



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO(UFPE)
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS(CTG)
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL(PPGEG)
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS**



MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

João Batista Fialho dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Co-orientador: Prof.Dr. Antônio Celso Dantas Antonino

Dissertação de Mestrado

Recife - PE

Julho de 2014

JOÃO BATISTA FIALHO DOS SANTOS

**MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA
TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Co-orientador: Prof.Dr. Antônio Celso Dantas Antonino

Recife - PE
Julho de 2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S237m Santos, João Batista Fialho dos.
Monitoramento e simulação hidráulica de uma trincheira de infiltração /
João Batista Fialho dos Santos. - Recife: O Autor, 2014.
96 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2014.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Manejo das águas pluviais. 3. Técnica compensatória. 4. Simulação numérica. 5. Infiltração. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira. (Orientador). II. Antonino, Antônio Celso Dantas (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2014-238



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA
DE UMA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO**

defendida por

João Batista Fialho dos Santos

Considera o candidato APROVADO

Recife, 28 de julho de 2014

Orientadores:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino - UFPE
(co-orientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Albert Einstein Spíndola Saraiva de Moura – IFPB
(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a. Leijdane Maria Maciel de Oliveira– UFPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Paulo Frassinete de Araújo Filho– UFPE
(examinador externo)

A minha família. Em especial ao meu pai Fialho (*in memoriam*), minha amada esposa e meu filho.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha família, principalmente, a minha querida esposa, Maria do Socorro, por estar sempre presente na minha caminhada, e ao meu filho, Gustavo, pela paciência e incentivo. Aos meus irmãos e pais pelo apoio afetivo.

Aos professores Jaime Cabral e Antônio Antonino, pela orientação, amizade, paciência e confiança, que tiveram durante todo o curso e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos grandes amigos que encontrei no CTG, Albert Einstein, por seu apoio, palavras de incentivo e credibilidade; ao queridíssimo Artur Paiva Coutinho, pela preocupação, dedicação, auxílio e coorientação em todos os momentos deste trabalho; a Tássia Melo, pelo incentivo e ajuda na formatação deste trabalho. Obrigado amigos, pelo maravilhoso convívio e aprendizado.

Ao CEL INF FRANCISCO DJALMA CESSÉ DA SILVA, Cmt do 14º BI Mtz (2007 – 2009), por ter me liberado para cursar durante o dia as disciplinas teóricas no CTG/UFPE, ao MAJ INF HELY ROBSON SOARES, Fiscal Administrativo do Colégio Militar do Recife (CMR), por ter me liberado durante a fase final desta longa e árdua batalha na preparação da dissertação.

Aos professores da Pós-Graduação pelos ensinamentos, colaboração e conhecimentos transmitidos, os quais foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao DEN/UFPE (Departamento de Energia Nuclear), por disponibilizar o Laboratório de Solos para a realização das análises de solo e, ao técnico do laboratório e amigo Cássio e Maurício, que se propuseram a me ajudar durante a realização dos ensaios no laboratório.

Aos professores componentes da banca avaliadora, Jaime Cabral, Albert Einstein, Leidjane e Paulo Frassinetti, pelas críticas e sugestões apresentadas, as quais foram essenciais para o enriquecimento deste trabalho.

RESUMO

SANTOS, J. B. F. dos (2014), Monitoramento e Simulação Hidráulica de uma Trincheira de Infiltração. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, 96 p.

MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

O escoamento superficial das águas das chuvas tem ocasionado grandes transtornos no meio urbano. O sistema de drenagem convencional já não suportam o crescente avanço da urbanização, tornando-se inoperante ou mesmo operando com grandes dificuldades. A impermeabilização do meio urbano constitui uma das principais responsáveis por essas consequências, a cada dia se constrói mais e há substituição do terreno natural por pavimentação de ruas e construções das mais variadas. Dessa maneira procurou-se desenvolver técnicas que compensassem o funcionamento do sistema, mesmo apresentando carência do conhecimento do seu desempenho hidráulico. Este trabalho contempla o uso de uma dessas técnicas, a trincheira de infiltração em um lote isolado, como elemento experimental para observação e constatação da sua eficiência e viabilidade. A trincheira de infiltração foi implantada no pátio interno do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE). Analisou-se a infiltração no terreno, a retenção da água no solo, a pluviometria, o escoamento na área da trincheira de infiltração e o lençol freático através de piezômetro já instalado no local. Para a otimização dos dados coletados houve a necessidade de realizar simulações numéricas realizando análises unidimensionais e bidimensionais do comportamento hidráulico da trincheira, sempre comparando com o solo natural. O monitoramento foi realizado próximo a estação chuvosa, o que facilitou bastante a observação de eventos de operação da trincheira em períodos em que ela estava como reservatório inicialmente seco e em eventos sucessivos de precipitação pluviométrica, permitindo a análise do comportamento hidráulico quando da trincheira parcialmente cheia. Os resultados evidenciaram que a caracterização hidrodinâmica do local de implantação permitiu verificar o comportamento hidráulico da trincheira e comparar com uma situação de ausência da trincheira de infiltração. A partir das simulações, observou-se que a trincheira de infiltração melhora o fluxo de recarga do lençol freático e diminui a aparência de cargas hidráulicas positivas na superfície. O monitoramento demonstrou que a trincheira apresentou vazões de saída significantes. A trincheira de infiltração mostrou-se eficiente e adequada como uma técnica compensatória para auxiliar no manejo das águas pluviais em solo urbano, diminuindo o tempo de alagamento do lote.

Palavras chave: manejo das águas pluviais, técnica compensatória, simulação numérica e infiltração.

ABSTRACT

SANTOS, J. B. F. dos. Monitoring and Simulation of a Hydraulic Infiltration Trench. M. Sc. Dissertation. Federal University of Pernambuco. Center for Technology and Geosciences. Graduate Program in Civil Engineering, 96 p.

MONITORING AND SIMULATION OF A HYDRAULIC INFILTRATION TRENCH

Runoff rainwater has caused major disruptions in the urban environment. The conventional drainage system no longer support the growing advancement of urbanization, becoming dead or even operating with great difficulty. The waterproofing of the urban environment is a major responsible for these consequences, every day there are more and builds replacement of natural terrain for paving streets and buildings of the most varied. Thus we sought to develop techniques to compensate the system operation, even with lack of knowledge of its hydraulic performance. This work describes the use of these techniques, the infiltration trench isolated on a lot, as an experimental element to observation and verification of its efficiency and feasibility. The infiltration trench was located in the inner courtyard of the Department of Nuclear Energy, Federal University of Pernambuco (DEN / UFPE). We analyzed the infiltration of ground water retention in the soil, rainfall, runoff in the area of the infiltration trench and the water table through piezometer already installed on site. For the optimization of the data collected was necessary to perform numerical simulations by performing one-dimensional and two-dimensional hydraulic behavior of the trench analyzes, always comparing with the natural soil. The monitoring was conducted near the rainy season, which greatly facilitated the observation operation events of the trench at times when she was initially as dry and successive rainfall events reservoir, allowing the analysis of the hydraulic behavior when the trench partially filled. The results showed that the hydrodynamic characterization of the implant has shown the hydraulic behavior of the trench and compare with a situation of absence of infiltration trench. From the simulations, it was observed that the infiltration trench improves the flow of groundwater recharge and decreases the appearance of hydraulic positive charges on the surface. The monitoring showed that the trench showed significant departure flows. The infiltration trench was efficient and suitable as a compensatory technique to assist in the management of stormwater in urban ground water, reducing the time of flooding of the lot.

Keywords management of stormwater, compensatory technique, numerical simulation and infiltration.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS

1.INTRODUÇÃO.....	20
2.OBJETIVOS.....	22
2.1.Objetivo Geral.....	22
2.2.Objetivos Específicos.....	22
2.3.Metas.....	22
3.REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1.Trincheiras de infiltração.....	23
3.1.1.Aspectos gerais.....	23
3.1.2.Estrutura.....	25
3.1.3.Dimensionamento.....	26
3.1.4.Trabalhos realizados sobre trincheira de infiltração.....	27
3.1.5. O Solo.....	29
3.1.6. Propriedades hidrodinâmicas e térmicas do solo.....	31
3.1.6.1. Curva característica da água no solo ou curva de retenção.....	31
3.1.6.2. Condutividade hidráulica.....	32
4.MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.1.Área de implantação da trincheira de infiltração.....	35
4.2.Projeto da trincheira de infiltração.....	36
4.3.Ensaio de laboratórios.....	37
4.4.Massa específica ou densidade do solo.....	38
4.4.1.Densidade das partículas do solo.....	39
4.4.2.Porosidade da brita.....	39
4.4.3.Análise granulométrica do solo.....	40
4.4.4.Propriedades hidráulicas do solo e infiltração.....	42
4.5.Instalação da trincheira.....	43
4.5.1.Projeto construtivo.....	43
4.5.1.1. Determinação do Geotêxtil.....	44

4.5.2. Dimensionamento da trincheira.....	45
4.5.2.1. Intensidade de precipitação	45
4.5.2.2. Volumes de entrada	46
4.5.2.3. Volumes de saída.....	47
4.5.3. Execução da Trincheira de Infiltração.....	48
4.5.3.1. Escavação.....	48
4.5.3.2. Preenchimento.....	48
4.5.3.3. Acabamento	49
4.6. Monitoramento e instrumentação de medição dos parâmetros	50
4.6.1. Vazão de entrada	50
4.6.2. Nível de água no interior da trincheira	51
4.6.3. Nível de água no interior do Vertedor	52
4.6.4. Poço de observação do lençol freático	53
4.6.5. Medição da chuva.....	53
4.7. O Modelo Hydrus	54
4.7.1. Hipóteses e considerações adotadas nas simulações numéricas utilizando o Hydrus	
1-d	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5.1. Caracterização Hidráulica da trincheira de infiltração	56
5.1.1. Análise Granulométrica.....	56
5.1.2. Análise dos ensaios de infiltração	57
5.2. Parâmetros Hidráulicos do solo e da trincheira de infiltração.....	58
5.2.1. Estimativa pelo método BEST	58
5.2.2. Tabela da Curva de retenção(Equação de van Genuchten) – Mualem.....	61
5.2.3. Análise da sensibilidade do dimensionamento.....	63
5.2.4. Monitoramento da trincheira de infiltração	65
5.3. Modelagem da trincheira de infiltração.....	72
5.3.1. Parte 1 – Modelagem Unidimensional	77
5.3.1.1. Caso A - Escolha da malha.....	77
5.3.1.2. Caso B - Comparação da trincheira com o solo natural – caso com	
condição de contorno inferior com drenagem livre.....	79
5.3.1.3. Caso C - Comparação da trincheira com o solo natural - caso com a	
condição de contorno inferior com lençol freático	81
5.3.2. Parte 2 – Modelagem Bidimensional.....	82
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	85
7. REFERÊNCIAS	86
8. ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trincheira de infiltração.....	23
Figura 2 - Exemplo de estrutura de uma trincheira de infiltração	26
Figura 3 - Triângulo de classificação de textura do solo (USDA, 1993)	30
Figura 4 - Mapa do Nordeste, de Pernambuco e da Região Metropolitana do Recife.....	36
Figura 5 - Localização do experimento no Departamento de Energia Nuclear - UFPE	36
Figura 6 - Trincheira de Infiltração - planta	37
Figura 7 - Corte longitudinal da trincheira	37
Figura 8 - Coleta de amostra para densidade dos solos.....	38
Figura 9 - Determinação da densidade das partículas pelo método do balão volumétrico	39
Figura 10 - Determinação da porosidade da brita.....	40
Figura 11 - Coleta de amostra para posterior análise granulométrica	41
Figura 12 - Análise Granulométrica na fase de sedimentação	41
Figura 13 - Análise Granulométrica na fase de peneiramento	41
Figura 14 - Ensaio de infiltração com o infiltrômetro anel simples - superfície.....	42
Figura 15 - Ensaio de infiltração com o infiltrômetro anel simples - 20 cm.....	42
Figura 16 - Alagamento do pátio que contribui para a trincheira.....	44
Figura 17 - Manta Geotêxtil Bidim RT-08 utilizada na trincheira de infiltração.....	45
Figura 18 - Escavação manual da trincheira	48
Figura 19 - Preenchimento da trincheira de infiltração com brita.....	49
Figura 20 - Cobertura com uma camada de brita para proteção mecânica.....	49
Figura 21 - Desenho - vista frontal do vertedor.....	50
Figura 22 - Construção da caixa do vertedor.....	50
Figura 23 - Instalação do vertedor.....	51
Figura 24 - Sensores de níveis usados no monitoramento.....	51
Figura 25 - Sensor de nível instalado no vertedor	52
Figura 26 - Detalhamento da altura H para o cálculo da vazão em vertedor triangular	53
Figura 27 - Pluviômetro Ville de Paris.....	53
Figura 28 - Pluviômetro Automático.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica para o solo natural da trincheira de infiltração.....	57
Gráfico 2 - Infiltração acumulada para a superfície, 20 cm, 40 cm e 60 cm do solo natural..	57
Gráfico 3 - Taxa de infiltração para a superfície do solo natural.....	58
Gráfico 4 - Taxa de infiltração para a camada de 20 cm do solo natural	58
Gráfico 5 - Taxa de infiltração para a camada de 40 cm do solo natural	59
Gráfico 6 - Taxa de infiltração para a camada de 60 cm do solo natural	59
Gráfico 7 - Curva de retenção- superfície (Burdine e Mualem).....	62
Gráfico 8 - Curva de retenção- 20cm (Burdine e Mualem).....	62
Gráfico 9 - Curva de retenção- 40cm (Burdine e Mualem).....	63
Gráfico 10 - Curva de retenção- 60cm (Burdine e Mualem).....	63
Gráfico 11 - Dimensionamento da trincheira pelo método do envelopamento da chuva para tempos de Retorno de 2, 5, 10 e 25 anos. Condutividade hidráulica saturada média obtida a partir do método BEST	64
Gráfico 12 - Nível d'água e precipitação pluviométrica acumulada no interior da trincheira para o dia 06/06. Obs: dados de precipitação da estação do INMET	66
Gráfico 13 - Nível d'água e precipitação pluviométrica acumulada no interior da trincheira para o dia 15/06. Obs: dados de precipitação da estação do INMET	67
Gráfico 14 - Nível d'água no interior da trincheira e precipitação pluviométrica acumulada para o dia 23/06/2014	68
Gráfico 15 - Nível d'água no interior da trincheira e precipitação pluviométrica acumulada para o dia 24/06/2014	69
Gráfico 16 - Nível d'água no interior da trincheira e precipitação pluviométrica acumulada para o dia 25/06/2014.....	70
Gráfico 17 - Nível d'água no interior da trincheira e vazão de escoamento superficial na alimentação da trincheira para o dia 24/06/2014.....	71
Gráfico 18 - Nível d'água no interior da trincheira e vazão de escoamento superficial na alimentação da trincheira para o dia 25/06/2014.....	72
Gráfico 19 – Fluxo de entrada na trincheira de infiltração e precipitação pluviométrica diária obtida na estação da APAC/LAMEPE - 2011	73
Gráfico 20 - Curvas de retenção para o solo natural e para a camada de reservatório da trincheira de infiltração.....	74
Gráfico 21 - Curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica para o solo natural e para a camada de reservatório da trincheira de infiltração.....	74
Gráfico 22 - Condição inicial de potencial total para a simulação unidimensional do perfil referente a trincheira de infiltração – condição de contorno inferior de drenagem livre	75
Gráfico 23 - Condição inicial de potencial total utilizada para a simulação unidimensional do perfil referente ao solo natural – condição de contorno inferior de drenagem livre	75
Gráfico 24 - Condição inicial de potencial total para a simulação unidimensional do perfil referente a trincheira de infiltração – condição de contorno inferior com lençol freático	76
Gráfico 25 - Condição inicial de potencial total para a simulação unidimensional do perfil referente a solo natural – condição de contorno inferior com lençol freático	76

Gráfico 26 - Efeito da malha no fluxo na base da trincheira de infiltração. Malha de 4cm, 2cm e 1cm.	77
Gráfico 27 - Efeito da malha no potencial total na superfície da trincheira de infiltração. Malha de 4 cm, 2cm e 1cm.....	78
Gráfico 28 - Efeito da malha no potencial total na base da trincheira de infiltração. Malha de 4 cm, 2cm e 1cm.....	78
Gráfico 29 - Potencial total no topo solo natural e no topo da trincheira de infiltração.....	79
Gráfico 30 - Potencial total na base solo natural e no topo da trincheira de infiltração.....	80
Gráfico 31 - Fluxo na base solo natural e no topo da trincheira de infiltração.	80
Gráfico 32 - Fluxo na base solo natural e no topo da trincheira de infiltração.	81
Gráfico 33 - Potencial total no topo solo natural e no topo da trincheira de infiltração.....	82
Gráfico 34 - Potencial total no topo solo natural e no topo da trincheira de infiltração. Modelagem Bidimensional com condição de contorno inferior de Lençol Freático a 4 m do topo para o solo natural (SN) e para a Trincheira de infiltração (TI).....	82
Gráfico 35 - Carta de umidade volumétrica para o dia 111-drenagem livre	83
Gráfico 36 – Carta de umidade volumétrica para o dia 112 - drenagem livre	83
Gráfico 37 - Carta de umidade volumétrica para o dia 113 -drenagem livre	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação granulométrica (ISSC, 1993).	30
Tabela 2 - Valores do coeficiente de escoamento (C).	46
Tabela 3 - Textura e classificação textural do solo	56
Tabela 4 - Parâmetros da curva de retenção (hipótese de Burdine)	60
Tabela 5 - Classificação hidrológica em função da condutividade hidráulica saturada.....	60
Tabela 6 - Parâmetros da curva de retenção (hipótese de Burdine)	60
Tabela 7 - Parâmetros da curva de retenção (Mualem, 1976) - camadas do solo	61
Tabela 8 - Sensibilidade do volume de armazenamento da trincheira com relação a variações no valor da condutividade hidráulica saturada obtida com o método BEST.....	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Densidade das partículas do solo.....	31
Equação 2 - Densidade global	31
Equação 3 - Porosidade	31
Equação 4 – Equação de van Genuchten.....	32
Equação 5 – Equação de Brooks e Corey.....	32
Equação 6 – Equação de van Genuchten com hipótese de Mualem	33
Equação 7 – Equação de van Genuchten com hipótese de Burdine.....	33
Equação 8 – Equação de Brooks e Corey com hipótese de Burdine.....	33
Equação 9 – Equação de Brooks e Corey com hipótese de Mualem.....	34
Equação 10 – Umidade mássica	38
Equação 11 – Volume da cápsula cilíndrica.....	38
Equação 12 – Densidade das camadas	38
Equação 13 – Volume da bureta.....	39
Equação 14 – Densidade das partículas.....	39
Equação 15 – Porosidade da brita	40
Equação 16 – Equação de van Genutchen.....	42
Equação 17 – Equação de Brooks e Corey.....	43
Equação 18 – Equação IDF de Ramos & Azevedo (2010)	45
Equação 19 – Método Racional.....	46
Equação 20 – Volume de entrada	47
Equação 21 – Volume de armazenamento	47
Equação 22 – Volume de saída.....	47
Equação 23 – Volume de armazenamento total	47
Equação 24 – Equação de Thomson.....	52
Equação 25 – Equação de Richards.....	54
Equação 26 – Equação d fluxode entrada de água na trincheira	72

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Pressão de entrada de ar
A	Área da bacia
Acap	Área de captação da precipitação pluviométrica
Ai	Área de infiltração
Atrench	Área de superfície da trincheira de infiltração
β	Ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical
B	Dimensão da trincheira de infiltração
C	Coefficiente de escoamento superficial
dp	Densidade das partículas do solo
dg	Densidade global
D	Diâmetro do cilindro
Dc	Densidade da camada do solo
DHmax	Altura máxima específica
F	Fluxo de entrada
h	Potencial matricial
hg	Valor de escala de h
H	Altura do cilindro
Hb	Altura da camada de brita
Hv	Altura do nível de água no vertedor
i	Intensidade de precipitação
$K(\theta)$	Condutividade hidráulica
Ks ou Ko	Condutividade hidráulica de saturação
L	Nível de álcool na bureta
L	Dimensões da trincheira de infiltração
m	Parâmetros de forma
ms	Massa da fração sólida do solo
Ms	Massa do solo seco
Mu	Massa do solo úmido
n	Parâmetro característico do solo
η_B	Porosidade da brita
Ia	Infiltração acumulada

L	Nível de álcool na bureta
L	Dimensões da trincheira de infiltração
m	Parâmetros de forma
ms	Massa da fração sólida do solo
Ms	Massa do solo seco
Mu	Massa do solo úmido
n	Parâmetro característico do solo
η_s	Porosidade da brita
n	Parâmetros de forma
ϕ	Porosidade de um solo
θ_r	Umidade volumétrica residual
θ_s	Umidade volumétrica saturada
Q	Vazão
S	Sumidouro
Se	Saturação efetiva
t	Duração da chuva
Tr	Tempo de retorno
U	Umidade do solo
V	Volume do cilindro
Va	Volume de água
Varm	Volume de armazenamento
Vb	Volume do balão volumétrico
Ve	Volume de entrada
Vr	Volume do recipiente
Vs	Volume da fração sólida do solo
Vt	Volume total do solo
x	Coordenada espacial

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Água e Clima
ASCE	American Society of Civil Engineers
BEST	Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments)
CST	Capillary Seepage Trench
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEN	Departamento de Energia Nuclear
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPA	Environmental Protection Agency
FVT	Sistema filtro – vala – trincheira de infiltração
HC	Hospital das Clínicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-duração-frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ISSC	International Society of Soil Science
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LAMEPE	Laboratório de Meteorologia de Pernambuco
LEGAL	Linguagem Especial para Geoprocessamento Algébrico
MAPLU	Manejo de Águas Pluviais Urbanas
MNT	Modelo Numérico do Terreno
NBR	Normas Brasileiras
PET	Politereftalato de etileno
PVC	Policloreto de polivinila
RMR	Região Metropolitana do Recife
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à tração
SBCS	Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
SCS	Soil Conservation Service
SHER	Similar Hydrological Element Response
SN	Solo natural

SP	São Paulo
SWMM	Storm Water Management Model
TI	Trincheira de infiltração
TFSE	Terra Fina Seca em Estufa
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande Sul
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USDA	United States Department of Agriculture

1. INTRODUÇÃO

Segundo o IBGE, mais de 80% da população vive em áreas urbanas, tendo nos últimos 50 anos uma elevação populacional de aproximadamente 37% (IBGE, 2011). Porém, à medida que a população aumenta nas grandes cidades, os métodos de urbanização implantados são cada vez mais questionados.

A falta de planejamento urbano e no controle do uso e ocupação do solo proporcionam o aumento da impermeabilização da superfície do solo, através da concepção e expansão de edificações, ruas, passeios, estacionamentos, entre outros. Assim, as áreas que antes proporcionavam a infiltração das águas pluviais na superfície do solo, são gradativamente submetidas a medidas que alteram o equilíbrio dos componentes do ciclo hidrológico principalmente o escoamento superficial. A impermeabilização interfere diretamente no comportamento das águas pluviais urbanas, resultando no aumento do volume escoado superficialmente e na intensificação da velocidade de escoamento, com isso os sistemas de drenagem convencionais ficam sobrecarregados e até mesmo inoperantes (BOTELHO, 2011).

O foco principal no estudo sobre técnicas alternativas que compensem os efeitos da urbanização está aliviando alguns desses problemas, pois elas visam atuar sobre a causa do problema. Tais técnicas compensatórias se propõem a preservar os mecanismos naturais de escoamento, diminuindo as vazões a jusante, maximizando o controle de escoamento na fonte e mitigando os impactos ambientais, através dos processos de armazenamento, detenção, retenção, interceptação, evapotranspiração e infiltração das águas pluviais. Elas podem ser estruturais e não estruturais. As estruturais abrangem obras de engenharia destinadas ao controle quali-quantitativo das vazões geradas, através de dispositivos de retenção, armazenamento e infiltração; e as não estruturais adotam meios naturais e sociais para a minimização do escoamento, como a educação ambiental, podendo está associadas a obras de engenharia (NASCIMENTO & BAPTISTA, 2009; RIGHETTO *et al*, 2009; TUCCI, 2009).

Em países desenvolvidos, é destaque a aplicação das técnicas compensatórias do tipo não estrutural, através da renaturalização dos canais e rios, da promoção da sustentabilidade dos recursos hídricos, e recarga das águas subterrâneas através da utilização de tecnologias que promovam a melhoria da capacidade de infiltração e da capacidade de armazenamento no meio urbano. Porém, é importante destacar que o solo deve ser propício a implantação dessas técnicas, considerando a capacidade de infiltração do solo e a condutividade hidráulica como aspectos essenciais na fase de projeto, e atentar aos possíveis riscos de contaminação, erosão e

colapso do solo. A resolução dos tais problemas deve ser incluída em uma política de drenagem urbana, principalmente no Plano Diretor de Drenagem Urbana de cada município, possibilitando a conscientização da própria sociedade de que essas medidas alternativas realmente existem e que elas funcionam (SILVA, 2007).

As técnicas compensatórias do tipo estruturais promovem uma resposta mais rápida em relação ao controle quantitativo das vazões de escoamento, principalmente por serem técnicas implantadas próximas às fontes geradoras. As técnicas compensatórias mais utilizadas são aquelas que potencializam a infiltração da água no solo e a recarga do lençol (SOUZA, 2002; MELO, 2011; COUTINHO, 2011).

Apesar dos avanços nos estudos sobre as técnicas compensatórias, é preciso aprimorar os conhecimentos e detalhar o comportamento hidráulico das estruturas compensatórias, principalmente no que tange ao dimensionamento e simulação numérica, avaliando a dinâmica da água na estrutura e na sua interação técnica - solo natural.

Este trabalho apresenta um estudo sobre uma técnica compensatória baseado na infiltração das águas pluviais por meio de uma trincheiras de infiltração, pelo qual se deve proceder um estudo prévio sobre a natureza do solo (tipo, estrutura e textura), estado da superfície, nível do lençol freático e declividade do terreno. A partir disso, é possível saber se o local é passível de implantação de uma trincheira de infiltração, pelo seguinte se deve realizar o comportamento hidráulico da estrutura, em decorrência dos eventos naturais de chuva.

Por inserir-se no contexto do projeto de Manejo de Águas Pluviais Urbanas (MAPLU), torna-se um trabalho contínuo na linha de pesquisa do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil (PPGEC) voltada para a adaptação das técnicas compensatórias (Cabral et al, 2009) na drenagem urbana para a cidade do Recife iniciados por Coutinho (2011) e Melo (2011).

Por sua vez a cidade do Recife apresenta uma série de problemas de drenagem devido às más condições geomorfológicas e do processo de urbanização acelerado (Cabral e Alencar, 2001).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Conceber, construir e avaliar a dinâmica da água na trincheira de infiltração para o controle do escoamento superficial em lote.

2.2. Objetivos Específicos

Dimensionamento e execução de uma trincheira de infiltração.

Avaliação da dinâmica da água na trincheira de infiltração desde a precipitação pluviométrica até a água atingir o lençol freático, através da simulação numérica do fluxo da água na trincheira de infiltração em área urbana.

2.3. Metas

- 1) Projeto e construção da trincheira de infiltração;
- 2) Caracterização hidráulica do solo da área de implantação da trincheira;
- 3) Monitoramento da vazão de entrada, do nível da água e do lençol freático;
- 4) Simulação numérica unidimensional e bidimensional da dinâmica da água na trincheira com o modelo Hydrus.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Trincheiras de infiltração

3.1.1. Aspectos gerais

As trincheiras são técnicas compensatórias lineares, cuja dimensão de comprimento sobressai sobre a largura e a profundidade. Recolhe as águas pluviais que incidem perpendicularmente ao seu comprimento, potencializando a infiltração e o armazenamento temporário. Tais dispositivos podem ser aplicados ao longo de áreas como canteiros, passeios, jardins, vias, etc. (BAPTISTA *et al.*, 2005) (Figura 1)



Figura 1 - Trincheira de infiltração

Fonte – Browne *et al.*(2012)

Lima (2009) avaliou o comportamento hidráulico de uma trincheira de infiltração experimental a partir de chuvas simuladas e naturais, realizou um estudo de solo utilizando as curvas de retenção da água no solo e a tomografia computadorizada para analisar o tamanho e comportamento dos poros do solo. Este estudo apresentou a eficiência da trincheira de infiltração no controle do escoamento superficial, retendo as vazões de escoamento decorrentes de eventos mais intensos, do que a intensidade adotada para o dimensionamento da estrutura.

Imbe *et al.*(2002) apresentaram o controle de inundação por uma trincheira de infiltração, através do Modelo SHER (Similar Hydrological Element Response). Foi simulado hidrograma de descarga e verificado a durabilidade do sistema de infiltração. Os resultados mostraram que o sistema de infiltração obteve um bom desempenho durante o período de estudos.

Lucas *et al.* (2010) utilizaram a técnica de cartografia digital em um sistema de informações geográficas para selecionar áreas propícias a implantação de trincheiras de infiltração. Essa metodologia foi aplicada no campus da Universidade Federal de São Carlos, utilizando a Linguagem Especial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) e o Modelo Numérico do Terreno (MNT). Os resultados concluíram que esta técnica é bastante eficiente não só na determinação da viabilidade de implantação de uma trincheira de infiltração, mas também como ferramenta para elaboração de Planos de Manejo de Águas Pluviais.

A Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (1999) realizou estudos sobre a melhoria da qualidade da água do escoamento superficial através de trincheiras de infiltração. O estudo mostrou a eficiência das trincheiras na remoção de poluentes e no tratamento de esgoto, apresentando remoção de até 90% de sedimentos, metais, bactérias coliformes e matéria orgânica, e até a 60% de fósforo e nitrogênio no escoamento superficial, diminuição de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) entre 70 a 80%, e também remoção de nitratos, cloretos e outros metais solúveis, mas com pequena intensidade.

Reed *et al.*, (1989), apresentaram um estudo sobre a metodologia que aplica um sistema CST (Capillary Seepage Trench). Esse sistema trincheira de infiltração capilar foi largamente usado no Japão, e serve para evitar ou mitigar a contaminação do solo por efluentes que se infiltram no solo. Foram avaliados os comportamentos dos sistemas CST e do sistema convencional de drenagem urbana e concluíram que o primeiro teve uma redução muito maior que o segundo sistema, no tocante a Demanda Química de Oxigênio (DQO), o que se puderam concluir foi que a trincheira de infiltração é eficiente na redução de poluentes.

Amoozegaret *al.* (2008) avaliaram a infiltração e o movimento da água em trincheiras semelhantes as que foram utilizadas em locais de dispersão de águas residuais. Foram realizados ensaios com quatro experimentos separadamente, de modo que, cada um usou pequenos drenos, usou quatro trincheiras paralelas em três locais com solos diferentes. Em dois experimentos as trincheiras estavam em solos de textura grossa superior a um solo argiloso, já nos outros dois experimentos as trincheiras estavam em solos diferentes do argiloso. Os resultados indicaram que as propriedades morfológicas do solo, bem como a

natureza de circulação de água a partir de trincheiras deve ser considerado na modelagem de fluxo de água em conexão com os sistemas sépticos.

Bertoni *et al* (2007), simularam o comportamento hidráulico de duas trincheiras instaladas em Porto Alegre (RS) e três na cidade de Montreal - Canadá , utilizando o aplicativo SWMM (Storm Water Management Model). Este apresentou uma boa capacidade de representação das características gerais dos dispositivos, os parâmetros analisados pelo modelo não forneceram uma relação com as características físicas do experimento, mas serviu como um marco inicial para aplicação viável deste tipo de simulação matemática para a trincheira de infiltração.

Graciosa (2005) realizou ensaios de campo com trincheiras de infiltração, em dois solos diferentes, um arenoso e outro argiloso. O foco principal foi de avaliar quantitativamente o comportamento hidráulico das estruturas de infiltração em relação aos volumes de escoamento, essas trincheiras foram alimentadas com volumes de água controlados em solos com diferenças significativas em suas respectivas condutividades hidráulicas. A umidade do solo no experimento foi monitorada com sonda de nêutrons durante o processo de redistribuição da água no solo. Também usou uma modelagem matemática do fenômeno bidimensional de infiltração em torno das trincheiras de infiltração. Comparou os resultados experimentais e simulados pela equação bidimensional de Richards o que indicou uma pequena defasagem dos valores de volume infiltrado e umidade do solo nos processos de infiltração e drenagem interna entre os valores da simulação numérica, observando também que a capacidade de infiltração da trincheira mostrou-se maior nos dados observados, possivelmente devido à simplificação de distribuição unimodal dos diâmetros dos poros adotada na modelagem numérica, realizada a partir da utilização das equações de van Genuchten e de Richards, através do modelo computacional.

3.1.2. Estrutura

A trincheira de infiltração é composta basicamente por uma camada de material granular protegido e separado do solo por um geotêxtil (Figura 2), a fim de evitar a entrada de partículas finas e elementos contaminantes. Pode ser inserida uma camada de areia fina, a fim de, juntamente com o geotêxtil, evitar a passagem de finos ou materiais contaminantes para o lençol freático (SOUZA, 2002).

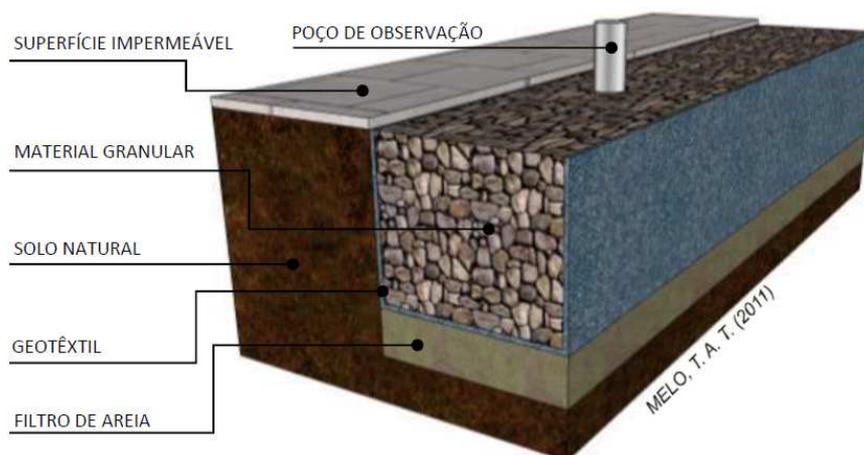


Figura 2 - Exemplo de estrutura de uma trincheira de infiltração
Fonte – Melo, 2011

Silva (2007) desenvolveu o trabalho que teve como foco principal os aspectos econômicos e ambientais, no tocante a reciclagem de garrafas de Politereftalato de etileno (PET), recarga de aquíferos e redução do risco de alagamentos próximo aos centros urbanos, cuja ideia era a substituição de parte dos agregados granulares usados em trincheiras de infiltração, por garrafas recicladas PET. A proposta tentou mitigar os riscos de contaminação do lençol freático e problemas ambientais, com alternativas simples e custo relativamente baixo quando comparado com os sistemas de drenagem convencionais. Utilizaram-se garrafas PET, material de fácil acesso nos mercados comerciais, por ser barato e reciclável. O estudo foi desenvolvido baseando-se na possibilidade do menor peso das garrafas em comparação com dos outros agregados como a brita, com 0%, 21%, 40% e 73 % de garrafas, elas proporcionaram uma redução do custo em relação a outro tipo de agregado, mas ainda não atingiu o valor econômico ideal para a trincheira de infiltração. Dos resultados obtidos e análises realizadas, concluiu-se que no caso do Distrito Federal, procurou-se associar a técnica ao custo na solução de questões ambientais atuais, como a da reciclagem das garrafas, o da recarga dos aquíferos e o da redução do risco de inundações junto aos grandes centros urbanos.

3.1.3. Dimensionamento

Há uma variedade de métodos utilizados para o dimensionamento da trincheira de infiltração, entre eles podemos citar: o balanço das massas utilizado por Graciosa (2005), da curva - envelope utilizado por Silveira e Goldenfum (2007), que é um dos mais utilizados, bem como diversos outros, etc.

3.1.4. Trabalhos realizados sobre trincheira de infiltração

Alguns trabalhos na literatura brasileira e internacional serão abordados aqui, entre eles estão os diversos usos da trincheira de infiltração seja para análise qualitativa, seja para análise quantitativa, modelagem, etc., desde da recarga de aquíferos até o controle de poluição no lençol freático.

Silveira e Goldenfum (2007) aplicaram o método da “curva envelope” ou “envelopamento das chuvas” utilizando uma metodologia numérica de pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte, entre eles a Trincheira de Infiltração, a partir de fórmulas explícitas e gerais baseada na equação Intensidade-Duração-Frequencia (IDF) de cada localidade aplicada, através da Equação IDF de Talbot.

Mediondo et al. (2008) apresentaram uma metodologia de dimensionamento de trincheira de infiltração de águas pluviais por meio do balanço hídrico utilizando dois modelos diferentes para estimar a infiltração; pelo modelo de Philip (unidimensional) e pelo modelo de Richards (bidimensional), com o propósito de estimar o volume de saída do dispositivo de infiltração, para determinar o volume de entrada de água na trincheira foi estimado pela curva IDF. O volume infiltrado foi estimado pela mesma metodologia aplicada por Graciosa (2005), e concluíram que os modelos empregados apresentaram resultados semelhantes para os volumes observados na trincheira de infiltração.

Peiter e Poletto (2012) aplicaram uma metodologia com o objetivo de controlar o escoamento superficial. Foram realizadas a construção de protótipos de trincheira de infiltração em laboratório e a construção da trincheira no campo,. Concluíram que de acordo com os resultados obtidos nestes experimentos de laboratório e de campo, mostrou-se como uma técnica compensatória como excelente alternativa para o controle do escoamento superficial, apresentando uma boa retenção principalmente em solos argilosos e que quanto maior a granulometria, maior a capacidade de armazenamento de água em relação o preenchimento granular.

Souza (2002) instalou 2 trincheiras de infiltração utilizando para o dimensionamento o método da “curva envelope” ou “envelopamento da chuva” para um tempo de retorno de 5 anos. As trincheiras construídas tinham as seguintes dimensões: a trincheira nr 1 tinha 0,80m de largura, 1 m de profundidade e 10 m de comprimento e foi projetada para atender uma área de 200 metros quadrados, enquanto que a trincheira nr 2 tinha 0,80m de largura, 1 m de profundidade e 3m de comprimento e foi projetada para atender uma área de 450 metros quadrados. Os períodos de monitoramento das trincheiras foram respectivamente: de 33

meses e 6 meses e os resultados mostraram eficiência total dos dispositivos de infiltração, demonstrando ser um elemento de controle do escoamento na fonte, muito eficiente.

Graciosa (2005) utilizou para o dimensionamento de duas trincheiras de infiltração o método do “balanço das massas” em que o volume a ser armazenado é igual ao volume de entrada, proveniente da precipitação, subtraído do volume da saída, através da infiltração. Para a estimativa do volume infiltrado, foi proposto a variação da taxa de infiltração no tempo. As dimensões das trincheiras construídas foram: 0,90m de largura, 1m de profundidade e 5m de comprimento cada uma. Dos resultados obtidos concluiu-se que foi viável o uso de trincheiras como ferramentas para a redução do escoamento superficial, uma vez que os volumes infiltrados e umidade observados foram condizentes com a expectativa de boa percolação e redistribuição da água no solo, necessária à sua utilização como recurso de armazenamento e disposição das águas pluviais em alternativa ao sistema convencional de drenagem urbana.

Silva (2007) dimensionou uma trincheira de infiltração através do método da “curva envelope” com aplicação a partir de dados de caracterização do local de implantação e da curva IDF (intensidade – duração – frequência) e avaliou a viabilidade econômica e a técnica do uso de garrafas politereftalato de etileno (PET) em substituição aos agregados usados na trincheira de infiltração.

Holz e Tássia (2007) realizaram a construção de uma trincheira de infiltração cuja finalidade foi comparar economicamente com outros dois tipos de técnicas compensatórias (Pavimento Permeável e Valo de Infiltração), foi realizada uma comparação entre os orçamentos para construção dos dispositivos citados anteriormente e concluíram que o custo da aplicação do sistema alternativo para um período de retorno de 10 anos foi inferior ao custo da aplicação do sistema de drenagem convencional para o período de retorno de 2 anos. O método de dimensionamento foi da “curva envelope” e utilizado como aplicativo de apoio no dimensionamento o programa IPH_CFONTE desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), específico para estruturas de controle na fonte.

Lucas et al (2010) apresentaram um trabalho que determinava a viabilidade da implantação da trincheira de infiltração através de técnicas de cartografia digital baseados em características topográficas, pedológicas e de uso e ocupação do solo, os resultados obtidos demonstraram que a técnica utilizada se mostrou muito eficiente como parte integrante da elaboração de Planos de Manejo de Águas Pluviais e como parâmetro para seleção de áreas que pode ser utilizada para a trincheira de infiltração. Lucas *et al* (2013) dimensionaram um

sistema filtro – vala – trincheira de infiltração (FVT) para atender uma área de 1.701m^2 , este sistema foi dimensionado pelo método da “curva envelope”, com período de retorno de 10 anos. A trincheira de infiltração tinha 40m de comprimento, 0,80m de largura e 1,30m de profundidade. Foi ainda realizada uma modelagem numérica e dos resultados obtidos concluíram que apesar do sistema FVT ser muito complexo e necessitar de conexão de várias estruturas, apresentou uma coerência entre a modelagem numérica realizada e os dados experimentais obtidos, e proporcionou uma excelente resposta nos resultados.

Akan (2002) dimensionou uma trincheira de infiltração baseado no método racional simplificado e nas equações de Green e Ampt. Dos resultados obtidos e gráficos analisados, conclui-se que o modelo numérico propõe com facilidade a entrada do fluxo na trincheira de infiltração, mostrando que a trincheira tem uma grande eficiência no controle do escoamento das águas pluviais.

Duchene et al (1994) utilizaram duas trincheira de infiltração para análise da qualidade da água na cidade de Fresno, nos Estados Unidos da América, o dimensionamento foi realizado através de elementos finitos. Esta metodologia também tem como objetivo quantificar o fluxo de água que recarregava o lençol freático e dos resultados obtidos concluíram que a trincheira de infiltração foi eficiente na remoção de poluentes e na recarga do lençol freático.

Chahar et al (2012), propuseram uma metodologia que foi utilizada em um estudo de caso em Lyon na França. Foi construída uma trincheira de infiltração trapezoidal que tinha como objetivo reduzir os fluxos de águas pluviais, que visava mitigar a poluição das bacias de infiltração de Lyon, recarga de aquíferos, diminuição de contaminantes, etc. Concluíram que a trincheira de infiltração pode controlar a qualidade e quantidade de água da chuva da microbacia urbana e que essas soluções podem fornecer uma diretriz para determinar o dimensionamento da trincheira de infiltração e sua viabilidade.

3.1.5. O Solo

O estudo do solo é fundamental na compreensão da performance das técnicas compensatórias uma vez que o mesmo funciona como exutório das técnicas de infiltração.

Segundo Klar (1988) o solo é definido como um sistema poroso constituído por partículas sólidas e volume de vazios, que podem ser ocupados pelo ar ou pela água, sendo, portanto, um armazenador de nutrientes e água para as plantas.

O solo é considerado, do ponto de vista da física do solo um sistema trifásico muito heterogêneo. As três fases são representadas no solo da seguinte maneira: a fase sólida constitui a matriz do solo; a fase líquida que consiste na água do solo na qual existem substâncias dissolvidas, devendo ser chamada então de solução do solo, e a fase gasosa que é a atmosfera do solo (FERREIRA, 2010).

O conhecimento dos parâmetros físicos desse sistema permite um entendimento dos processos naturais que ocorrem ou não, no solo. Quanto à granulometria, usualmente os grãos são classificados em três classes básicas: areia, silte e argila. Abaixo está a tabela utilizada pela International Society of Soil Science (ISSC):

Tabela 1 -Classificação granulométrica (ISSC, 1993).

Classificação	Tamanho dos grãos (diâmetro médio, mm)
Areia muito grossa	2,0 – 1,0
Areia grossa	1,0 – 0,5
Areia média	0,5 – 0,25
Areia fina	0,25 – 0,10
Areia muito fina	0,10 – 0,05
Silte	0,05 – 0,002
Argila	< 0,002

As classes podem ser determinadas através do triângulo de texturas, proposto pelo United States Department of Agriculture (USDA) e adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), conforme apresentado na Figura 3.

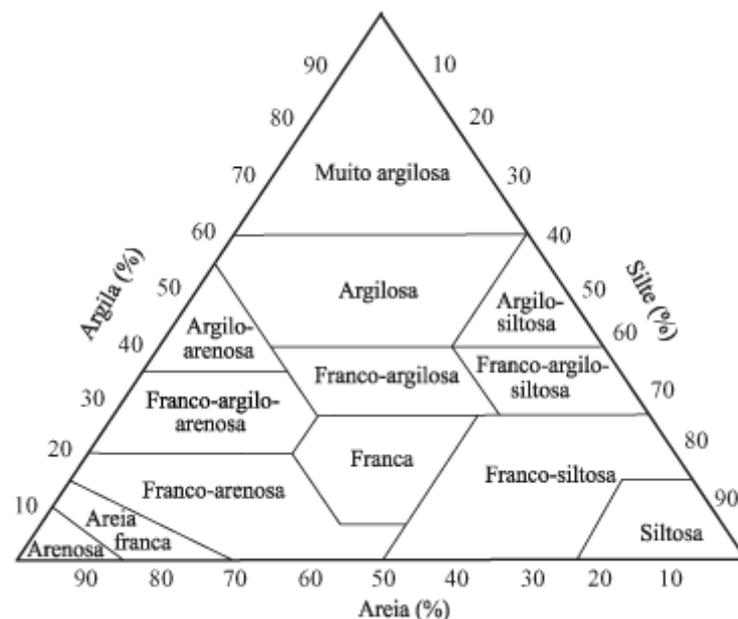


Figura 3 - Triângulo de classificação de textura do solo (USDA, 1993)

Caputo (1988) diz ser relevante aos estudos de física do solo, o conceito de *densidade das partículas do solo* (d_p) ou densidade real, dada pela razão entre a massa da fração sólida do solo (m_s) e o volume desta fração (V_s), qual seja:

$$d_p = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

A densidade das partículas do solo (d_p) não é considerado um parâmetro físico do solo por sua susceptibilidade às variações no tempo, mas de relevante análise, principalmente em estudos agrônômicos, para a determinação da quantidade de água a aplicar no solo em projetos de irrigação (HILLEL, 1998)

A densidade global ou a densidade de um solo (d_g), é definida como a relação entre a massa de fração sólida do solo (m_s) e o volume total do solo (V_t), conforme Equação 2:

$$d_g = \frac{m_s}{V_t} \quad (2)$$

Quanto à porosidade total ou a porosidade de um solo, $\phi(\%)$, Klar (1988) apresentou a seguinte relação entre a densidade global (d_g) e a densidade de partículas do solo (d_p):

$$\phi(\%) = \left(1 - \frac{d_g}{d_p}\right) \times 100 \quad (3)$$

3.1.6. Propriedades hidrodinâmicas e térmicas do solo

3.1.6.1. Curva característica da água no solo ou curva de retenção

A relação entre o potencial de água no solo e a umidade do solo pode ser representada graficamente por uma curva que caracteriza o armazenamento de água pelo solo (RICHARDS, 1931; JALBERT&DANE, 2001).

Essa representação gráfica é chamada de curva característica do solo ou curva de retenção de água no solo. Em geral, a curva característica é também uma representação da função que correlaciona o volume de água dentro dos poros do solo e a energia necessária para extração dessa água pela ação de uma força de sucção (KLAR, 1988).

As curvas são diferentes para cada tipo de solo, pois está intimamente ligada à distribuição dos poros, que por sua vez está relacionada com pressão capilar. Solos arenosos apresentam poros maiores, que quando submetidos à sucção apresentam redução brusca da umidade. Em solos argilosos, o decréscimo da umidade é gradual, devido à redução dos poros e às forças iônicas entre partículas de solo e água (HILLEL, 1998).

Vários modelos foram desenvolvidos para descrever o comportamento da curva de retenção da água no solo (GARDNER, 1958; BROOKS & COREY, 1964; van GENUCHTEN, 1980; ZHANG & VAN GENUCHTEN, 1994). Dentre os mais citados na literatura estão:

a) Equação de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha h|^n]^{-m} \quad (4)$$

Com, $m = 1 - 1/n$; $n > 1$, Mualem (1976) e $m = 1 - 2/n$; $n > 2$, Burdine (1953),

Sendo:

S_e a saturação efetiva;

θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente;

$\alpha = 1/h_g$ a pressão de entrada de ar e

n e m parâmetros de forma.

b) Equação de Brooks e Corey (1964):

$$S_e = \left(\frac{h}{h_g}\right)^{-\eta} \quad (5)$$

Sendo

$S_e \leq 1$, e

η um parâmetro característico do solo, que indica a distribuição do tamanho dos poros (CHEN *et al.*, 1999).

3.1.6.2. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é um parâmetro hidrogeológico que expressa a facilidade com que o solo pode conduzir a água, correlacionando as características do meio, tais como, porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, e as propriedades do fluido que está escoando, em especial a viscosidade e a massa específica.

A principal diferença entre o escoamento em meio saturado e em meio não-saturado está na condutividade hidráulica. Em regime de saturação, o solo possui todos os poros preenchidos por água e conduzindo água, apresentando uma condição de condutibilidade máxima do fluido. No meio não-saturado os poros encontram-se preenchidos por água e ar decrescendo a condutividade hidráulica nesta situação. Assim, a condutividade hidráulica é variável em função da umidade do solo, atingindo seu valor máximo na saturação, onde é

chamada de condutividade hidráulica de saturação, K_s ou K_o . Quando sob a condição de não saturação, se obtém a função $K(\theta)$, a qual recebe o nome de condutividade hidráulica do solo não-saturado. Para meios porosos saturados ou não-saturados, a maior dificuldade na quantificação do fluxo está na determinação da condutividade hidráulica (PAULETTO *et al.*, 1988).

Os métodos de determinação direta da condutividade hidráulica dos solos podem ser classificados em métodos de laboratório e métodos de campo. Nos métodos de laboratório, podem ser utilizadas amostras com estrutura deformada ou amostras com estrutura indeformada. Nos métodos de campo, a perturbação do solo deve ser a mínima possível. Além disso, há outros métodos nos quais muitos pesquisadores, por causa de certas dificuldades envolvidas na medida direta da condutividade hidráulica, têm procurado calculá-la teoricamente, a partir de outras propriedades do meio poroso de fácil medida (LIBARDI, 2000).

Alguns dos métodos de laboratório são: permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga decrescente; e de campo são: método do furo do trado e método do perfil instantâneo. Estes métodos servem para determinar diretamente a condutividade hidráulica em solo não saturado e normalmente consomem tempo, são caros e algumas vezes, sujeitos a hipóteses simplificadoras. Uma alternativa de medida direta é o cálculo teórico da condutividade hidráulica, a partir de dados de retenção da água no solo, que é facilmente medida no campo ou no laboratório.

Dentre os modelos mais utilizados para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, destacam-se:

- a) Equação de van Genuchten (1980), com a hipótese de Mualem (1976):

$$K(S_e) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

Com a hipótese de Burdine (1953):

$$K(S_e) = K_s S_e^2 \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right] \quad (7)$$

- b) Equação de Brooks e Corey (1964), com a hipótese de Burdine ($\lambda = n-2$):

$$K(S_e) = K_s S_e^\eta \quad \text{sendo} \quad \eta = 3 + \frac{2}{\lambda} \quad (8)$$

Ou utilizando a hipótese de Mualem ($\lambda = n-1$):

$$K(S_e) = K_s S_e^{c-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

4. MATERIAL E MÉTODOS

Como o foco principal deste trabalho trata-se de analisar o comportamento de uma trincheira de infiltração como uma ação de mitigar o alagamento localizado em um lote bastante afetado pelo escoamento superficial decorrido das chuvas e a utilização de uma modelagem numérica desta trincheira, então a metodologia que foi utilizada neste trabalho foi para desenvolver o estudo mais detalhado da trincheira de infiltração.

4.1. Área de implantação da trincheira de infiltração

Após escolhido para implantação do dispositivo, a próxima fase foi a determinação de fatores importantes tais como: perfil do solo, curvas de infiltração, condutividade hidráulica saturada, facilidade de realização dos ensaios necessários a obtenção desses parâmetros, disponibilidade de aparelhos de medição já instalados na área, entre outros. Também deve-se levar em conta o fator primordial que é o objetivo do dispositivo, que é minimizar o alagamento, ou seja, a área que constantemente alagava durante o período chuvoso.

Como o alagamento na cidade do Recife é uma constante que encontra-se presente durante as chuvas, procurou-se pontos isolados que encontram-se nas imediações ou internamente na Cidade Universitária, após vários levantamentos, decidiram-se optar por duas áreas a escolher: uma no estacionamento do Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Pernambuco (HC/UFPE) e outra no pátio interno do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE). Entre estas duas escolheu-se a área do DEN (Figuras 4 e 5), devido a vários fatores: alagamento acentuado e localizado, proximidade do laboratório de Física dos Solos, facilidade da utilização de instalação dos aparelhos de medição com segurança, facilidade de deslocamento do bota fora durante a escavação, facilidade no transporte para o enchimento da trincheira.

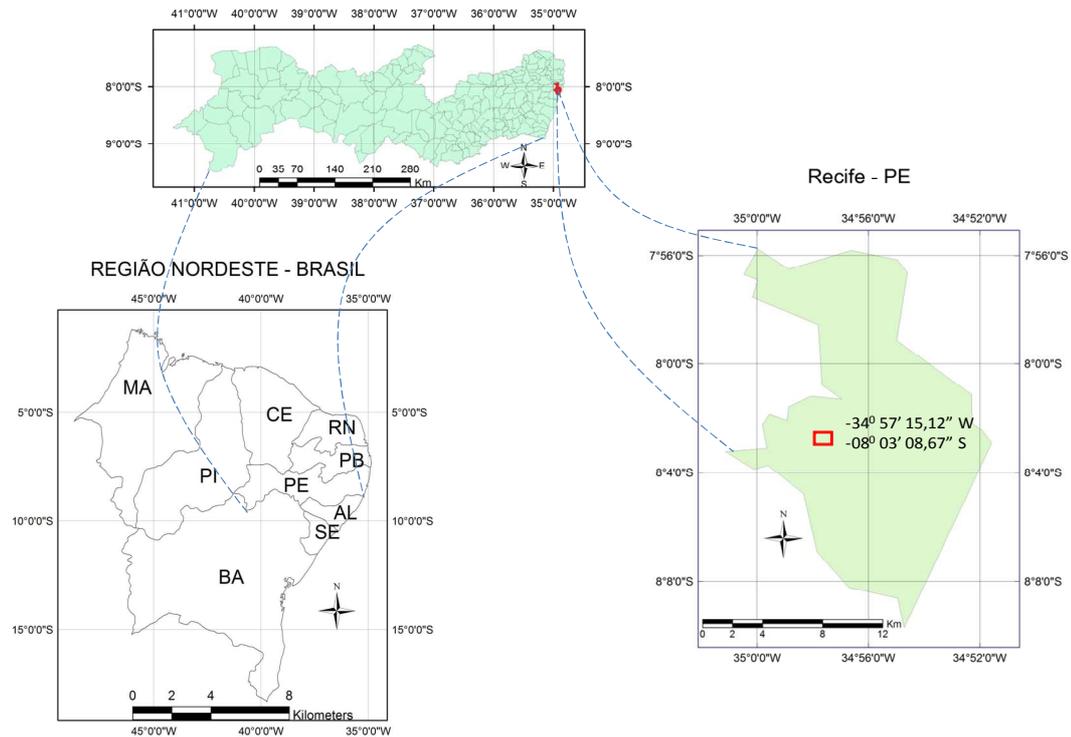


Figura 4 – Mapa do Nordeste, do Estado do Pernambuco e da Região Metropolitana do Recife (RMR)
Fonte: Coutinho (2011)



Figura 5 - Localização do experimento no Departamento de Energia Nuclear – UFPE

4.2. Projeto da trincheira de infiltração

Como forma de caracterizar e realizar a construção da trincheira de infiltração, seguiu-se para a fase de execução e instalação da trincheira, através da planta e corte com as dimensões e outros detalhes do dispositivo (Figuras 6 e 7).

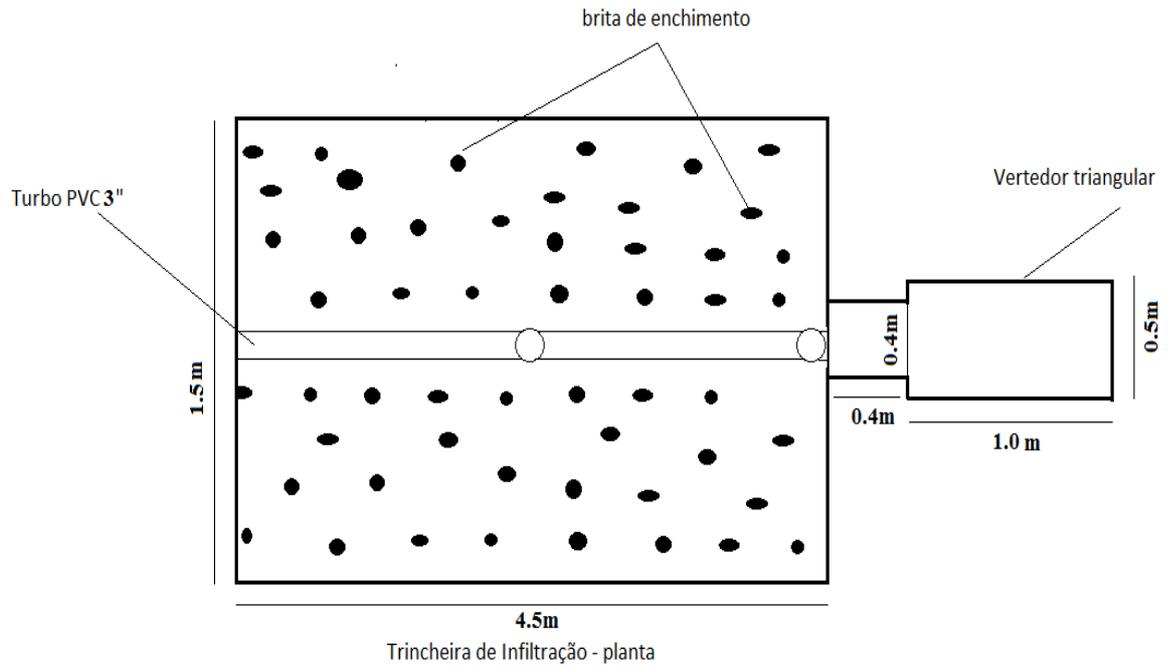


Figura 6 – Trincheira de Infiltração - Planta

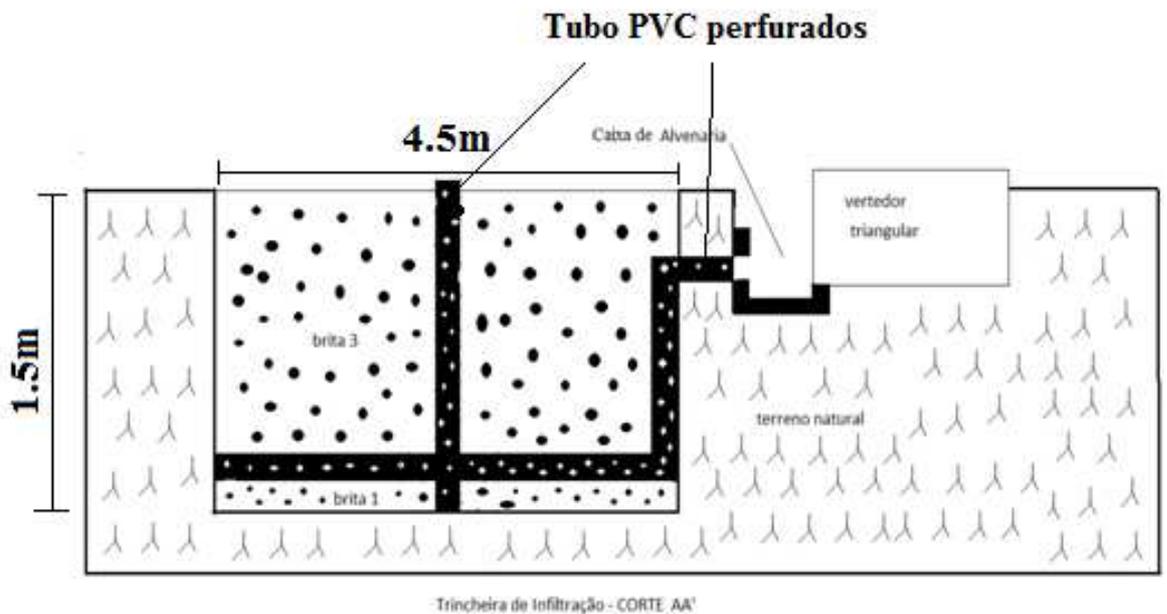


Figura 7 - Corte longitudinal da trincheira de infiltração

Fonte: Lima (2009)

4.3. Ensaios de laboratórios

Com a finalidade de fornecer subsídios para a instalação da trincheira e para determinar os aspectos físicos dos solos foram realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica do solo, massa específica dos solos, densidade das partículas sólidas, curva de

retenção de água no solo. Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Energia Nuclear.

4.4. Massa específica ou densidade do solo

Para determinar a massa específica do solo, de início foram coletadas amostras de camada do solo, da superfície, das camadas de 20 cm, 40 cm e 60 cm (Figura 8), as cápsulas de 7 cm de diâmetro e 6 cm de altura foram encaminhadas ao laboratório para seguir o procedimento: a) pesagem da cápsula vazia, b) pesagem da cápsula com a amostra do solo; c) as cápsulas foram levadas a estufa à uma temperatura de 100°C, durante um tempo de 24 horas; d) após a secagem, foram pesadas novamente e determinada a umidade do solo pela equação 10:



Figura 8 - Coleta de amostra para densidade dos solos

$$U(\%) = \left[\frac{(Mu - Ms)}{Ms} \right] \times 100 \quad ; \quad (10)$$

onde: Mu é a massa do solo úmido(g)

Ms é a massa do solo seco(g)

Determinada a umidade do solo, o próximo passo que é calcular o volume do cilindro através da equação 11:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad (11)$$

Onde: D é o diâmetro do cilindro (cm)

H é a altura do cilindro (cm)

Para calcular a densidade do solo de cada camada analisada, deve-se medir a massa do solo seco em cada amostra aqui definido como a diferença entre a massa da cápsula e a massa do solo seco na cápsula, então a massa específica ou densidade de cada camada é dada pela equação 12:

$$Dc = Ms/V \quad (12)$$

Onde: M_s é a massa do solo seco(g)

V é o volume da cápsula (cm^3)

4.4.1. Densidade das partículas do solo

Para a determinação da densidade das partículas do solo optou-se pelo Método do Balão Volumétrico (Figura 9), por ser rápido, fácil e de grande praticidade. Este método consiste em: 1) aferir o volume do balão volumétrico, pesar 20 g de Terra Fina Seca em Estufa (TFSE) e transferir para balão volumétrico de 50 mL; 2) colocar na bureta aferida com o balão e álcool etílico até a marca do zero; 3) colocar no balão com TFSE aproximadamente 25 mL de álcool; 4) agitar o balão durante 1 min para facilitar a penetração do álcool nos capilares do solo; 5) deixar repousar por 15 min e; 6) completar o volume do balão com álcool etílico, fazer a leitura do nível de álcool na bureta (L), o volume de TFSE será determina através da Equação 13:

$$V = 50 - L; \quad (13)$$

onde: V é o volume (mL)

L é o nível de álcool na bureta (mL)

A densidade das partículas será determinada pela equação 14:

$$dp = 20/V; \quad (14)$$

dp é a densidade das partículas (cm^3/g)

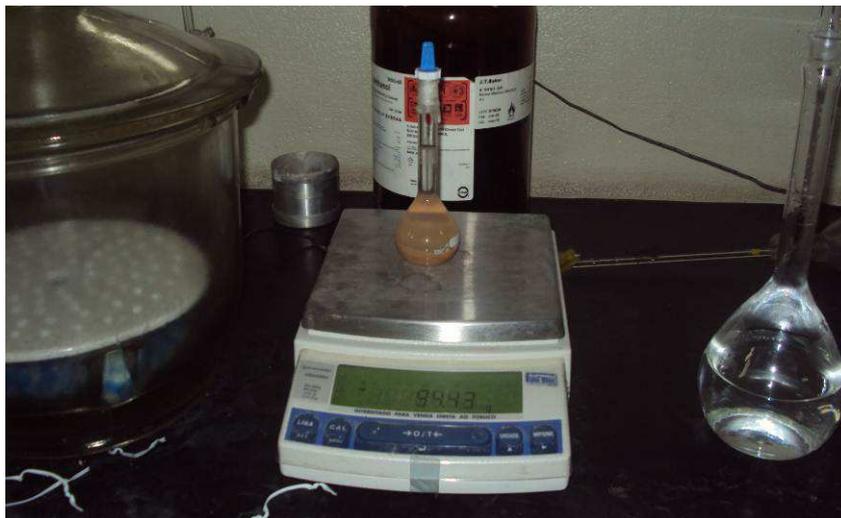


Figura 9 - Determinação da densidade das partículas pelo método do balão volumétrico

4.4.2. Porosidade da brita

Para a utilização no dimensionamento e para o enchimento da trincheira de infiltração com o material granular (brita) foi necessário calcular a porosidade da brita a ser utilizada. O

cálculo da porosidade de um solo é determinado pela relação entre o volume de vazios (volume de água + volume de ar) e o volume total do solo.

A porosidade da brita foi determinada da seguinte maneira: 1) obteve-se um recipiente definido segundo sua geometria regular de tal maneira que se pudesse calcular o volume do recipiente; 2) preencheu de brita totalmente até o limite superior do sólido representante deste recipiente; 3) preencheu de água até o limite superior do recipiente. A porosidade foi determinada através da relação do volume de água despejado dentro do recipiente e o volume total do recipiente (Figura 10) através da equação 15:



Figura 10 - Determinação da porosidade da brita

$$n_b(\%) = \left[\frac{V_a}{V_r} \right] \times 100 \quad (15)$$

onde: n_b é a porosidade da brita(%)

V_a é o volume da água no recipiente (cm^3)

V_r é o volume do recipiente-cilindro (cm^3)

4.4.3. Análise granulométrica do solo

Este ensaio foi realizado no laboratório do Departamento de Energia Nuclear da UFPE (DEN/UFPE) e serviu para a caracterização dos solos, o método utilizado foi de sedimentação e peneiramento estabelecido na NBR 7181/84 –“Solo – Análise Granulométrica”. Foram retiradas amostras de solos para composição inicial do ensaio (Figura 11).



Figura 11 - Coleta de amostra para posterior análise granulométrica

O processo de sedimentação foi realizado no laboratório do DEN/UFPE (Figura 12) e foram determinadas conforme modo idêntico ao usado por Melo (2011) que seguiu o seguinte procedimento: 1) após definidas as frações de finos ou seja as partículas menores que 0,075 mm; 2) foram colocados 70 g de cada amostra de solo e misturado com 125 ml de hexametáfosfato de sódio (defloculante) com a finalidade de agilizar a lavagem; 3) foi agitado mecanicamente durante 10 min; 4) foram colocados em uma proveta e completadas com água destilada até atingir o volume de 1 litro para homogeneização; 5) foram realizadas leituras de temperatura e densidade através de densímetros e termômetros, essas leituras foram feitas após decorridos 1, 2, 4, 6, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos. O processo de peneiramento (Figura 13) seguiu-se o seguinte procedimento: 1) foram determinadas as porcentagens de partículas maiores que 0,075 mm; 2) as misturas utilizadas no processo de sedimentação foram lavadas em uma peneira com malha de fundo de 0,053 mm, para que os finos existentes nas amostras fossem removidos; 3) as amostras foram postas para secar em uma estufa; 4) foram colocadas em um peneirador mecânico de solos durante 15 min, neste equipamento, várias peneiras são empilhadas e presas a uma base vibratória do próprio equipamento. As malhas das peneiras utilizadas foram de 1,00; 0,5; 0,25; 0,106 e 0,053 mm.

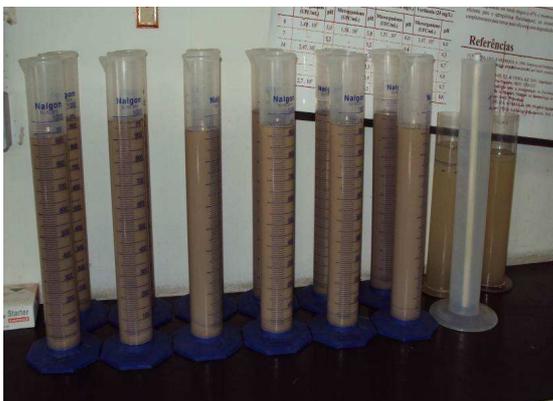


Figura 12 – Sedimentação



Figura 13 – Peneiramento

4.4.4. Propriedades hidráulicas do solo e infiltração

Realizaram-se ensaios de infiltração com anel simples de 15 cm de diâmetro. O método consiste em adicionar o volume de 70 ml de água e observa-se o tempo que o volume adicionado infiltra no solo por dentro do anel, anotando-se o tempo de cada medida despejada até que o tempo anotado para cada volume adicionado se torne constante.

Estes ensaios foram realizados desde a superfície até uma profundidade de 60 cm. Inicialmente antes de cada ensaio por camada, foram coletadas amostras para determinar a umidade inicial e final. Os ensaios realizados foram: à superfície, 20 cm, 40 cm e 60 cm.

Para iniciar os ensaios de infiltração, coletou-se amostra antes de cada ensaio para determinar a umidade inicial e após o ensaio, coletou-se amostra para determinar a umidade final (Figuras 14 e 15).



Figura 14 - Ensaio de infiltração à superfície Figura 15 - Ensaio de infiltração à 20 cm

Para a avaliação do coeficiente de escoamento, foram determinadas as propriedades hidráulicas do solo, ou seja, as curvas de retenção da água no solo $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$, para essa determinação foi empregado o método Beerkan, este método consiste de propriedades estáticas e dinâmicas do solo, como a curva de distribuição dos tamanhos das partículas e a curva de infiltração da água no solo, respectivamente, necessários para obter os parâmetros (n , η , θ_s , K_s e h_g). Os detalhes do método incluindo os dados necessários para a sua aplicação, como também os procedimentos necessários para os cálculos, foram apresentados por Lassabaté et al. (2006).

No método Beerkan, $\theta(h)$ e $K(\theta)$ são descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad \text{com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Burdine, 1953}) \quad (16)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (17)$$

Sendo θ a umidade volumétrica [$L^3 L^{-3}$];

θ_r e θ_s são as umidades volumétricas residual e saturada [$L^3 L^{-3}$], respectivamente;

h é o potencial matricial [L];

h_g [L] é um valor de escala de h ;

m e n são parâmetros de forma;

K_s é a condutividade hidráulica saturada do solo [$L T^{-1}$] e ;

η é o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Essas funções contêm cinco parâmetros desconhecidos: dois parâmetros de forma (m ou n e η) e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g). Os parâmetros de forma dependem principalmente da textura (HAVERKAMP *et al.*, 1998), enquanto os parâmetros de normalização resultam da estrutura dos solos. Obtiveram-se os parâmetros de forma e normalização usando-se o programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments) proposto por Lassabatère *et al.* (2006) (Anexo1).

Foram realizados ensaios com um infiltrômetro de anel simples de 15 cm de diâmetro e coletas de amostras de solo deformadas para determinação da curva granulométrica. Este teste fornece a infiltração tridimensional axissimétrica como uma função do tempo. Durante cada teste se coletaram, ainda, amostras indeformadas para determinação da densidade global do solo e das umidades inicial θ_0 e final θ_s . A análise granulométrica foi realizada utilizando-se o método da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984), o qual permite determinar os diâmetros das partículas mais finas (argila e silte) por sedimentação e as mais grosseiras (areia) por peneiramento.

4.5. Instalação da trincheira

A instalação da trincheira de infiltração foi realizada em 3 etapas: Projeto Construtivo, Dimensionamento e Execução.

4.5.1. Projeto construtivo

Na fase inicial do projeto construtivo da trincheira de infiltração, tinha a ideia que seria projetada para receber o volume de precipitação sobre uma área de contribuição de 200m², que dividia-se em duas partes: uma de um pátio com área de 140m² e outra de um telhado de 60m². No Projeto optou-se por não considerar o volume sobre a trincheira de infiltração por

ser desprezível conforme proposto por Lima (2009) o que não afeta a área de contribuição, no entanto direcionou-se o escoamento superficial do pátio para a trincheira (Figura 16) através de valas escavadas, já a água do telhado foi direcionado através de canaleta existente que conduz a água do telhado para a trincheira.



Figura 16 – Área de contribuição do escoamento superficial para a trincheira de infiltração

4.5.1.1. Determinação do Geotêxtil

Nesta fase tomou-se importante cuidado quanto a escolha e a utilização da manta de geotêxtil tipo bidim para a construção da trincheira de infiltração. O material granular (brita), deve ser envolvida por uma manta de geotêxtil, que tem vários aspectos importantes, entre os quais para evitar a colmatção (obstrução por finos), comprometendo totalmente a funcionalidade da trincheira (Silva,2007). A escolha da manta de Geotêxtil dependente de vários tipos de características, sejam elas hidráulicas, mecânicas, etc. Algumas características hidráulicas importantes são citadas, entre elas: 1) retenção 2) permeabilidade e 3) colmatção.

a) Critério da Retenção: Determina condições para que as partículas sejam retidas protegendo e estabilizando o solo, migrando partículas para a manta de geotêxtil.

b) Critério de Permeabilidade: Determina condições de capacidade de fluxo e permeabilidade alta para evitar inesperados acréscimo de poros-pressão no dispositivo drenante.

c) Critério da colmatção: duas condições são mais frequente:

- 1) Cegamento (formação de uma fina camada de solo sobre o geotêxtil)
- 2) Bloqueamento (obstrução das aberturas do geotêxtil, pelas partículas de solo)

Optou-se neste trabalho em escolher o tipo de Geotêxtil a ser empregado com base em características mecânicas, e foi escolhida a Manta Geotêxtil Bidim RT-08, por ser 100% poliéster com filamentos contínuos e resistência á tração longitudinal de 8 KN/m e resistência à tração transversal de 7 KN/m (Figura 17).



Figura 17 - Manta Geotêxtil Bidim RT-08 utilizada na trincheira de infiltração

4.5.2. Dimensionamento da trincheira

Este trabalho foi realizado pelo método da curva-envelope ou envelopamento da chuva, este método utiliza a altura máxima específica (DHmax) para determinar o volume a armazenar de modo que não haja o transbordamento da trincheira. A trincheira foi dimensionada para um tempo de retorno de 2 anos ($Tr=2$ anos).

4.5.2.1 .Intensidade de precipitação

Altura precipitada por unidade de tempo foi determinado através da relação intensidade – duração – frequência (IDF).

Utilizou-se neste trabalho a equação proposta por Ramos & Azevedo (2010), que propuseram uma equação IDF para a Região Metropolitana do Recife (RMR), (Equação 18), cuja característica e embasamento principal foi a utilização de dados do posto localizado no Aeroporto Internacional dos Guararapes em Recife. Essa equação foi baseada em um período de 40 anos de dados (1968 – 2007), apresentando poucos erros e falhas em seus registros.

$$i = \frac{1423,97Tr^{0,1124}}{(t+21)^{0,7721}} \quad (18)$$

Onde: Tr é período de retorno (anos),

t é a duração da chuva (min) e

i é a intensidade de precipitação em (mm/h).

4.5.2.2. Volumes de entrada

Os volumes de entrada foram determinados a partir do Método Racional, método este aplicados a pequenas bacias hidrográficas, com área inferior ou igual a 2 km². O método tem como finalidade transformar a intensidade de precipitação (mm/h) em vazão (m³/s).

Para melhor avaliar essa metodologia de transformação da precipitação em vazão, deve-se considerar a duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração e não considerar o volume de cheia, nem a distribuição temporal das vazões (TUCCI, 2009).

$$Q = \frac{C.I.A.10^{-3}}{3600} \quad (19)$$

Onde: Q representa a vazão máxima (m³/s);

C é o coeficiente de escoamento;

I é a intensidade da precipitação (mm/h) e

A é a área da bacia (m²).

O coeficiente de escoamento leva em conta vários fatores entre os quais podemos citar: tipo de pavimento, cobertura vegetal, tipo de superfície, tipo de ocupação do solo, etc. Baseado nessas informações foi utilizada a Tabela 3 da American Society of Civil Engineers (ASCE, 1969).

De acordo com a Tabela 2, os valores para a cobertura do tipo telhado e tipo calçadas que se enquadram entre (0,75 – 0,95), optou-se por utilizar o valor médio 0,85 que é o valor recomendado em cálculos, sendo assim, o valor adotado neste trabalho para o coeficiente de escoamento.

Tabela 2 -Valores do coeficiente de escoamento (C) baseado no tipo de superfície.
Fonte – Adaptado de ASCE, 1969

SUPERFÍCIE		CONSIDERAÇÕES	
		INTERVALO	VALOR ESPERADO (VALOR MÉDIO)
Pavimento	asfalto	0,70 – 0,95	0,83
	concreto	0,80 – 0,95	0,88
	calçadas	0,75 – 0,85	0,80
	telhado	0,75 – 0,95	0,85
Cobertura: grama, arenoso	plano (2%)	0,05 – 0,10	0,08
	médio (2 a 7%)	0,10 – 0,15	0,13
	alta (7%)	0,15 – 0,20	0,18
Gramma, solo pesado	plano (2%)	0,13 – 0,17	0,15
	médio (2 a 7%)	0,18 – 0,22	0,20
	declividade alta (7%)	0,25 – 0,35	0,30

O resultado obtido por esse método fornece valores em m³/s (vazão), porém para calcular o volume de entrada em litros realizou-se a transformação de m³ para litros (Equação 20).

$$V_E = Q \cdot t \quad (20)$$

Onde: V_E é o volume de entrada (m³);

Q é a vazão máxima (m³/s) e,

t é o tempo (s).

4.5.2.3. Volumes de saída

O volume de saída da camada de brita que corresponde a quantidade de água que sai da trincheira de infiltração e se infiltra no solo. Sua determinação tem como base a lâmina d'água acumulada, de acordo com o teste de infiltração e, o comportamento das águas infiltradas no dispositivo.

O volume na camada de armazenamento foi obtido pela diferença entre o volume que entrou e que saiu do sistema (Equação 21)

$$V_A = V_E - V_S \quad (21)$$

Onde: V_A é o volume de armazenamento (L);

V_E é o volume de entrada (L) e ;

V_S é o volume de saída (L).

O volume de saída é representado pelo produto da infiltração acumulada pela área da base do dispositivo (Equação 22)

$$V_S = A_I \times I_A \quad (22)$$

Onde: V_S é o volume de saída (L),

A_I é a área de infiltração (m²) e,

I_A é a infiltração acumulada (m).

A variação no armazenamento pode ser também ser expressa pelas dimensões do dispositivo e a porosidade do material granular (brita) (Equação 23).

$$V_A = B \times L \times H_b \times \eta_b \quad (23)$$

Onde: V_A é o volume de armazenamento (m³),

B e L são as dimensões de largura e comprimento da base do dispositivo (m),

H_b é a altura da camada de brita (m) e,

η_b é a porosidade da brita(%).

4.5.3. Execução da Trincheira de Infiltração

Antes de proceder as etapas de execução, preparou-se o local para receber o material a ser empregado na construção da trincheira: tijolos, brita e areia. A execução da trincheira foi realizada em 3 etapas: escavação, preenchimento e acabamento.

4.5.3.1. Escavação

A escavação foi realizada manualmente, pois o local não apresentava condições que permitisse a escavação com retro-escavadeira (Figura 18). Durante a escavação foi constatado a presença de raízes nas paredes laterais da trincheira de infiltração.



Figura 18 - Escavação manual da trincheira

4.5.3.2. Preenchimento

Após a escavação, preparou-se os tubos de PVC para o sistema de alimentação interna da trincheira. Em seguida recobriu-se com manta geotêxtil do tipo Bidim em todas as faces e no fundo da trincheira, evitando rasgos eventuais na manta, principalmente em contato com a brita (Figura 18). No fundo da trincheira colocou-se 10 cm de brita de graduação inferior (brita nr 1), para amortecer e receber a brita de graduação maior (brita nr 3), cuja finalidade era evitar que a alimentação concentrada provocasse erosão localizada no fundo da trincheira de infiltração.

Os tubos de PVC de 75 mm de diâmetro foram perfurados com espaçamentos iguais entre si, e recobertos com a manta Geotêxtil Bidim RT-08 para evitar a entrada de finos (pó de brita).

Durante a colocação da brita na trincheira tomou-se o cuidado para que todo o material estivesse limpo a fim de evitar a colmatação inicial devido aos finos presentes na brita.



Figura 19 - Preenchimento da trincheira de infiltração com brita

Para ter uma visualização mais precisa de como a trincheira foi construída, optou-se em mostrar o corte longitudinal da trincheira em seus detalhes nas camadas e tubos de PVC (Figura 6), bem como da caixa de alvenaria para o amortecimento da queda d'água proveniente do vertedor e também do próprio vertedor.

O poço de observação ilustrado na figura 18 foi construído com tubo de PVC de 75 mm, perfurado em pontos equidistantes. Este poço é para permitir a medição do nível de água na trincheira através de sensores de níveis (Figura 24).

4.5.3.3. Acabamento

Após o fechamento da trincheira ou envelopamento, colocou-se o plástico de cobertura e uma camada de solo natural acima da brita como proteção mecânica (Figura 19).



Figura 20 - Cobertura com uma camada de brita para proteção mecânica

Sinalizou-se a trincheira de infiltração com tijolos restantes da construção da caixa de acoplamento do vertedor, para que ficasse visível aos transeuntes que no local existia uma trincheira de infiltração.

4.6. Monitoramento e instrumentação de medição dos parâmetros

4.6.1. Vazão de entrada

Optou-se em determinar a vazão de entrada a partir da leitura do nível de água do vertedor triangular delgado com ângulo de abertura de 90° . A metodologia de construção utilizada foi semelhante a de Lima (2009), foi construído um vertedor de chapa de alumínio com 5 mm de espessura e dimensões 1 m de comprimento; 0,50 m de largura e 0,30 m de altura (Figura 21).

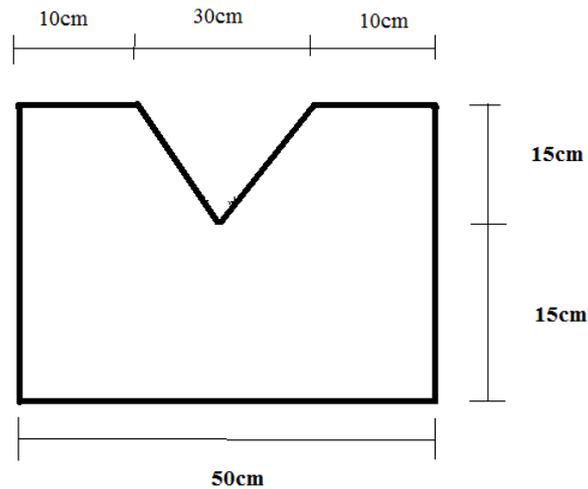


Figura 21 – Desenho - vista frontal do vertedor

Foram construídas paredes de alvenaria circundante para evitar o tombamento das paredes devido a pressão da água e o empuxo de terra, devido ao escoamento superficial direcionado e a precipitação que incide diretamente no vertedor. (Figuras 22 e 23).



Figura 22 - Construção da caixa do vertedor



Figura 23 – Instalação do vertedor

4.6.2. Nível de água no interior da trincheira

A água que entra na trincheira foi proveniente do escoamento superficial que vem do pátio interno do DEN e das águas do telhado por meio das canaletas. Antes de percorrer o interior da trincheira, a água escoava para o vertedor, logo após, deságua em caixa de alvenaria que serve para amortecer a queda d'água vinda do vertedor e é canalizada pela tubulação de acesso à trincheira, cuja finalidade é alimentar a mesma.

O nível de água no interior da trincheira é medido por um sensor de nível que foi colocado a uma profundidade de 1,65 m, sua montagem constituiu de uma corrente com o sensor de nível em uma das extremidades, próximo ao fundo da trincheira, e a outra extremidade fixo a um CAP de PVC especialmente construído, próximo a superfície do terreno (Figura 24).



Figura 24 – Sensores de níveis usados no monitoramento.

Os sensores de nível foram calibrados através do programa Solinst Levelogger Software que acompanha o sensor e foram testados em um recipiente de plástico contendo água.

Como o balde (recipiente em forma de tronco de cone) já veio preparado com as medidas marcadas nele, facilitou muito o procedimento de calibração, de tal forma que: no balde foi colocado o sensor próximo ao fundo, despejou-se cinco medidas de 5 litros, com intervalos de 3 min, e marcou-se a altura de cada medida no balde através de uma fita métrica e comparou-as com as medidas efetuadas com o sensor, observando a variação ocorrida entre elas. Logo após essas cinco medidas conectou-se o sensor de nível no computador e com base nestas medidas fez-se o ajuste. O sensor foi ajustado para medir intervalos de tempo de 1 em 1 min. Esse procedimento foi realizado para os demais sensores de níveis (1 para poço do lençol freático e 1 para vertedor e 1 para a trincheira de infiltração).

4.6.3. Nível de água no interior do Vertedor

Após a construção do vertedor foi colocado um tubo de PVC perfurado com espaçamentos iguais preso por dois suportes de madeira, de modo que funcione como tranquilizador do fluxo d'água, neste tubo de acesso foi instalado um sensor de nível para medir o nível de água que o vertedor recebe tanto pela chuva direta como pelo escoamento superficial direcionado (Figura 25).



Figura 25 - Sensor de nível instalado no vertedor

Para o cálculo da vazão de escoamento superficial no vertedor foi utilizada a fórmula de Thomson (Equação 24), recomendada para vertedor triangular de parede delgada (Azevedo Netto, 2005).

$$Q = 1,4(Hv)^{\frac{5}{2}} \quad (24)$$

Onde Q é a vazão em m^3/s e,

H é a altura em metros (Figura 24).

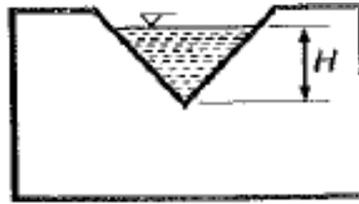


Figura 26 - Detalhamento da altura H para o cálculo da vazão em vertedor triangular

4.6.4. Poço de observação do lençol freático

A profundidade deste poço de observação é de 2,38 m e cuja finalidade destas medidas era o acompanhamento do nível do lençol freático imediatamente após as chuvas diárias. Logo após a construção da trincheira, o nível d'água do lençol freático foi medido manualmente por uma vareta que era introduzida, verticalmente, no piezômetro do poço que já existia na entrada do laboratório de solos a uma distância do vértice mais próximo da trincheira aproximadamente uns 3 metros em linha reta, e que esta medida era feita uma vez ao dia as 09:00 h da manhã.

Após a aquisição dos sensores de níveis, o monitoramento que antes era realizado manualmente (coleta de medidas uma vez ao dia em hora determinada), passou a ser automático (medidas registradas no sensor de 1 em 1 min).

4.6.5. Medição da chuva

Inicialmente o monitoramento da precipitação pluviométrica foi realizado numa escala de tempo diária com a utilização de um pluviômetro tipo Ville de Paris (Figura 26), então este pluviômetro foi instalado junto a trincheira e coletou-se as quantidades de chuvas diariamente, a coleta das medidas foram realizadas todo dia às 09:00 h (Figura 26).



Figura 27 - Pluviômetro Ville de Paris



Figura 28 - Pluviômetro Automático

A partir do dia 17/06/2014 foi instalado um pluviômetro automático que permitiu o monitoramento mais preciso da precipitação pluviométrica (Figura 27).

4.7. O Modelo Hydrus

O Hydrus é um programa computacional que simula a dinâmica da água, o transporte de calor e de solutos em solos saturados e não saturados, cultivados ou não. Resolve numericamente as equações de Richards e do transporte de soluto, com o uso de elementos finitos, e inclui modelagem inversa para estimar os parâmetros hidráulicos e de transporte (Alves, 2009).

A rotina para a dinâmica da água em um meio poroso unidimensional, isotérmico, parcialmente saturado é descrito por uma forma modificada da Equação de Richards (Equação 25), pelo qual não se considera os efeitos da fase gasosa e do gradiente térmico no fluxo da água.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (25)$$

Onde h é o potencial mátrico da água no solo (L);

θ é a umidade volumétrica da água ($L^3 L^{-3}$);

t é o tempo (T);

x é a coordenada espacial (L);

S é um termo de sumidouro ($L^3 L^{-3} T^{-1}$);

α é o ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical (ou seja, $\alpha=0^\circ$ para fluxo vertical; $\alpha=90^\circ$ para fluxo horizontal) e $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para fluxo inclinado.

As propriedades hidráulicas de um solo não saturado, $\theta(h)$ e $K(h)$, são de maneira geral funções não lineares do potencial mátrico ou da umidade volumétrica. O programa HYDRUS-1D permite o uso de 5 modelos analíticos para as propriedades hídras: Brooks e Corey (1966); van Genuchten (1980); Vogel e Cislerová (1988), Kosugi (1996); e Durner (1994). Optou-se aqui utilizar o modelo de van Genuchten (1980).

4.7.1. Hipóteses e considerações adotadas nas simulações numéricas utilizando o Hydrus 1-d

Para a simulação hidráulica do escoamento superficial da trincheira de infiltração, utilizou-se como condições de contorno na fronteira superior as condições atmosféricas. Na condição de fronteira inferior foram utilizadas as condições de drenagem livre e de presença do lençol freático.

No tocante a fronteira superior sujeita as condições atmosféricas foi utilizada como variável uma série de precipitação pluviométrica diária para a cidade do Recife para a estação LAMEPE/ITEP da APAC/LAMEPE para o ano de 2011. A evaporação foi desprezada, sendo este procedimento também utilizado por COUTINHO (2011).

Utilizando o HIDRUS 1- D e 2- D foram simulados os seguintes aspectos:

- Verificação do efeito da discretização numérica nos resultados da simulação. Essa etapa apresenta a importância de se economizar tempo durante as simulações. As características hidrodinâmicas do solo utilizada nesta simulação são as mesmas do módulo experimental instalado para o desenvolvimento desta dissertação.
- O modelo Hydrus não apresenta a possibilidade da utilização de brita, cascalho ou qualquer outro material com diâmetro das partículas superior ao de uma areia grossa. Para suprir essa deficiência, foi utilizada no programa uma camada de areia com porosidade igual a da brita utilizada no experimento.
- Para todos os casos, o modelo adotado para descrever as propriedades hidráulicas do solo foi o de van Genuchten (1980).
- Foram também realizadas a comparação do desempenho hidráulico da trincheira de infiltração com uma situação anterior a implantação da trincheira onde apenas existia o solo natural. Para esses casos, foram testadas as condições de contorno inferior de: a) drenagem livre, caso do lençol freático muito distante da camada de reservatório e b) condição de potencial constante e nulo na base do perfil, caso da presença do lençol freático na base do perfil.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização Hidráulica da trincheira de infiltração

Este item trata-se das características hidráulicas da trincheira de infiltração, onde foram determinadas a curva granulométrica do solo e as curvas de infiltração, cujos resultados são necessários para o dimensionamento e para a viabilidade da construção da trincheira.

5.1.1. Análise Granulométrica

A classificação textural do solo urbano onde foi implantada a trincheira de infiltração são apresentadas na Tabela 3 e no Gráfico 1. Observa-se que o perfil de solo apresenta um maior percentual da fração areia e que a mesma diminui com a profundidade. A maior proporção de areia poderia indicar uma boa capacidade de infiltração e também um indicador da viabilidade de implantação para a trincheira de infiltração, no entanto, é necessário compatibilizar a informação textural com as propriedades hidráulicas.

Tabela 3 - Textura e Classificação textural para o solo de implantação da área de estudo

Camada (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação textural
0 - 10	5,86	8,22	85,92	Areia
10 - 20	11,68	9,20	79,12	Areia Franca
20 - 30	11,72	12,24	76,04	Areia Franca
30 - 40	14,07	22,11	63,82	Fr. Arenoso
40 - 50	23,45	33,24	43,31	Fr. Arenoso
50 - 60	23,45	32,76	43,79	Fr. Arenoso
60 - 70	17,59	20,37	62,04	Fr. Arenoso
70 - 80	19,93	13,29	66,78	Fr. Arenoso
80 - 90	23,45	21,12	55,43	Fr. Arenoso
90 - 100	25,79	25,11	49,10	Fr. Arenoso

Observando a curva granulométrica (Gráfico 1) nota-se que em todas as camadas há uma grande quantidade de grão entre o 0,02 mm e 1,0 mm, o que caracteriza a areia (fina e grossa), e em menor porção grão de dimensões entre 0,002 mm e 0,02 mm, o que caracteriza silte, o que podemos concluir do Gráfico 1 que o terreno em estudo se apresenta como um solo FRANCO ARENOSO.

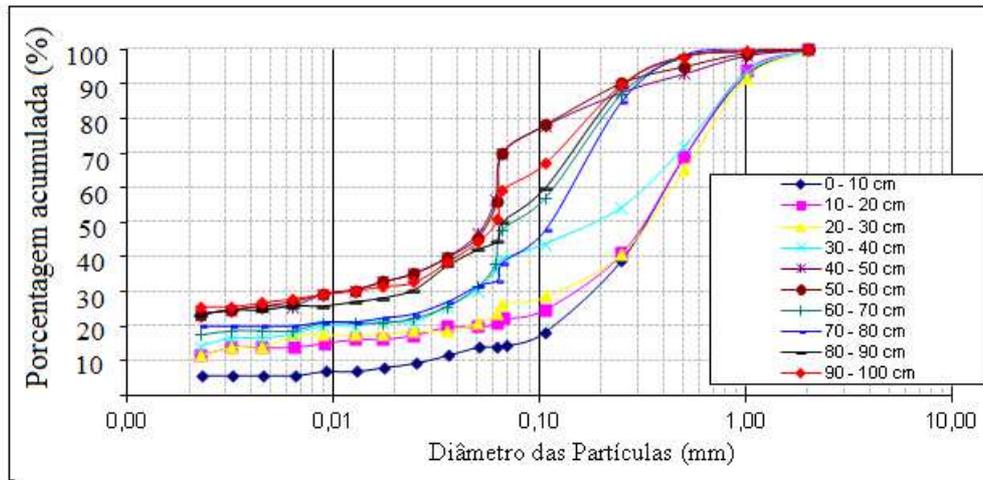


Gráfico 1 - Curva granulométrica para o solo natural da trincheira de infiltração

5.1.2. Análise dos ensaios de infiltração

Pode-se observar que no Gráfico 2, a infiltração acumulada chegou a 120 mm em um tempo de 6000 s para a superfície, atingiu uma infiltração acumulada de 45 mm em um tempo de 15.000 s para a camada de 20cm; uma infiltração acumulada de 130 mm em um tempo de 3.700 s para a camada de 40 cm e alcançou uma infiltração acumulada de 70 mm em um tempo de 5.800 s para a camada de 60 cm.

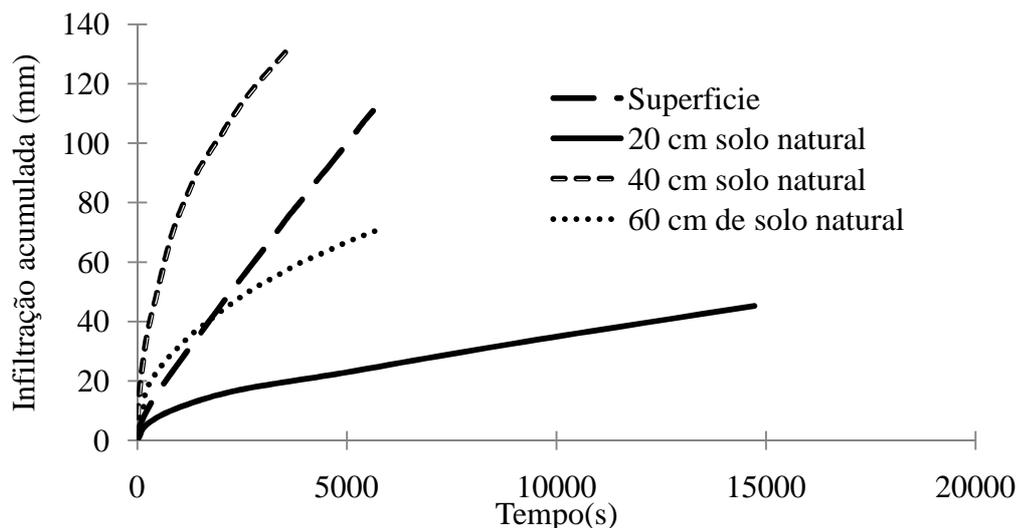


Gráfico 2 - Infiltração acumulada para a superfície, 20 cm, 40 cm e 60 cm do solo natural. Local de implantação da trincheira de infiltração

A taxa de infiltração chegou a menos de 0,02mm/s após um 250s (Gráficos 3) para a superfície, atingiu uma taxa de infiltração de 0,002mm/s após o tempo de 2500s (Gráfico 4) para a camada de 20 cm, atingiu uma velocidade de infiltração de 0,00001mm/s após o tempo

de 250s (Gráfico 5) e alcançou uma velocidade de infiltração de 0,000001 mm/s em um tempo de 780s (Gráfico 6). Da análise dos gráficos da infiltração acumulada e da taxa de infiltração pode-se concluir que o solo estava inicialmente seco e sua velocidade de infiltração decresceu com o decorrer do tempo.

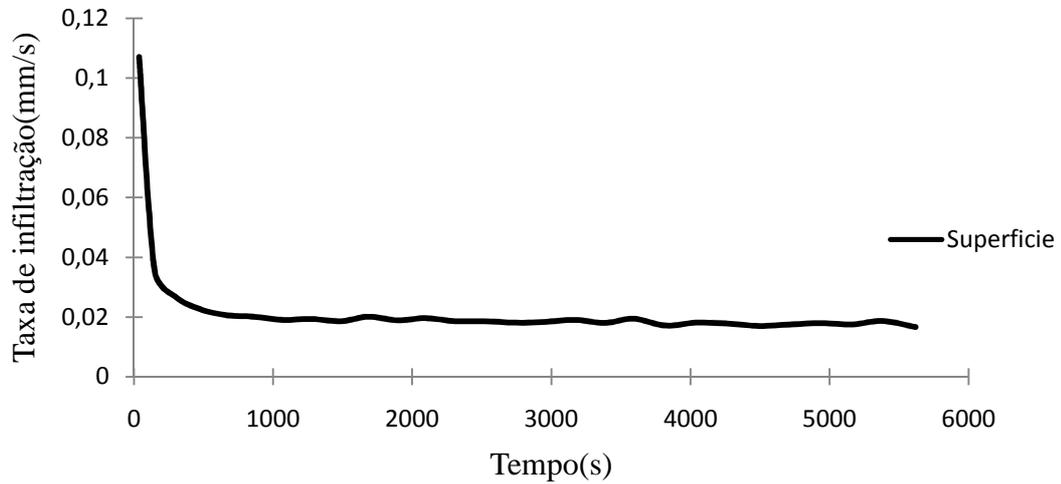


Gráfico 3 - Taxa de infiltração para a superfície do solo natural

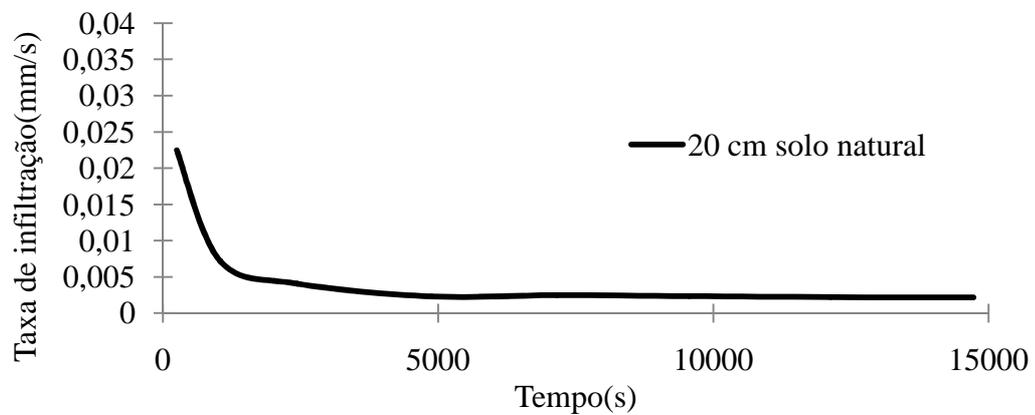


Gráfico 4 - Taxa de infiltração para a camada de 20 cm do solo natural

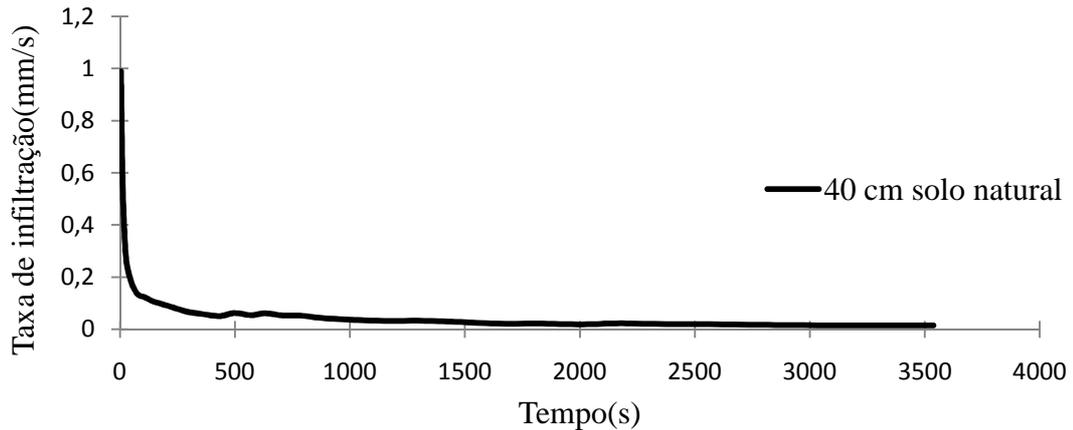


Gráfico 5 - Taxa de infiltração para a camada de 40 cm do solo natural

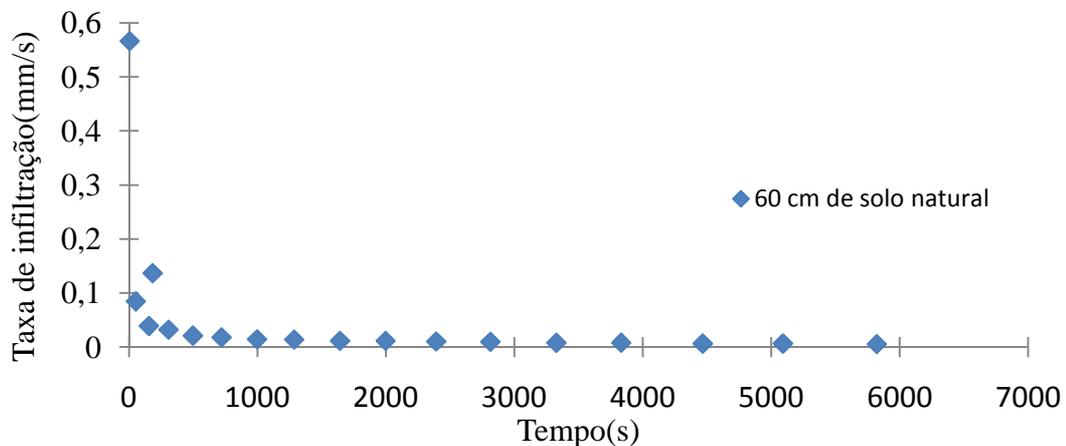


Gráfico 6 - Taxa de infiltração para a camada de 60 cm do solo natural

5.2. Parâmetros Hidráulicos do solo natural e da trincheira de infiltração

Aqui foram caracterizados os parâmetros hidráulicos do solo natural e da trincheira de infiltração, com a determinação da curva de retenção utilizando a Equação de van Genuchten com a hipótese de Burdine e ajustando pelo Hydrus com a hipótese de Mualem.

5.2.1. Estimativa pelo método BEST

5.2.1.1. Curva de retenção (Equação de van Genuchten) – Burdine

Observa-se que a umidade volumétrica saturada varia a partir da superfície até a camada de 60 cm de 16,76%. A umidade volumétrica residual para a hipótese de Burdine foi considerada nula. O parâmetro de forma n varia de 0,73%. O fator de forma m variou de 7,5% e o η variou de 7,15%. Os parâmetros que apresentaram maior variabilidade foram a condutividade hidráulica com uma variação de 57,72% e o comprimento capilar, que apresentou uma variação máxima de 401,32% (Tabela 4 e 6).

Tabela 4 - Parâmetros da curva de retenção (hipótese de Burdine)

Camadas	$\Theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\Theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	n	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	m
superfície	0,4880	0,00	2,194	0,4149	0,0884
20cm	0,5400	0,00	2,183	0,4403	0,0842
40 cm	0,5471	0,00	2,155	0,1976	0,0721
60 cm	0,5698	0,00	2,210	0,1033	0,0950

A condutividade hidráulica saturada classifica hidrologicamente o solo urbano do local de implantação da trincheira em solos do tipo A para quase todo o perfil do terreno ($K_s > 7,6$ mm/h) conforme Tabela 5. Essa condição só não é atendida para a camada de 20 cm a qual está classificada como um solo do tipo B (K_s entre 3,6 e 7,6 mm/h).

Tabela 5 - Classificação hidrológica em função da condutividade hidráulica saturada (RAWLS *et al.*, 1992).

Classificação Hidrológica	Condutividade Hidráulica Saturada(K_s) (mm/h)
GRUPO A	$K_s > 7,6$
GRUPO B	$3,8 < K_s < 7,6$
GRUPO C	$1,3 < K_s < 3,8$
GRUPO D	$0 < K_s < 1,3$

Essa classificação está coerente com as frações granulométrica do solo do local (Gráfico 1 e Tabela 3), onde foi observado a existência de uma predominância da textura do tipo areia. Para Tucci (2005), solos com classificação hidrológica do SCS (Soil Conservation Service) são predominantemente arenosos. Além disso, segundo Azzoutet *al* (1994), uma condição necessária para a implantação de dispositivos de infiltração é a existência de solos com classificação hidrológica do SCS do tipo A e com condutividade hidráulica saturada superior a 8 mm/h.

Tabela 6 - Parâmetros da curva de retenção (hipótese de Burdine)

Camadas	$k_s(\text{mm/h})$	$S(\text{mm} \cdot \text{s}^{-0,5})$	hg(mm)	η	cp	hg(cm)
superfície	41,148	0,46720	24,10	13,2700	2,34	2,41
20cm	6,5124	0,19031	22,71	13,8722	2,32	2,27
40 cm	63,144	0,90590	50,60	15,8765	2,44	5,06
60 cm	23,7492	0,76590	96,72	12,3200	2,28	9,67

5.2.2. Curva de retenção (Equação de van Genuchten) – Mualem

A utilização do Modelo Hydrus necessita que os parâmetros da curva de retenção estejam calculados para a hipótese de distribuição dos poros de Mualem (1976). Na Tabela 7 apresentaram-se os parâmetros já transformados da hipótese de distribuição dos poros que é fornecida pelo BEST [hipótese de Burdine (1964)] para a hipótese de distribuição dos poros de Mualem.

Tabela 7 - Parâmetros da curva de retenção com a hipótese de Mualem (1976) para as camadas da superfície, 20cm, 40cm e 60 cm do solo natural do local de implantação da trincheira de infiltração.

Camadas	$\Theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\Theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	n	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	m
Superfície	0,01893	0,49348	1,2200	0,32206	0,1803
20cm	0,01600	0,54630	1,2052	0,35300	0,1702
40 cm	0,02880	0,55110	1,1814	0,14960	0,1535
60 cm	0,02590	0,57460	1,2483	0,75700	0,1989

Os resultados gráficos do efeito da curva de retenção quando ajustados das hipótese de Burdine para a de Mualem (1976) são demonstrados nos Gráficos 7,8,9 e 10. Observa-se uma leve subestimativa da umidade de saturação para a superfície e para a camada de 20 cm. Uma maior dificuldade de ajuste foi notada para a camada de 40 cm a partir do potencial de 10 cmH₂O. De uma maneira geral, a mudança de hipótese de distribuição dos poros apresentou boa qualidade como pode ser notado nos Gráficos 7,8,9 e 10.

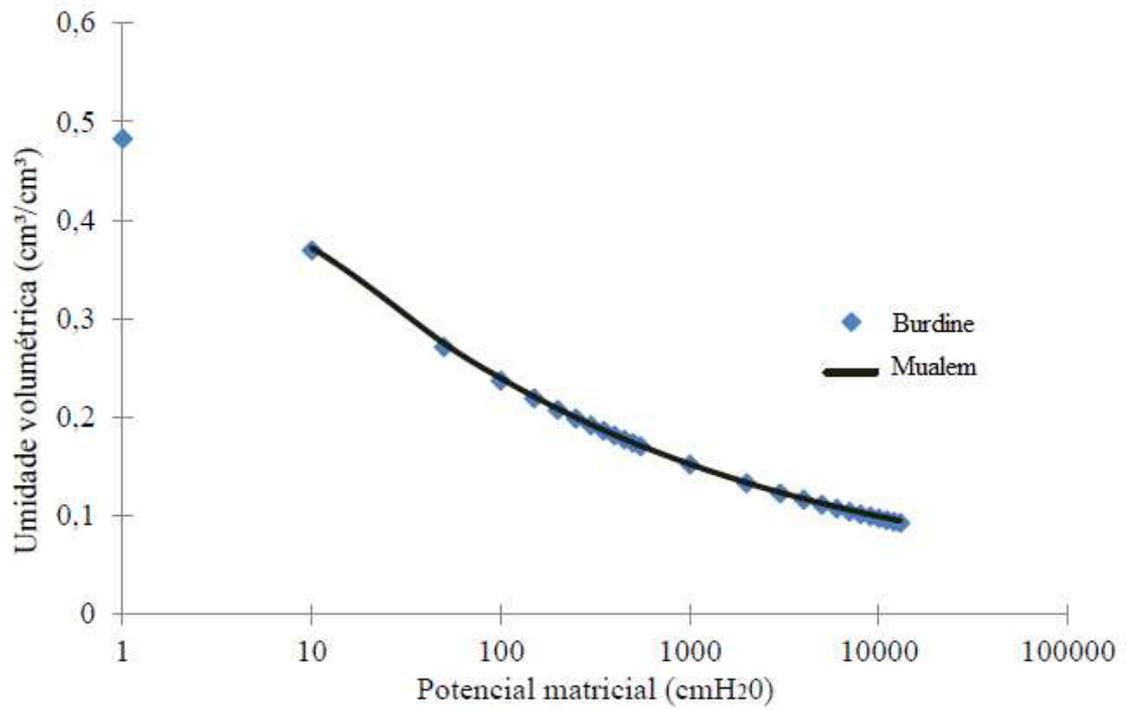


Gráfico 7 - Curva de retenção- superfície (Burdine e Mualem)

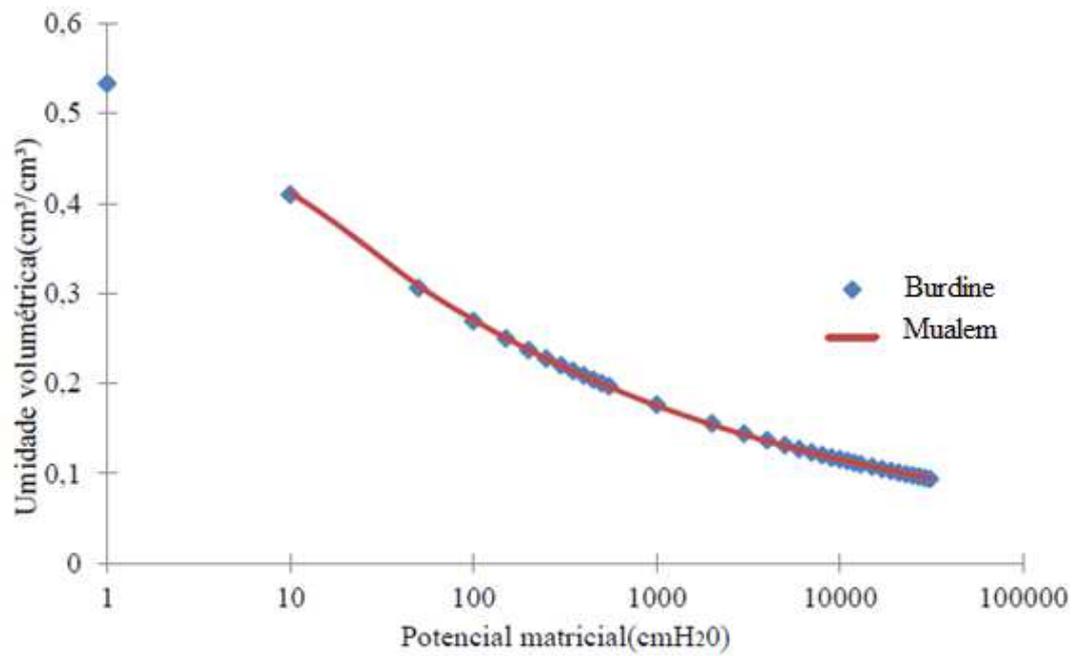


Gráfico 8 - Curva de retenção- 20cm (Burdine e Mualem)

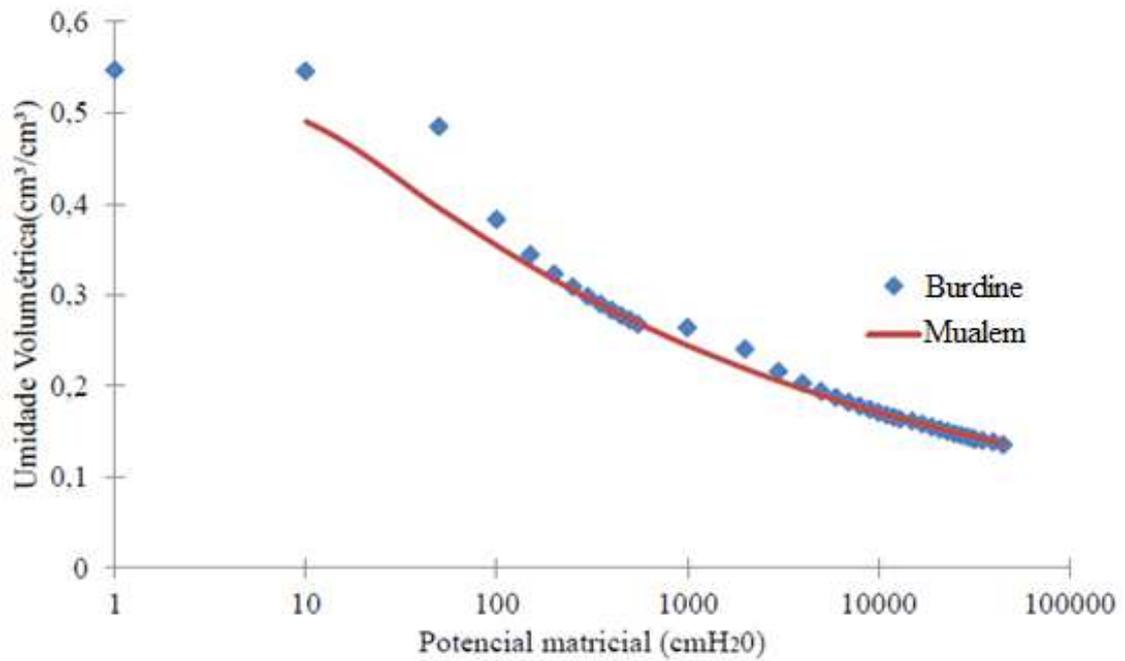


Gráfico 9 - Curva de retenção- 40cm (Burdine e Mualem)

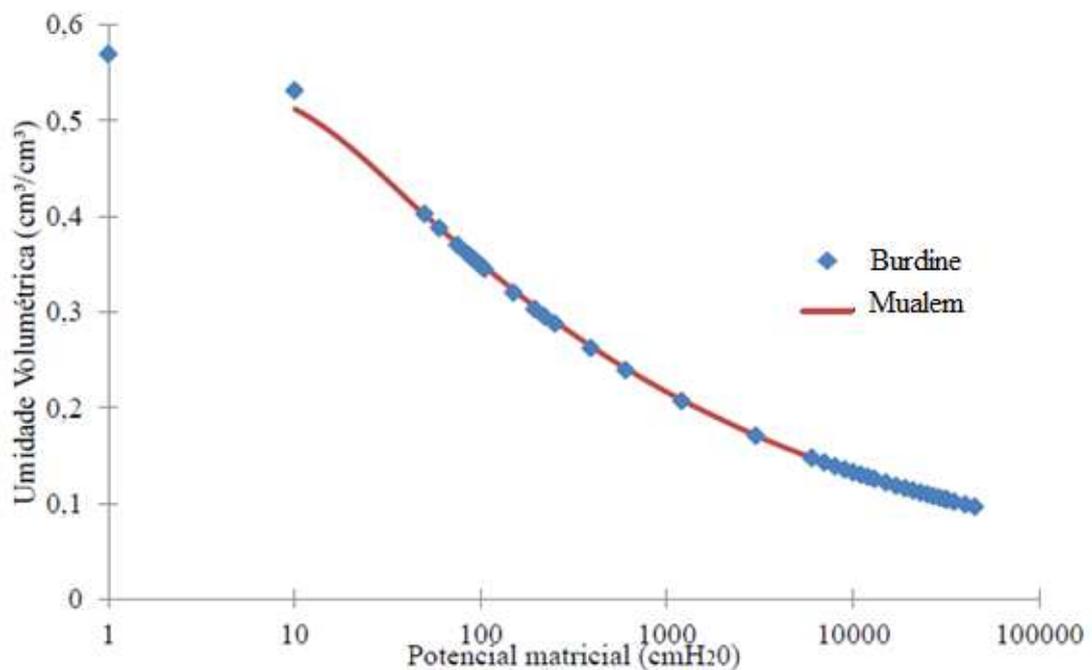


Gráfico 10 - Curva de retenção- 60cm (Burdine e Mualem)

5.2.3. Análise da sensibilidade do dimensionamento

Para o Método do Envolvimento da Chuva a altura máxima específica a armazenar, de modo que não haja o transbordamento, denomina-se DHmax (qs,T). Uma análise de sensibilidade para tempos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos foi realizada (Gráfico 11). A altura de brita necessária para camada de reservatório quando consideramos um tempo de retorno de

2 anos foi de 66,14 mm, o que equivale a uma trincheira de infiltração com uma capacidade de armazenamento de 4,23 m³. Esse volume máximo ocorre num tempo de 325 min.

Para o tempo de retorno de 5 anos, o DHmax (qs,T) foi de 76,21 mm, correspondendo a um volume de armazenamento de 4,95m³. Para o tempo de retorno de 10 anos, o DHmax (qs,T) foi de 84,78 mm com um volume de armazenamento de 5,51 m³ e para o tempo de retorno de 25anos, o DHmax (qs,T) encontrado foi de 97,54,cujo equivalendo a uma trincheira com um volume de armazenamento de 6,34 m³ (Gráfico 11). Isso mostra que mais que dobrando o tempo de retorno ou a magnitude da precipitação de projeto (10 anos para 25 anos), a altura da camada de armazenamento aumenta de 13%. Dessa maneira um projetista pode escolher construir um dispositivo de infiltração com uma chuva de projeto maior, sem necessariamente, haver uma proporcionalidade linear entre o aumento do tempo de retorno e o aumento do custo da construção.

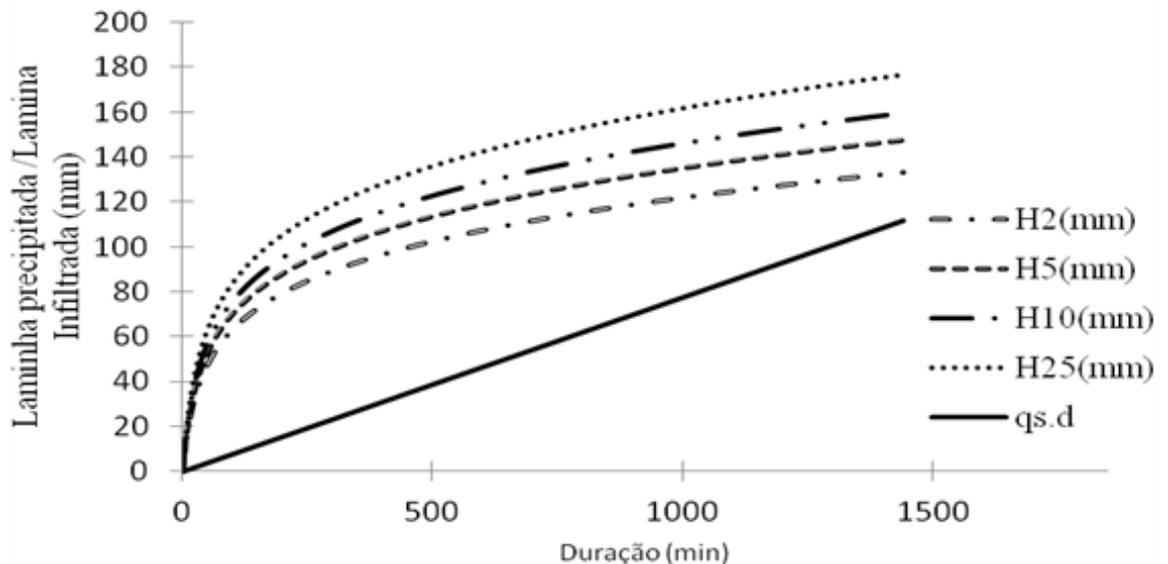


Gráfico 11 - Dimensionamento da trincheira pelo Método do Envolvimento da Chuva para Tempos de Retorno de 2, 5, 10 e 25 anos. Condutividade hidráulica saturada média obtida a partir do método BEST

Para valores da condutividade hidráulica saturada calculada pelo BEST também foi realizada uma análise de sensibilidade (Tabela 8). Variando a condutividade hidráulica saturada de um valor de referência até 50% a cada 10%. Pode-se observar que para o tempo de retorno de 2 anos, um erro 50% para mais na condutividade saturada, provoca uma variação de 16,87% para menos no volume da trincheira de infiltração em comparação para o volume de referência, gerando uma diminuição do volume armazenado.

Para um tempo de retorno de 10 anos, um erro de 50% para mais no valor da condutividade hidráulica saturada provoca uma diminuição de 15,9% em relação ao volume de referência da trincheira de infiltração.

Tabela 8 - Sensibilidade do volume de armazenamento da trincheira com relação a variações no valor da condutividade hidráulica saturada obtida com o método BEST.

TR	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	Referência	10%	20%	30%	40%	50%
2		17,43	16,45	15,63	14,90	14,28	13,70	13,182	12,71	12,27	11,87
5				18,03	17,22	16,52	15,87	15,29	14,77	14,28	13,83
10						18,43	17,72	17,09	16,52	15,99	15,50
25											17,99

Para o caso da diminuição do valor da condutividade hidráulica saturada, para o tempo de retorno de 5 anos, uma diminuição em 20% do valor da condutividade hidráulica induz a um aumento de 9,14% no volume de armazenamento da trincheira de infiltração.

5.2.4. Monitoramento da trincheira de infiltração

O nível d'água observado no interior da trincheira de infiltração e o pluviograma para o dia 06/06/2014 são apresentados no Gráfico 12. Esse dia apresentou um total precipitado de 24,4 mm. Todo esse total precipitado ocorreu num intervalo entre meia noite e 3 h da manhã resultando em uma intensidade média de precipitação de 8,13 mm/h resultando numa elevação do nível d'água no interior da trincheira de 0,69 m no período compreendido entre meia noite e 1 h 8 min da manhã.

Outro aspecto a ser observado na trincheira de infiltração é a recessão ou diminuição do nível d'água nos períodos em que não ocorre a precipitação pluviométrica e conseqüentemente não ocorre escoamento superficial. Para o dia 06/06/2014 ocorre drenagem livre no período compreendido entre 5 h e meia noite, ocorrendo uma variação do nível d'água no interior da trincheira de 1,36m a 0,55m equivalendo a uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,0426 m/h, isto é, uma velocidade de infiltração devido a infiltração no fundo e nas paredes da trincheira de infiltração.

Além disso, essa variação de nível correspondeu a um volume infiltrado de 2,35 m³, gerando uma vazão média de saída por infiltração no solo no período de 5 horas da manhã até meia noite de 123,74 litros/hora (0,12374 m³/h).

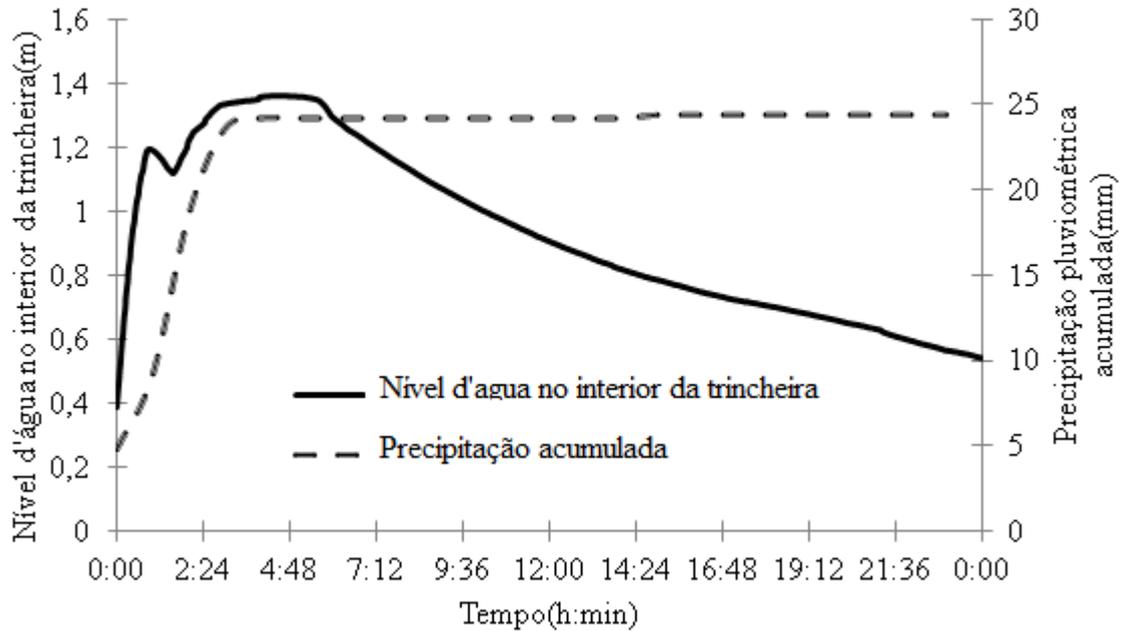


Gráfico 12 - Nível d'água e precipitação pluviométrica acumulada no interior da trincheira para o dia 06/06/2014. Obs.: dados de precipitação da estação do INMET

O evento para o dia 15/06/2014 (Gráfico 13) apresenta basicamente dois trechos, um de ascensão e outro de recessão. Para a ascensão, houve uma variação positiva no nível d'água no interior da trincheira de 0,557 metros, num período de 00 h a 2 h 10 min, atingindo uma velocidade de ascensão de 0,2785 m/h. Após cessada a precipitação, ocorre o período de recessão que vai de 2 h 10 min até as 24 h, o nível d'água no interior da trincheira cai de 1,30 m para 0,51 m, cuja queda é de 0,79 m; o que equivale a uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,0359 m/h, equivalendo a um volume de infiltração de 2,30 m³ e uma vazão média de saída de aproximadamente 105,34 litros/hora (0,10534 m³/h). O total precipitado neste dia foi de 15,8 mm em período de 8 horas, o que foi equivalente a uma intensidade média de precipitação de 1,975 mm/h.

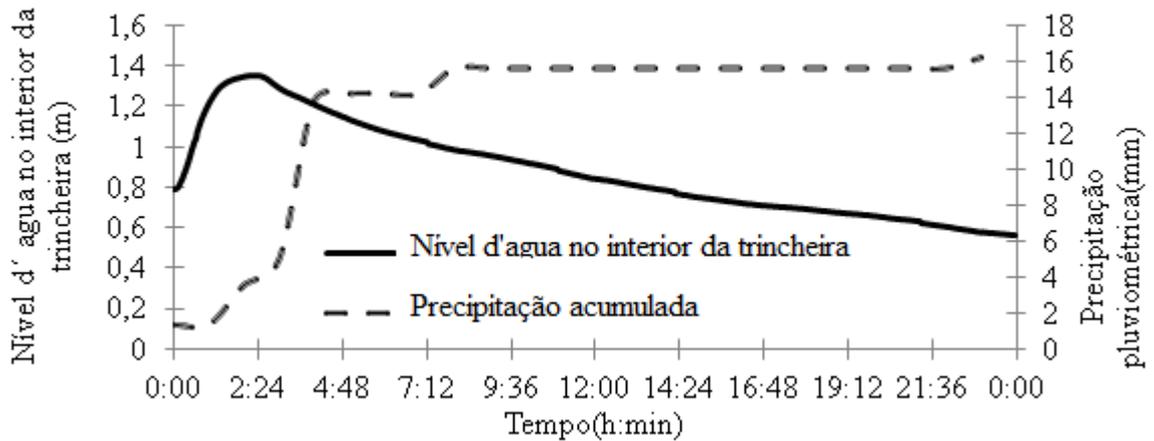


Gráfico 13 - Nível d'água e precipitação pluviométrica acumulada no interior da trincheira para o dia 15/06/14. Obs.: dados de precipitação da estação do INMET

O Gráfico 14 demonstra a relação entre a precipitação registrada e o nível de água na trincheira de infiltração ocorrido no dia 23/06/14 entre o período das 00 h até as 23 h 2 min. O período de precipitação mais intenso ocorreu entre 22 h e 23 h 12 min, onde a precipitação acumulada variou de 5,8 mm a 12,2 mm resultando em um valor de 5,33 mm e que sua intensidade média de precipitação de 5,33 mm/h. Essa variação influenciou num aumento do nível d'água da trincheira de infiltração para o mesmo período de 0,828 metros com uma velocidade de ascensão de 0,828 m/h. Tal resposta brusca do armazenamento na trincheira de infiltração se deve as condições de umidade do solo na área de captação, as quais já estão elevadas devido ao total precipitado no mês até essa data (efeito da precipitação antecedente).

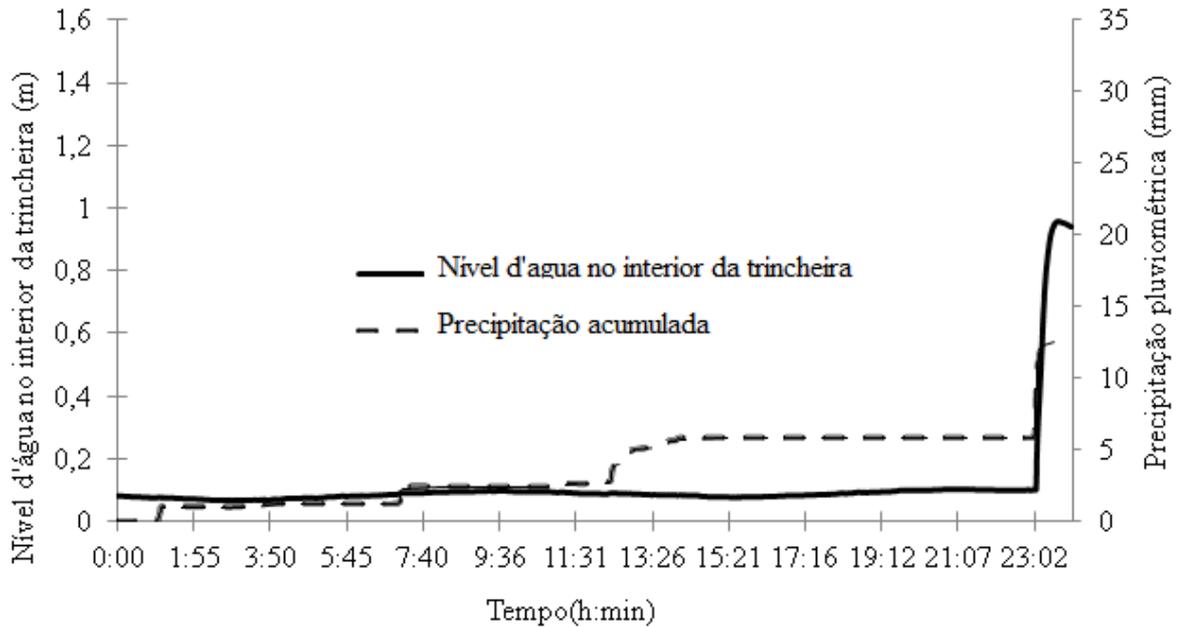


Gráfico 14 – Nível d'água no interior da trincheira e precipitação pluviométrica acumulada para o dia 23/06/2014

Do Gráfico 15 pode ser observado que entre as 00 h e 1 h 55 min não houve chuva e em consequência o nível d'água decresceu de 0,9 m para 0,7 m equivalendo a uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,104 m/h; um volume infiltrado de 0,580 m³ e vazão média de saída de aproximadamente 303,65 litros/hora (0,30365 m³/h). A partir do período de 1 h 55 min a 24 h, houve chuva todo o dia, ocorrendo uma lâmina precipitada acumulada de 28,4 mm, e uma intensidade média de precipitação de 1,29 mm/h. Ocorreram mais 4 eventos importantes: 2 período de ascensão e 2 períodos de recessão. As velocidades de ascensão do nível d'água no interior da trincheira de infiltração são função da intensidade de precipitação. No período compreendido entre 2 h 22 min e 3 h 32 min houve uma elevação do nível d'água no interior da trincheira de 0,69 m a 1,44 m equivalendo a uma velocidade de ascensão de 0,64 m/h para esse trecho. Um outro trecho de ascensão ocorreu entre 16 h 40 min e 17 h 15 min resultando numa velocidade de ascensão de 0,37 m/h.

O nível de água da trincheira atingiu o pico de 1,5 m às 4 h 35 min da manhã, ou seja atingiu o limite da trincheira de infiltração. Após receber as contribuições do escoamento superficial, o nível d'água no interior da trincheira apresentou uma recessão entre 8 h 49 min e 16 h 37 min, decrescendo de 1,36 m a 0,95 m, cujo valor de desnível foi de 0,41 m; alcançando uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,0466 m/h, cujo volume infiltrado foi de 1,19 m³, com uma vazão média de saída de aproximadamente 152,56 litros/hora (0,15256 m³/h).

Um segundo evento de recessão significativa ocorreu entre 17 h 43 min e 23 h 55 min onde ocorreu uma variação do nível de água na trincheira de 0,294m, ou seja uma queda do nível d'água de 1,214 m para 0,92 m; o resultou em uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,0432 m/h; um volume infiltrado de 0,853 m³ e uma vazão média de saída de aproximadamente 133,33 litros/hora (0,13333 m³/h).

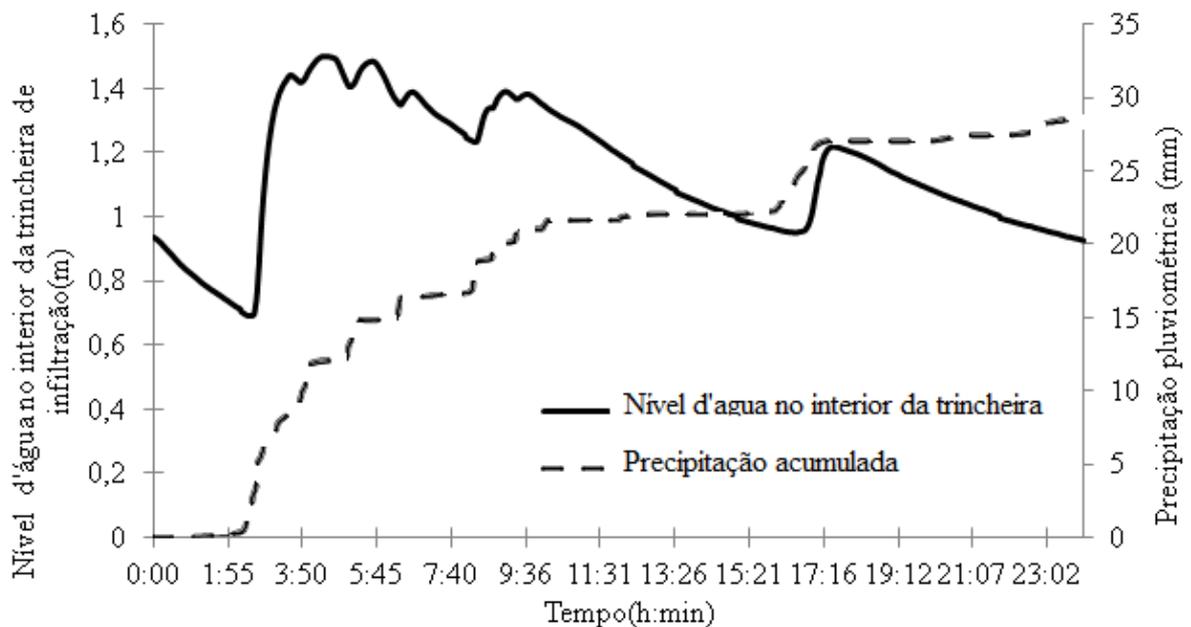


Gráfico 15 – Nível d'água no interior da trincheira e precipitação pluviométrica acumulada para o dia 24/06/2014

O evento do dia 25/06/2014 apresentado no Gráfico 16, mostrou um total precipitado de 9,4 mm, alcançado no período das 2 h 30 min às 24 h resultando em uma intensidade média de precipitação de 0,437 mm/h. De maneira geral, esse baixo valor precipitado influenciou para o nível d'água no interior da trincheira de infiltração apresentasse eventos de recessão. Analisando o primeiro período de recessão que ocorreu de 00 h às 2 h 30 min, cujo nível d'água caiu de 0,921 m para 0,850 m, equivalendo a uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,0284 mm/h, com um volume infiltrado de 0,206 m³, com uma vazão média de saída de aproximadamente 82,43 litros/hora (0,08243 m³/h). O segundo evento de recessão ocorreu das 5 h às 10 h 30 min, cujo nível d'água caiu de 0,910 m para 0,756 m, equivalendo a uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,028 mm/h, com um volume infiltrado de 0,447 m³, com uma vazão média de saída de aproximadamente 81,27 litros/hora (0,08127 m³/h). O terceiro e último evento da recessão ocorreu das 11 h 8 min às 24 h cujo

nível d'água caiu de 0,876 m para 0,506 m, equivalendo a uma velocidade de infiltração tridimensional de 0,028 mm/h, com um volume infiltrado de 1,073 m³, com uma vazão média de saída de aproximadamente 82,61 litros/hora (0,08261 m³/h).

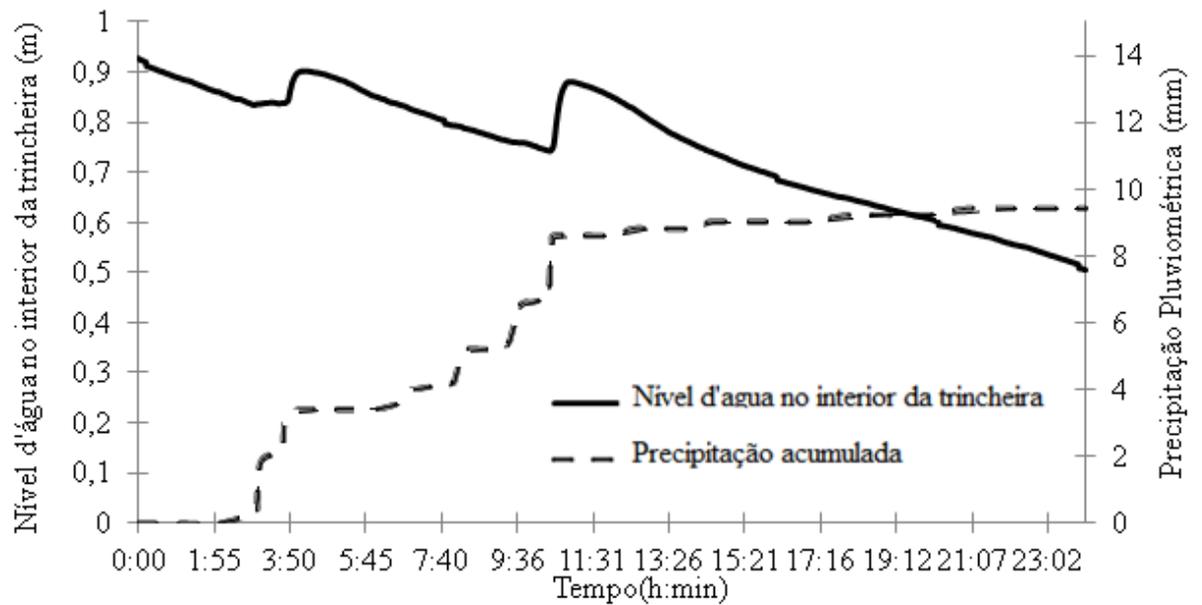


Gráfico 16 – Nível d'água no interior da trincheira e precipitação pluviométrica acumulada para o dia 25/06/2014

Analisando o evento do dia 24/06/14 (Gráficos 15 e 17), pode-se observar que nos períodos em que ocorrem as recessões que foram: 00 h às 1h 55 min; 8 h 49 min às 16 h 37 min e 17 h 43 min às 23 h 55 min; as vazões do escoamento superficial de entrada na trincheira de infiltração foram nulas, uma vez que os períodos de recessões foram determinados após cessar o escoamento superficial. O período em que ocorreu o evento de ascensão e de picos de ascensão isolados, ocorreram os picos de vazões correspondentes.

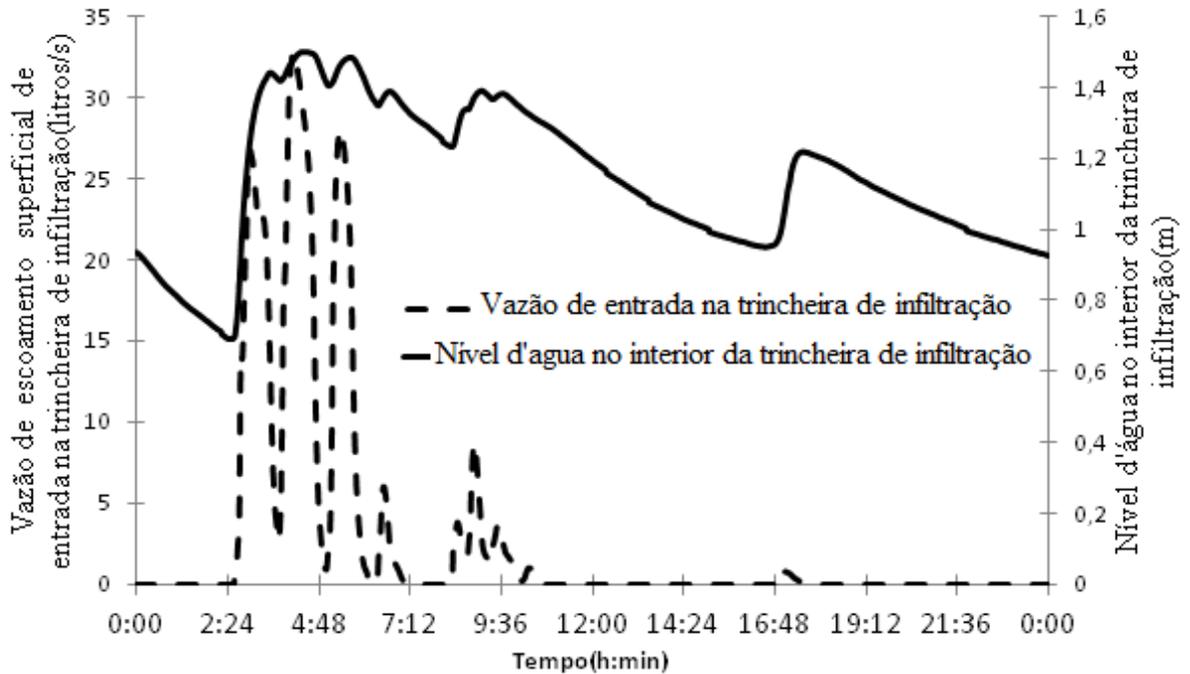


Gráfico 17 – Nível d'água no interior da trincheira e vazão de escoamento superficial na alimentação da trincheira para o dia 24/06/2014

Analisando o evento do dia 25/06/14 (Gráficos 16 e 18), pode-se observar que nos períodos em que ocorrem as recessões que foram: 00 h às 2 h 30 min; 5 h às 10 h 30 min e 11 h 8 min às 24 h; as vazões do escoamento superficial de entrada na trincheira de infiltração foram nulas, uma vez que os períodos de recessões foram determinados após cessar o escoamento superficial. O período em que ocorreu o evento de ascensão e de picos de ascensão isolados, ocorreram os picos de vazões correspondentes.

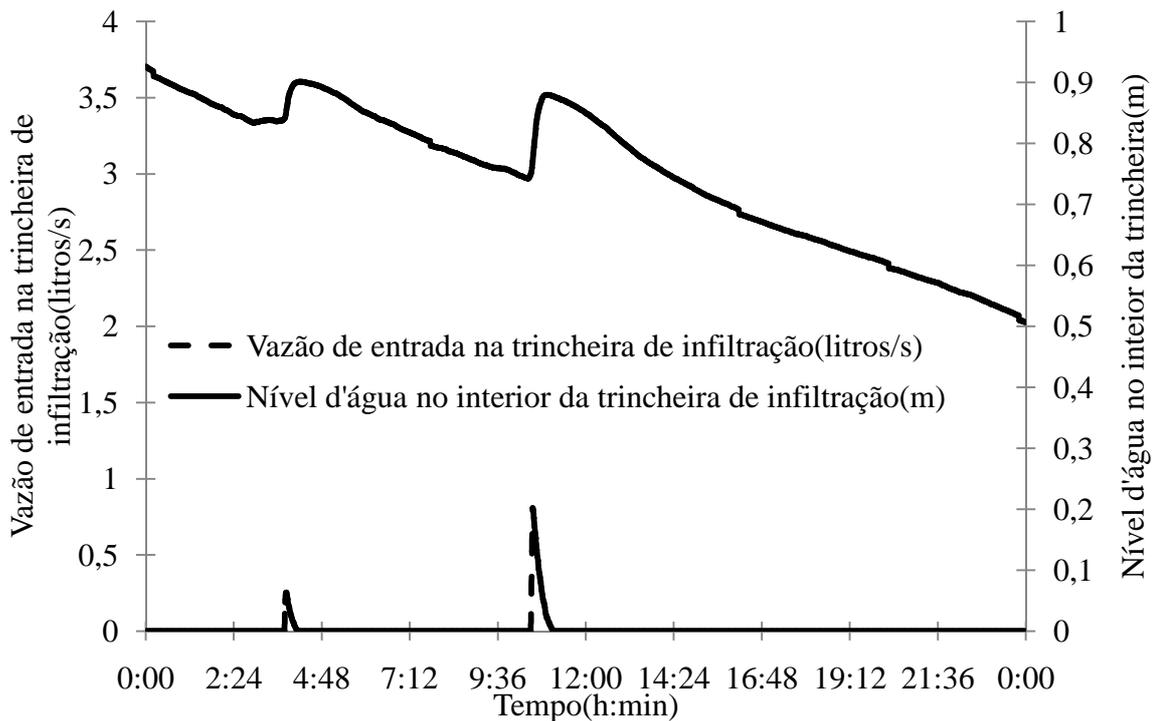


Gráfico 18 - Nível d'água no interior da trincheira e vazão de escoamento superficial na alimentação da trincheira para o dia 25/06/2014

5.3. Modelagem da trincheira de infiltração

Para a modelagem da trincheira de infiltração consideraram-se vários casos:

- Situação com lençol freático distante do fundo da trincheira;
- Situação com lençol freático no fundo da trincheira de infiltração;
- Comparação das condições de empoçamento da trincheira de infiltração e do solo natural;
- A modelagem foi realizada considerando seções monodimensionais e bidimensionais.

Para todos esses casos foram adotadas as seguintes estratégias de modelização:

- Análise da malha adequada
- Considerou-se que a trincheira de infiltração foi solicitada pelo escoamento superficial direto resultante da ação da precipitação pluviométrica na área de captação utilizada no dimensionamento (Gráfico 19). Assim, o escoamento superficial foi transformado em fluxo de entrada conforme equação 26:

$$F = P + \frac{C.P.A_{cap}}{A_{trench}} \quad (26)$$

Onde: C é o coeficiente de escoamento superficial,

P é a precipitação pluviométrica diária;

Acap é a área de captação da precipitação pluviométrica; e

Atrench é a área de superficial da trincheira

Observando o Gráfico 19, pode-se perceber que as maiores precipitações pluviométricas ocorreram entre os dias de nr 100 a 225, o que correspondem ao período de abril a agosto, que é o período das chuvas (inverno). Como o escoamento superficial foi aqui transformado em fluxo de entrada na trincheira (Equação 26), pode concluir que quanto maior a precipitação pluviométrica maior será o escoamento superficial e conseqüentemente será o fluxo de entrada de água na trincheira, o que se observa esta situação no Gráfico 19.

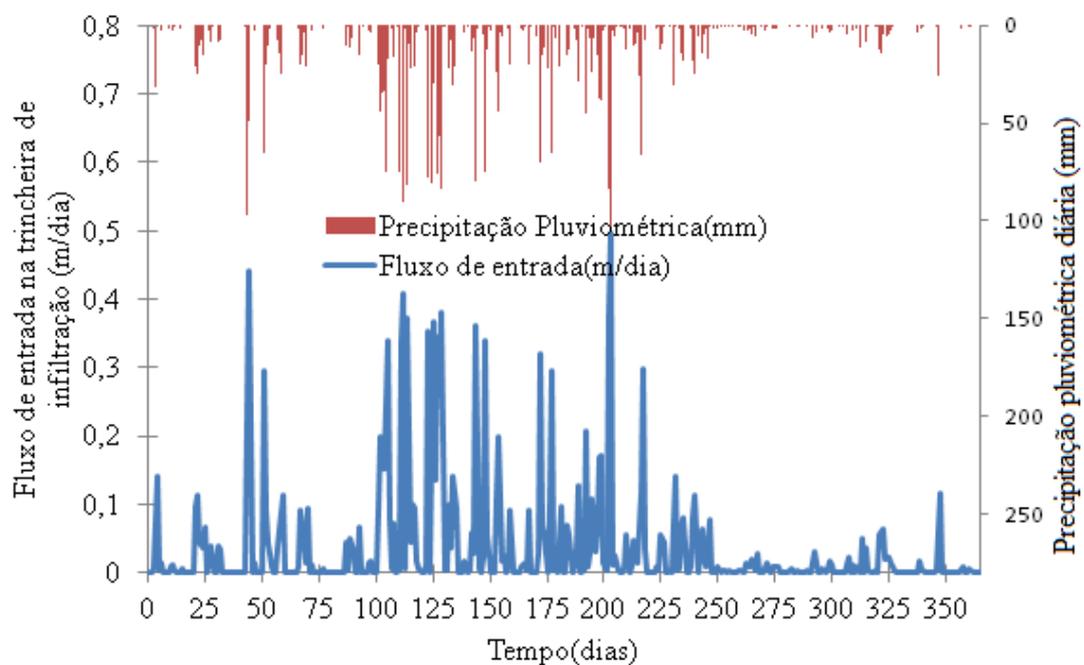


Gráfico 19 – Fluxo de entrada na trincheira e precipitação pluviométrica diária obtidos na estação APAC/LAMEPE - 2011

1) Como condição inicial foi considerada a seguinte estratégia:

Simular o perfil da trincheira por um período de 365 de precipitação pluviométrica para a cidade de Recife partindo de uma seção com potencial constante de $-100 \text{ cmH}_2\text{O}$. Assim, utilizou-se o potencial resultante para o dia 365 como condição inicial para todos os casos. As curvas de retenção da água para as camadas de solo natural e para as camadas da trincheira de infiltração bem como as curvas de condutividade hidráulica em função da umidade são apresentadas nos Gráficos 20 e 21.

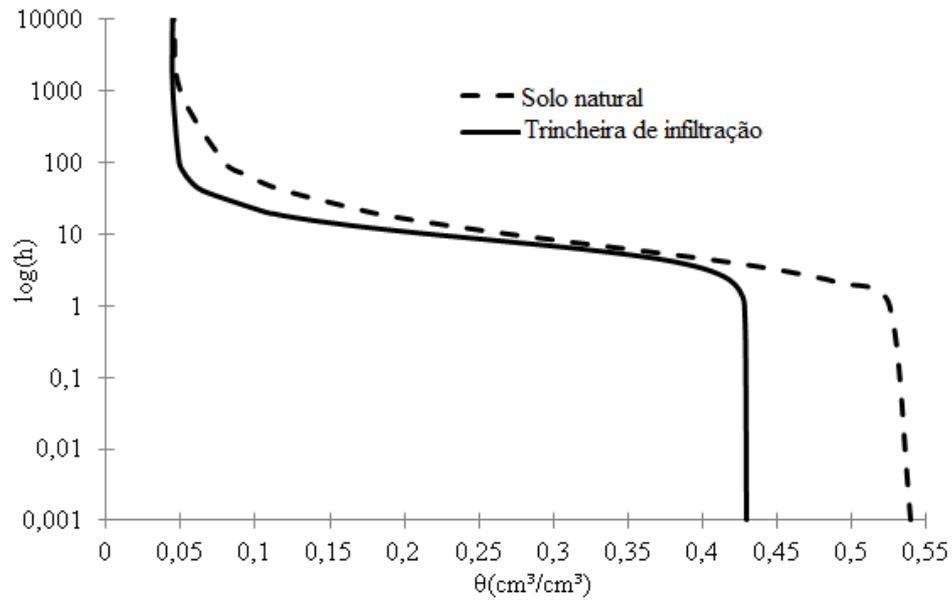


Gráfico 20 -Curvas de retenção para o solo natural e para a camada de reservatório da trincheira de infiltração.

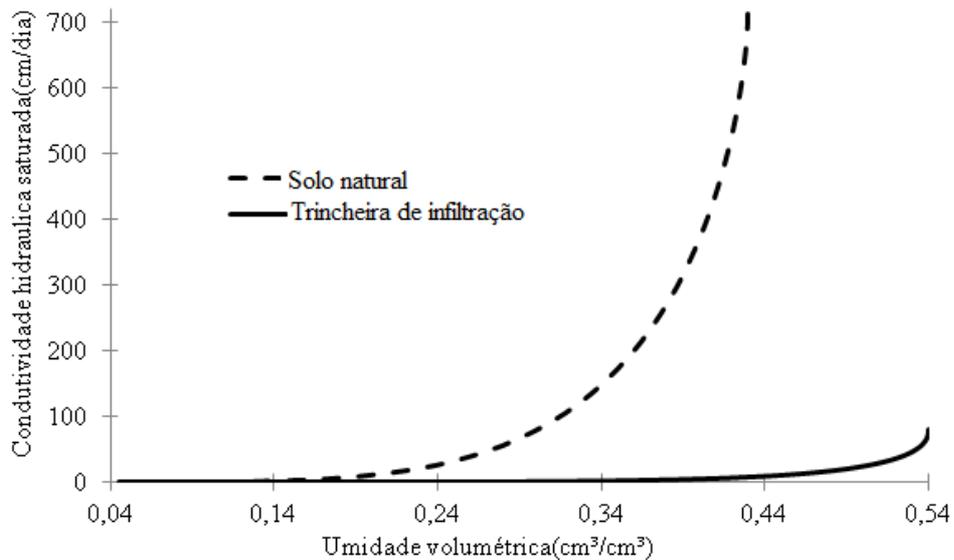


Gráfico 21 -Curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica para o solo natural e para a camada de reservatório da trincheira de infiltração.

As condições iniciais para a trincheira de infiltração para o solo natural nos casos de drenagem livre e lençol freático na base do perfil são apresentadas nos Gráficos 22, 23, 24, e 25. Foram realizadas as simulações utilizando como base o potencial total de $-100 \text{ cmH}_2\text{O}$, para todos os 365 dias.

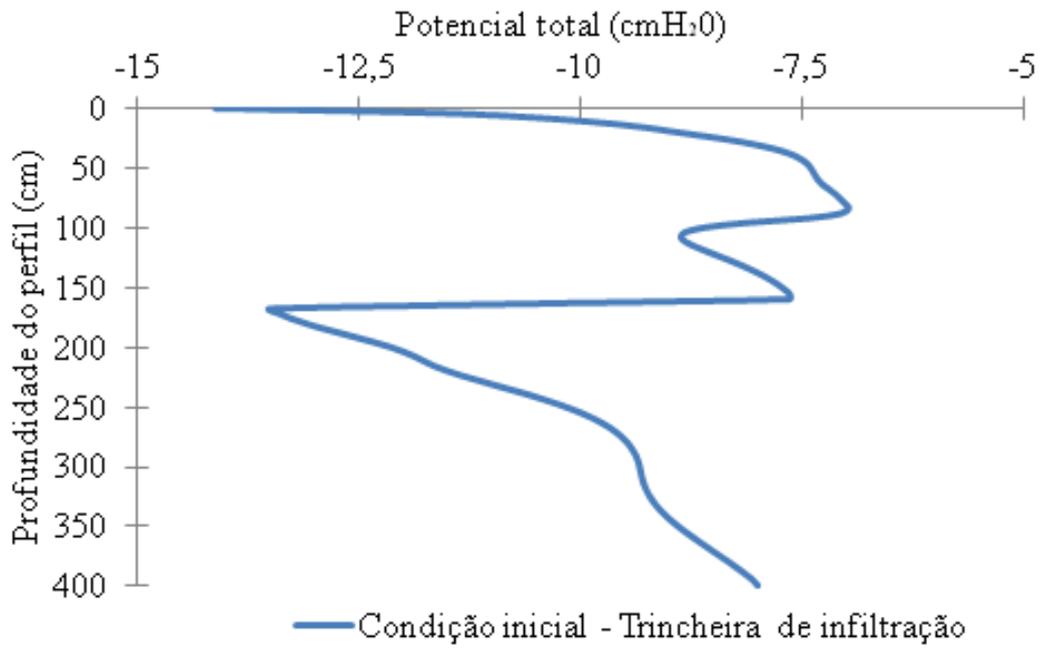


Gráfico 22 - Condição inicial de potencial total utilizada para a simulação unidimensional do perfil referente a trincheira de infiltração – condição de contorno inferior de drenagem livre

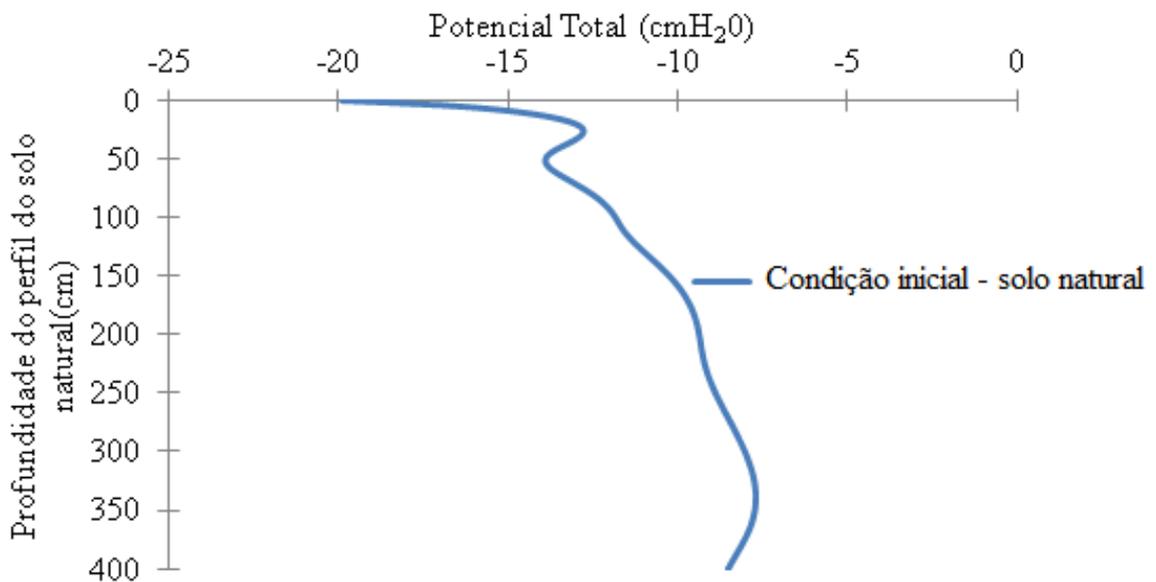


Gráfico 23 - Condição inicial de potencial total utilizada para a simulação unidimensional do perfil referente ao solo natural – condição de contorno inferior de drenagem livre

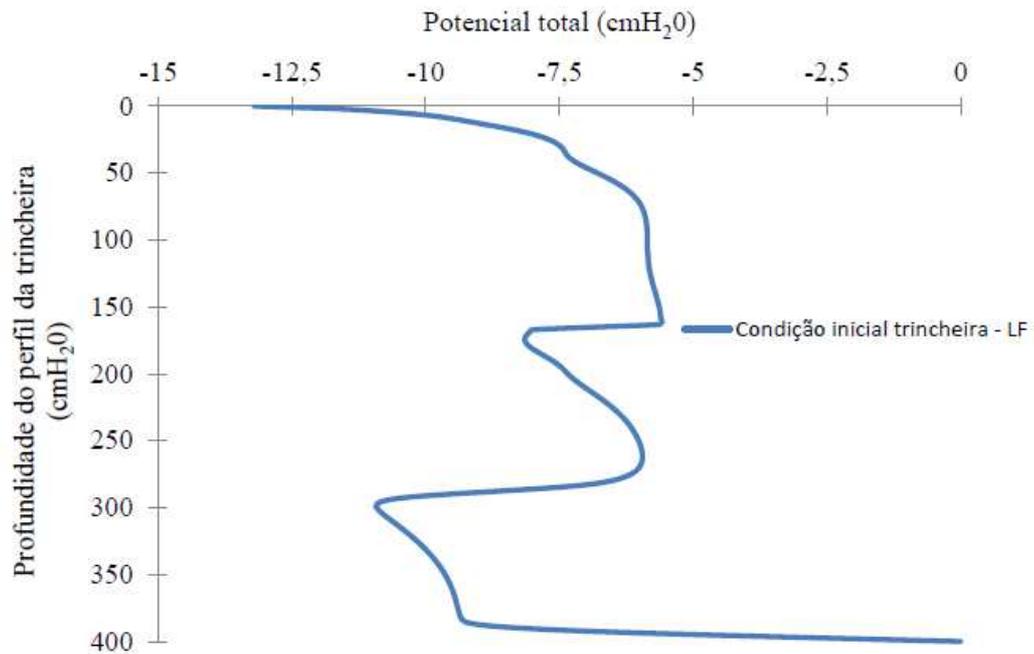


Gráfico 24 - Condição inicial de potencial total utilizada para a simulação unidimensional do perfil referente a trincheira de infiltração – condição de contorno inferior com lençol freático

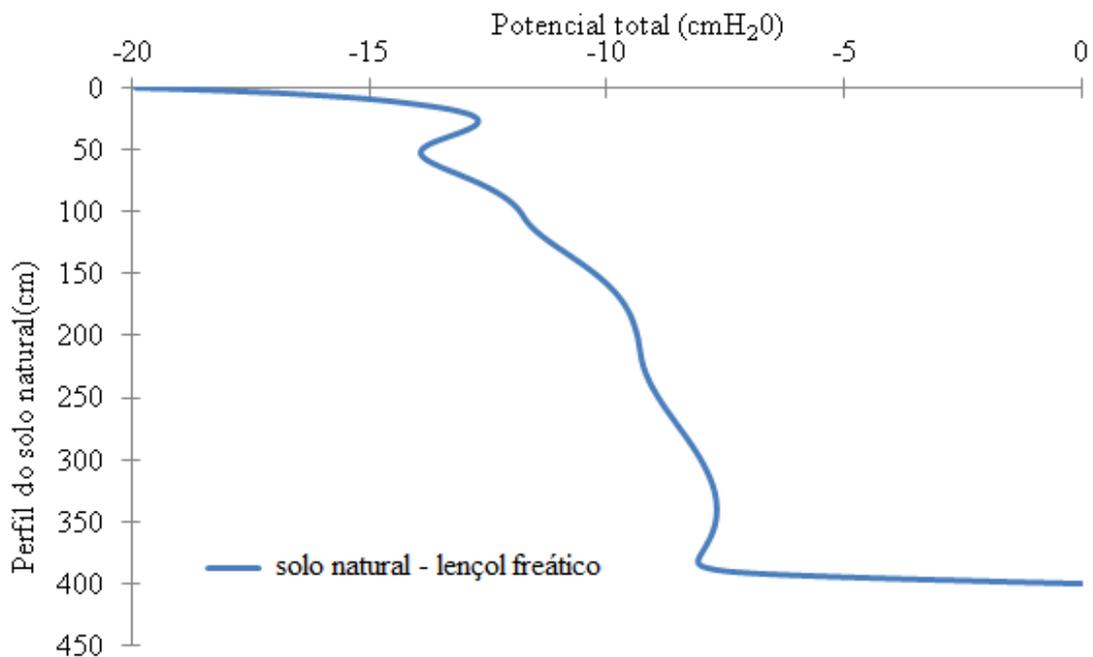


Gráfico 25 - Condição inicial de potencial total utilizada para a simulação unidimensional do perfil referente a solo natural – condição de contorno inferior com lençol freático

5.3.1. Parte 1 – Modelagem Unidimensional

Neste subitem foram analisados o tipo de malha utilizado, o seu efeito no potencial total na base e na superfície da trincheira de infiltração, para a modelagem unidimensional.

5.3.1.1.Caso A – Escolha da malha

A escolha da malha a ser utilizada nas simulações é fundamental, pois interfere no tempo de simulação. A análise realizada com a trincheira de infiltração com malhas de 4 cm, 2 cm e 1 cm, mostrou não haver diferença entre as variáveis de saída (Gráficos 26, 27 e 28).

Dessa maneira as simulações podem ser continuadas com a adoção de uma malha mais grosseira de 4 cm. Isso possibilita uma economia no tempo de simulação sem ter prejuízo na qualidade dos resultados de saída.

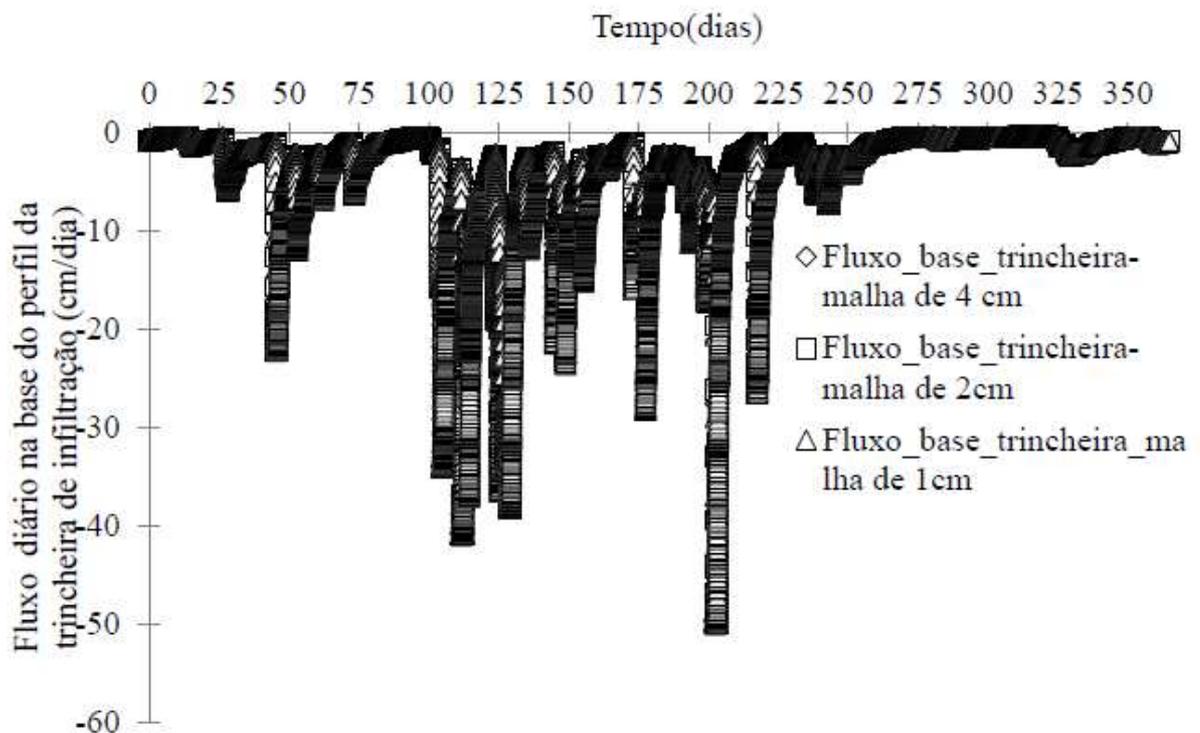


Gráfico 26 - Efeito da malha no fluxo na base da trincheira de infiltração. Malha de 4cm, 2cm e 1cm.

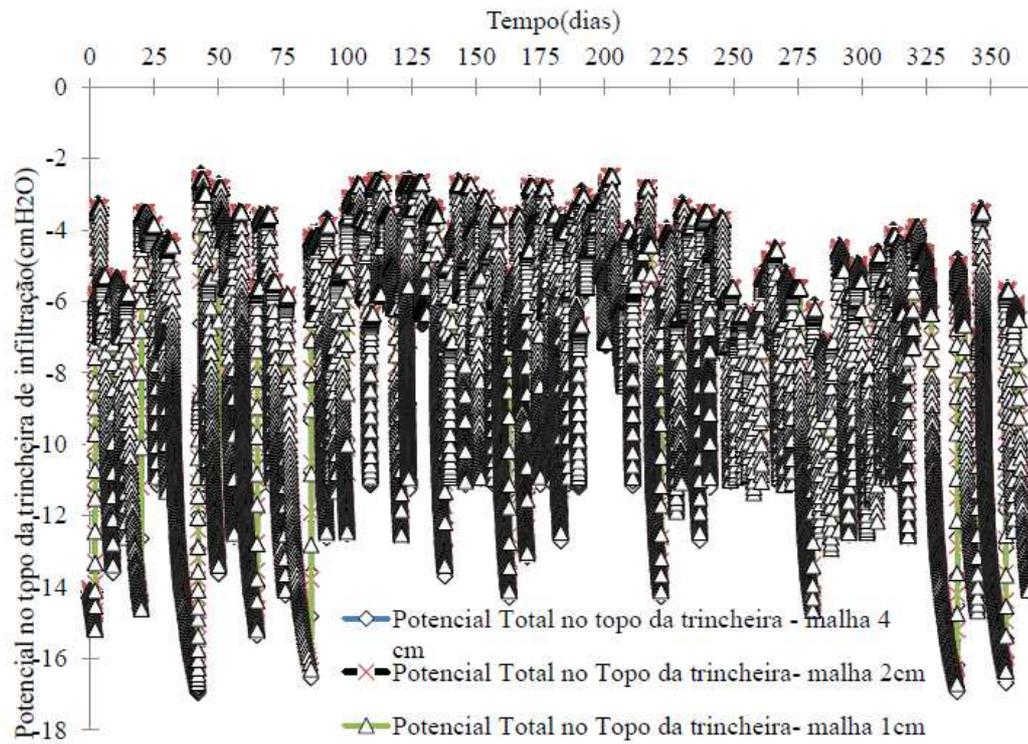


Gráfico 27 - Efeito da malha no potencial total na superfície da trincheira de infiltração. Malha de 4 cm, 2cm e 1cm.

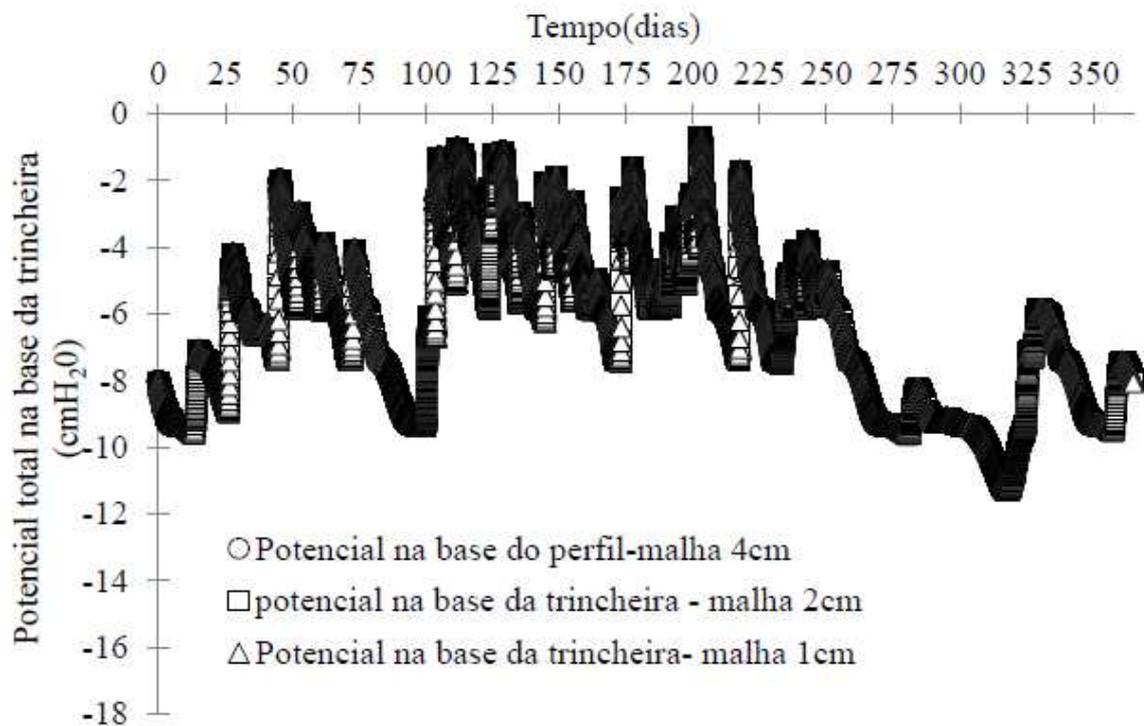


Gráfico 28 - Efeito da malha no potencial total na base da trincheira de infiltração. Malha de 4 cm, 2cm e 1cm.

5.3.1.2. Caso B – Comparação da trincheira com o solo natural – Caso com condição de contorno inferior com drenagem livre

A construção da trincheira de infiltração visa possibilitar uma melhoria das condições de armazenamento quando comparada com as situações anteriores a implantação do dispositivo, isto é, com as condições apenas com a presença do solo natural. A comparação do comportamento hidráulico de uma seção unidimensional contendo o solo natural com uma outra seção heterogênea e a camada de reservatório da trincheira de infiltração é apresentada nos Gráficos 29, 30 e 31.

Para o potencial total no topo da trincheira (Gráfico 29), observa-se que em geral a trincheira de infiltração apresenta um potencial total mais negativo quando comparado com o solo natural para o período simulado. Esse fato pode ser notado entre o período de 100 e 200 dias, período em que ocorre a maior parte do total precipitado.

Assim, a simulação unidimensional demonstra que a utilização da trincheira de infiltração apresenta a potencialidade de diminuir a formação de cargas hidráulicas na superfície nos períodos críticos de precipitação pluviométrica.

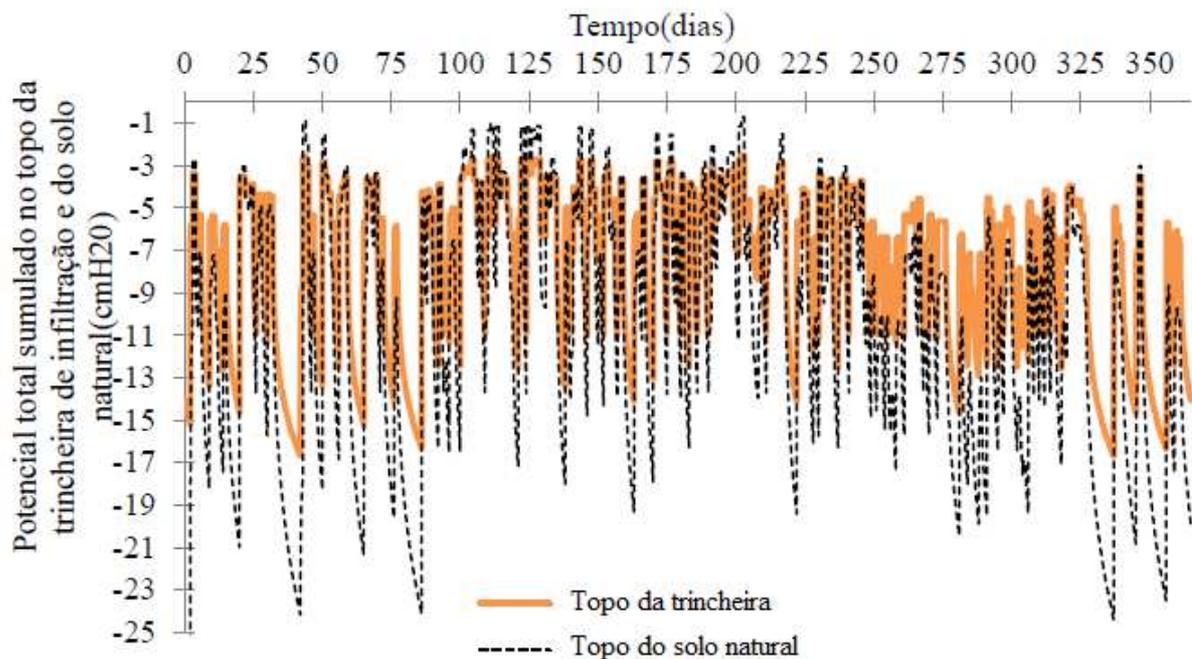


Gráfico 29 - Potencial total no topo solo natural e no topo da trincheira de infiltração (2011)

Observando o Gráfico 30, verifica-se que os potenciais totais na base da trincheira de infiltração são mais próximos de zero do que os potenciais totais na base do solo natural.

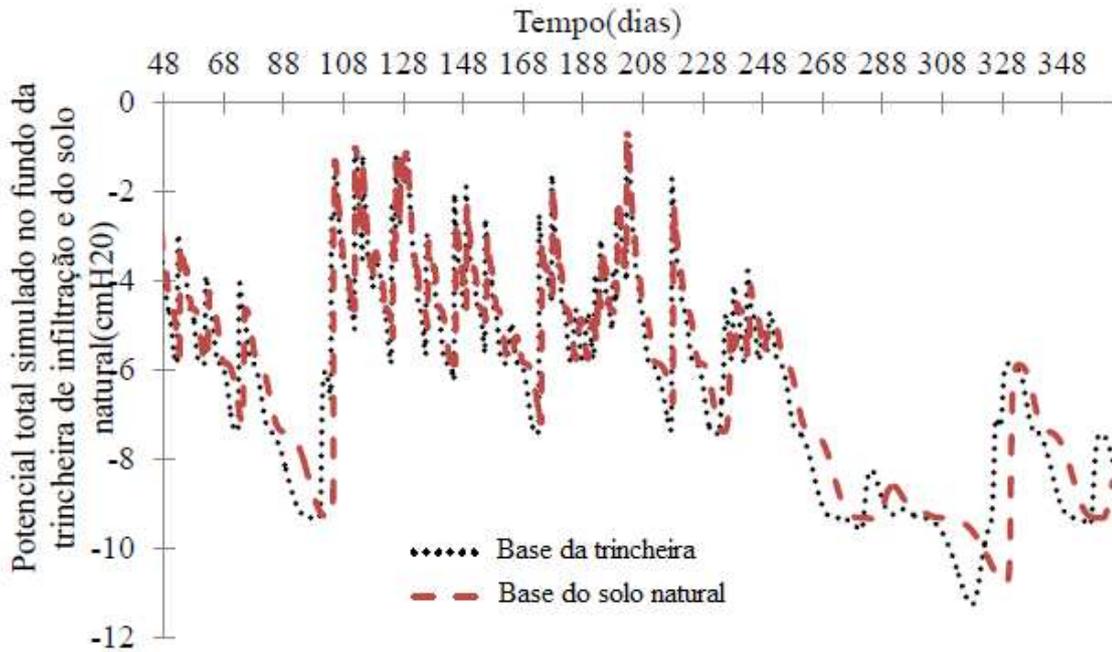


Gráfico 30 - Potencial total na base solo natural e no topo da trincheira de infiltração.

É demonstrada também a partir da simulação unidimensional que o fluxo na base da trincheira de infiltração é maior ou igual ao fluxo na base do solo natural quando submetidos ao mesmo fluxo de entrada no topo (Gráfico 31).

Os períodos em que o fluxo na base do perfil é maior são notados nos períodos entre 40 e 80 dias, nos períodos entre 140 e 180 dias e no dia 220.

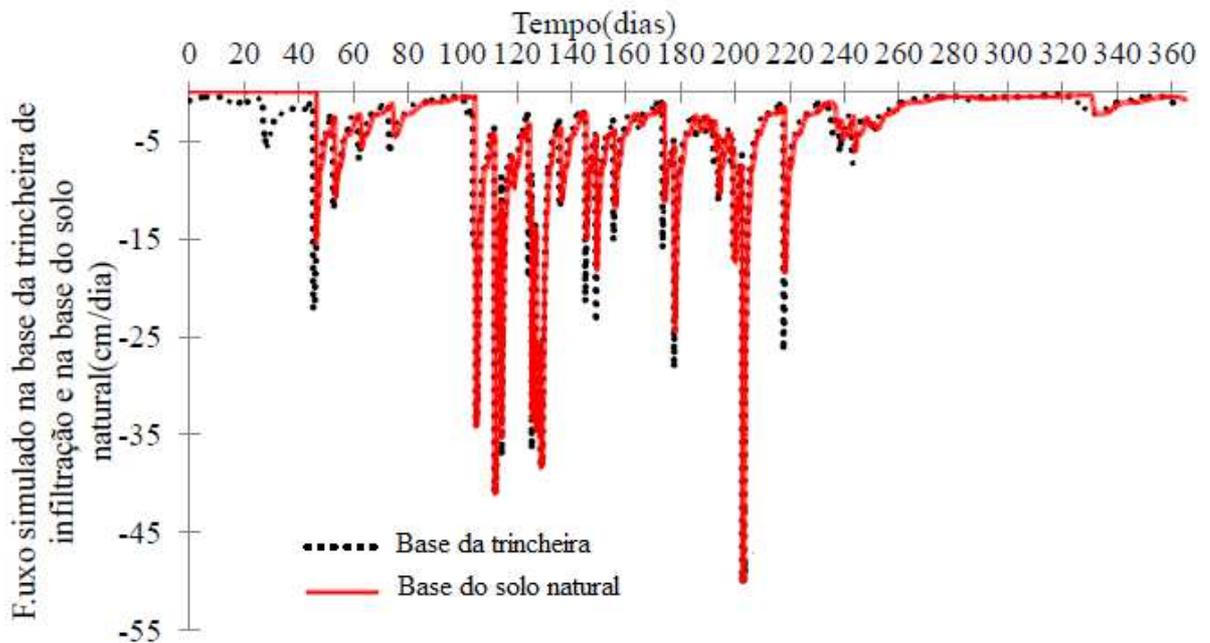


Gráfico 31 - Fluxo na base solo natural e no topo da trincheira de infiltração.

5.3.1.3. Caso C – Comparação da trincheira com o solo natural – Caso com condição de contorno inferior com lençol freático

Para a situação de lençol freático na base do perfil, a presença da trincheira de infiltração gera fluxos de drenagem maiores ou igual ao solo natural, para o caso dos dois perfis serem solicitados por um mesmo fluxo de escoamento superficial (Gráfico 32).

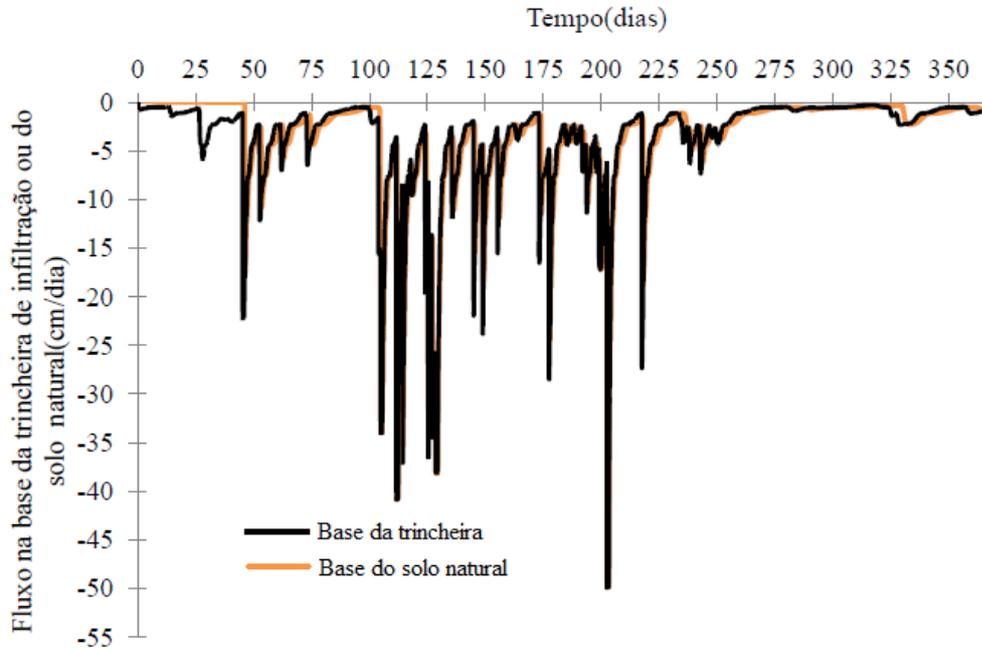


Gráfico 32 - Fluxo na base solo natural e no topo da trincheira de infiltração.

Para este caso, fica também demonstrado que quando submetidos a um mesmo fluxo, o topo da trincheira de infiltração tende a gerar potenciais totais mais distantes de zero. Assim, espera-se que aumentando o fluxo de entrada, o potencial total no topo do solo natural tenderá a alcançar valores positivos de maneira mais rápida que a trincheira de infiltração (Gráfico 33).

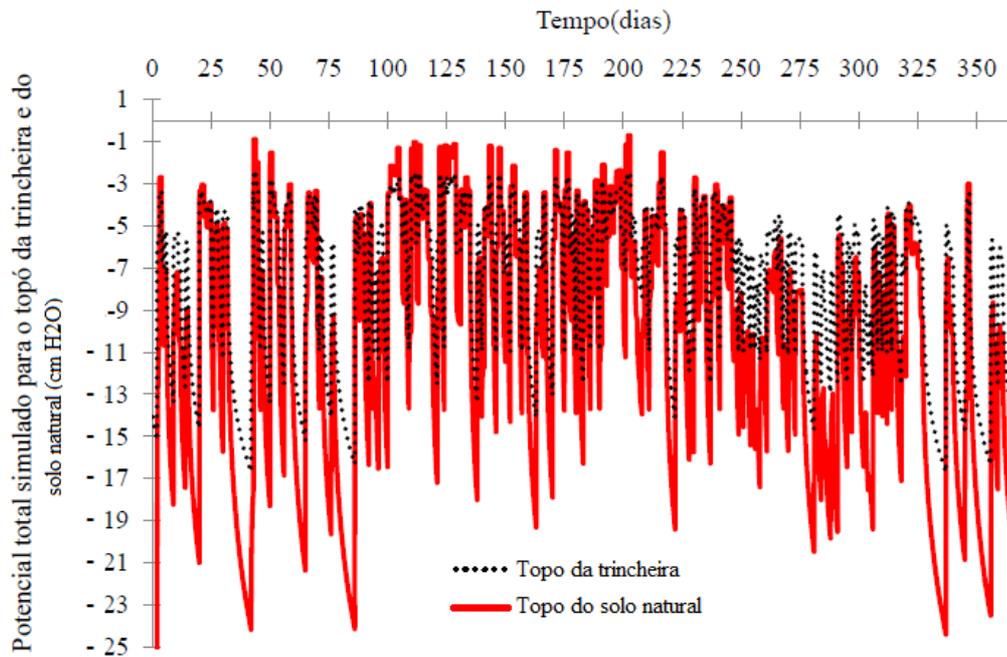


Gráfico 33 - Potencial total no topo solo natural e no topo da trincheira de infiltração

5.3.2. Parte 2 – Modelagem Bidimensional

O mesmo caso demonstrado na simulação unidimensional é demonstrado agora através de modelagem bidimensional. Nesse caso, fica mais evidente que a presença da trincheira de infiltração diminui o potencial total na superfície tornando-o mais negativo (Gráfico 34).

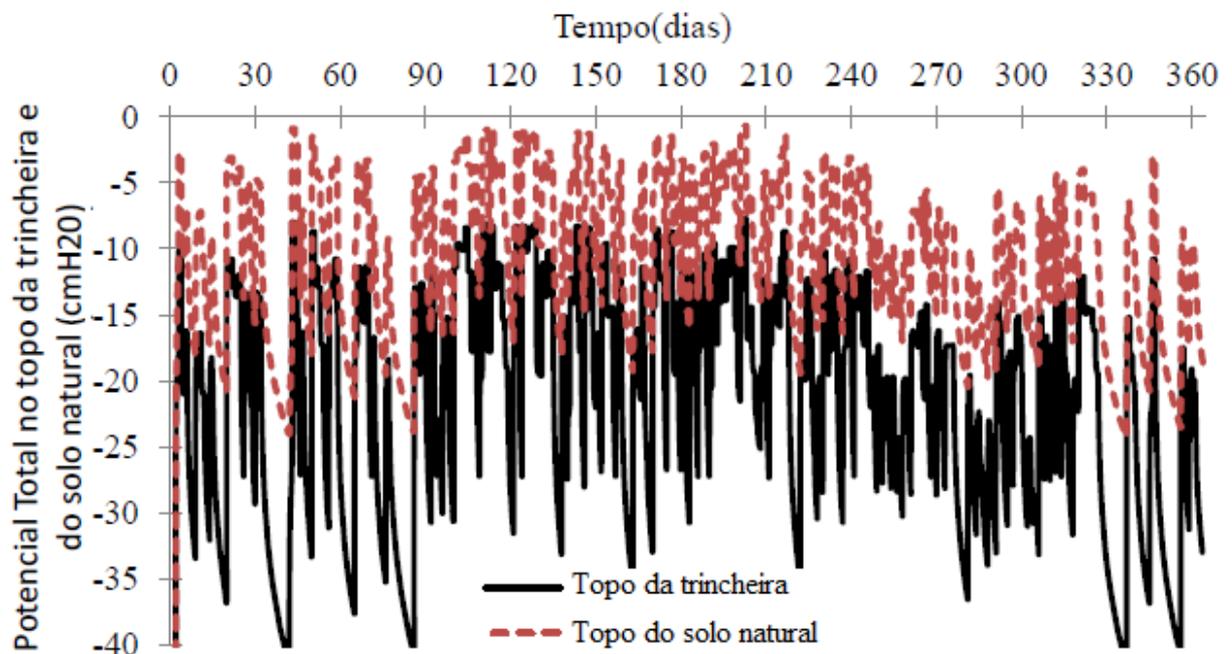


Gráfico 34 - Potencial total no topo solo natural e no topo da trincheira de infiltração. Modelagem Bidimensional com condição de contorno inferior de Lençol Freático a 4 m do topo para o solo natural e para a Trincheira de infiltração.

Uma modelagem bidimensional mostrando uma distribuição de umidade para a trincheira de infiltração é apresentada nos Gráficos 35,36, 37. Essas cartas de umidade volumétricas simuladas foram determinadas inicialmente para os dias 111, 112 e 113.

Observa-se que o fundo da trincheira de infiltração acaba influenciando mais na distribuição da umidade correspondente ao volume armazenado que a lateral da trincheira de infiltração. Fica evidenciada também uma maior distribuição de umidade volumétrica teores próximos a saturação na região de interface entre a trincheira e o solo natural (Gráfico 35). Foi observado que neste dia 111, a precipitação acumulada foi de 74,8 mm e o fluxo de entrada foi de 33,87 cm/dia.

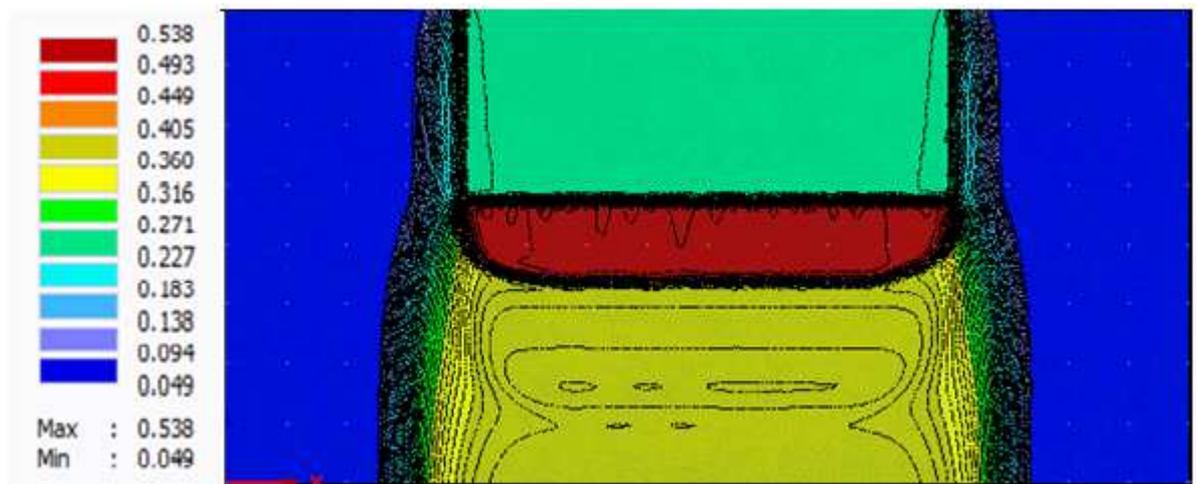


Gráfico 35 - Carta de umidade volumétrica para o dia 111-drenagem livre

Foi observado que no dia 112 (Gráfico 36), a precipitação acumulada foi de 90 mm e o fluxo de entrada foi de 40.75 cm/dia. Uma vez aumentado o fluxo ocorre uma saturação completa de todo o solo natural imediatamente abaixo da trincheira.

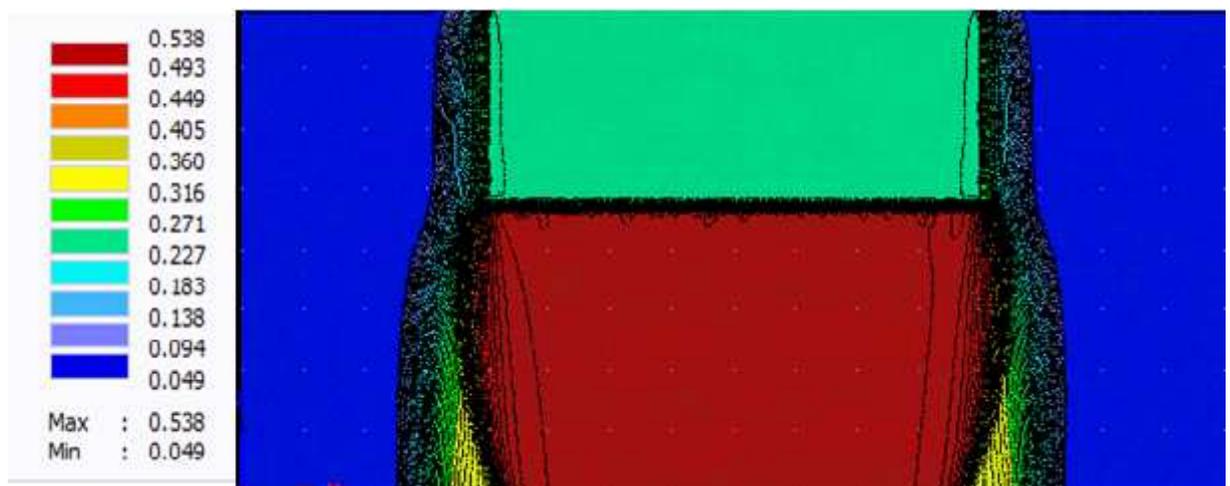


Gráfico 36 – Carta de umidade volumétrica para o dia 112 -drenagem livre

Foi observado que no dia 113 (Gráfico 37), a precipitação acumulada foi de 1,5 mm e o fluxo de entrada foi de 0,4564 cm/dia. Uma vez diminuindo o fluxo ocorre um secamento por drenagem.

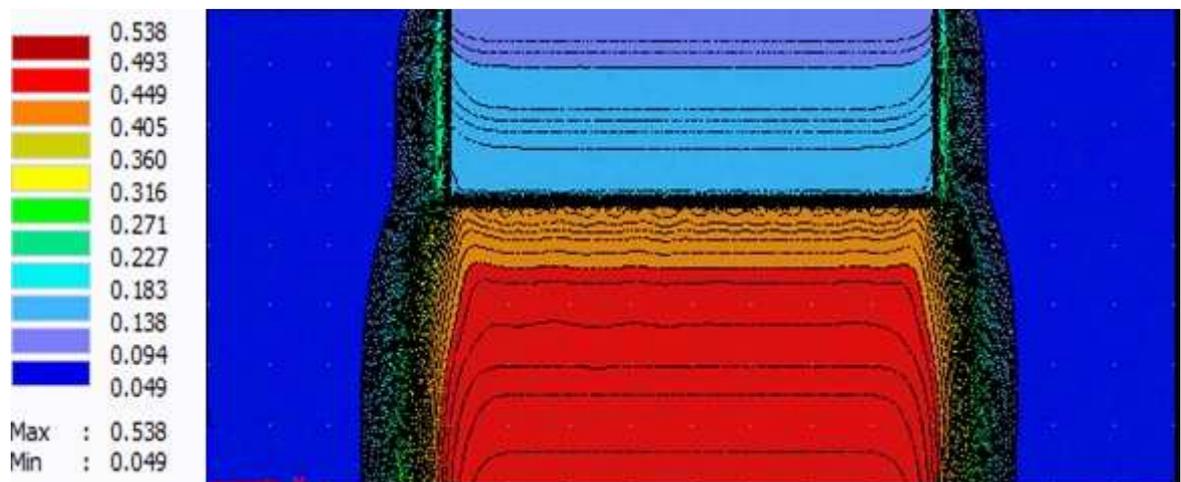


Gráfico 37 – Carta de umidade volumétrica para o dia 113 -drenagem livre

Os resultados da simulação evidenciam que devem ser encontradas maneiras para preservação das condições de fluxo na base da trincheira, evitando principalmente a ação da colmatação. E que podemos concluir que é mais viável construir uma trincheira de infiltração com uma área de base maior e mais rasa do que uma trincheira mais profunda com área de base pequena, uma vez que o fundo da trincheira da infiltração contribui mais para a umidade do que as paredes laterais.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Essa dissertação apresentou um estudo experimental de uma trincheira de infiltração construída num lote. A concepção experimental permitiu medir diversas variáveis importantes para o entendimento do comportamento hidráulico de uma trincheira de infiltração em solo urbano.

A caracterização hidráulica do solo suporte permitiu gerar cenários do comportamento hidráulico da trincheira de infiltração, bem como de comparar seu comportamento hidráulico com o do solo natural nas situações de lençol freático muito distante da base do perfil e nas situações de lençol freático na base do perfil. Em todos os casos ficou evidenciado a função da trincheira de melhorar o fluxo de recarga do lençol freático, quando comparada ao solo natural.

Além disso, a modelagem também demonstrou que a utilização da trincheira de infiltração gera potenciais totais mais negativos, isto é, menor chance de gerar uma carga hidráulica positiva no nível da superfície, indicando uma redução da geração de escoamento superficial.

A trincheira de infiltração apresentou elevada sensibilidade no seu volume armazenado em função das solicitações decorrentes do escoamento superficial, resultando em elevações rápidas no nível d'água da camada de reservatório.

Recomenda-se realizar modelagem 3D da trincheira de infiltração e estudar a transferência de soluto e metais pesados para a trincheira de infiltração (impacto sobre a qualidade das águas pluviais).

7. REFERÊNCIAS

- AKAN, O. A. (2002) Sizing stormwater infiltration structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 5, p. 534–537. 2002.
- ALVES, E.M. (2009). Aplicação do programa HYDRUS -1D em solo cultivado com feijão Caupi. Dissertação de Mestrado, 83 pg. Programa de Pós – Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares, CTG, UFPE.
- AMOOZEGAR, A.; NIEWOEHNER, C.; LINDBO, D. (2008) Water flow from trenches through different soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, p. 655–664. 2008.
- AZEVEDO Netto, J. M. et al. (2000) Manual de Hidráulica, 8a edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1998. Manual de Hidráulica. 8- edição, 1 - reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2000. BARACUHY Neto, N.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F.N.; ALFAKIH, E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien. Paris: Lavoisier. 372p.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. & CIRILLO, J. A. (2001) Hidráulica Aplicada. Porto Alegre: ABRH. 619p. BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO N. O.; BARRAUD S. (2005) Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH, 266 p.
- BERTONI, J. C.; CATALINI, C. G. (2007) Representation of infiltration and exfiltration processes in two types of infiltration drainage devices using the SWMM model. *Novatech*, p. 1007–1014. 2007.
- BOTELHO, M. H. C. (2011) Águas de Chuva - 3ª Edição Revista e Ampliada ISBN, 300p
- BRENCICH, A. (2010) Deep trench, landslide and effects on the foundations of a residential building: a case study. *Engineering Structures*, p. 1821 – 1829.
- BRIGHT, T. M.; BURCHELL, R. M.; HUNT, W. F.; PRICE, W. (2011) Feasibility of a dune infiltration system to protect North Carolina beaches from fecal bacteria contaminated stormwater. *Journal of Environmental Engineering*, p. 968 – 979.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1964) Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 27p.
- BROWNE, D.; DELETIC, A.; MUDD, M. G.; FLETCHER, T. D. (2012) A two-dimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration systems. *Hydrological Processes*, v 27, n 19, p. 2785 – 2799.
- BURDINE, N.T. (1953) Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *American Institute Mining and Metallurgy Engineering*, Littleton, v.198, p.71–77, 1953.
- CABRAL, J.J.S.P.; ALENCAR, A.V. (2005) Recife e a convivência com as águas, em “Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas”. Ministério das Cidades, Brasil, p. 111-130, 2005.
- CABRAL, J.J.S.P.; CARTAXO, A.L.; ANTONINO, A.C.D.; BORBA, F.B.F.L e SANTOS, L.L. Microreservatório de detenção em logradouro público, em “Manejo das águas pluviais urbanas”. PROSAB, Rio de Janeiro, ABES, p. 256-286, 2009.
- CAPUTO, H.P. (1988) Mecânica dos solos e suas aplicações. Livros Técnicos e Científicos, 6 ed., 234 p.
- CASTRO, L. C. A.; DE SOUZA, F. (1999) Análise dos parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov - Lewis na irrigação por sulcos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.2, p.167-172, 1999.

- CHAHAR, R. B.; GRAILLOT, D.; GAUR, S. (2012) Stormwater management through infiltration trenches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 138, n. 3, p. 274–281. 2012.
- CHEN, J.; HOPMANS, J. W.; GRISMER, M. E. (1999) Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. *Advances in Water Resources*, v.22, n. 5, p.479-493.
- CLAY, H.; EMERSON, C. H.; ROBERT, G.; TRAVER, R.G. (2008) Multiyear and Seasonal Variation of Infiltration from Storm-Water Best Management Practices. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, p. 598-605, 2008
- CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J.M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. (2002) Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés – LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, 82p.
- COUTINHO, A. P. (2011) Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2011.
- DUCHENE, MICHAEL,; MCBEAN, E.A.; THOMSON, N. R. (1994) Modeling of infiltration from trenches for storm-water control. *Journal Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 3, p. 276–293.
- DURNER, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resource Research*, Washington ,v.30, n.1 ,p . 211 - 223.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. (1991) Storm water technology fact sheet infiltration trench. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission p. 1–7. 1991.
- FERREIRA, M. M. (2010) Caracterização física do solo In. Editor Quirijn de Jong van Lier. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Física do solo. Viçosa, MG, 2010. 298p.
- FRANCISCO, C. N.; DE CARVALHO, C. N. (2008) Avaliação da sustentabilidade hídrica de municípios abastecidos por pequenas bacias hidrográficas: O caso de Angra dos Reis, RJ. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V. 13, n.2,p. 15-30, 2008.
- FUENTES, C. (1992) Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés. Grenoble: Université Joseph Fourier, 1992. 444p. Tese Doutorado
- FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J.Y.; HAVERKAMP, R. (1998) Soil water conductivity of a fractal soil. In: Baveye, P.; Parlange, J.Y.; Stewart, B.A. (eds.). *Fractals in soil science*. Boca Raton: CRC, cap. 11, p.333–340.
- GARDNER, W.R. (1958) Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, v. 85, p. 228-232.
- GRACIOSA, M. C. P. (2005) Trincheira de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 282p. 2005.
- GUO, J. C. Y. (1998) Surface - subsurface model por trench infiltration basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, p. 280 – 284.
- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.R. (1986) Predicting the water retention curve from particle size distribution: I Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, Baltimore, v.142, p.325–335.
- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.Y.; CUENCA, R.; ROSS, P.J.; STEENHUIS, T.S. (1998) Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In:

- Sposito, G. (Ed). Scale dependence and scale invariance in hydrology. Cambridge: Cambridge University Press, p.190–223.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. (1994) Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, Washington, v.30, p. 2931-2935.
- HILLEL, D. (1998) *Environmental soil physics*. New York: Academic press. 771 p.
- HOLZ, J; TASSI, R. (2007). Usando estruturas de drenagem não convencionais em grandes áreas: o caso do Loteamento Monte Belo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 19 pg.
- HUNG, C. Y. (2005) Dynamic Model for Calculating Infiltration of Rain Water through an Unsaturated Zone, and Its Application to Environmental Protection Agency's PRESTO Model. *Pract. Period. Hazard. ToxicRadioact. WasteManage*, p.86-96.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2011). Sinopse do Censo Demográfico 2010. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acessoem: 17.03.2012 às 15:51:33. 2011.
- IMBE, M.; OKUI, H.; HASHIMOTO, C.; MUSIAKE, K. (2002) Monitoring and analysis of implemented infiltration system over past 20 years. *Global Solutions for Urban Drainage*. p. 1–13, 2002.
- JALBERT, M.; DANE, J.H. (2001) Correcting laboratory retention curves for hydrostatic fluid distributions. *Soil Science Society of America Journal*, n. 4, v. 65, p. 648-654.
- JOHN C. STORMONT, J. C.; ZHOU, S. (2005) Impact of Unsaturated Flow on Pavement Edgedrain Performance. *Journal of Transportation Engineering*, p. 46 – 53.
- Ki, J. S.; Ray, C. (2014). Using fuzzy logic analysis for siting decisions of infiltration trenches for highway runoff control. *Science of the Total Environment* 493, p. 44 – 53.
- KLAR, A.E. (1988). *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.
- KOSUGI, K. (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, Washington, v. 32, n.9, p 2697 -2703.
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. (2006) Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.70, p.521-532, 2006.
- LE GAL LA SALLE, C.; AQUILINA, L.; FOURRE, E.; JEAN-BAPTISTE, P.; MICHELOT, J. L.; ROUX, C.; B.G, D. BUGAID; LABASQUE, T.; SIMONUCCI, C.; VAN MEIR, N.; NORET, A.; BASSOT, S.; DAPOIGNY, A.; BAUMIER, D.; VERDOUX, P.; STAMMOSE, D.; LANCELOT, J. (2012) Groundwater residence time down gradient of Trench Nr. 22 at the Chernobyl Pilot Site: Constraints on hydrogeological aquifer functioning. *Applied Geochemistry*, v. 27, n. 7, p. 1304–1319.
- LEEFLANG, M.; MONSTER, N.; VAN DE VEN, F. (1997) Design graphs for stormwater infiltration facilities. *Hydrological Sciences Journal*, v. 43, n. 2, p. 173 – 180.
- LIBARDI, P.L. (2000) *Dinâmica da água no solo*. 2ª ed. Piracicaba-SP, 509 p.
- LIMA, V. C. G. R. (2009) *Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 177p. 2009.

- LUCAS, A. H.; BARBASSA, A. P.; MORUZZ, R. B. (2013) Modelagem de um sistema filtro-vala-trincheira de infiltração pelo método de PULS adaptado para calibração de parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V.18, n.2, p. 225 – 236.
- LUCAS, A. H.; GUTIERREZ, L. A.; RHOM, S.A.; LOLLO, J. A. (2010) Proposta para seleção de áreas potenciais para implantação de trincheiras de infiltração: Estudo de caso-Campus da UFSCar, São Carlos, SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.15, n.4, p.135-141.
- MANNICH, M.; GUETTER, A. K. (2011) Solução analítica da equação de Richards. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.16, n.1, p. 47-54.
- MARQUARDT, D.W. (1963) Algorithm for least squares estimation of non linear parameters. *SIAM. Journal off the Society for Industrial and Applied Mathematics*, v.11, n. 2, p.431-441. 1963.
- MAVROULIDOU, M.; GUNN, M. J.; WOODS, R. I. (2003) Impact of storage coefficient on numerical modelling of trench drainage. *Computer sand Geotechnics* 30, p. 683 – 693.
- MELO, T. A. T. (2011) Jardim de Chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 137p.
- MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H; GRACIOSA, M. C. P. (2008) Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem. *Revista Brasileira de RecursosHídricos*, v. 13, n. 2.
- MIKKELSE, P.S.; HAFLIGER, M.; OCHSB, M.; TJELL, J.C.; JACOBSEN, P.; BOLLERB, M.(1996) Experimental assessment of soil and groundwater contamination from two old infiltration systems for road run-off in Switzerland . *The Science of the Total Environment*, p.341-347, 1996.
- MONTGOMERY, R. J.; GAFFIELD, S. J.; ZOLIDIS, N. R.(2005) Stormwater runoff supplied to subsurface infiltration areas for groundwater recharge. *Impacts of Global Climate Change*, p. 1 – 12.
- MUALEM, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resource Research*, v.12, p. 513-522.
- NASCIMENTO, N. O.;BAPTISTA, M. B. (2009) Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais. In: RIGHETTO, A. M. (coord.). *Manejo de Águas Pluviais Urbanas*. Rio de Janeiro: ABES. 396p.
- NORRSTROM, A. C. (2005) Metal mobility by de-icing salt from an infiltration trench for highway runoff. *Applied Geochemistry*, p. 1907–1919.
- PAULETTO, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. (1988) Determinação da condutividade hidráulica a partir da curva de retenção de água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 12, n. 1, Viçosa, p. 189-195.
- PEITER, T. V.; POLETO, C. (2012) Estudos dos efeitos de trincheiras de infiltração sobre o escoamento superficial. *Revista de Estudos Ambientais* ,v. 14, n. 2 esp, p. 57-67.
- PRAKASH, A. (2005) Modeling LNAPL extraction with a trench sysem. *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts*, p. 1 - 8.
- RAWLS, W. J., AHUJA, L. R., BRAKENSIEK, D. L. E SHIRMOHAMMADI, A. (1993) Infiltration and soil water movement, in *Handbook of Hydrology*. Ed. David R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., USA, p.5.1-5.51.
- REED, B. E.; MATSUMOTO, M. R.; WAKE, A.; TAKEDA, F.(1989) Improvements in soil absorption trench design. *Journal Environmental Engineering*, v. 115, n. 4, p. 853–857. 1989.

- RICHARDS, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Journal of Applied Physics*, v.1, p. 318-333.
- RICHARDS, L.A. (1941) A pressure - membrane extraction apparatus for soil solution. Reprinted from *Soil Science*, v.51, n. 5, p. 10.
- RIGHETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F. & SALES, T. E. A. (2009) Manejo de Águas Pluviais Urbanas. In: RIGHETTO, A. M. (coord.). *Manejo de Águas Pluviais Urbanas*. Rio de Janeiro: ABES. 396p. 2009.
- ROLDIN, M. LOCATELLI, L.; MARK, O. MIKKELSEN, P.S.; BINNING, P. J. (2013) A simplified model of soakaway infiltration interaction with a shallow groundwater table. *Journal of Hydrology*, p. 165 – 175.
- SANSALONE, J. J. (1999) Adsorptive infiltration of metals in urban drainage media characteristics. *The Science of the Total Environment*, p. 179 – 188.
- SHIRAHAMA, M.; KAWAGUCHI, T.; ASADA, K. (2004) Study on Distribution and Evaluation of Stormwater Control Facilities. *Global Solutions for Urban Drainage*, p. 1 – 11.
- SILVA, J. P. (2007) Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração. Brasília: Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 167p. Dissertação de Mestrado.
- SILVEIRA, A. L.L. (2003) Pré-dimensionamento hidrológico de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. Simpósio ABRH, p. 1 – 10, 2003.
- SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. (2007) Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n.2, p. 157-168.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; NETTO, A. M.; CABRAL, J.J. DE S.; JARAMILO, R. A.; ROULIER, S. (2006) Análise do Regime Transitório da Infiltração Tridimensional sob Sucção Controlada. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.11,n.1, p. 5 – 13.
- SOUZA, E.S.; ANTONINO, A.C.D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; MACIEL NETO, A. Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método Beerkan. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.128-135, 2008.
- SOUZA, V. C. B. (2002) Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SOUZA, V. C. B.; GOLDENFUM, J. A.(1999) Trincheiras de infiltração como elemento de controle do escoamento superficial: um estudo experimental. Simpósio. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1- 11, 1999.
- TAKASOU, M.; ICHIKAWA, Y.; MASUOKA, S. (2004) Research one valuation method for stormwater infiltration facilities. *Global Solutions for Urban Drainage*, p. 1 - 8.
- TRAVER, R. G.; LATHROP, STEVE.(2008) Best Management Practice National Monitoring Site, Year 5. Villanova Urban Stormwater Partneship, v.1, 27p.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (1993) *Soil Survey Manual*. Natural Resources Conservation Service, edição revisada.
- TUCCI, C. E. M. (2009) *Hidrologia : Ciência e Aplicação*, Porto Alegre,v.7,n.1,pag.5-27.
- van GENUCHTEN, M.Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VOGEL, T.; CÍSLEROVÁ, M. (1988). On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Phoenix* : v.3,n .1,p 1-15.

YOSHIOKA, M. H.; DE LIMA, M. R. (2005) Experimentoteca de solos retenção da água pelo solo. Experimentoteca de Solos – Projeto Solo na Escola – Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR, p. 1 – 9.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A.C.D.(2003) Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: Congreso Nacional de Irrigación, 13, Zacatecas. Resumos. Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219.

ZHANG, R.; van GENUCHTEN, M.Th. (1994) New models forun saturated soil hydraulic properties. *Soil Science*, v.158, p.77-85.

8. ANEXOS

ANEXO I

A1. BEST - Algoritmo e análise dos dados (Lassabatère et al., 2006)

Determinação dos parâmetros de forma (m, n e η)

Assumindo a similaridade de forma entre a curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, Haverkamp&Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar $F(D)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com} \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (1)$$

sendo D o diâmetro da partícula [L], D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L] e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Os parâmetros de forma da curva de retenção m e n são obtidos a partir do índice de forma do meio p_m pelas seguintes relações:

$$m = \frac{1}{p_m} \left(\sqrt{1 + p_m^2} - 1 \right) \quad (2)$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad (3)$$

p_m é estimado a partir de M e N por (Zataráin et al., 2003):

$$p_m = \frac{M N}{1 + M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (4)$$

sendo κ um coeficiente definido por Fuentes et al. (1998):

$$\kappa = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad (5)$$

e s a dimensão fractal relativa. A dependência de s ($s = \text{DBB}_{\text{fBB}}/E$, na qual DBB_{fBB} é a dimensão fractal do solo e $E = 3$ a dimensão de Euclides) com respeito à porosidade total do solo (ϕ) é definida por (Fuentes, 1992):

$$(1-\phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com} \quad \frac{1}{2} < s < 1 \quad (6)$$

No caso da equação da curva de condutividade hidráulica de Brooks & Corey (1964), o seu parâmetro de forma, η , pode ser expresso como função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção e do fator de tortuosidade (p):

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (7)$$

sendo $p = 1$ para o modelo de Burdine (1953).

Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g).

O primeiro parâmetro de normalização, θ_s , foi estimado a partir da umidade gravimétrica saturada e da massa específica do solo; os outros parâmetros de normalização são obtidos a partir da modelagem dos experimentos de infiltração. Para uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme (θ_0), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Eq. 8 e 9) e estacionário (Eq. 10 e 11) (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad (8)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad (9)$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + K_s] \cdot t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (10)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + K_s \quad (11)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (12)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (13)$$

$$c = \frac{a}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (14)$$

sendo S a sorvidade [$L T^{-1/2}$], r o raio do cilindro [L]; γ igual a 0,75 e β igual a 0,6.

Para determinação de K_s e S , o BEST utiliza equações equivalentes às Eqs. (7) e (8), obtidas pela substituição de K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$, (Eq. 11) nas Eqs. (8) e (9):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b) \cdot S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (15)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b) \cdot S^2 + bq_{+\infty}] \quad (16)$$

O ajuste da Eq. (15) aos dados experimentais da infiltração acumulada ($I_{\text{exp}}(t)$) é obtido pela minimização da clássica função objeto, dada por:

$$f_1(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (17)$$

na qual k é o número considerado de pontos no regime transitório. O algoritmo usado na minimização de $f_1(S, K_s, k)$ é o de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM):

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k (I_{\text{exp}}(t_i))^2}} \quad (18)$$

Inicialmente, o BEST estima um valor máximo para a sorvidade, S_{MAX} , a partir do ajuste dos dados experimentais com a Eq. (15), caso em que se assume um fluxo de água dependente apenas da capilaridade, considerando-se b igual a zero.

Como as Eqs. (8), (9), (15) e (16) são válidas apenas para o regime transitório, é possível que os ajustes não sejam feitos para todos os valores de k ; a sorvidade é, então, estimada para valores de k de no mínimo cinco pontos para um máximo de N_{tot} . S_{MAX} é considerada o valor máximo de toda a sequência de pontos. Para se obter valores positivos de K_s , levam-se em consideração as seguintes condições: S_{MAX}^2 deve ser menor que a taxa de infiltração no regime estacionário ($q_{+\infty}$) dividido pelo coeficiente a (Eq. 12); assim, a sorvidade máxima S_{MAX} é definida por:

$$S_{MAX} = \underset{N_{obs}=1}{\overset{MAX}{N_{tot}-1}} \left[\underset{N_{obs}}{\text{MIN}} \left(S_{N_{obs}} (b=0), \sqrt{\frac{q_{+\infty}}{a}} \right) \right] \quad (19)$$

Para obtenção de K_s , considera-se o valor verdadeiro de b (Eq. 13). O ajuste é executado minimizando a função objeto definida pela Eq. (17). Como os ajustes pela Eq. (15) nem sempre são válidos para todos os pontos ($0 \dots k$), o BEST ajusta os dados para um mínimo de cinco pontos a um máximo de N_{tot} . Para cada subconjunto de dados que contém os k primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade $S(k)$, a condutividade hidráulica $K_s(k)$ em função de $S(k)$ e da Eq. (11) para um tempo máximo $t_{max}(k)$ definido como:

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-b)^2} \cdot t_{grav} \quad (20)$$

sendo t_{grav} o tempo gravimétrico definido por Philip (1969). O $t_{max}(k)$ é o tempo máximo para o qual as expressões para o regime transitório são consideradas válidas; logo, o tempo mais longo do subconjunto de dados t_k é comparado com $t_{max}(k)$. Os valores de $S(k)$ e $K_s(k)$ são considerados válidos para t_k menores que $t_{max}(k)$. Dos valores que cumprirem esta condição, serão escolhidos aqueles correspondentes ao maior k .

Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro h_g é obtido pela seguinte equação (Lassabatèreet al., 2006):

$$h_g = \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right]} \cdot K_s \quad (21)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η dos modelos (de Condappa et al., 2002; Lassabatère et al., 2006):

$$c_p = \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left[\frac{\Gamma\left(n\eta + \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma\left(n\eta + m - \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (22)$$

sendo Γ a função gama clássica.