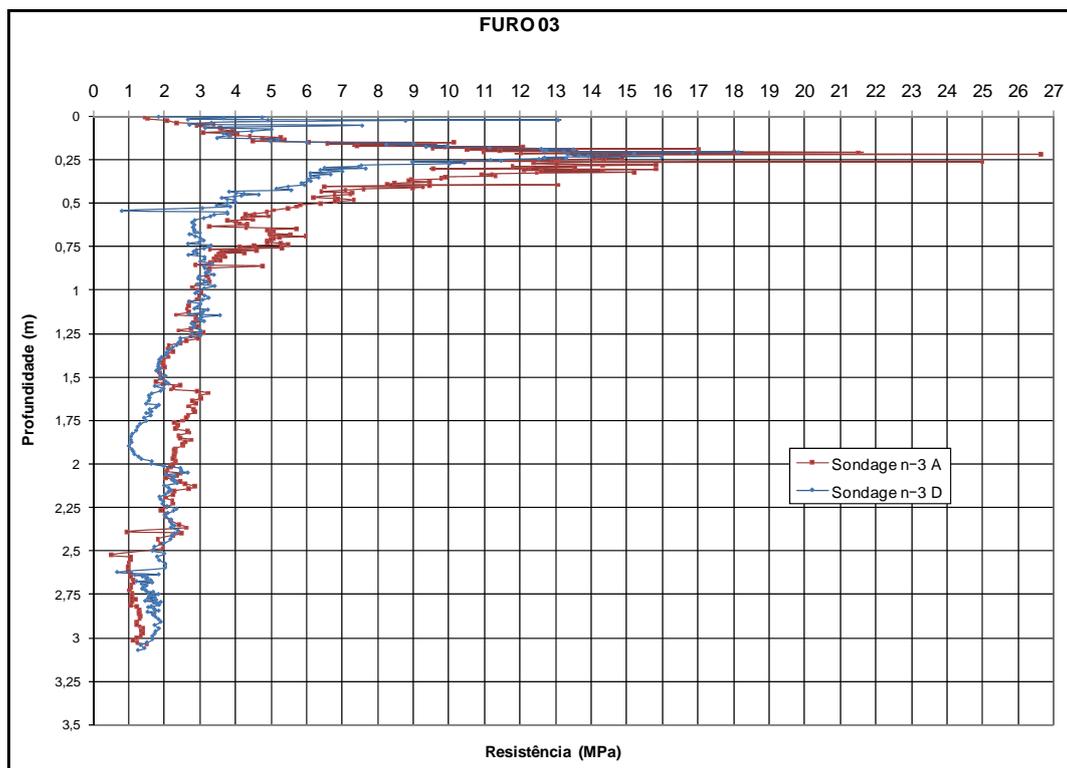


Figura A- 1- Resistências obtidas para o furo No 03 antes e depois do ensaio

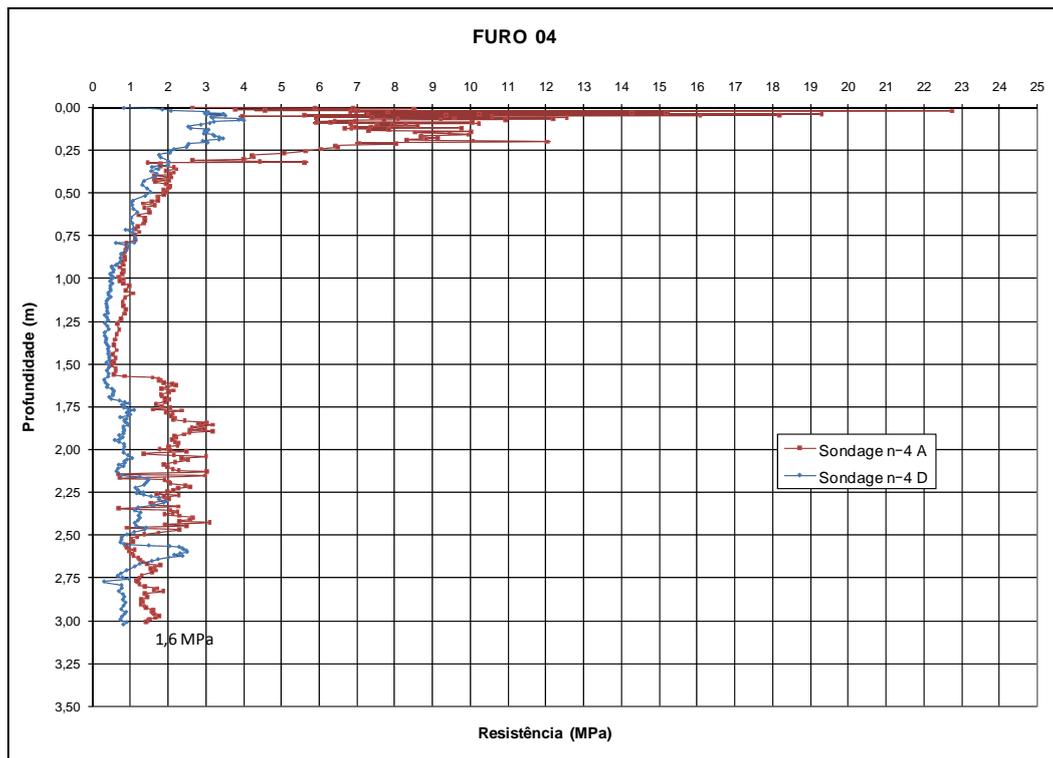


Figura A-2- Resistências obtidas para o furo No 04 antes e depois do ensaio

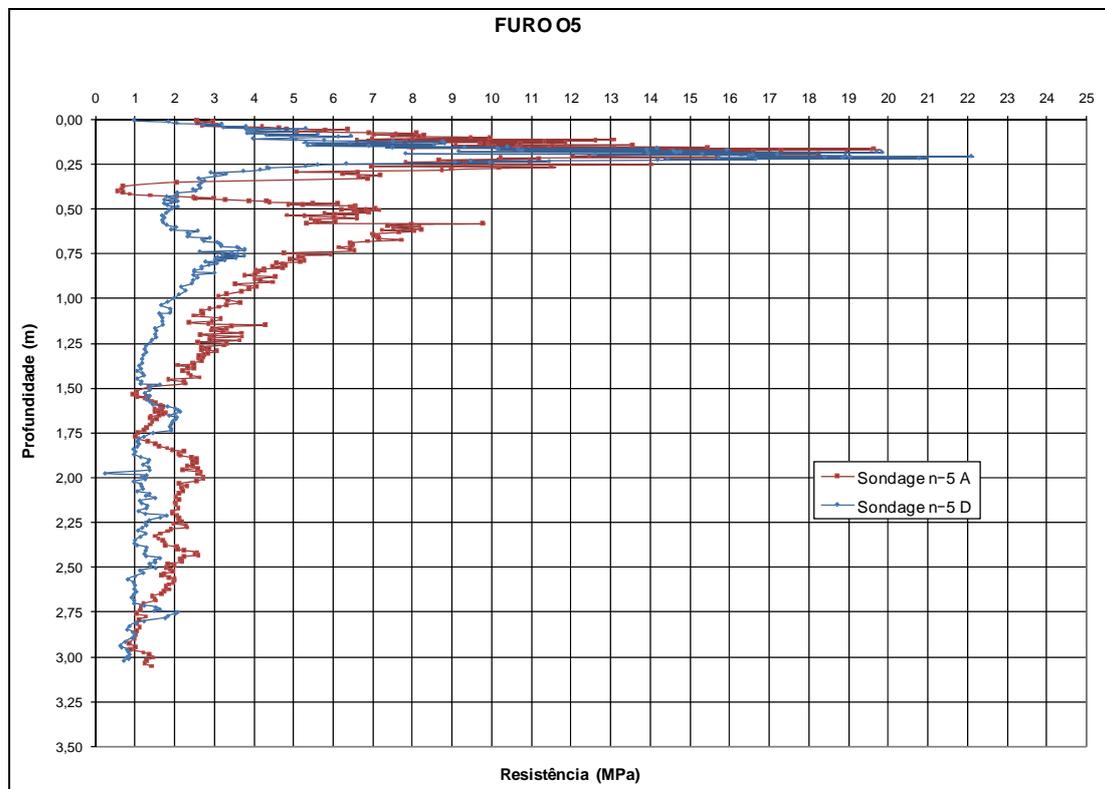


Figura A-3- Resistências obtidas para o furo No 05 antes e depois do ensaio

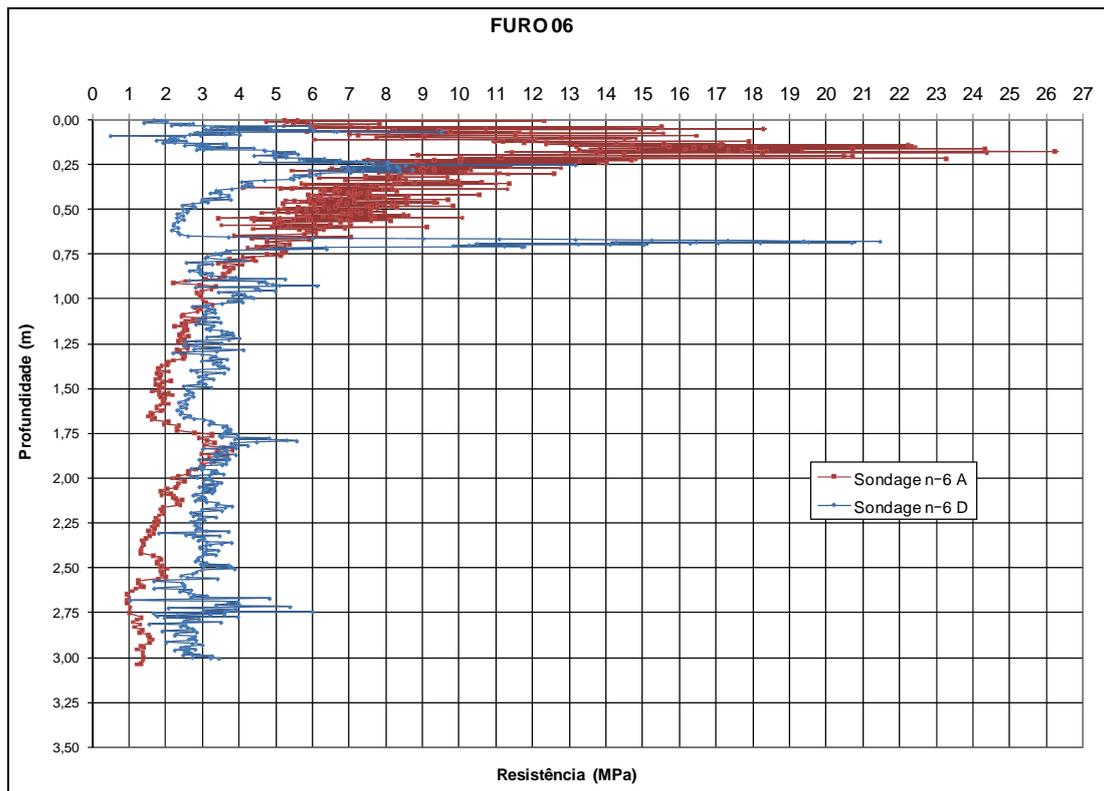


Figura A- 4- Resistências obtidas para o furo No 06 antes e depois do ensaio

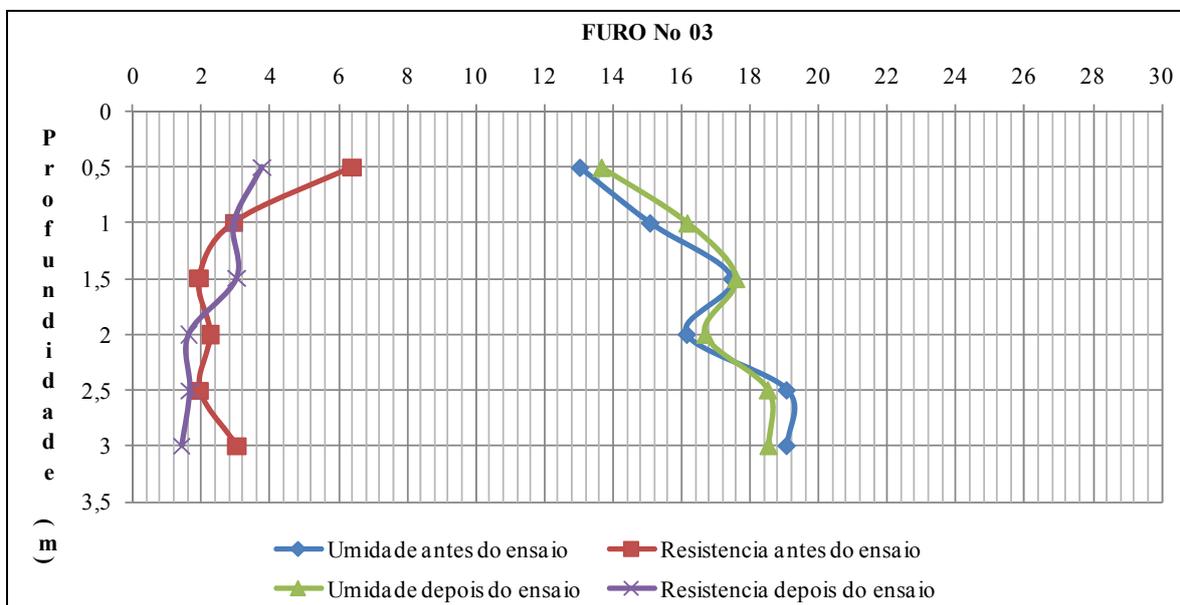


Figura A- 5- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 03

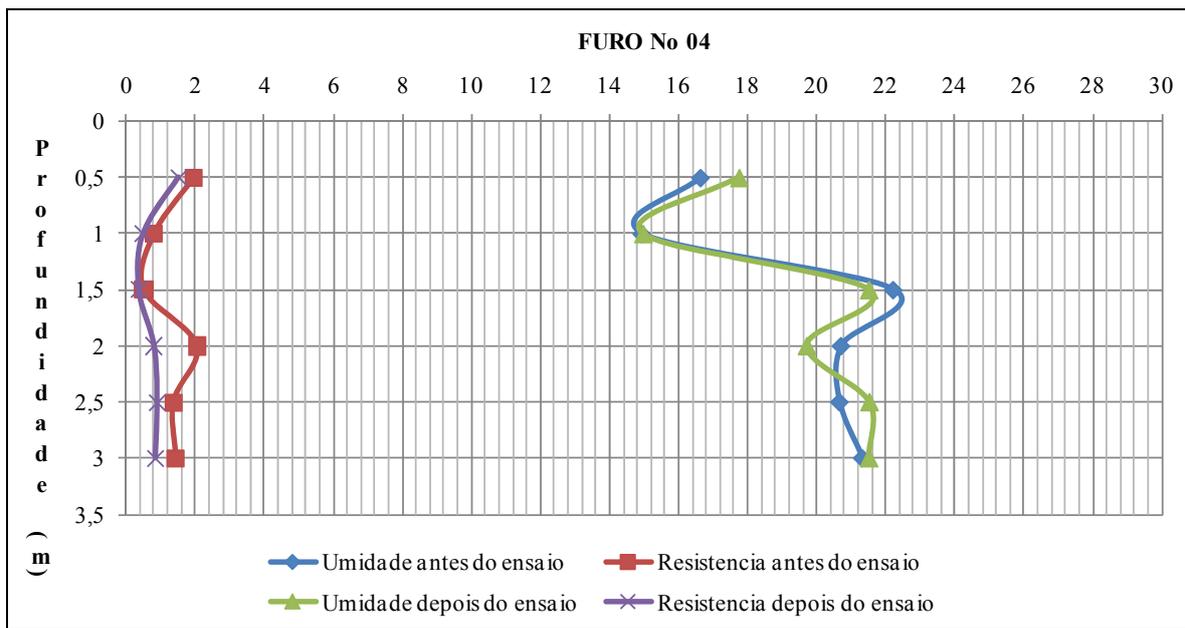


Figura A- 6- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 04

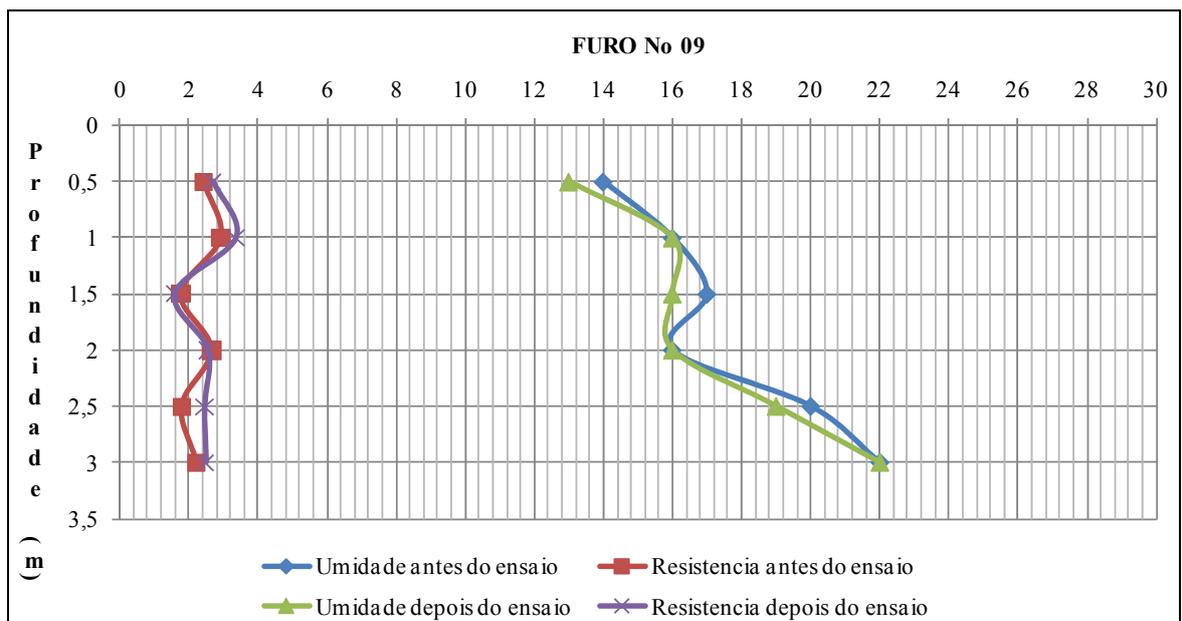


Figura A- 7- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 09

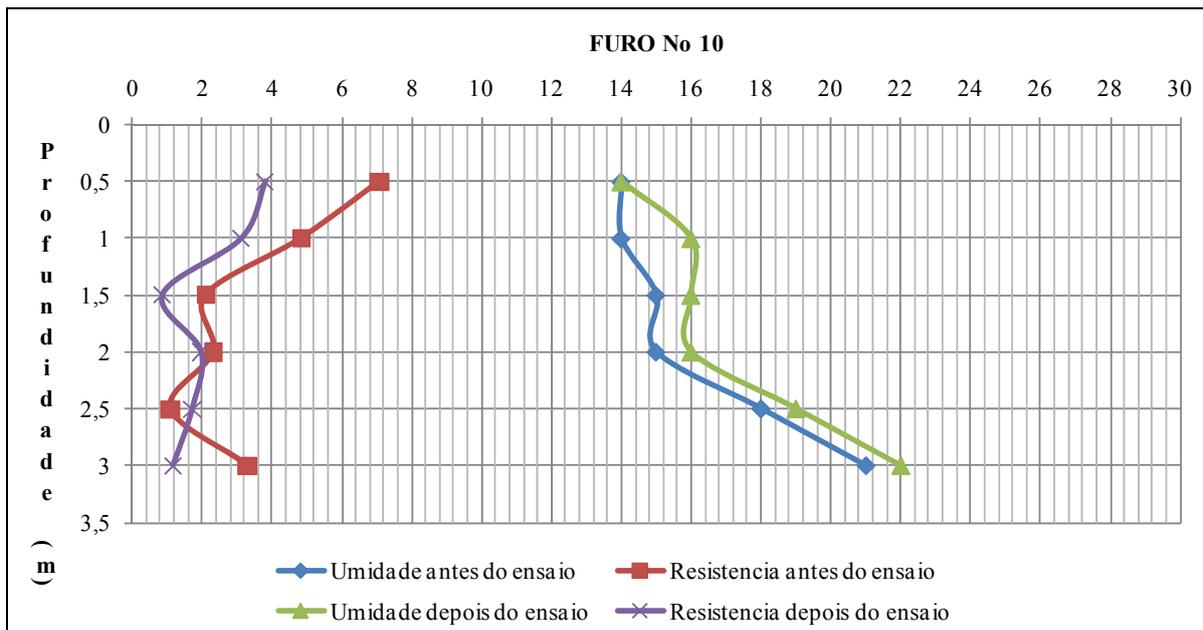


Figura A- 8- Umidades e resistências obtidas antes e depois do ensaio para o furo No 10