

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO NO  
CONTROLE DA GERAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

VLADIMIR CARAMORI BORGES DE SOUZA

*Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia*

**Orientador:** Joel Avruch Goldenfum

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira  
Prof. Dr. Geraldo Lopes da Silveira  
Prof. Dr. Nilo de Oliveira Nascimento

IPH/UFRGS  
DHS/UFSM  
EHR/UFGM

**Porto Alegre, abril de 2002**

## I. APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Joel Avruch Goldenfum.

Agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, seja com idéias, sugestões, comentários e críticas, seja com a participação em momentos de alegria e descontração. A eles dedico esta tese.

Em especial, à minha mãe e meu pai, Edinho, Míriam, Saulo, Milena. E à Fernanda, que sempre deu apoio em todos os momentos.

Ao Joel pela orientação, estímulo e amizade. Ao Nilo Nascimento e Roberto Eustáquio (UFMG), pelo constante apoio, desde a época de graduação.

Um agradecimento especial ao Jaime Federici Gomes, colega, amigo, irmão, de longa jornada. Da mesma forma, à Nadir, sempre presente na vida de todos aqueles que passam pelo IPH, pessoa indispensável ao andamento dos trabalhos da pós-graduação.

Sidnei, Marcus Cruz, Paulo Araújo, Stela, Roberto Kirchheim, Alexandra, Joana Darc, Omar, pelas contribuições em discussões, sugestões, idéias, e pela amizade de sempre.

A todos os amigos e colegas do IPH, que nas tantas indas e vindas proporcionaram momentos de alegria e descontração. E, em nome do Jaido, irmão mais velho de uma geração inteira de alunos do IPH, a lembrança marcante de todos os que por aqui passaram.

Ao Paulo Edson, por sua dedicação ao laboratório de água e solo, e André Mito, Luciano e Denise, pelo apoio técnico durante o desenvolvimento do trabalho.

Àqueles que, mesmo de longe, sempre dão apoio: Elizeth, Luciana, Juliana, Mário Vinícius, Flávio Boaventura, e tantos outros...

À turma de mestrado de 1998, com quem iniciei este curso: Adriano Schorr, Jaime (já citado), Jean, Juliano, Marllus, Nicolás, Paulo Henrique, Sandro, Sérgio Gomez.

Ao pessoal do laboratório do URGH-HU, do INSA-Lyon, pela acolhida e contribuição para o desenvolvimento do trabalho.

Um agradecimento também especial ao IPH, que, com seu pessoal, sua estrutura, sua qualidade, cria condições para o desenvolvimento de tantos trabalhos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do CNPq, entidade do Governo Brasileiro voltada ao desenvolvimento científico e tecnológico. Contou com o apoio dos programas PRONEX-FINEP e RECOPE/REHIDRO-FINEP.

## II. RESUMO

A crescente urbanização observada nas últimas décadas tem sido acompanhada por problemas relacionados a quase todos aspectos da infra-estrutura urbana. No que se refere à drenagem pluvial, a situação não é diferente. A impermeabilização gerada pelo processo de urbanização faz com que os hidrogramas se tornem progressivamente mais críticos, com maiores volumes escoados, maiores vazões de pico e menores tempos de escoamento. Agravando esta situação, o sistema tradicional de drenagem, baseado na máxima “pegar e largar depressa”, busca a eliminação da água, o mais rápido possível, através de galerias, condutos enterrados e canalizações, significando, muitas vezes, a simples transferência da cheia para as seções de jusante. A solução clássica para o problema das cheias baseia-se na ampliação do sistema e/ou aumento da eficiência das redes, com custos geralmente elevados.

Este trabalho apresenta um estudo experimental efetuado em trincheiras de infiltração, dentro de uma filosofia compensatória dos efeitos da urbanização. Esses dispositivos se inserem dentro de um conceito ambiental da drenagem urbana, onde se busca não mais a eliminação da água o mais rapidamente possível, mas sua valorização dentro do espaço urbano, através de dispositivos bem integrados e, preferencialmente, multifuncionais. Duas trincheiras de infiltração foram instaladas e monitoradas em uma área do IPH-UFRGS. A implantação das trincheiras baseou-se na adaptação, para as condições brasileiras, de técnicas descritas na literatura, principalmente no que se refere aos métodos construtivos e materiais utilizados, assim como aos métodos e critérios de utilização e dimensionamento. Durante o período de monitoramento e análise de dados, foram avaliados e discutidos aspectos relacionados a: condições de funcionamento, tais como magnitude do evento pluviométrico e condições antecedentes de umidade do solo; eficiência dos dispositivos; ocorrência de escoamento preferencial; custos; limitações de aplicação. Aspectos relacionados ao funcionamento do dispositivo ao longo do período de monitoramento são também discutidos, buscando avaliar seu desempenho a longo prazo, apesar do curto período de observação. Adicionalmente, um modelo numérico de simulação do funcionamento quantitativo de dispositivos de infiltração foi testado (modelo de Bouwer), sendo sugeridas modificações para torná-lo mais abrangente.

As duas trincheiras mostraram-se eficientes, controlando 100% do volume escoado, mesmo para eventos de período de retorno superiores aos de projeto. Verificou-se que a metodologia de projeto gera super-dimensionamento das estruturas e que as condições iniciais de umidade do solo e as características dos eventos são fatores determinantes para seu funcionamento. Durante os 33 meses de observação da trincheira I e os 6 meses da trincheira II, não houve alterações significativas do funcionamento. Os eventos monitorados na trincheira I indicam a ocorrência de escoamento preferencial. Um ensaio destrutivo reforçou esta hipótese, além de mostrar acentuado grau de colmatação da primeira camada, em função do excessivo aporte de material em suspensão. Recomendações para utilização deste tipo de solução são apresentadas, visando estimular seu uso.

### III. ABSTRACT

The growing urbanisation observed during the last decades has been followed by problems related to almost all urban infrastructures issues. Urban drainage is not an exception. The imperviousness due to the urbanisation process causes critical flow conditions, with higher runoff volumes, higher peak flows and smaller travel times. Worsening this situation, the traditional drainage systems simply tries to get rid of the excess water, as fast as possible, through galleries, buried pipes and networks, resulting, most of the time, in a simple transference of the flood to the downward sections. The classical solution for flooding is based on the enlargement of the existing drainage system or by increasing the hydraulic efficiency of drainage networks, generally implying high costs.

This work presents an experimental study of infiltration trenches, based on a compensatory approach of urbanisation effects. These devices are conceived from an environmental standpoint, where the quick removal of the excess water is not the main goal, trying, instead, to increase its value in the urban space, through well integrated and multifunctional devices. Two infiltration trenches were installed and monitored, in the IPH-UFRGS area. The implementation of the trenches was based on the adaptation to Brazilian conditions of techniques described in the literature, including equipment and materials, as well as design and operational criteria. During the period of data gauging and analysis, aspects related to functioning conditions (such as rainfall magnitude and antecedent soil moisture), devices efficiency, preferential flow, costs, and limitations of use were assessed and discussed. Aspects related to the device's performance during the gauging period were also discussed, trying to evaluate long-term performance, despite the short monitoring period. Also, a numerical model for simulation of the quantitative performance of infiltration devices (Bouwer model) was tested, and some modifications were suggested to broaden its use.

Both trenches proved to be efficient, controlling 100 % of the runoff volume, even for events of return periods higher than the design return period. It was observed that the design procedure causes overestimates of the structures dimensions and that the initial soil moisture conditions, together with the events characteristics are determinant factors for its performance. No significant performance changes were observed during the gauging period (33 months for Trench I and 6 months for Trench II). The monitored events at Trench I suggest the occurrence of preferential flow. A destructive sampling strengthened this hypothesis and also showed advanced clogging at the top layer, due to the excessive inflow of suspended load. Recommendations for the use of this type of solution are presented, trying to encourage its use.

## IV. RÉSUMÉ

L'urbanisation croissante observée pendant les dernières décennies a été suivie par des problèmes relatifs à presque toutes les questions concernant l'infrastructure urbaine. En ce qui concerne l'assainissement pluvial urbain c'est pareil. L'imperméabilisation gerée par le processus d'urbanisation pose des conditions d'écoulement critiques, avec la croissance des volumes écoulés, au même temps que les débits de pointe et les temps de parcours sont réduits. Le système conventionnel de drainage essaie d'évacuer, le plus vite possible, les eaux pluviales à travers le réseau. Cette solution, dans la plupart du temps, provoque le transfert de l'inondation à l'aval. La solution classique pour les inondations est basée soit sur l'agrandissement du système de drainage existant, soit sur l'augmentation de l'efficacité hydraulique des réseaux. En général, cette solution signifie des coûts élevés.

Ce travail présente une étude expérimentale sur deux tranchées d'infiltration, installées dans le domaine du IPH-UFRGS, dans une approche de compensation des effets de l'urbanisation. Ces dispositifs sont conçus d'un point de vue environnemental du drainage urbain, où le but principal n'est pas l'évacuation la plus vite que possible, mais plutôt la valorisation des eaux dans le milieu urbain, à travers les dispositifs bien intégrés et, de préférence, avec plusieurs fonctions. La mise en oeuvre des tranchées a été basée sur l'adaptation à des conditions brésiliennes, y compris climat, sol, matériel et matière, aussi bien que dessin et critère opérationnel, de techniques bien connues et décrites dans la littérature scientifique. Pendant la période d'observation et d'analyses des données, on a évalué et discuté les aspects concernant: les conditions de fonctionnement (tel que magnitude de la pluie et humidité précédente du sol); efficacité des dispositifs; occurrence d'écoulement préférentiel; coûts; et limitations d'utilisation. Les aspects concernant la performance des dispositifs ont aussi été discutés, en essayant d'évaluer le fonctionnement à long terme, malgré la courte période analysée. En addition, un modèle numérique pour simuler le fonctionnement quantitative des dispositifs d'infiltration (modèle de Bouwer) a été testé, et quelques modifications ont été suggérées pour élargir son usage aux dispositifs de petite taille dans sols argileux.

Les deux tranchées ont montrées leurs efficience, en contrôlant 100% du volume écoulé, même pour les événements pluvieux avec périodes de retour supérieures à celui du projet. Il a été observé que la procédure de dimensionnement cause surestimation des dimensions des dispositifs et que les conditions précédentes d'humidité du sol, ainsi que les caractéristiques des événements sont les facteurs déterminants pour la performance des dispositifs. Aucun changement considérable de la performance n'a pas été observé pendant la période d'observation (33 mois pour la tranchée I et 6 mois pour la tranchée II). Les événements observés sur la tranchée I suggèrent l'occurrence d'écoulement préférentiel. Une autopsie avec échantillonnage dans cette tranchée a fortifié cette hypothèse et elle a aussi montré un processus de colmatage dans la première couche, dû à l'afflux excessif de matière en suspension. Des recommandations pour l'usage de ce type de solution sont présentées, en essayant d'encourager son usage.

## ÍNDICE

<b>I</b>	<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>RESUMO .....</b>	<b>II</b>
<b>III</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>IV</b>	<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>IV</b>
<b>V</b>	<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>VI</b>	<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>VII</b>	<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIII</b>
	<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
	<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
	1.1 - JUSTIFICATIVA .....	1
	1.2 - OBJETIVOS .....	5
	1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	6
	<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>7</b>
	<b>2 - AS TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO NA DRENAGEM URBANA.....</b>	<b>7</b>
	2.1 - EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.....	7
	2.2 - A URBANIZAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A DRENAGEM .....	9
	2.3 – SISTEMA TRADICIONAL OU CONVENCIONAL DE DRENAGEM .....	12
	2.4 - SISTEMAS DE DRENAGEM ALTERNATIVOS , COMPENSATÓRIOS OU AMBIENTAIS .....	13
	2.4.1 - <i>Armazenamento na fonte</i> .....	17
	2.4.2 - <i>Infiltração</i> .....	18
	2.4.2.1 - Pavimentos permeáveis , valos, poços e trincheiras de infiltração .....	19
	2.4.2.2 - Bacias de infiltração.....	20
	2.5 - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO.....	21
	2.5.1 - <i>Utilização: vantagens, desvantagens, riscos, limites</i> .....	22
	2.5.2 - <i>Projeto e dimensionamento: o “Rain-Envelope-Method”</i> .....	25
	2.5.2.1 - Vazão (volume) de projeto afluente à trincheira.....	26
	2.5.2.2 - Taxa de infiltração/percolação .....	28
	2.5.2.3 - Vazão (volume) de saída da trincheira.....	29
	2.5.2.4 - Cálculo do volume da trincheira.....	30
	2.5.3 - <i>Processo de colmatção</i> .....	31
	2.5.4 - <i>Vida útil</i> .....	33
	2.5.5 - <i>Práticas de manutenção</i> .....	34
	2.5.6 - <i>Cuidados na execução</i> .....	36
	2.5.7 - <i>Gestão e aspectos institucionais</i> .....	37
	2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
	<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>39</b>
	<b>3 - DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>39</b>
	3.1 - VARIÁVEIS DE CONTROLE E MEDIÇÃO.....	40
	3.2 - INSTRUMENTOS DE CONTROLE E MEDIÇÃO.....	41
	3.2.1 - <i>Precipitação</i> .....	41
	3.2.2 - <i>Vazão (volume) de entrada no dispositivo</i> .....	43
	3.2.3 - <i>Nível no dispositivo e vazão (volume) de saída</i> .....	45
	3.2.4 - <i>Tempo de esvaziamento e nível de colmatção do dispositivo</i> .....	46

3.2.5 - <i>Umidade do solo</i> .....	46
3.3 - CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	48
3.3.1 - <i>Ensaio de caracterização</i> .....	48
3.3.1.1 - Curva de infiltração: ensaio dos cilindros concêntricos.....	48
3.3.1.2 - Condutividade hidráulica: método do poço invertido.....	49
3.3.1.3 - Perfil do solo: ensaio de textura.....	50
3.3.1.4 - Curva de retenção.....	51
3.3.2 - <i>Coefficientes de segurança</i> .....	51
3.4 - INSTALAÇÃO DA TRINCHEIRA I.....	53
3.4.1 - <i>Descrição e caracterização do local de implantação</i> .....	53
3.4.2 - <i>Projeto e dimensionamento</i> .....	55
3.4.3 - <i>Localização/individualização da área de contribuição</i> .....	57
3.4.4 - <i>Execução do dispositivo</i> .....	58
3.5 - INSTALAÇÃO DA TRINCHEIRA II.....	60
3.5.1 - <i>Descrição e caracterização do local de implantação</i> .....	60
3.5.2 - <i>Projeto e dimensionamento</i> .....	61
3.5.3 - <i>Localização/Individualização da área de contribuição</i> .....	64
3.5.4 - <i>Execução do dispositivo</i> .....	64
3.6 - MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS DISPOSITIVOS.....	65
3.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>69</b>
<b>4 - ANÁLISE DE DADOS</b> .....	<b>69</b>
4.1 - FORMATAÇÃO DOS DADOS.....	70
4.2 - SELEÇÃO DE EVENTOS.....	75
4.3 - AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS E FENÔMENOS ENVOLVIDOS.....	75
4.3.1 - <i>Análise da precipitação</i> .....	75
4.3.2 - <i>Interceptação vegetal e geração do escoamento superficial</i> .....	76
4.3.3 - <i>Cálculo das vazões e volumes de entrada nos dispositivos</i> .....	78
4.3.4 - <i>Cálculos de vazões e velocidades de saída (infiltração)</i> .....	79
4.3.5 - <i>Escoamento de saída</i> .....	83
4.3.6 - <i>O fenômeno da histerese</i> .....	84
4.4 - EFICIÊNCIA DO DISPOSITIVO (VOLUMES E VAZÕES CONTROLADAS).....	86
4.5 - COMPORTAMENTO DE LONGO PRAZO E VIDA ÚTIL.....	88
4.6 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO.....	91
4.7 - PRÁTICAS DE MANUTENÇÃO.....	93
4.8 - EXTENSÃO DA APLICAÇÃO.....	94
4.9 - ANÁLISE DE CUSTOS.....	94
4.10 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>98</b>
<b>5 - AJUSTE DE MODELOS</b> .....	<b>98</b>
5.1 - MODELO DE BOUWER.....	99
5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO DE BOUWER.....	102
5.3 - APLICAÇÃO DO MODELO ÀS TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO.....	103
5.3.1 - <i>Infiltração pelo fundo</i> .....	103
5.3.2 - <i>Infiltração pelas paredes</i> .....	104
5.3.3 - <i>Infiltração total e função objetivo</i> .....	105
5.4 - RESULTADOS DO AJUSTE DO MODELO.....	106
5.4.1 - <i>Trincheira I</i> .....	106

5.4.2 - <i>Trincheira II</i> .....	108
5.5 - RECOMENDAÇÃO PARA MODIFICAÇÃO NO MODELO .....	112
5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	112
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>114</b>
<b>6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....</b>	<b>114</b>
<b>7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>1</b>
A1 – RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO .....	A1
<i>A1.1 - Concepção de projeto</i> .....	A1
<i>A1.2 - Ensaios de caracterização</i> .....	A2
A1.2.1 - Curva de infiltração: ensaio dos cilindros concêntricos.....	A3
A1.2.2 - Condutividade hidráulica: método do poço invertido .....	A4
<i>A1.3 - Metodologia de cálculo</i> .....	A5
<i>A1.4 - Recomendações para a construção</i> .....	A7
<i>A1.5 - Dispositivos auxiliares para controle de material em suspensão</i> .....	A7
<i>A1.6 - Manutenção</i> .....	A8
<i>A1.7 – Custos</i> .....	A8
<i>A1.7 - Limitações</i> .....	A8
A2 - INFORMAÇÕES ADICIONAIS .....	A10



## V. LISTA DE SÍMBOLOS

$r$	densidade
$q$	conteúdo de água no solo
$a$	ângulo médio dos taludes da trincheira em relação à vertical
$DH$	variação da altura
$Dt$	variação do tempo
$DV$	variação do volume
$A$	área
$a, b, n$	coeficientes, cujos valores são obtidos para cada tipo de solo
$A_{perc}$	área disponível para percolação
$BMP$	<i>Best Management Practices</i>
$C$	coeficiente de escoamento
$D$	volume específico de percolação
$E$	vazão específica de saída da bacia
$f_m$	potencial matricial
$h$	nível d'água no interior da trincheira
$H_w$	altura d'água no interior do dispositivo
$\tilde{Nf}$	gradiente hidráulico
$I_b$	taxa de infiltração no final do ensaio de infiltração, para solo saturado
$i_{máx}$	intensidade máxima da precipitação
$IPH-UFRGS$	Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
$I_T$	intensidade da precipitação de T anos de retorno
$k$	condutividade hidráulica saturada
$K_a$	condutividade hidráulica da camada colmatada
$K_p$	condutividade hidráulica do solo subjacente
$L_a$	espessura da camada colmatada
$P$	pressão intersticial do solo subjacente
$P_{cr}$	pressão crítica
$per$	perímetro da trincheira
$q$	vazão de infiltração específica

$Q$	vazão
$Q_{calc}$	vazão calculada
$Q_e$	vazão de entrada na trincheira
$Q_f$	vazão de infiltração pelo fundo da trincheira
$Q_p$	vazão de infiltração pela parede da trincheira
$Q_s$	vazão de saída da trincheira por infiltração
$R$	resistência hidráulica
$R_f$	resistência hidráulica do fundo da trincheira
$R_p$	resistência hidráulica das paredes da trincheira
$t$	instante de tempo qualquer
$T$	período de retorno
$t_p$	tempo de percolação
$U$	velocidade do fluxo, de acordo com a lei de Darcy
$V$	volume a ser armazenado
$V_d$	volume de dimensionamento
$V_e$	volume acumulado de entrada na trincheira
$V_{perc}$	volume de água percolado no solo
$V_s$	volume acumulado de saída da trincheira
$V_T$	volume escoado para uma precipitação de T anos de retorno

## VI. LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma: metodologia de desenvolvimento do trabalho .....	6
Figura 2.1 – Efeito da urbanização sobre o sistema de drenagem (aspecto quantitativo) .....	8
Figura 2.2 – Evolução da população no Brasil .....	9
Figura 2.3 – Urbanização sobre a vazão máxima (aspecto quantitativo) .....	10
Figura 2.4 – Medida compensatória (infiltração) para o efeito da urbanização .....	14
Figura 2.5 – Microrreservatório de retenção no lote, simulado por Cruz <i>et al.</i> (1998) e Agra (2001).....	18
Figura 2.6 – Coincidência de picos por retardo no escoamento.....	18
Figura 2.7 – Integração de poços de infiltração com o espaço urbano .....	20
Figura 2.8 – Trincheira de infiltração típica .....	22
Figura 2.9 – Trincheira de infiltração (a) sob pavimento permeável em estacionamento (Bettes, 1996) e (b) ao longo de calçada em área comercial (Lyon-França).....	23
Figura 2.10 – Determinação do volume do dispositivo .....	26
Figura 2.11 – Volume afluente para bloco único de precipitação .....	27
Figura 2.12 – Relação entre carga sólida acumulada e condutividade hidráulica saturada.....	32
Figura 2.13 – Evolução da vazão infiltrada em função do tempo.....	33
Figura 3.1 – Esquema geral da instrumentação para monitoramento .....	41
Figura 3.2 – Instalação do pluviógrafo I ("Galpão").....	42
Figura 3.3 – Vertedor para medição da entrada na trincheira II, com tranquilizador de fluxo .....	43
Figura 3.4 – Curvas de calibração: a) vertedor da trincheira I e b) vertedor da trincheira II .....	44
Figura 3.5 – Curva de infiltração característica.....	49
Figura 3.6 – Esquema de montagem do infiltrômetro de cilindros concêntricos.....	49
Figura 3.7 – Esquema de montagem do ensaio do poço invertido .....	49
Figura 3.8 – Variação da velocidade de infiltração com a temperatura.....	50
Figura 3.9 – Esquema de montagem (a) do prato de sucção e (b) da panela de pressão .....	51
Figura 3.10 – Curva de retenção da água no solo (Trincheira I).....	54
Figura 3.11 – Volumes de entrada e saída acumulados.....	56
Figura 3.12 – Projeto da trincheira de infiltração I.....	57
Figura 3.13 – Individualização da área de estudos .....	58
Figura 3.14 – (a) Escavação da trincheira e (b) colocação de bidim® .....	59
Figura 3.15 – (a) Enchimento da trincheira com brita e (b) fechamento.....	59
Figura 3.16 – Trincheira pronta, em monitoramento.....	59
Figura 3.17 – Curva de retenção obtida no local de instalação da trincheira II .....	61
Figura 3.18 – Área de contribuição para a trincheira II.....	62
Figura 3.19 – Curva envelope de dimensionamento da trincheira II.....	63
Figura 3.20 – Projeto da trincheira II.....	63
Figura 3.21 – Área de contribuição da trincheira II .....	64
Figura 3.22 – Escavação e enchimento da trincheira.....	65

Figura 3.23 –Trincheira II: fechamento e pronta para o monitoramento.....	65
Figura 3.24 – (a) sensores de pressão da trincheira I e (b) monitoramento na trincheira II .....	66
Figura 3.25 – Material de enchimento da trincheira II, com grande parcela de material fino .....	67
Figura 4.1 – Definição de evento .....	70
Figura 4.2 – Dados fornecidos pelos registradores automáticos na trincheira I, antes e após formatação .....	71
Figura 4.3 – Dados fornecidos pelos registradores automáticos na trincheira II .....	71
Figura 4.4 – Tempos de retorno dos principais eventos observados .....	76
Figura 4.5 – Coeficiente de escoamento: precipitação / volume escoado (trincheira I) .....	77
Figura 4.6 – (a) correlação entre precipitação “G” e “H” e (b) Interceptação vegetal .....	78
Figura 4.7 – Coeficiente de escoamento na trincheira II: volume precipitado / volume escoado.....	78
Figura 4.8 – Defasagem entre a entrada e a resposta na trincheira.....	79
Figura 4.9 – Medições na trincheira coincidentes com período de alimentação (evento 25/03/2001).....	80
Figura 4.10 – Curva de infiltração em função do nível para a trincheira I (21/09/2000) .....	80
Figura 4.11 – Período de esvaziamento puro .....	81
Figura 4.12 – Curva de infiltração em função do nível na trincheira II (01/10/2001) .....	81
Figura 4.13 – Eventos consecutivos na trincheira I.....	82
Figura 4.14 – Macroporo na trincheira I.....	84
Figura 4.15 – Efeito “bolha de tinta”.....	85
Figura 4.16 – Histerese na trincheira I.....	85
Figura 4.17 – Evento observado na trincheira I (21/09/2000).....	87
Figura 4.18 – Evento observado na trincheira II (01/10/2001) .....	87
Figura 4.19 – (a) tela da caixa de areia entupida e (b) material em suspensão colmatando primeira camada da trincheira .....	88
Figura 4.20 – Colmatação da camada superior da trincheira (geotêxtil).....	89
Figura 4.21 – Evolução da curva de infiltração (nível h=10 cm).....	89
Figura 4.22 – Ensaio destrutivo na trincheira I .....	90
Figura 4.23 – Condições do geotêxtil no interior da trincheira .....	91
Figura 4.24 – Superdimensionamento devido a simplificações no método (evento observado).....	92
Figura 4.25 – Custo de trincheiras de infiltração $\times$ área de contribuição $\times$ condutividade hidráulica .....	96
Figura 5.1 – Notação utilizada no modelo de Bouwer (1969) .....	99
Figura 5.2 – Forma da curva que relaciona a condutividade hidráulica com a pressão capilar .....	100
Figura 5.3 – Representação das áreas de infiltração para um dispositivo qualquer .....	103
Figura 5.4 – Vazão de infiltração em função do nível: eventos analisados na trincheira I .....	106
Figura 5.5 – Ajuste do modelo à eventos da trincheira I.....	107
Figura 5.6 – Ajuste do modelo para um evento pouco significativo .....	107
Figura 5.7 – Vazão em função do nível na trincheira II.....	108
Figura 5.8 – Ajuste do modelo aos principais eventos observados na trincheira II .....	109
Figura 5.9 – Ajuste global na trincheira II .....	109
Figura A1.1 – Configuração sugerida para a trincheira.....	A1
Figura A1.2 – Esquema de montagem do infiltrômetro de cilindros concêntricos .....	A2

Figura A1.3 – Curva de infiltração característica.....	A3
Figura A1.4 – Montagem do poço invertido.....	A4

## VII. LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas .....	11
Tabela 2.2 – Parâmetros de caracterização das águas pluviais .....	12
Tabela 2.3 – Monitoramento de trincheiras em Bordeaux-França .....	24
Tabela 2.4 – Condutividade hidráulica saturada de alguns tipos de solos .....	28
Tabela 2.5 – Porosidade efetiva de materiais de enchimento .....	29
Tabela 2.6 – Parâmetros que influenciam a colmatação .....	31
Tabela 3.1 – Calibração do vertedor da trincheira I .....	43
Tabela 3.2 – Calibração do vertedor da trincheira II .....	44
Tabela 3.3 – Classes de condutividade hidráulica .....	50
Tabela 3.4 – Coeficientes de segurança para o projeto de estruturas de infiltração (Bettess, 1996) .....	52
Tabela 3.5 – Ensaios de infiltração: método do infiltrômetro de cilindros concêntricos .....	53
Tabela 3.6 – Ensaio de condutividade hidráulica saturada: método do poço invertido .....	53
Tabela 3.7 – Perfil do solo no local de instalação da trincheira.....	54
Tabela 3.8 – Ensaios de infiltração .....	60
Tabela 3.9 – Perfil do solo no local de instalação da trincheira II.....	60
Tabela 3.10 – Densidade e porosidade do solo no local de implantação da trincheira II .....	61
Tabela 4.1 – Características dos eventos observados na trincheira I.....	72
Tabela 4.2 – Características dos eventos observados na trincheira II .....	74
Tabela 4.3 – Relação entre eventos observados e eventos analisados na trincheira I .....	74
Tabela 4.4 – Relação entre eventos observados e eventos analisados na trincheira II.....	74
Tabela 4.5 – Tempo gasto para baixar 40 cm na trincheira II em esvaziamento puro (horas) .....	83
Tabela 4.6 – Variações entre as condições dos ensaios de caracterização e o funcionamento real .....	83
Tabela 4.7 – Custos relacionados ao desenvolvimento do trabalho.....	95
Tabela 5.1 – Parâmetros ajustados para alguns eventos da trincheira II .....	108
Tabela 5.2 – Medições de umidade na área da trincheira II (usando sonda de nêutrons).....	111
Tabela A1.1 – Porosidade média para alguns materiais de enchimento.....	A2
Tabela A1.2 – Condutividade hidráulica saturada de alguns tipos de solos .....	A3

# Capítulo 1

---

"Se soubéssemos tudo, não teríamos necessidade de fazer descobertas."  
*M. Weatherall*

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Justificativa

A crescente urbanização das cidades brasileiras observada nas últimas décadas tem sido acompanhada por grandes problemas relacionados a praticamente todos os aspectos da infra-estrutura: saneamento, transporte, habitação, abastecimento, dentre outros.

No que se refere à drenagem pluvial, vários autores (Tucci, 1995; Campana, 1995; Silveira, 2001, entre outros) têm publicado trabalhos que apresentam o impacto da urbanização sobre o escoamento no meio urbano, nos aspectos quantitativos, nos aspectos qualitativos e no que diz respeito à gestão.

Com a urbanização, vem a impermeabilização e uma parcela de água que infiltrava no solo passa a compor o escoamento superficial, com aumento dos volumes escoados e das vazões de pico ao mesmo tempo em que ocorre a redução do tempo de concentração, o que faz com que os hidrogramas de cheias se tornem mais críticos. Essas alterações provocam um aumento na frequência e na magnitude das inundações, o que pode ser visto, todo ano, nos principais jornais do país, que relatam alagamentos provocados pelas águas das chuvas no meio urbano.

Ao mesmo tempo em que se vê o aumento na frequência das inundações urbanas, ocorre a deterioração da qualidade da água. A água do escoamento lava as superfícies carregadas de poluentes (óleos e graxas, metais pesados, sedimentos e carga orgânica), conduzindo essa carga poluente para os corpos d'água receptores.

Baseada nos conceitos higienistas do século XIX, a solução clássica para a drenagem procura remover da forma mais rápida e eficiente possível a água dos centros urbanos. Baseadas na máxima "pegar e largar depressa" (Botelho, 1998), presente na maioria dos

manuais de drenagem de uso corrente no país, as ações se concentram na execução de obras hidráulicas, tais como construção de redes subterrâneas de drenagem, canalizações e retificações de corpos d'água, construção de galerias, drenagem de banhados, dentre outras.

Esse tipo de solução encontra suas limitações à medida que o sistema de drenagem se torna mais complexo, atingindo custos onerosos para uma sociedade carente de recursos, como a brasileira. A cada etapa de desenvolvimento da cidade (e conseqüente impermeabilização de novas áreas) a montante de um trecho onde foram adotadas medidas que aumentam a eficiência de drenagem, este trecho se tornará insuficiente, já que os volumes escoados de montante serão aumentados. Dessa forma, essas medidas não são definitivas ou sustentáveis: resolvem o problema da cheia em uma área, mas o transferem para jusante, exigindo, assim, o redimensionamento da rede de drenagem de jusante e resultando em custos cada vez mais elevados devido às dimensões das novas estruturas.

Nascendo o conceito ambiental, em substituição ao higienista, aparecem as soluções alternativas ou ambientais de drenagem que, agindo em conjunto com as estruturas convencionais, procuram compensar sistematicamente os efeitos da urbanização, não só em termos quantitativos mas também em termos qualitativos.

As alternativas de infiltração, detenção e retenção procuram favorecer os processos hidrológicos alterados durante a urbanização (infiltração, interceptação, amortecimento), objetivando a reconstituição das condições de pré-ocupação. Essas estruturas buscam compensar os efeitos da urbanização na fonte, ou seja, antes que a água atinja a rede de drenagem.

As estruturas de infiltração trabalham tanto na redução das vazões máximas, funcionando como reservatórios de amortecimento, quanto na redução dos volumes escoados, através da infiltração das águas drenadas, podendo desempenhar também um importante papel na remoção e no controle de poluentes do escoamento superficial bem como na recarga das águas subterrâneas. São, portanto, estruturas que recuperam de forma mais efetiva as condições de pré-ocupação.

Um aspecto importante a ser pensado quando da concepção de medidas de controle do escoamento superficial é à valorização da água no meio urbano. Nesse sentido, os dispositivos alternativos desempenham papel fundamental no que se refere a melhorias ecológicas no ciclo da água em meio urbano (Fujita, 1996; Kampfmann e Wegner, 1996). No Japão os dispositivos de infiltração têm sido usados para o controle do escoamento de rios e condutos, com os objetivos principais de manutenção de escoamento de base, sustentabilidade dos



recursos hídricos, recarga das águas subterrâneas e prevenção contra a salinização dos aquíferos (através da sua renovação-recarga) (Fujita, 1996).

O uso sistemático dos dispositivos de infiltração como elementos da drenagem urbana no Brasil ainda é muito restrita, sendo difícil encontrar trabalhos publicados relatando essa utilização. Os trabalhos relatados em publicações científicas internacionais trazem exemplos de aplicação em regiões com características hidrológicas bastante diferentes das encontradas no Brasil, principalmente no que se refere à precipitação, o que significa que são necessários mais estudos que trarão mais informações para o emprego de tais tecnologias.

A literatura internacional relata casos isolados, mas cada vez em maior número, (Fujita, 1996; Balades *et al.*, 1998; Warnars *et al.*, 1998; Gautier *et al.*, 1999, dentre outros), em que esses dispositivos estão sendo utilizados, observados e modelados, mas ainda com poucas informações a respeito do efeito do uso sobre os processos hidrológicos envolvidos e sobre a drenagem urbana como um todo, o que torna difícil a elaboração de manuais de projeto apropriados e precisos, relacionando o comportamento hidrológico das estruturas de infiltração para planejamento urbano.

No que se refere à qualidade, diversos pesquisadores (Balades *et al.*, 1998; Barraud *et al.*, 1998; Gautier, 1998) têm trabalhado na tentativa de se aferir a influência e o risco de poluição das águas subterrâneas e do solo no entorno de dispositivos de infiltração. No entanto, os resultados ainda não são conclusivos.

Warnars *et al.* (1998) ressaltam a importância de pesquisas aplicadas nessa área, relatando as experiências e os resultados obtidos, com a finalidade de se obterem padrões de projeto, e apresentando o comportamento hidrológico dos dispositivos de infiltração, para fins de planejamento dos sistemas de drenagem urbana. Segundo o autor, na cidade de Copenhagem (Dinamarca), estruturas de infiltração são usadas há cerca de 100 anos, mas as informações a respeito apenas aparecem em discussões informais.

A vida útil do dispositivo é um dos parâmetros importantes na avaliação da sua viabilidade e depende, dentre outros fatores, da qualidade da água afluente ao dispositivo, principalmente no que se refere à quantidade de sedimentos. A avaliação da vida útil pode ser feita a partir do acompanhamento da evolução do processo de colmatção em dispositivos experimentais.

Vários autores (Fujita, 1996, Ishizaki, 1996 e Yamada, 1993, no Japão; Zimmer *et al.*, 1999 e Bettess, 1996, na Alemanha; Argue, 1999 na Austrália; Warnars *et al.*, 1998; Balades *et al.*, 1998, Barraud, 2000 e Gautier *et al.* 1999, na França, dentre outros) têm desenvolvido trabalhos com dispositivos de infiltração. No entanto cada uma das regiões apresenta suas

particularidades, principalmente no que se refere às características hidrológicas, climatológicas e de solo.

O conhecimento do funcionamento dos dispositivos ditos "alternativos" envolve pesquisas em um campo extremamente vasto e abrangente, tal é a diversidade dos dispositivos aqui compreendidos (bacias, poços, valos, planos, trincheiras de infiltração; pavimentos permeáveis; microrreservatórios de detenção, dentre outros), as solicitações às quais os dispositivos podem estar sujeitos (escoamento pluvial em rede unitária ou separativa) e as configurações de funcionamentos que podem ser utilizadas (a montante ou a jusante da rede, na parcela, com ou sem tratamento, etc.) (Bardin, 1999). Dessa forma, fez-se necessário restringir o campo de trabalho e a escolha do tema "trincheiras de infiltração" se deu em função dos seguintes aspectos:

- necessidade de se aprofundar a discussão desse assunto no Brasil, através de uma contribuição ao conhecimento do seu funcionamento, tanto nos aspectos quantitativos quanto nos qualitativos;
- necessidade de incentivo à adoção de controle do escoamento na fonte, através de trincheiras de infiltração;
- o controle na fonte se mostra vantajoso no que se refere à facilidade de implementação e manutenção e à disponibilidade de material;
- esses dispositivos drenam pequenas áreas e, portanto, estão sujeitos ao carreamento de pequenas quantidades de poluentes;
- os custos de implantação podem ser baixos, dependendo das condições locais e da combinação de soluções empregadas.

Pesquisas dentro desse contexto já vêm sendo desenvolvidas no IPH, tendo se iniciado com o trabalho de Genz (1994). O autor utilizou um modelo matemático hidrológico para simular um lote padrão de ocupação urbana na cidade de Porto Alegre. Com variação das taxas de áreas impermeáveis e com alterações nos tipos de cobertura do solo, o autor verificou os diversos valores de vazão de saída dos lotes, buscando então a introdução de estruturas de amortecimento para retorná-los às condições de pré-ocupação.

Cruz et al. (1998) prosseguiram nessa linha de pesquisa, analisando numericamente a aplicação de seis tipos de estruturas de detenção localizadas em lotes hipotéticos da cidade de

Porto Alegre, sujeitos a aumentos progressivos de urbanização. Um desses reservatórios (de 1 m<sup>3</sup>) foi monitorado por Agra (2001).

Dentro da mesma filosofia, Araújo *et al.* (2000) realizaram estudos para avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis no controle do escoamento urbano. Foram efetuados experimentos utilizando um simulador de chuvas em módulos de 1 m<sup>2</sup>, para seis diferentes tipos de coberturas urbanas (incluindo dois tipos de pavimentos permeáveis).

Atualmente, trabalhos apoiados pelos programas PRONEX (IPH, 1997a) e RECOPE/REHIDRO (IPH, 1997b) continuam seguindo essa linha de pesquisa, sendo que esse trabalho faz parte desse conjunto.

## **1.2 - Objetivos**

Com base nas justificativas acima, o desenvolvimento desse trabalho foi feito de forma a se atingirem os seguintes objetivos:

- verificar se as trincheiras de infiltração podem ser utilizadas de forma efetiva no controle da geração do escoamento superficial, através de uma análise de sua atuação sobre o ciclo hidrológico urbano, visando a reconstituição da vazão de preocupação, a partir do monitoramento de 2 dispositivos instalados no IPH-UFRGS, levando-se em consideração as particularidades das condições brasileiras para a adoção deste tipo de solução (clima, solo, materiais e métodos construtivos, custos).

Considerando-se as especificidades das condições brasileiras no que se refere aos processos hidrológicos, aos fatores climáticos, ao tipo, uso e ocupação do solo e aos materiais e métodos construtivos disponíveis, os objetivos específicos deste estudo são os seguintes:

- crítica sobre métodos e parâmetros de dimensionamento;
- avaliação do desempenho a curto e longo prazo, visando o planejamento da drenagem urbana;
- avaliação da perda da função de controle do escoamento por colmatção;
- avaliação da aplicabilidade de um modelo quantitativo (Bouwer, 1969), já testado com eficiência em outras condições;
- análise de custos de implantação e manutenção dos dispositivos de infiltração.

### 1.3 - Organização do trabalho

A Figura 1.1 apresenta, de forma esquemática, a metodologia empregada nesse trabalho, que tentará responder às seguintes questões:

1. Quais são as principais características dos sistemas alternativos de drenagem do tipo infiltração?
2. Como funciona um dispositivo de infiltração e como ele interage com o meio?
3. Quais os limites dos sistemas alternativos e como trabalhar tais limites?
4. Quais os riscos de aplicação destes dispositivos, no que se refere à qualidade e ao risco de contaminação do meio?

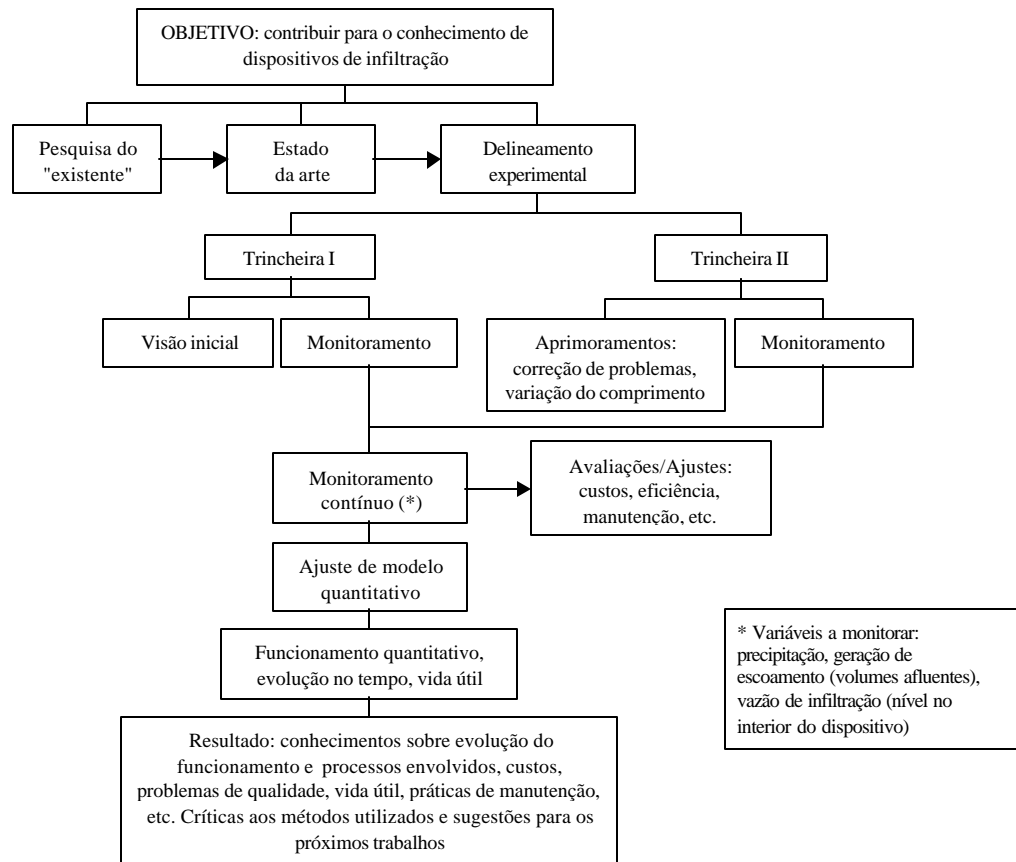


Figura 1.1 – Fluxograma: metodologia de desenvolvimento do trabalho

## Capítulo 2

---

Torna-se indispensável que a humanidade formule um novo modo de pensar se ela quer sobreviver e atingir um plano mais elevado."  
*Albert Einstein*

### 2 - AS TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO NA DRENAGEM URBANA

#### 2.1 - *Evolução dos sistemas de drenagem urbana*

Antes do século XIX as intervenções em drenagem eram feitas de forma isolada, através de tecnologias precárias, quando, então, começaram a se desenvolver novos conceitos em saúde pública, em circulação e conforto. Os problemas de águas pluviais e esgotos eram tratados de forma um tanto simples, através do sistema unitário ou o 'tout à l'égoût' (tudo no esgoto). Como os esgotos pluviais e domésticos são visualmente desagradáveis, tratou-se logo de escondê-los, através de redes subterrâneas, que passavam por baixo do sistema viário. Buscava-se retirar a água dos centros urbanos da forma mais rápida possível, através da canalização dos cursos d'água (Nascimento, 1996).

No início do século XX começaram a surgir os primeiros modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão, tais como o método racional, que buscam solucionar os problemas de drenagem sem modificar o uso do solo. Sendo assim, mais uma vez, a solução era canalizar. Nesta mesma época foi introduzida a noção de risco.

A partir de meados do século XX iniciou-se um processo intenso de urbanização, que impermeabilizava áreas progressivamente maiores. A partir de então, o sistema de drenagem começou a entrar em crise, tornando-se insuficiente. A solução hidráulica era o aumento das canalizações, sendo que essa solução tornava-se inviável por serem elevados os custos de implantação e não ser uma solução definitiva: à medida que os centros urbanos se desenvolviam, era necessário rever todo o sistema de drenagem. Nessa época começaram a aparecer os reservatórios urbanos para amortecimento de cheias, estruturas que armazenam temporariamente a água da chuva, para posterior liberação gradual.

O conceito ambientalista surge a partir da maior conscientização ecológica e de uma explosão tecnológica, tendo se iniciado por volta dos anos 70. Nessa nova visão, procurou-se

estabelecer alternativas ao conceito de evacuação rápida, reconheceu-se a poluição do esgoto pluvial e desenvolveu-se uma crescente pressão para que todos os esgotos fossem tratados. Essa nova concepção teve maior impulso a partir dos anos 80 até hoje (Silveira, 1998).

Essa nova abordagem é mais complexa e envolve maiores investimentos iniciais, já que depende fortemente de condições locais (porque é ambiental), mas apresenta menor custo global, visto que trabalha com a conscientização ambiental e prevenção dos problemas. Por isso a transferência de resultados ou métodos de outros locais é bem menos aceitável do que era para as etapas higienistas (Silveira, 1998). No Brasil, grande parte das obras de drenagem urbana ainda segue o conceito higienista, em função da falta de pesquisa aplicada (para adequação de tecnologias e critérios de uso), aliada ao conservadorismo do setor.

Seguindo os conceitos higienistas, as práticas tradicionais de drenagem, largamente utilizadas no Brasil, procuram conduzir as águas pluviais da forma mais rápida possível para fora das áreas urbanas, através de galerias, canais, etc. Estas estruturas, no entanto, se tornam insuficientes à medida que a cidade se desenvolve. O problema das cheias urbanas é tratado considerando-se os trechos críticos de forma isolada, sem análises das conseqüências para a bacia como um todo; nem sequer são previstos os horizontes de ocupação. Dessa forma, ao solucionar o problema de inundações de um trecho, o problema pode ser transferido para as seções a jusante, como apresentado na Figura 2.1 (Tucci, 1995).

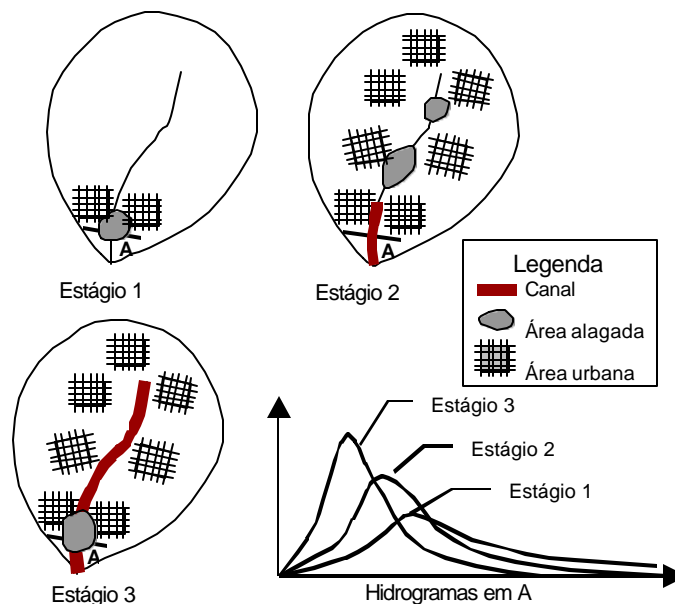


Figura 2.1 – Efeito da urbanização sobre o sistema de drenagem (aspecto quantitativo)  
(Fonte: Tucci, 1995)

Dentro de uma abordagem ambiental do ciclo hidrológico surgem as tecnologias alternativas de drenagem, que procuram atuar sobre os processos hidrológicos tanto na

reconstituição das vazões naturais quanto no que se refere à qualidade da água. Não só o problema quantitativo da drenagem é tratado, mas também as questões de convivência com a água no meio urbano. O rio volta a fazer parte da cidade, devendo se integrar a ela, de forma harmoniosa e agradável. E, para esta reintegração do rio, faz-se necessário tratar da qualidade da água como um dos aspectos da drenagem indissociável dos aspectos quantitativos.

## 2.2 - A urbanização e sua influência sobre a drenagem

Em 1800, apenas 1% da população mundial morava em cidades. Em 1970 este percentual era de 37%, passando a cerca de 46% em 1990. Para o ano 2000 era previsto que se atingiria os 51%. Observa-se um crescimento mais acentuado a partir dos anos 70: em torno de 64% para os países desenvolvidos e de 239% para os países menos desenvolvidos, para o período que vai do início dos anos 70 até o ano 2000 (tendo sido a população do ano 2000 estimada) (Gladwell 1993).

O Brasil apresentou um significativo crescimento da população urbana nas últimas décadas. Entre 1950 e 1996 (IBGE, 2002), aumentou mais de 7 vezes, passando de 31% para 81% do total (a Figura 2.2 mostra o crescimento populacional brasileiro entre 1800 e 2000). Este crescimento acelerado resultou em uma população urbana praticamente sem infraestrutura. Os problemas decorrentes podem ser vistos em todos os aspectos do espaço urbano (saneamento, transporte, abastecimento, habitação, educação), e em particular no que se refere à drenagem das águas pluviais.

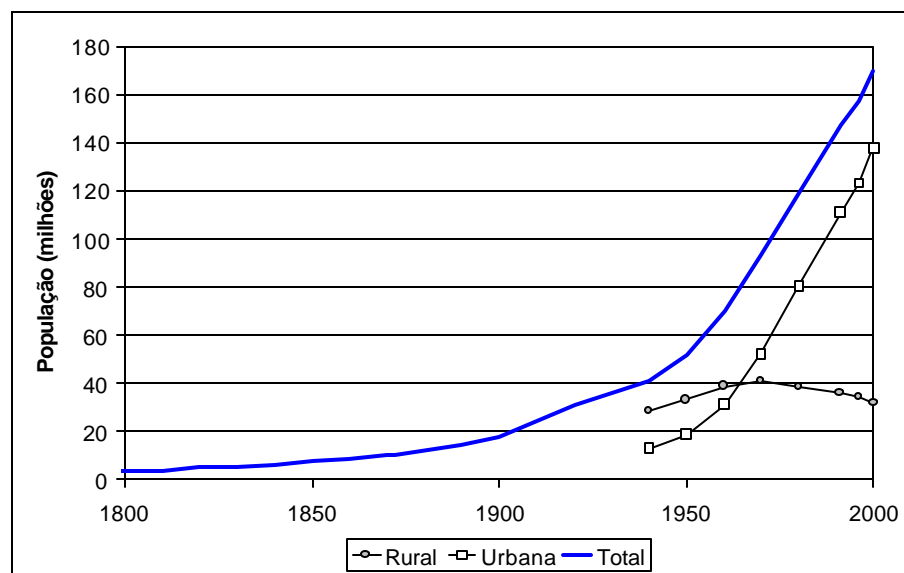


Figura 2.2 – Evolução da população no Brasil  
Fonte: IBGE (2002)

O desenvolvimento urbano provoca a impermeabilização do solo, através de telhados, ruas, calçadas e pátios, entre outros. Dessa forma, a água que anteriormente se infiltrava passa a escoar pelas superfícies impermeáveis, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície mais rugosa, ficando retido em depressões e vegetação, passa a escoar em condutos e canais, exigindo maior capacidade das seções de escoamento.

Assim, os efeitos da urbanização sobre a drenagem das águas pluviais são percebidos através do aumento das enchentes urbanas (em magnitude e freqüência), trazendo grandes prejuízos materiais e sociais. A Figura 2.1 apresenta uma situação típica do efeito provocado pela urbanização sobre o hidrograma de cheias em uma bacia urbana. A tendência da urbanização é ocorrer de jusante para montante, devido, principalmente, às características do relevo. Assim, quando os loteamentos de montante são implantados, os efeitos verificados sobre o hidrograma de cheia são transferidos para as seções de jusante, que se tornam insuficientes.

Segundo Silveira (1999), a impermeabilização causada pela urbanização pode provocar aumento da ordem de 6 a 7 vezes no coeficiente de escoamento global. O autor trabalhou com dados da cidade de Porto Alegre-RS, em uma bacia com urbanização da ordem de 50% gerando aumento no escoamento da ordem de 4 a 5 vezes. Com relação à vazão de pico, o aumento pode ser da ordem de 6 vezes em relação à vazão natural, como apresentado na Figura 2.3, dependendo das condições locais (Tucci e Genz, 1995). A Tabela 2.1 apresenta uma relação de causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas.

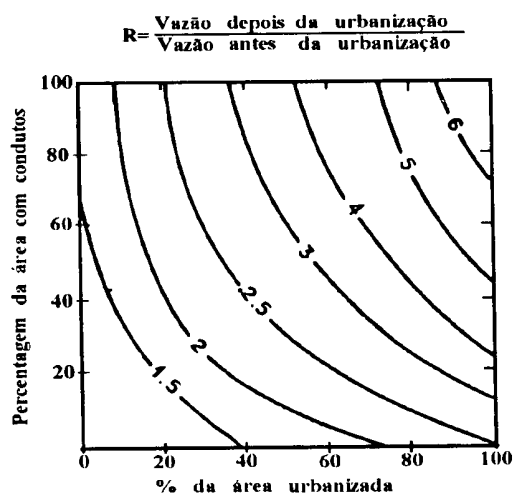


Figura 2.3 – Urbanização sobre a vazão máxima (aspecto quantitativo)  
(Fonte: Leopold, apud Tucci e Genz, 1995)



Do ponto de vista da qualidade, a urbanização provoca uma deterioração importante das águas de escoamento pluvial, em decorrência do acúmulo de poluentes sobre as superfícies urbanas e gases poluentes na atmosfera, os quais serão lavados durante um evento chuvoso.

Ide (1985) e Chebbo (1992) constataram que essa carga de poluição é tão nociva quanto os esgotos domésticos, e da mesma ordem de grandeza, não podendo ser desprezada quando se está tratando da qualidade do meio receptor (em geral os cursos d'água no meio urbano). A diferença é que a poluição dos esgotos domésticos é essencialmente orgânica, enquanto que a transportada pelas águas do escoamento pluvial é composta, essencialmente, por material em suspensão e metais pesados.

Essa analogia entre a poluição das águas pluviais e das águas usadas é feita também por Valiron et Tabuchi (1992). Acrescente-se ainda que a poluição das águas pluviais é caracterizada por sua descontinuidade e por ser a concentração de alguns elementos muito mais elevada que no caso dos esgotos domésticos (como material em suspensão e metais pesados).

Tabela 2.1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas

<b>Causas</b>	<b>Efeitos</b>
Impermeabilização Redes de drenagem	Maiores picos e volumes Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água Entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgoto deficientes	Degradação da qualidade da água Moléstias de veiculação hídrica Inundações: conseqüências mais sérias
Desmatamentos e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes Mais erosão Assoreamento em canais e galerias
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos de inundações Maiores picos Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Porto *et al.* (1997)

Entre numerosos parâmetros que caracterizam as águas do ponto de vista físico, químico e biológico, Chebbo (1992) apresentou uma lista de parâmetros de caracterização da poluição das águas pluviais, sendo completada por Gautier (1998). Tais parâmetros representam a carga poluente nas águas do escoamento pluvial que podem contaminar as águas subterrâneas e, portanto, devem ser levadas em consideração no planejamento e na experimentação de dispositivos de infiltração.

Segundo os autores, os parâmetros que caracterizam a qualidade das águas pluviais são bastante numerosos, visto serem os mesmos que classificam as águas superficiais. No entanto, no estado atual de conhecimento, são analisados apenas alguns deles, supostamente os mais representativos da poluição das águas pluviais urbanas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Parâmetros de caracterização das águas pluviais

Tipo de poluição	Parâmetros	Efeitos sobre o meio (solo, freático), as obras, os outros poluentes ou os usos
Poluição sólida	Material em suspensão	- colmatção mecânica das obras - vetor de outras formas de poluição (metais pesados, matéria orgânica)
Poluição orgânica	DBO <sub>5</sub> DQO Carbono Orgânico Total	- moléculas orgânicas naturais = vetores de poluição metálica. Sua biodegradação desencadeia o desprendimento de metais fixados - Aporte de matéria biodegradável => proliferação de bactérias => colmatção
Poluentes hidrogenados e fosforados	NTK Nitratos NO <sub>3</sub> Nitritos NO <sub>2</sub> NH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> Fósforo total	Perturba a produção de água potável Colmatção de obras por proliferação de algas
Poluição tóxica	Pb Zn Cu Cd Cr Hg	- Toxicidade segundo o metal, forma e concentração - Adsorção pelas partículas do solo, microorganismos, material em suspensão => risco de desprendimento e de contaminação do freático em função de modificações das condições biológicas e físico-químicas do meio
	Fenóis	Gosto ruim
	Hidrocarbonetos totais	- Toxicidade, remanescente segundo a forma das moléculas (as cadeias curtas são mais biodegradáveis) - Diminuição da biodegradação - Influencia as trocas com a atmosfera
	HAP (6 substâncias) (benzo3;4pyrène)	Muito tóxicos
	Pesticidas: organo-clorados organo-fosforados organo-metálicos	Toxicidade aguda, apresentando riscos de acumulação na cadeia trófica em função de sua grande estabilidade
Poluição microbiológica	Coliformes totais Coliformes fecais Streptococos fecais	- Necessidade de esterilização para água potável - Vetor de poluição metálica por adsorção => risco de desprendimento dos metais no caso de morte dos microorganismos - Colmatção por proliferação de microorganismos

Fonte: Chebbo (1992) e Gautier (1998)

### 2.3 – Sistema tradicional ou convencional de drenagem

Até recentemente a drenagem pluvial era vista como uma medida de proteger os centros urbanos das águas das chuvas, que deveriam ser escoadas o mais rapidamente

possível. Os sistemas de drenagem eram considerados separadamente, apenas como adjunto ao planejamento do uso do solo.

A drenagem das águas pluviais se iniciou pelo desenvolvimento do sistema unitário (onde os esgotos domésticos, industriais, etc., são conduzidos juntamente com o esgoto pluvial), evoluindo a seguir para o separador (onde o pluvial é conduzido separadamente) e hoje, com os conceitos ambientalistas, para o compensatório (onde se busca a valorização da água no meio urbano, pela compensação dos efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico).

No sistema tradicional, baseado nos conceitos higienistas, as soluções são baseadas na rápida condução das águas de escoamento superficial para fora dos centros urbanos, através da execução de obras hidráulicas "eficientes" (como retificações de rios, canalizações, execução de condutos subterrâneos, dentre outras medidas). Não há preocupação com o controle da geração do escoamento, mas simplesmente com a forma como o hidrograma resultante será tratado. Por não ser o objetivo deste trabalho, esse tipo de solução não será abordado, se concentrando na descrição dos dispositivos alternativos ou compensatórios.

Seu princípio de atuação é sobre os hidrogramas gerados, não agindo sobre as causas (fonte) dos hidrogramas. A característica desses sistemas é atuar de forma localizada para resolver um problema já existente. Em geral envolvem custos relativamente altos, principalmente à medida que a cidade se desenvolve e o sistema torna-se mais complexo.

Os sistemas tradicionais de drenagem geralmente são "escondidos" no subsolo, o que faz com que as pessoas não tenham conhecimento deles ou do seu funcionamento. Apenas percebem sua existência quando de sua incapacidade ou saturação, quando ocorrem as inundações urbanas. Esses sistemas, geralmente projetados à parte, não são tratados senão após a instalação da infra-estrutura urbana (Hamacher *et al.*, 1999).

#### **2.4 - Sistemas de drenagem alternativos, compensatórios ou ambientais**

São ditas alternativas (em relação à rede tradicional de condutos) as técnicas que se opõem à idéia do "tout à l'égout". Seu objetivo é não mais evacuar para o mais longe e o mais rápido possível as águas de escoamento, mas retardar a este ou fazer infiltrarem aquelas. Reapresentaram-se antigos procedimentos tais como poços de infiltração, valos ou trincheiras drenantes, bacias de retenção ou de infiltração, reservatórios de detenção no lote e, mais recentemente, os pavimentos permeáveis e armazenamento em telhados (Chocat, 1997).

Fala-se, igualmente, em soluções compensatórias (subentendido dos efeitos da urbanização) e são, freqüentemente, adaptações de técnicas bastante antigas, algumas vezes destinadas prioritariamente à alimentação de água potável. Lagos destinados á retenção (ancestrais das bacias de retenção) foram construídos no rio Nilo (Lago Moeris) por volta do ano 3000 a.C. Estes lagos permitiam a prevenção contra cheias, a manutenção de vazões em períodos de estiagem, assim como forneciam água para irrigação. Na Índia encontram-se, na mesma época, poços de pedra que permitiam o acúmulo das águas pluviais que serviriam de reserva para os períodos de seca. Mais tarde essa técnica será reutilizada na Índia, em seguida em Bizâncio, onde os poços vão ser recobertos de pedra (Alfakih, 1991, apud Chocat, 1997).

Essas técnicas não são, portanto, "inovadoras" pelo fato de serem novas ou modernas, mas sim pelo fato de se oporem ao princípio do "tudo na rede". Seu "renascimento" está ligado ao desenvolvimento histórico das redes convencionais de drenagem, às quais elas são alternativas (Chocat, 1997). O desenvolvimento do sistema convencional ocorreu a partir do fim do século XVIII e hoje apresenta suas limitações, havendo a necessidade de ser repensado, complementado e/ou substituído.

Assim, dentro do conceito ambiental da drenagem, e não mais higienista, cada novo espaço urbanizado deve incluir uma compensação para os efeitos da urbanização (Figura 2.4). Isso vai significar uma recuperação (ou a manutenção) do ciclo hidrológico urbano, de tal modo que a população perceba a existência desse ciclo e participe de maneira ativa de sua manutenção.

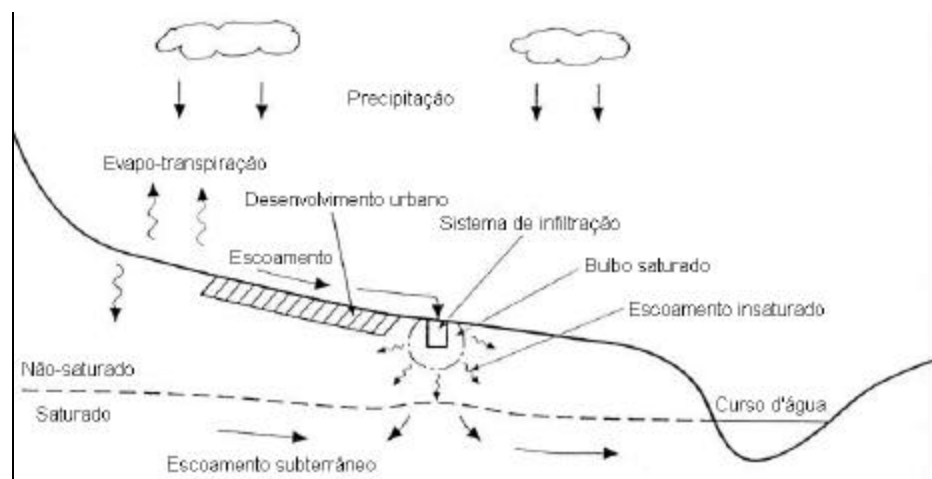


Figura 2.4 – Medida compensatória (infiltração) para o efeito da urbanização  
(Fonte: Bettess, 1996)

No sistema alternativo (ou compensatório), busca-se a compensação dos efeitos da urbanização sobre o hidrograma de cheias gerado por uma bacia (lote ou loteamento). Também inseridas dentro dos conceitos das BMP's (Best Management Practices), as chamadas tecnologias alternativas de drenagem são alternativas em relação às soluções clássicas porque buscam (Nascimento *et al.*, 1997):

- considerar os impactos da urbanização não apenas nas novas áreas em urbanização, mas no contexto urbano global, tomando a bacia hidrográfica como referência física;
- compensar sistematicamente os efeitos da urbanização, atuando, sempre que possível, nas proximidades das áreas impermeabilizadas;
- modular o sistema de drenagem com o crescimento urbano, sem gerar custos excessivos para as municipalidades.

O emprego dessas tecnologias deve ser feito de maneira distribuída, com a utilização de diferentes soluções. Equipes multidisciplinares são importantes, uma vez que as novas abordagens envolvem não só questões relativas ao problema da drenagem em si, mas também questões relativas ao urbanismo, qualidade da água, convivência com o usuário, dentre outras.

As vantagens apresentadas dependem da solução empregada, podendo ser citadas, de forma global, as seguintes (Urbonas e Stahre, 1993; Azzout *et al.*, 1994; Bettess, 1996; Nascimento *et al.*, 1997):

- diminuição do risco de inundação e contribuição para a melhoria da qualidade da água em meio urbano;
- redução ou mesmo eliminação da rede de microdrenagem local;
- minimização das intervenções a jusante de novas áreas loteadas quando a rede de drenagem preexistente encontra-se saturada, permitindo a modulação do sistema de drenagem em função do crescimento urbano;
- boa integração com o espaço urbano e possibilidade de valorização da água no meio urbano, através de áreas verdes, áreas de lazer, etc.;
- melhoria da recarga de água subterrânea, normalmente reduzida em razão da impermeabilização de superfícies, com conseqüente manutenção da vazão de base dos pequenos rios urbanos;
- taxas mais elevadas de enchimento médio dos coletores de águas pluviais e melhores condições de transporte de matéria sólida;

- controle da poluição das águas pluviais, contribuindo para a recuperação e preservação do meio ambiente;
- baixos custos de implantação.

Além destas, está a vantagem de serem reduzidos os volumes escoados (estruturas de infiltração), assim como vários dos efeitos adversos da urbanização sobre as inundações urbanas, apresentados na Tabela 2.1, tais como transporte de lixo e conseqüente entupimento de bueiros e galerias, degradação da qualidade da água, disseminação de moléstias, etc.

Dentre as desvantagens na aplicação dessas metodologias, podem ser citadas:

- preocupação com manutenção freqüente, a fim de se evitar a perda de desempenho e aumentar a vida útil;
- utilização das tecnologias condicionada a características de solo (tipo, uso e ocupação, topografia), lençol subterrâneo, etc.;
- uso recente, resultando na falta de padrões de projeto e na escassez de informações a respeito do seu funcionamento a longo prazo;
- risco de contaminação do aquífero;
- risco de afetar fundações de obras vizinhas.

As estruturas alternativas de drenagem podem ser divididas em estruturas de controle na fonte e estruturas de controle a jusante. As estruturas de controle a jusante (bacias de amortecimento de cheias) não serão detalhadas, por não fazerem parte do objeto de trabalho.

As estruturas de controle na fonte podem ser do tipo:

- infiltração e percolação: pavimento poroso; poços, planos, trincheiras e valos de infiltração; bacias de percolação;
- armazenamento: microrreservatórios em lotes; armazenamento em coberturas e estacionamentos.

As estruturas alternativas podem ser classificadas, ainda, segundo a ação que exercem sobre os processos hidrológicos, atuando sobre a redução dos volumes ou das vazões. No caso das estruturas de redução dos volumes, estão as estruturas de infiltração. E no caso de redução das vazões, estão os reservatórios que promovem o armazenamento temporário das águas pluviais.

O processo de escolha da solução alternativa a ser utilizada em um contexto específico deve adotar três critérios: as condições físicas locais, o modelo de urbanismo e os impactos da

solução alternativa sobre o sistema de drenagem e o meio ambiente (Nascimento *et al.*, 1997). As soluções de infiltração são geralmente escolhidas por razões hidráulicas, tendo função de redução da vazão de pico e do volume escoado (Barraud *et al.*, 1998).

Além de armazenamento e infiltração, as soluções podem ser mistas (armazenamento seguido de infiltração), visando a um tratamento inicial da água de escoamento antes de se proceder à infiltração. Os dispositivos de retenção promovem um pré-tratamento por deposição de grande parte da matéria em suspensão, reduzindo a quantidade de poluentes adsorvidos que serão infiltrados.

Tratando de dispositivos alternativos, as soluções empregadas devem levar em consideração o ambiente em torno, a obra em si e o ambiente a jusante da instalação. Em um dispositivo de infiltração, devem ser identificadas e detalhadas três partes (Gautier, 1998):

- o interior da obra;
- a interface obra-solo;
- a interface obra-rede, quando esta existe.

A interface obra-solo desempenha um papel fundamental no funcionamento de dispositivos de infiltração, seja em termos quantitativos, seja em termos qualitativos. Nela vai ocorrer a maior parte dos fenômenos envolvidos: infiltração, filtração de poluentes, deposição de partículas em suspensão, colmatação. Ela irá regular a vazão de saída do dispositivo (e, conseqüentemente, determinará suas dimensões).

Em termos de gestão, deve-se encontrar um ótimo entre a depuração, o risco de liberação de poluentes para o meio natural e a velocidade de infiltração que assegure a drenagem das águas pluviais.

#### **2.4.1 - Armazenamento na fonte**

Trabalha-se no controle da vazão de saída, através do armazenamento temporário das águas de escoamento pluvial no próprio lote. O princípio de funcionamento está na recuperação da capacidade natural de armazenamento perdida durante o processo de urbanização. Sua utilização apresenta vantagens com relação à facilidade de implementação e custo relativamente baixo (Cruz *et al.*, 1998).

A Figura 2.5 apresenta um dos microrreservatórios de detenção no lote simulados matematicamente por Cruz *et al.* (1998) e experimentalmente por Agra (2001). Esse foi

construído com acrílico para fins didáticos; mas, para ser implantado como controle na fonte, poderá ser construído com qualquer outro material.



Figura 2.5 – Microrreservatório de detenção no lote, simulado por Cruz *et al.* (1998) e Agra (2001)

Não atuando sobre os volumes escoados, os sistemas de armazenamento sem infiltração apresentam o risco de combinação de picos, em função do retardo no escoamento, como apresentado na Figura 2.6.

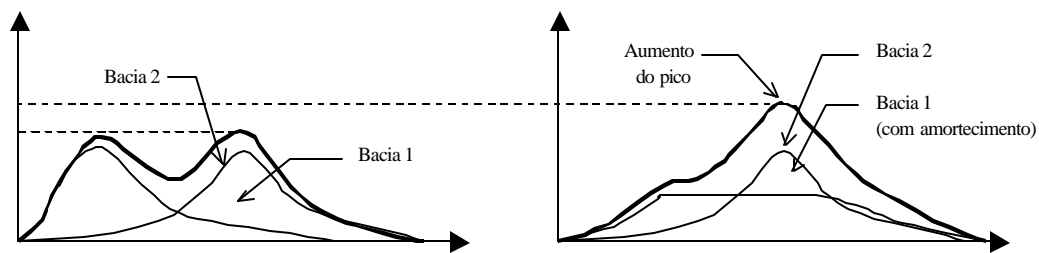


Figura 2.6 – Coincidência de picos por retardo no escoamento  
(Fonte: modificado de Chocat, 1997)

### 2.4.2 - Infiltração

Os dispositivos de infiltração atuam tanto na redução das vazões máximas quanto na dos volumes escoados. Em relação às outras soluções alternativas, este tipo apresenta as seguintes vantagens (modificado de Hasegawa *et al.*, 1999):

- redução de inundações;
- medidas contra CSO (*Combined Sewer Overflows*);
- recuperação da vazão de base em rios urbanos;
- contribuição para o controle de ilhas de calor;
- suprimento de água para a vegetação no meio urbano.



Como principais desvantagens, citam-se: a necessidade de manutenção freqüente; a redução da eficiência pelo processo de colmatção e o risco de contaminação do solo e do lençol freático.

Os dispositivos alternativos em geral, e os de infiltração em particular, desempenham importante papel no que se refere à qualidade da água no meio urbano. As bacias de infiltração, por exemplo, permitem a filtragem de poluentes, através da percolação da água pelo solo. Segundo Gautier (1998), não somente as partículas do solo e das camadas superiores têm papel na filtragem de poluentes. Mikkelsen *et al.* (apud Gautier, 1998) ressaltam que o material depositado também tem poder adsorvente importante. Decantação e adsorção, mais que a filtração mecânica, seriam os fenômenos preponderantes. Além disso, as vazões de saída do dispositivo são baixas, sobretudo para baixos níveis de água, o que permite a retenção desta por longo tempo, aumentando ainda mais o papel da decantação na depuração. Este seria o caso, por exemplo, de bacias de retenção trabalhando em conjunto com as bacias de infiltração.

No que se refere à qualidade, em primeiro lugar deve-se reconhecer que a água do escoamento pluvial tem um elevado grau de poluição, no que se refere ao transporte de metais pesados, óleos e graxas, materiais em suspensão, dentre outros. Verifica-se que os aspectos qualitativos e quantitativos do escoamento superficial são indissociáveis (Gautier, 1998), apesar de na maioria dos casos serem tratados separadamente.

O controle de poluentes pelos dispositivos de infiltração tanto pode ser uma vantagem (filtragem) quanto apresentar um problema (risco de contaminação do solo e do lençol freático), dependendo da escala de utilização, das características do solo e dos elementos poluentes presentes na água do escoamento pluvial.

A seguir serão apresentados alguns tipos de dispositivos de infiltração que, por não fazerem parte do objeto de trabalho, não serão explicados detalhadamente. As trincheiras de infiltração serão apresentadas em item à parte.

#### 2.4.2.1 - Pavimentos permeáveis, valos, poços e trincheiras de infiltração

As águas de escoamento superficial podem ser controladas por pavimentos permeáveis, que vão armazenar a água em reservatórios sob os pavimentos pelo tempo necessário para sua infiltração no solo ou, de forma alternativa, funcionar como reservatório de amortecimento, mediante drenos auxiliares para o excesso de água. Como problemas principais, esses dispositivos apresentam custos relativamente elevados, trabalhos de

manutenção específicos, problemas de colmatção e resistência mecânica (Araújo *et al.*, 2000).

Os valos de infiltração permitem controlar as águas de escoamento superficial através de infiltração no solo ou redução da velocidade de escoamento. Com efeito paisagístico interessante, podendo ser bem integrado ao espaço urbano, apresentam a desvantagem de ocuparem áreas relativamente grandes, que dificilmente serão usadas para outros fins (com a implantação dos valos). Uma outra desvantagem no seu uso é que, por ser um espaço vegetado, sua manutenção deverá ser freqüente (Azzout *et al.*, 1994).

Os poços de infiltração têm a vantagem de poderem ser aplicados onde a camada de solo superficial é pouco permeável (forte urbanização, terreno superficial impermeável), mas que tem capacidades de infiltração importantes nas camadas profundas. Com boa integração ao espaço urbano e ocupando superfícies relativamente pequenas (Figura 2.7), apresentam o inconveniente de necessidade de manutenção freqüente, sob pena de ter sua vida útil reduzida pelo processo de colmatção (Azzout *et al.*, 1994).

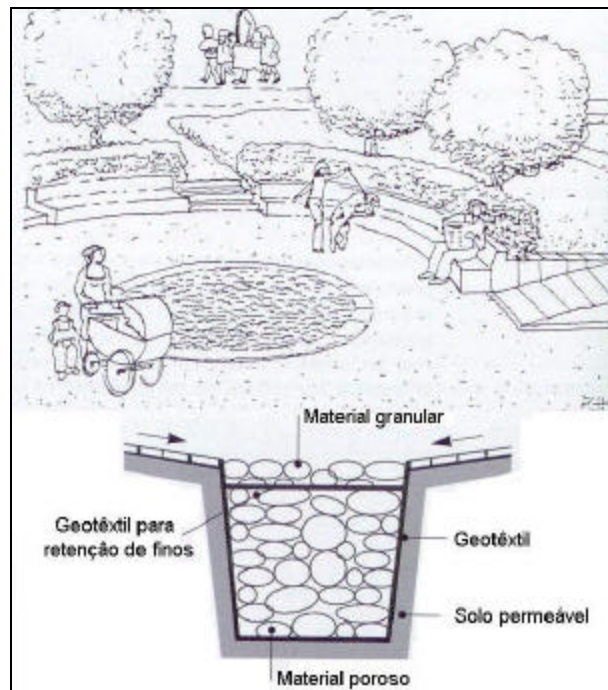


Figura 2.7 – Integração de poços de infiltração com o espaço urbano

#### 2.4.2.2 - Bacias de infiltração

As bacias de infiltração já passaram por três gerações (Chocat, 1997). O primeiro tipo remonta na França aos anos cinquenta: trata-se de bacias cuja finalidade era a de recarga das

águas subterrâneas, para posterior uso como água potável. É de uso extremamente restrito e geralmente são implantadas em zona de recarga.

A segunda geração data dos anos 70 e foi concebida unicamente para armazenamento e regulação das águas pluviais. São obras superficiais, com preocupação puramente técnica, não tendo boa integração com o espaço urbano.

Na geração seguinte, as obras são caracterizadas pela multifuncionalidade. Servem tanto para o armazenamento de águas pluviais quanto para o lazer (prática de esportes, jardins, etc.). Estas bacias apresentam enormes vantagens sobre as antecedentes: boa integração com o espaço urbano, preocupação com aspectos de poluição, possibilidades de financiamentos múltiplos das obras, garantia de melhor gestão. A gestão é tanto melhor quanto mais utilizado é o espaço, já que a manutenção “voluntária” acontece com mais frequência pelas funções secundárias (lazer) que pela função principal (drenagem).

## **2.5 - Trincheiras de infiltração**

As trincheiras de infiltração (trincheiras de percolação ou trincheiras drenantes) são estruturas lineares (o comprimento prepondera sobre a largura) que armazenam a água precipitada por tempo suficiente para sua infiltração no solo. Funcionam como reservatórios convencionais de amortecimento de cheias, apresentando melhor desempenho (em relação ao reservatório) uma vez que favorecem a infiltração da água no solo, com conseqüente redução dos volumes escoados e das vazões máximas de enchentes (Azzout *et al.*, 1994; Balades *et al.*, 1998).

São constituídas por valetas preenchidas por material granular (seixos rolados, brita, dentre outros) com porosidade em torno de 35% (dependendo do material utilizado). Um filtro geotêxtil é colocado entre a trincheira e a superfície, recoberto por uma camada de seixos, formando uma superfície drenante. Todo o material deve estar envolto no filtro geotêxtil, que impede a entrada de material fino na estrutura, além de servir como anticontaminante. A drenagem do excesso de água da trincheira pode ser feita através de um tubo perfurado colocado entre o material granular, no interior da trincheira (Balades *et al.*, 1988). A Figura 2.8 apresenta uma trincheira de infiltração típica.

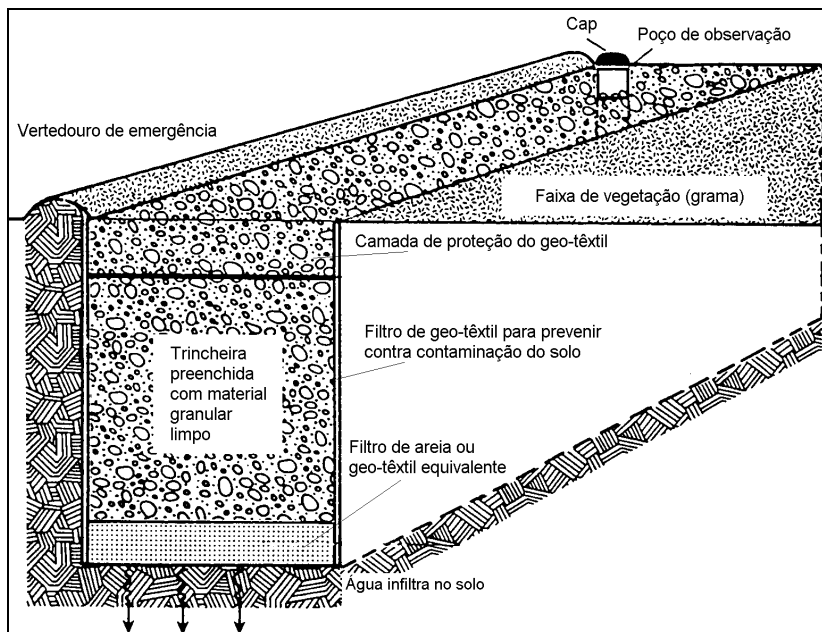


Figura 2.8 – Trincheira de infiltração típica  
(Fonte: modificado de Schueler, 1987)

### 2.5.1 - Utilização: vantagens, desvantagens, riscos, limites

Em relação a outros sistemas de infiltração, as trincheiras apresentam as seguintes vantagens e desvantagens (Bettess, 1996):

- visualmente bem integradas (como mostrado na Figura 2.9), podem estar cobertas ou não;
- permitem que o espaço seja utilizado para outras atividades (Figura 2.9);
- podem ser colocadas em locais que não teriam outra finalidade;
- dificultam o tratamento biológico da água do escoamento superficial;
- oferecem dificuldade na manutenção ao longo do tempo: se o desempenho é reduzido por colmatção, pode ser que a estrutura inteira tenha que ser substituída;
- são de difícil monitoramento quanto ao desempenho e ao funcionamento.

De acordo com Schueler (1987), as trincheiras de infiltração estão divididas em dois grupos: superficiais e subterrâneas. As trincheiras superficiais são tipicamente aplicadas em áreas residenciais, onde a carga de sedimentos e óleos é pequena, podendo ser retida pela grama. Podem receber contribuição difusa. As trincheiras subterrâneas podem receber escoamento mais concentrado, de canalizações e/ou estruturas de drenagem, mas devem ser providas de estruturas especiais de entrada, que devem reter sedimentos e óleos.



(a)



(b)

Figura 2.9 – Trincheira de infiltração (a) sob pavimento permeável em estacionamento (Bettess, 1996) e (b) ao longo de calçada em área comercial (Lyon-França)

A utilização desse tipo de estrutura deve obedecer a alguns cuidados. São critérios para a escolha do local de implantação da estrutura (Urbonas e Stahre, 1993; Werf, 1999; Schueler, 1987; Bettess, 1996):

- profundidade do lençol freático e da camada impermeável;
- declividade do solo;
- tipo de solo (superfície e subsuperfície);
- usos do solo e cobertura vegetal;
- relação entre superfície impermeabilizada da bacia e a superfície disponível para infiltração;
- este tipo de solução é adequado para pequenas áreas de drenagem, tais como lotes individuais ou quarteirões.

De acordo com os critérios acima apresentados, se uma das situações abaixo for encontrada ou se for comum sua ocorrência no terreno, Urbonas e Stahre (1993) não recomendam a disposição da água de escoamento superficial em estruturas de infiltração (percolação):

- se o NA máximo sazonal do lençol estiver a menos de 1,2 m abaixo do fundo da trincheira;
- se a camada impermeável estiver a menos de 1,2 m abaixo do fundo da trincheira;
- se o solo estiver na classificação *C* ou *D* do *Soil Conservation Service* ou se a taxa de infiltração do solo saturado for inferior a 8 mm/h;
- se a superfície de infiltração for um aterro.

Os limites para os valores mínimos e máximos de condutividade hidráulica saturada são discutidos por vários autores (Urbonas e Stahre, 1993; Bettess, 1996; Schueler, 1997; Hamacher *et al.*, 1999; Argue, 1999; dentre outros), não havendo consenso. O valor mínimo se refere à capacidade de drenagem do solo, que não deve ser muito baixa, e o valor máximo se refere ao potencial de remoção de poluentes e ao risco de contaminação do aquífero. Se a condutividade hidráulica for muito alta, o solo não terá tempo de filtrar os poluentes.

À medida que o conhecimento sobre esses dispositivos aumenta, os limites para sua utilização são corrigidos e adaptados, assim como os coeficientes de segurança (Argue, 1999). Tais limites estão mais relacionados ao conservadorismo das pessoas que trabalham com a drenagem e com a falta de conhecimentos dos processos envolvidos que com limites de aplicação, propriamente ditos.

A utilização das estruturas alternativas de drenagem é recente e tem suas justificativas na insuficiência e nos altos custos das estruturas convencionais de drenagem. Balades *et al.* (1998) relatam que, na tentativa de se proteger contra cheias devido ao escoamento superficial, a comunidade de Bordeaux-França tem desenvolvido largamente tecnologias alternativas de drenagem, em particular trincheiras drenantes. Nesta comunidade foi desenvolvido um trabalho experimental, em que uma trincheira com 8 anos de operação foi monitorada por um ano e meio. Deu-se ênfase à função de remoção de poluentes da trincheira, ressaltando-se que a trincheira pode trabalhar como um importante elemento de prevenção de cheias, pela redução dos volumes escoados e também das vazões de pico.

Nas trincheiras monitoradas em Bordeaux-França, o volume observado no exutório da trincheira foi, de maneira geral, da ordem de 24% do volume precipitado, em uma área onde o coeficiente de escoamento teórico é da ordem de 0,86. A Tabela 2.3 apresenta alguns dados de eventos médios do monitoramento desta trincheira:

Tabela 2.3 – Monitoramento de trincheiras em Bordeaux-França

<b>Evento</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Altura precipitada (mm)	8,8	18,8	10,8	6	3,8	22	12,6
Intensidade máxima em 12 min. (mm/h)	38	13	10	4	9	21	4
Duração (min)	30	90	96	150	48	106	471
Tempo seco antecedente	2 dias	Chuva contínua	2 horas	3 dias	4 dias	1 hora	19 dias
Vazão máxima afluyente (calculada) (l/s)	68	23	17	7	16	37	7
Vazão máxima efluente (observada) (l/s)	29	4	8	0,8	1,5	8	1,3

(Fonte: Balades *et al.*, 1998; Balades e Trincat, 1998)

Em função de alguns problemas que podem surgir a partir da utilização de dispositivos de infiltração, tais como o deslizamento de encostas, Hasegawa *et al.* (1999) sugerem a criação de mapas de áreas propícias à utilização de infiltração e mapas de áreas onde a utilização destes dispositivos deve ser proibida do ponto de vista de preservação do solo. Segundo os autores, as áreas onde estes dispositivos não devem ser utilizados são:

- áreas com risco de deslizamentos;
- áreas degradadas com alta declividade;
- terrenos alagadiços;
- áreas sujeitas a efeitos de maré.

Para os autores, é mais importante criar mapas de áreas onde estes dispositivos não podem ser aplicados, que definir os locais onde eles poderão ser utilizados.

Outro fator a observar-se na instalação de dispositivos de infiltração é a densidade de utilização. Esse fator deve ser considerado de modo que um dispositivo de infiltração não tenha influência sobre o funcionamento de outro, reduzindo-lhe o desempenho. (Hasegawa *et al.*, 1999). Para resolver o problema dos limites da utilização de dispositivos de infiltração, combinar infiltração e retenção no lote pode ser uma excelente solução.

### **2.5.2 - Projeto e dimensionamento: o “Rain-Envelope-Method”**

Zimmer *et al.* (1998) apresentam um método de dimensionamento de trincheiras de infiltração, através da utilização de elementos finitos. Métodos mais simples são apresentados por Leeflang *et al.* (1998), que apresentam curvas de dimensionamento, ou por Jonasson (1984) e Urbonas e Stahre (1993), que apresentam o “rain-envelope-method”. Este último é recomendado para o dimensionamento das estruturas de percolação, quando os critérios para utilização de dispositivos de infiltração (apresentados acima) são obedecidos.

Para o desenvolvimento deste trabalho experimental, foi utilizado o “rain-envelope-method”, por ser simples, de aplicação direta a partir dos dados de caracterização do local de implantação e da curva IDF.

O método baseia-se na determinação dos volumes acumulados de entrada e saída do dispositivo, como mostrado na Figura 2.10. O volume do dispositivo deverá ser suficiente para armazenar a máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e saída (levando-se em consideração a porosidade do material de preenchimento).

A curva de volumes de entrada é construída com base na curva IDF local e os volumes de saída são determinados com base nas características de infiltração/percolação do solo e da área disponível para infiltração/percolação.

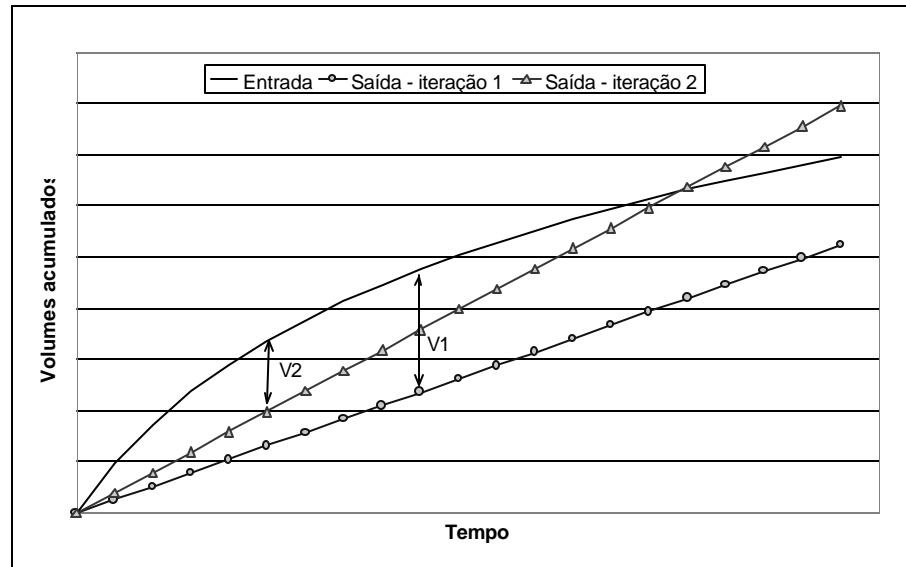


Figura 2.10 – Determinação do volume do dispositivo  
(Fonte: modificado de Urbonas e Stahre, 1993)

#### 2.5.2.1 - Vazão (volume) de projeto afluyente à trincheira

Uma vez que as estruturas de infiltração (percolação) são usadas principalmente para pequenas bacias, o cálculo do escoamento pode ser feito com base no Método Racional. Desta forma, obtém-se o volume afluyente acumulado através da multiplicação da vazão pelo tempo, resultando em:

$$V_T = 3600 \cdot C \cdot \left( \frac{I_T}{1000} \right) \cdot t \cdot A \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:  $V_T$  = volume total escoado no tempo  $t$  para uma precipitação de  $T$  anos de retorno ( $m^3$ )

$C$  = coeficiente de escoamento

$I_T$  = intensidade da precipitação de  $T$  anos de retorno (l/s/ha)

$t$  = duração da precipitação (h)

$A$  = área da bacia de contribuição (ha)



O volume pode ser calculado utilizando-se uma curva IDF para um determinado período de retorno ( $T$ ). Para pequenas bacias, pode-se utilizar a simplificação de considerar um bloco único de precipitação, de intensidade constante, sendo o volume escoado igual a  $I_T.t$ . Este procedimento é ilustrado na Figura 2.11.

No entanto, os blocos únicos de precipitação representam apenas a intensidade média da máxima intensidade de precipitação, não se considerando a precipitação anterior e posterior à máxima. Uma vez que o dimensionamento das estruturas de infiltração (percolação) depende principalmente do volume escoado, é importante considerar a parte da precipitação não incluída no cálculo através de bloco único de precipitação.

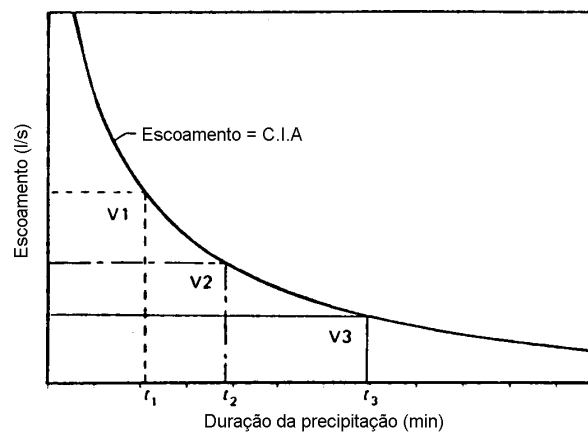


Figura 2.11 – Volume afluente para bloco único de precipitação  
(Fonte: modificado de Urbonas e Stahre, 1993)

Sjoberg e Martensson (apud Urbonas e Stahre, 1993) estudaram como o escoamento de blocos únicos de precipitação diferia dos resultados obtidos usando simulação contínua, com registros cronológicos de precipitação. Assumindo-se que no último caso os resultados obtidos são mais precisos (já que representam melhor o processo natural), eles concluíram que um acréscimo em torno de 25% ao volume calculado pelo método racional pode ser mais preciso. Dessa forma, a Equação 2.1 é alterada para considerar este fato:

$$V_T = 1,25 \cdot \left[ 3600 \cdot C \cdot \left( \frac{I_T}{1000} \right) t \cdot A \right] \quad \text{Equação 2.2}$$

Para o dimensionamento, pode-se considerar que apenas as áreas impermeáveis estarão contribuindo para a estrutura, tendo coeficiente de escoamento ( $C$ ) valor entre 0,85 e 0,95 (Urbonas e Stahre, 1993).

### 2.5.2.2 - Taxa de infiltração/percolação

A taxa com que a água percola no solo pode ser estimada pela lei de Darcy para fluxo unidimensional:

$$U = k \cdot \tilde{Nf} \quad \text{Equação 2.3}$$

onde  $U$  = velocidade do fluxo (m/s)

$k$  = condutividade hidráulica saturada (m/s)

$\tilde{Nf}$  = gradiente hidráulico (m/m)

A lei de Darcy se aplica ao escoamento subterrâneo em solo saturado (Urbonas e Stahre, 1993). Apesar de o fundo da trincheira estar a pelo menos 1,20 m acima do NA, é recomendado assumir que o solo estará saturado quando a trincheira estiver em operação. Isto deve ser feito devido à falta de conhecimento preciso e da grande variabilidade das características do solo. Não é possível generalizar que valor de condutividade hidráulica deverá ser utilizado para o dimensionamento. Devem-se fazer, portanto, testes locais para a determinação desse parâmetro. A Tabela 2.4 apresenta intervalos de condutividade hidráulica para alguns tipos de solo.

Tabela 2.4 – Condutividade hidráulica saturada de alguns tipos de solos

<b>Tipo de solo</b>	<b>Condutividade hidráulica saturada (m/s)</b>
Cascalho	$10^{-3}$ a $10^1$
Areia	$10^{-5}$ a $10^{-2}$
Silte	$10^{-9}$ a $10^{-5}$
Argila saturada	$< 10^{-9}$
Solo cultivado	$10^{-10}$ a $10^0$

(Fonte: Urbonas e Stahre, 1993)

Estes valores apenas dão uma idéia da ordem de grandeza da condutividade hidráulica em função do tipo de solo, uma vez que eles podem variar grandemente em função da estrutura do solo. Assim, não se deve fazer um planejamento da utilização de dispositivos de infiltração apenas pela classificação do solo.

Observe-se, ainda, que os sistemas de infiltração devem ser dimensionados com considerável margem de segurança devido à dificuldade de se determinar a condutividade hidráulica ( $k$ ), à variabilidade espacial de  $k$ , ao risco de colmatção e à incerteza nos métodos de dimensionamento (Jonasson, 1984). Uma vez que os solos tendem a se tornar gradualmente colmatados com o tempo, reduzindo sua condutividade hidráulica disponível, é

recomendado que a condutividade de campo (obtida pelos testes) seja reduzida por um fator de segurança (2 ou 3) para o projeto de estruturas de percolação (infiltração) (Urbonas e Stahre, 1993).

O fato de se considerar para o dimensionamento a condutividade hidráulica saturada já é uma forma de "embutir" um coeficiente de segurança, pelo fato de este valor não considerar efeitos de capilaridade enquanto o solo apresenta-se não saturado.

### 2.5.2.3 - Vazão (volume) de saída da trincheira

O cálculo do volume da estrutura de percolação (infiltração) é feito considerando-se a porosidade efetiva do material de enchimento. Assim, o volume útil para armazenamento será o volume referente aos vazios da trincheira. A Tabela 2.5 apresenta valores típicos de porosidade para alguns materiais de enchimento.

Visto que o fundo está sujeito a colmatação mais rápida, em função da deposição de sedimentos, alguns autores recomendam que ele seja considerado impermeável. Assim, considera-se que a saída de água da trincheira por percolação (infiltração) somente ocorrerá pelas paredes verticais (Urbonas e Stahre, 1993).

Deve-se observar que a consideração de fundo colmatado não é consenso, como resume bem Gautier (1998), e será utilizada neste trabalho, conforme a recomendação do método escolhido, proposto por Urbonas e Stahre.

Tabela 2.5 – Porosidade efetiva de materiais de enchimento

<b>Material</b>	<b>Porosidade efetiva (%)</b>
Brita grossa	30
Cascalho de granulometria uniforme	40
Brita graduada (menores que 1/4")	30
Areia	25
Seixo rolado	15-25

Fonte: (Urbonas e Stahre, 1993)

A Lei de Darcy será considerada para se estimar a taxa de água percolada. Considerando-se o tempo de enchimento e esvaziamento da estrutura, pode-se aproximar a taxa média de saída de água como a média entre as vazões de saída para o enchimento e o esvaziamento da estrutura. Simplificando esta média, pode-se considerar o nível d'água constante na altura média da estrutura. Considerando-se o solo saturado (situação crítica para o funcionamento do dispositivo), obtém-se gradiente hidráulico unitário e a Lei de Darcy

resulta na seguinte expressão para a determinação da vazão de saída da estrutura (Urbonas e Stahre, 1993):

$$V_{perc}(t) = k \cdot \nabla f \cdot \frac{A_{perc}}{2} \cdot 3600 \cdot t_p \quad \text{Equação 2.4}$$

onde:  $V_{perc}(t)$  = volume de água percolado no solo ( $m^3$ );

$k$  = condutividade hidráulica do solo (m/s);

$A_{perc}$  = área total dos lados da estrutura de percolação ( $m^2$ );

$t_p$  = tempo de percolação (h);

$\tilde{N}f$  = gradiente hidráulico = 1,0

#### 2.5.2.4 - Cálculo do volume da trincheira

O volume ( $V$ ) da trincheira será obtido pela máxima diferença entre o volume afluente e o volume de saída da trincheira, sendo o cálculo efetuado por um processo iterativo, no qual estimam-se as dimensões iniciais. Efetua-se em seguida uma verificação destas dimensões considerando-se os volumes de entrada e saída na estrutura. De acordo com o resultado desta verificação, aumentam-se ou reduzem-se as dimensões, até que valores compatíveis sejam encontrados.

$$V = \text{máx}[V_T(t) - V_{perc}(t)] \quad \text{Equação 2.5}$$

$$V = \text{máx}\left[1,25 \cdot 3600 \cdot C \cdot \frac{I_T}{1000} \cdot t \cdot A - k \cdot 1,0 \cdot \frac{A_{perc}}{2} \cdot 3600 \cdot t\right] \quad \text{Equação 2.6}$$

Dividindo-se ambos os lados da equação por  $C \cdot A$ , obtém-se:

$$D = \text{máx}[4,5 \cdot I_T \cdot t - 3,6 \cdot E \cdot t] \quad \text{Equação 2.7}$$

onde:  $D = V / (C \cdot A)$

$$E = 1000 \cdot k \cdot (A_{perc}/2) / (C \cdot A)$$

O parâmetro  $D$  é o volume específico de percolação, que representa o volume de armazenamento em  $m^3$  por hectare de área impermeável de contribuição. O parâmetro  $E$  é a vazão específica de saída da bacia, em l/s por hectare de área impermeável de contribuição.

O volume e a duração crítica da chuva para o dispositivo podem ser obtidos de forma analítica pela utilização da derivada da Equação 2.6, de acordo com a curva IDF local (Mikkelsen, 1991):

$$V_d = Máx[V_e - V_s]$$

$$\text{E } V_d = V_e - V_s \quad \text{Se } \frac{d(V_e - V_s)}{dt} = 0$$

onde:  $V_d$  = volume de dimensionamento;

$V_e$  = volume acumulado de entrada;

$V_s$  = volume acumulado de saída.

### 2.5.3 - Processo de colmatação

O processo de colmatação pode ser entendido como uma modificação local da condutividade hidráulica do meio no qual tem lugar a infiltração (Gautier, 1998). Trabalhando-se em uma escala fina, a definição da função  $K(x, y, z)$  (onde  $K$  é a condutividade hidráulica do meio) é suficiente para descrever a colmatação; na prática, porém, não pode ser feita de maneira fácil, o que conduz a considerar a colmatação de um ponto de vista macroscópico.

A colmatação dos dispositivos de infiltração modifica as características hidráulicas da interface obra-solo. Os materiais em suspensão nas águas pluviais se depositam no fundo do dispositivo, mas podem, sob certas condições, penetrar no interior da interface, obstruindo assim os poros do material e reduzindo sua condutividade hidráulica (Gautier, 1998).

Esse fenômeno é acentuado pelo desenvolvimento de algas e bactérias (que formam um biofilme), provocado pelo aporte de nutrientes e de matéria orgânica, presentes nas águas de escoamento. Durante um período seco, o ressecamento do fundo do dispositivo permite eliminar-se a via bacteriana e faz e secarem as algas. Distingue-se, em geral, a colmatação física ou mecânica, ligada ao material sólido, e a colmatação biológica, devida à proliferação de algas e bactérias (Gautier, 1998).

Os parâmetros que influenciam estes três tipos de colmatação são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Parâmetros que influenciam a colmatação

Colmatação por sólidos suspensos de origem mineral	Colmatação por algas	Colmatação por bactérias
Concentração e granulometria dos sólidos suspensos Granulometria do solo Regularidade do fundo Massa de sólidos suspensos pH	Teor de nutrientes Duração e número de períodos durante os quais a obra está seca Insolação Temperatura Tempo de permanência da água	Teor de matéria orgânica Duração e número de períodos durante os quais a obra está seca Temperatura Tempo de permanência da água

Fonte: Gautier (1998)

Ishizaki (1996) apresenta resultados de estudos desenvolvidos em colunas de laboratório, com a finalidade de investigar os mecanismos de colmatção. Nestes estudos, o autor verificou que o processo de colmatção acontece em duas etapas. Na primeira, o material sólido se deposita, acumulando-se na camada superior do solo, preenchendo e reduzindo os vazios. Nesta etapa, a condutividade hidráulica saturada tem um ligeiro decréscimo.

A partir de um ponto crítico, o desenvolvimento da colmatção se torna muito rápido e a condutividade hidráulica saturada tem uma drástica redução. O autor considera que esta segunda fase da colmatção é devida à formação de um biofilme na camada superficial. A Figura 2.12 apresenta os resultados obtidos por Ishizaki (1996).

Em experimentos de campo, conduzidos por dois anos em pequenas trincheiras, Ishizaki (1996) verificou que a colmatção evoluía no primeiro ano (reduzindo a condutividade hidráulica), e atingindo um certo equilíbrio após este tempo. O autor verificou que o decréscimo repentino da condutividade hidráulica (devido à formação do biofilme) pode ser evitado se o suprimento de água para o dispositivo não for contínuo.

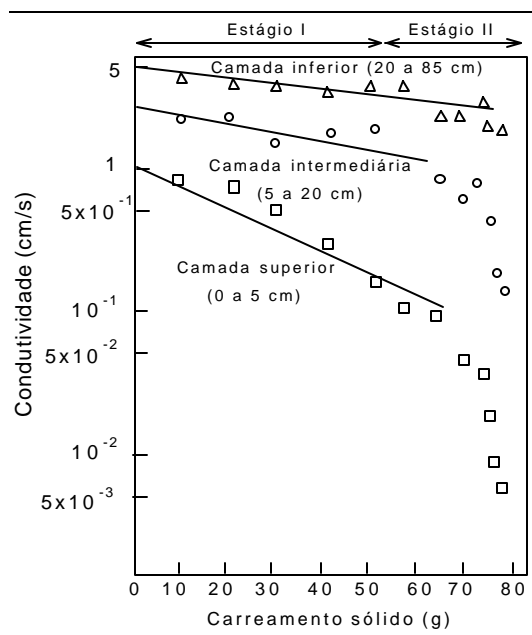


Figura 2.12 – Relação entre carga sólida acumulada e condutividade hidráulica saturada (Fonte: Ishizaki, 1996)

Detay *et al.* (1994) identificaram 4 fases na evolução da colmatção (Figura 2.13) em trabalhos de campo com 3 bacias de realimentação artificial do aquífero:

- Fase A: inchamento de partículas coloidais do solo pelo primeiro contato da água;

- Fase B: dissolução progressiva de bolhas de ar;
- Fase C: formação de um filme bacteriano (útil na filtração biológica);
- Fase D: asfixia completa do fundo da bacia, tendo como ponto final teórico a colmatação completa.

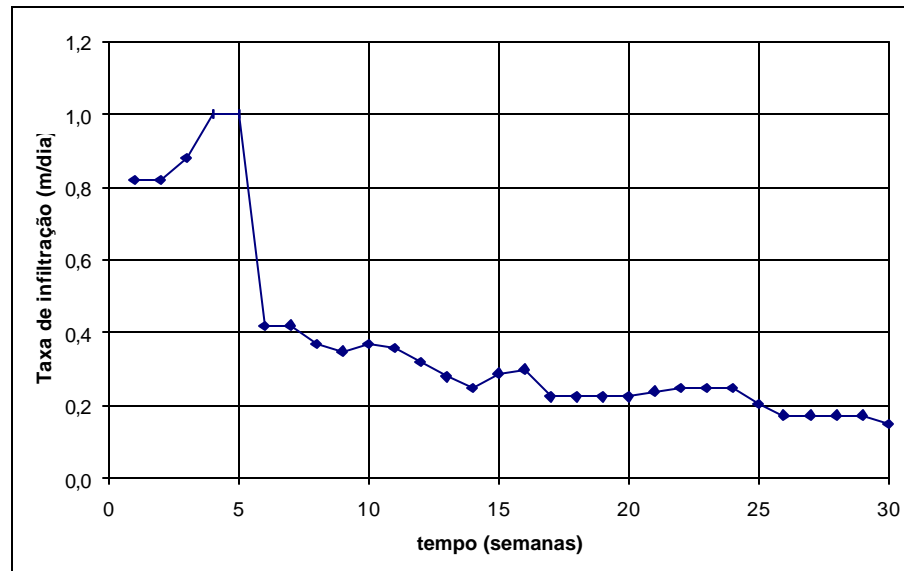


Figura 2.13 – Evolução da vazão infiltrada em função do tempo  
(Fonte: Detay *et al.*, 1994)

Nos dispositivos de infiltração para controle de escoamento superficial, em geral, a fase da colmatação correspondente à formação do filme biológico não chega a acontecer, uma vez que a presença de água no seu interior está condicionada à ocorrência de eventos chuvosos, sendo, portanto, intermitente. Somando-se a baixa entrada de luz nas trincheiras, o problema de colmatação biológica torna-se de menor importância, e a colmatação pode ser minimizada simplesmente pelo controle da quantidade de sedimentos afluente.

Minagawa (1990), apresentou resultados semelhantes aos de Detay *et al.*, mostrando que a infiltração decresce rapidamente nos dois primeiros anos e que a retirada de cerca de 15 cm de solo colmatado é suficiente para a recuperação das condições iniciais de infiltração.

#### 2.5.4 - Vida útil

A vida útil dos dispositivos de infiltração é dependente da redução da capacidade de infiltração ao longo do tempo, devido ao efeito da colmatação. Em observação de alguns dispositivos de infiltração no Japão (condutos de infiltração, trincheiras de infiltração e pavimentos de asfalto poroso), Hasegawa *et al.* (1999) observaram que a capacidade de

infiltração decresce com o tempo de maneira exponencial. Em 10 anos de observação, os condutos de infiltração tiveram uma redução na capacidade de infiltração de 20%, as trincheiras de infiltração de 50%; e os pavimentos de asfalto poroso tiveram uma redução de 15% em 3 anos.

Ainda segundo Hasegawa *et al.* (1999), a capacidade inicial dos condutos de infiltração pode ser restabelecida por trabalhos de manutenção, o que não pôde (nos casos observados) ser feito com as trincheiras de infiltração. Para o asfalto poroso, o processo de colmatção é mais rápido, mas as funções de infiltração podem ser recuperadas pela manutenção.

Como o uso desse tipo de estrutura é recente, não há dados suficientes para se fazer estimativas aceitáveis do tempo em que a trincheira terá funcionamento satisfatório. Schueler (1987) sugere que o tempo de vida das trincheiras pode ser da ordem de 10 a 15 anos, estando diretamente relacionado às práticas de manutenção adotadas, sobre as quais podem-se fazer as recomendações a seguir.

Outros autores, tais como Fujita (1996), Hasegawa *et al.* (1999), sugerem que a vida útil dos dispositivos de infiltração pode superar dez anos. No Brasil, não existem informações sobre a utilização de dispositivos de infiltração, visto que apenas recentemente se iniciou a discussão em torno do assunto.

### **2.5.5 - Práticas de manutenção**

Após o desenvolvimento estar completo, pontos de erosão podem aparecer em locais de fluxo concentrado (como nas margens de pavimentos, calhas de telhados, etc.). O solo erodido é carregado para as estruturas de infiltração ou percolação, ocasionando redução significativa nas taxas de infiltração e percolação (Urbonas e Stahre, 1993).

Não é possível prevenir por completo a entrada de sedimentos finos nas estruturas. Os poros do solo podem ser colmatados. Em quanto tempo isto ocorrerá depende da porosidade do solo, da intensidade e frequência da precipitação. É possível reduzir a quantidade de sedimentos pela instalação de pré-filtros ou caixas de areia.

A necessidade de manutenção de rotina das trincheiras não é grande. Fazer, porém, os proprietários dos locais onde as trincheiras estão instaladas executarem essa manutenção pode ser muito difícil. As trincheiras são menores que a maioria das outras BMP's e, quando subterrâneas, podem não estar visíveis ou acessíveis. Como resultado, os moradores podem



não se preocupar tanto com a manutenção das trincheiras como se preocupariam se se tratasse de estruturas mais visíveis.

Alguns itens de uma manutenção padrão para as trincheiras são descritos a seguir (Schueler, 1987):

1. Inspeção: a trincheira deve ser inspecionada várias vezes nos primeiros meses de operação e, a partir de então, anualmente. A inspeção deve ser feita após grandes eventos de precipitação para se verificar a possibilidade de colmatção local ou generalizada. O nível d'água no poço de observação deve ser verificado durante algum tempo para se avaliar a taxa de drenagem da trincheira. A superfície desta pode ser inspecionada escavando-se com uma espátula ou colher de pedreiro até a primeira camada do filtro de geotêxtil, localizado a cerca de 20 centímetros da superfície.
2. Manutenção da faixa de cobertura vegetal: as condições da faixa vegetal devem ser verificadas anualmente. Áreas erodidas ou descobertas devem ser reconstituídas.
3. Corte da grama: a faixa de grama deve ser aparada pelo menos duas vezes por ano, para evitar o crescimento exagerado da vegetação e também por razões estéticas. Em áreas residenciais deve-se aparar a faixa de grama com mais frequência, observando-se que o funcionamento do filtro de grama também será prejudicado caso esta seja cortada muito baixo. Durante a poda, deve-se tomar cuidado para que os restos da vegetação não entrem na trincheira, devendo ser levados para longe desta.
4. Remoção de sedimentos: as estruturas de pré-tratamento (remoção de sedimentos e óleos) das trincheiras subterrâneas devem ser verificadas periodicamente e limpas quando o sedimento ocupar mais que 10% da capacidade útil.
5. Poda de árvores: as árvores adjacentes devem ser podadas se seus galhos se estenderem sobre as trincheiras deixando suas folhas caírem sobre esta e, conseqüentemente, provocando a colmatção. Da mesma forma, as árvores que começarem a crescer nas proximidades da trincheira devem ser removidas, a fim de se evitar que o filtro seja rompido pelas raízes.

Além das medidas de manutenção acima citadas, alguns procedimentos de reconstituição da trincheira devem ser tomados à medida que esta começa a perder suas funções, ou seja, à medida que ela se torna colmatada.

A camada superior da trincheira, compreendida entre o topo e o filtro de geotêxtil, pode se tornar colmatada mais facilmente. Esta colmatção da superfície pode ser eliminada por uma cuidadosa remoção da camada de material granular superior, retirando-se o filtro

colmatado e instalando-se um filtro novo. Antes de se recolocar a camada superior de material granular, este deve ser devidamente limpo. Os custos deste tipo de manutenção correspondem à substituição da primeira camada, ou seja, cerca de 10 a 20% do total.

### **2.5.6 - Cuidados na execução**

Uma grande quantidade de trincheiras falha logo após a sua construção, não funcionando como projetado. As causas podem estar em práticas incorretas de construção, na falta de testes adequados em campo para determinação das propriedades do solo ou na falta de controle do aporte de sedimentos às estruturas. O sucesso de funcionamento das trincheiras está intimamente relacionado às condições de construção destas estruturas e às práticas de manutenção.

A seguir são apresentados alguns procedimentos de construção e manutenção que podem minimizar o risco de colmatção precoce das estruturas de infiltração (Schueler, 1987).

1. Na área planejada para a infiltração deve-se evitar a utilização de equipamento pesado, que poderá compactar o solo.
2. Obstruções físicas devem ser colocadas ao redor do perímetro da trincheira durante todas as fases de construção. Planos de controle de erosão e sedimentos para o terreno devem ser orientados para deixar o sedimento e o escoamento completamente fora da área da trincheira. A construção da trincheira não deve começar até que o terreno esteja completamente estabilizado.
3. A trincheira deve ser escavada utilizando-se uma retroescavadeira equipada com esteira ou pneus “fora-de-estrada”. Pneus normais devem ser evitados uma vez que eles compactam o subsolo e podem reduzir a capacidade de infiltração. Pela mesma razão, o uso de máquinas de grande porte deve ser evitado. O material escavado deve ser colocado a pelo menos 3 m da trincheira para se evitar seu escorrimento de volta para a trincheira.
4. Uma vez que a trincheira esteja escavada, devem-se colocar filtros de geotêxtil no fundo e nos lados do reservatório de pedras para se prevenir penetração de material proveniente do solo local. O geotêxtil deve ser colocado alinhado com os lados e o fundo da trincheira, deixando uma considerável sobreposição na junção. Cuidado especial deve ser dado na escolha do filtro, já que os tipos disponíveis diferem significativamente em sua permeabilidade, resistência e durabilidade. O fundo da trincheira deve ser coberto por um filtro de areia ou geotêxtil.

5. Agregado grosso (tais como brita, cascalho ou pedra de mão), deve ser colocado limpo, em camadas, dentro do reservatório escavado, sendo levemente compactado. Material que não esteja suficientemente limpo pode provocar a colmatação precoce da estrutura.
6. Um poço de observação deve ser instalado em cada trincheira, sendo necessário para monitorar do seu desempenho e também para marcar sua localização (no caso da trincheira subterrânea).
7. O controle de sedimentos após a construção é fundamental para o bom funcionamento da trincheira. Portanto, é importante que: os controles de sedimentos e erosão sejam inspecionados para se ter certeza de que eles estejam funcionando; uma faixa de cobertura vegetal (de preferência grama) seja imediatamente implantada em torno da trincheira e, se forem utilizadas sementes, uma proteção seja colocada entre esta faixa e a trincheira, até que a cobertura vegetal esteja completamente estabelecida.

### **2.5.7 - Gestão e aspectos institucionais**

Uma das dificuldades na utilização deste tipo de estrutura como elemento de drenagem é a pequena quantidade de informações sobre seu funcionamento, principalmente no que se refere ao longo prazo e aos aspectos qualitativos. Assim, cabe ao poder público tomar a iniciativa de regulamentar o seu emprego, seja através de leis, como os Planos Diretores, seja através de incentivos econômicos, como redução de impostos.

A correta utilização das estruturas passa por um processo de educação do usuário, a respeito do funcionamento e das regras de manutenção das estruturas. Para tanto, podem ser feitos manuais de usuário, com regras de projeto, operação e manutenção. E, a fim de garantir que elas estejam em perfeito estado de manutenção, fazem-se necessários trabalhos de fiscalização. A busca do conhecimento sobre suas funções deve ser uma constante, com o objetivo de aprimoramento das técnicas.

### **2.6 - Considerações finais**

Diante da necessidade de se buscarem formas de prevenção e controle das inundações urbanas com custos condizentes com a realidade brasileira, as trincheiras de infiltração se apresentam como uma alternativa: permitem efetivo controle do escoamento superficial (tanto em termos de vazão máxima quanto de volumes escoados), com baixos custos de implantação.

No que se refere à qualidade da água em meio urbano, os dispositivos alternativos representam um importante instrumento para o controle de poluentes, devendo ser aplicados em conjunto com o sistema convencional de drenagem. Durante a fase de planejamento, é importante efetuar estudos que permitam avaliar os riscos de contaminação do lençol freático e do solo, aspecto ainda pouco estudado.

Aspectos relativos às características do solo devem ser levados em consideração na definição desse tipo de solução e no seu dimensionamento, sendo um dos fatores limitantes quanto à aplicação de cada tipo de solução alternativa.

Muitos mitos são colocados com relação aos sistemas alternativos de drenagem, o que conduz à adoção de práticas conservadoras. Tais mitos se referem, entre outros aspectos, à vida útil dos dispositivos desta natureza, aos limites de sua utilização e aos problemas relativos ao uso de infiltração em áreas urbanas, e são apresentados e discutidos por Argue (1999). Quebrá-los, através da experimentação e de estudos aprofundados, pode conduzir a uma utilização de dispositivos alternativos em circunstâncias diversas, com limites menos restritivos.

A vida útil dos dispositivos de infiltração pode ser prolongada, observando-se as práticas de manutenção e prevenção de afluência de carga sólida. Os dispositivos devem ser bem planejados antes que se proceda a sua execução. Ishizaki (1996) apresenta um caso de dispositivos de infiltração em plena atividade desde 1981. Balades *et al.* (1998) apresentam trincheiras, monitoradas por 8 anos, em pleno funcionamento. Barraud (2000) apresenta estudos e projetos de reabilitação de uma bacia de infiltração que teve funcionamento sem qualquer manutenção por cerca de 30 anos.

Cada um dos métodos propostos pela literatura é baseado em características particulares das regiões para onde foram desenvolvidos. Mesmo os mais abrangentes, como o proposto por Urbonas e Stahre (1993), necessitam de adaptações para a realidade brasileira, antes de sua aplicação direta. O mesmo serve para as recomendações referentes à execução e manutenção (propostas por Schueler, 1987 e Urbonas e Stahre, 1993).

## Capítulo 3

---

### 3 - DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de conhecer o funcionamento de dispositivos de infiltração do tipo trincheira, foram executadas duas instalações experimentais na área do IPH-UFRGS. A primeira começou a ser monitorada em maio/1999 e serviu de exemplo para a instalação da segunda, cujo monitoramento teve início em agosto/2001. Durante a fase de planejamento e instalação desta, procurou-se minimizar os problemas no monitoramento da primeira.

O desenvolvimento do trabalho experimental foi dividido em três etapas: instalação dos dispositivos, monitoramento contínuo e análise dos dados obtidos. Este capítulo descreve as duas primeiras etapas, procurando detalhar a instalação do dispositivo desde a fase de planejamento até a instrumentação, ressaltando ajustes efetuados durante o monitoramento.

A implantação dos dispositivos se inicia nos estudos preliminares de caracterização do solo e termina com a execução propriamente dita. Também faz parte dessa etapa a definição das variáveis a serem monitoradas, a escolha dos instrumentos a serem utilizados, bem como sua calibração e instalação. No fim, o dispositivo está pronto para ser monitorado.

O monitoramento foi feito de forma contínua através da utilização de instrumentos dotados de registradores automáticos (“data loggers”), como os pluviógrafos e linígrafos (sensores de pressão). Foram efetuados diversos ajustes de forma a corrigir alguns problemas observados, principalmente no que se refere ao aporte de folhas de árvores e sedimentos que poderiam prejudicar o monitoramento e o funcionamento do dispositivo a longo prazo. Simultaneamente ao monitoramento, iniciou-se a análise dos dados.

A terceira etapa do trabalho (análise dos dados) consiste na seleção dos eventos a serem analisados (os de menor significância foram inicialmente descartados), formatação dos dados obtidos pelos instrumentos de monitoramento, cálculos e interpretações dos resultados. Também faz parte desta etapa, que será apresentada em capítulo específico, o ajuste de modelos quantitativos aos dados obtidos durante o monitoramento.

### **3.1 - Variáveis de controle e medição**

A etapa de implantação dos dispositivos se iniciou com a escolha do local, através dos ensaios de caracterização, e foi finalizada com a instrumentação dos mesmos. Ao término, os dispositivos estão prontos para serem monitorados, sendo necessários alguns ajustes a serem feitos em etapas seguintes à medida que forem observadas falhas de funcionamento, seja de perda de água da superfície de contribuição, seja de falha de monitoramento.

Procurou-se também a correção de falhas observadas no primeiro dispositivo, quando da instalação do segundo. Neste caso, as falhas se referem principalmente à dificuldade de delimitação da área de contribuição, à perda de água de contribuição e ao aporte de folhas e sedimentos. Também foi considerada a precisão dos instrumentos de medição, tendo sido escolhidos para o segundo dispositivo instrumentos que permitem faixas mais estreitas de medição e maior precisão das medidas. Maiores detalhes serão apresentados nas seções que se seguem.

A escolha das variáveis foi feita em função dos processos hidrológicos envolvidos (precipitação, interceptação, geração do escoamento, infiltração/percolação). Assim, as variáveis monitoradas devem estar relacionadas à entrada e à saída de água do dispositivo, ou seja, à precipitação e vazão de entrada, à taxa (real) de infiltração a partir do dispositivo, e à umidade do solo.

O funcionamento quantitativo dos dispositivos é caracterizado através da análise de registros simultâneos de vazão (volume) de entrada e nível no seu interior. Os dados de entrada são obtidos por medições da vazão de entrada, através de um vertedor calibrado, e de transformações chuva-vazão utilizando-se os dados de chuva e dos coeficientes de escoamento como função das características de cobertura vegetal e uso do solo. A vazão de saída do dispositivo é calculada pela equação da continuidade, considerando-se as entradas e o armazenamento no dispositivo, levando-se em consideração possíveis extravasamentos.

Dados de umidade do solo são importantes para o ajuste de modelos de infiltração, com a finalidade de melhor caracterizar o funcionamento e simular a utilização do dispositivo para condições diferentes das testadas.

A eficiência do dispositivo é dada por parâmetros de volume e vazão de pico, tempo de duração do evento e tempo de esvaziamento da estrutura, custos de implantação e manutenção, área ocupada em relação à área total drenada, vida útil, dentre outros, determinados a partir das variáveis apresentadas.

Grande atenção deve ser dada à perda de função de infiltração por colmatção. Para uma análise mais completa deste item, seria necessário um tempo de monitoramento maior

(cerca de 5 anos ou mais). No caso da trincheira I, o tempo de monitoramento de 2 anos e 8 meses já permite uma avaliação preliminar destas condições. Trabalhos posteriores poderão utilizar estes dispositivos para se verificar o seu funcionamento a longo prazo, podendo propor modificações para o aumento da vida útil.

### 3.2 - Instrumentos de controle e medição

Tendo por base as variáveis acima colocadas, os instrumentos de medição foram selecionados de forma a representar da melhor maneira possível, e de forma contínua, estas variáveis. A escolha dos instrumentos levou também em consideração a sua disponibilidade no IPH-UFRGS ou os custos de aquisição de acordo com a precisão desejada. A Figura 3.1 apresenta a concepção adotada para monitoramento e os instrumentos utilizados são apresentados a seguir.

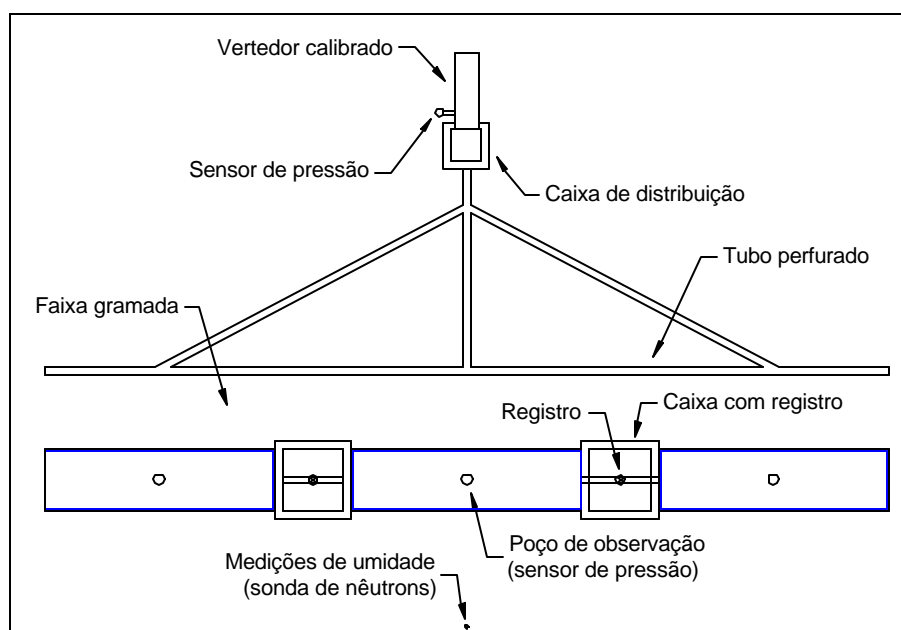


Figura 3.1 – Esquema geral da instrumentação para monitoramento

#### 3.2.1 - Precipitação

Para a medição das precipitações, dois pluviógrafos estão disponíveis. O primeiro, instalado dentro da área de contribuição da trincheira I, encontra-se sob a influência de árvores (Figura 3.2), representando as condições de uma parcela da área de contribuição. Isso permite uma avaliação simplificada de perdas por interceptação vegetal, através da comparação com os dados do segundo pluviógrafo, que não está sob a influência de

obstáculos e representa as condições da outra parcela da área de contribuição. Este último foi instalado para o monitoramento de microrreservatórios de retenção no lote (Agra, 2001) e encontra-se na área de contribuição da trincheira II. Estas informações são importantes para avaliação da consistência dos dados de vazão/volumes medidos na entrada da trincheira.

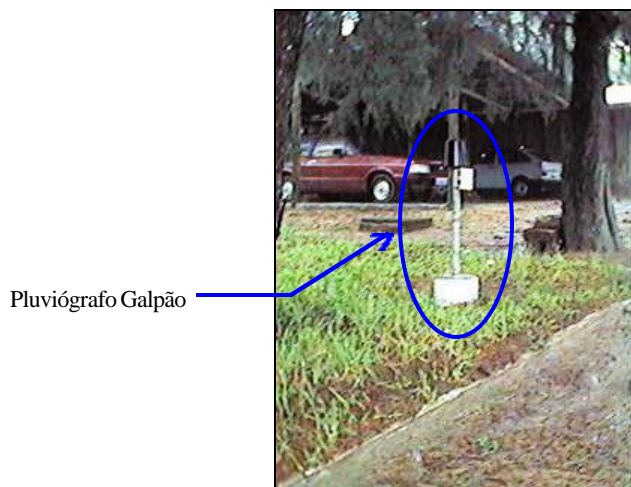


Figura 3.2 – Instalação do pluviógrafo I ("Galpão")

Dados de um terceiro pluviógrafo instalado na área de testes de pavimentos da UFRGS, distante cerca de 1 km da área monitorada, estão também disponíveis e foram utilizados para consistência dos dados dos outros dois. Neste terceiro pluviógrafo, a discretização utilizada é de 30 minutos, com observação contínua desde junho/1999.

Os dados de precipitação são utilizados para a avaliação de interceptação vegetal e determinação dos coeficientes de escoamento do pavimento da área drenada, podendo ainda ser usados no ajuste de modelos e na recuperação de informação no caso de falha das medições de vazão na entrada do dispositivo.

Os pluviógrafos utilizados são de cuba basculante, da Global Water®, modelo RG200, com medições de 0,2 mm de precipitação e precisão do mecanismo de 3% para intensidades de até 100 mm/h. A discretização do intervalo de tempo foi de 5 minutos, sendo que o pluviógrafo permite discretizações de 1 a 6 minutos, 10, 12, 15, 20, 30 e 60 minutos.

Bertrand-Krajewski *et al.* (2000) recomendam a calibração dos pluviógrafos em laboratório, com o objetivo de corrigir erros de medidas sistemáticas dos aparelhos para altas intensidades de precipitação. Tal calibração, no entanto, não foi efetuada. O erro associado à falta de verificação dos pluviógrafos é contornado pela medição da vazão de entrada nas trincheiras, através do vertedor calibrado. Além disto, as intensidades de precipitação raramente ultrapassam os 100 mm/h e, neste caso, o erro é de cerca de 3%.



### 3.2.2 - Vazão (volume) de entrada no dispositivo

A vazão de entrada foi estimada a partir de vertedores triangulares calibrados em laboratório, colocados a montante das trincheiras (Figura 3.1). O nível d'água nos vertedores foi determinado a partir da instalação de sensores de pressão, colocados em poços conectados às caixas dos vertedores.

O vertedor triangular de ângulo central de 90 graus e altura de 15 cm foi construído em chapa de alumínio de 3 mm de espessura, colocado em uma caixa de acrílico de 1 m de comprimento, 30 cm de largura e 30 cm de altura, com conexão com um poço no qual o sensor de pressão foi colocado. Na caixa de acrílico foi colocado um tranqüilizador de fluxo (Figura 3.3).

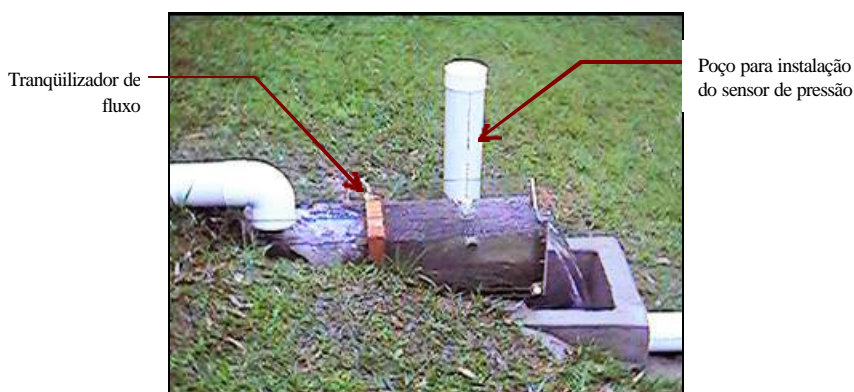


Figura 3.3 – Vertedor para medição da entrada na trincheira II, com tranqüilizador de fluxo

A calibração em laboratório foi efetuada pela medição do tempo gasto para encher um determinado volume de uma caixa de taragem, para uma lâmina d'água conhecida. Tal calibração apresentou os resultados da Tabela 3.1 para o vertedor da trincheira I e da Tabela 3.2 para o vertedor da trincheira II, ilustrados na Figura 3.4.

Tabela 3.1 – Calibração do vertedor da trincheira I

$\Delta H$ (cm)	Q (l/s)	Qcalc. (l/s)	Erro (%)	$\Delta H$ (cm)	Q (l/s)	Qcalc. (l/s)	Erro (%)
0	0	0	-	5.21	0.856	0.893	4.3
2.32	0.104	0.104	-0.9	6.42	1.611	1.557	-3.3
3.07	0.223	0.218	-2.3	6.93	1.906	1.909	0.2
3.59	0.329	0.331	0.7	7.68	2.602	2.510	-3.5
3.70	0.359	0.359	0.0	8.43	3.147	3.218	2.3
4.03	0.463	0.451	-2.8	8.58	3.383	3.372	-0.3
4.32	0.535	0.542	1.4	8.70	3.561	3.499	-1.7
4.47	0.593	0.594	0.1	-	-	-	-

Tabela 3.2 – Calibração do vertedor da trincheira II

$\Delta H$ (cm)	Q (l/s)	Qcalc. (l/s)	Erro (%)	$\Delta H$ (cm)	Q (l/s)	Qcalc. (l/s)	Erro (%)
0,00	0,000	0,000	-	5,25	0,609	0,639	5,0
2,26	0,144	0,107	-25,9	5,29	0,530	0,649	22,6
2,96	0,161	0,190	18,0	5,45	0,584	0,692	18,5
3,45	0,223	0,262	17,4	5,57	0,609	0,724	19,0
3,91	0,318	0,342	7,6	6,32	0,817	0,947	15,9
3,94	0,298	0,348	16,7	6,56	0,894	1,025	14,6
4,45	0,409	0,450	10,1	7,15	1,144	1,230	7,5
4,48	0,358	0,457	27,7	7,28	1,192	1,278	7,2
4,79	0,440	0,526	19,5	8,36	1,788	1,713	-4,2
4,92	0,461	0,557	20,7	10,15	2,860	2,585	-9,6
5,17	0,520	0,619	18,9	-	-	-	-

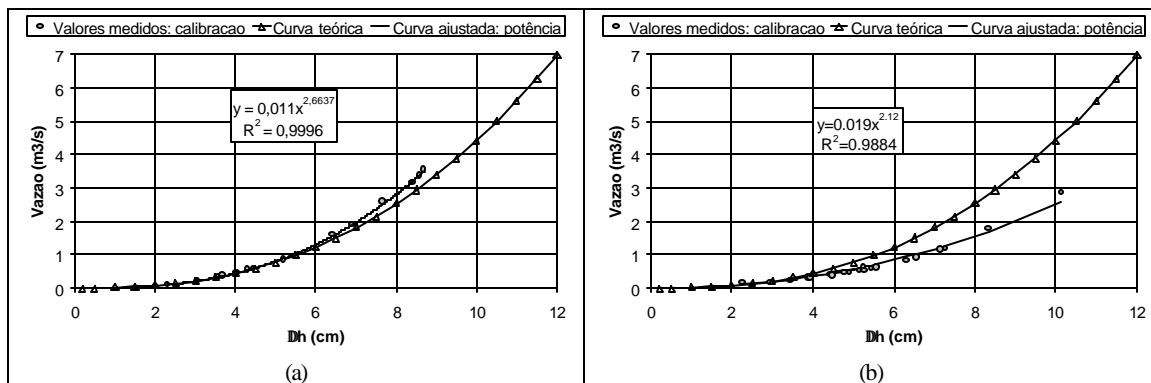


Figura 3.4 – Curvas de calibração: a) vertedor da trincheira I e b) vertedor da trincheira II

As equações ajustadas para os vertedores da trincheira I e II foram a Equação 3.1 e a Equação 3.2, com coeficientes de correlação  $R^2=0,9996$  e  $R^2=0,9884$ , respectivamente.

$$Q=0,011 \cdot h^{2,6637}$$

Equação 3.1

$$Q=0,019 \cdot h^{2,12}$$

Equação 3.2

Na primeira trincheira, utilizou-se um linígrafo (sensor de pressão) da Global Water®, modelo WL14, que permite medições na faixa de 0 a 4 m, com precisão de 0,2% do fundo de escala (8 mm). Utilizou-se discretização de 1 minuto, sendo que este sensor permite discretizações de 1 a 6 minutos, 10, 12, 15, 20, 30 e 60 minutos.

Para a segunda trincheira, optou-se pela utilização de sensores mais precisos, com faixas de medição mais estreitas. Foi então escolhido um sensor (Transmissor Hidrostático de Nível/Profundidade) Druck®, modelo PTX 1830, com medições de 0 a 70 cm e precisão de  $\pm 0,1\%$  do fundo de escala (0,7 mm). Utilizou-se um registrador automático montado no IPH, com discretização de 1 minuto.

Tanto para a trincheira I quanto para a II, os instrumentos foram inicialmente calibrados em laboratório, antes de sua instalação para medição nos dispositivos. Em função da sensibilidade dos sensores, os poços de observação onde estão instalados os sensores são mais profundos que a caixa dos vertedores e esta carga hidráulica inicial é levada em consideração na determinação da vazão de entrada.

Na tentativa de resolver problemas relativos ao aporte de carga sólida ao dispositivo, optou-se por deixar uma faixa de grama entre a trincheira e os condutos que ligam a área de contribuição ao dispositivo. Da mesma forma, foi feita uma distribuição do volume afluente por toda a extensão da trincheira, diferentemente da primeira, onde a entrada era concentrada.

### **3.2.3 - Nível no dispositivo e vazão (volume) de saída**

Na primeira trincheira utilizou-se um sensor de pressão igual ao colocado no vertedor. Inicialmente optou-se pela utilização de um intervalo de discretização de 5 minutos, uma vez que a resposta à variação de nível na trincheira é mais lenta. No entanto, para simplificar a manipulação dos dados e garantir uma correspondência entre as respostas às solicitações, optou-se a partir do início de dezembro/2000 pela utilização da mesma discretização da entrada (1 minuto). Esta mudança permitiu a identificação de uma defasagem de cerca de 3 a 4 minutos entre a entrada e a resposta de nível, como será mais bem detalhado nos capítulos seguintes.

Para a segunda trincheira, optou-se pela utilização de sensores diferentes para a medição da entrada e do nível no interior da mesma, procurando-se adequar a faixa de medição à variável medida. Neste caso, utilizou-se um sensor Druck® modelo PTX 1230, com medições de 0 a 100 cm e precisão de  $\pm 0,25\%$  do fundo de escala (2,5 mm). Este sensor foi dotado de registrador automático, montado no IPH, com discretização de 1 minuto.

Os sensores de pressão utilizados necessitam de uma carga hidráulica mínima de cerca de 10 cm para o início das leituras. Dessa forma, o fundo dos poços de observação está a 14 cm e 19 cm abaixo do fundo da trincheira I e II, respectivamente, e esses valores serão considerados na determinação da altura útil d'água no interior dos dispositivos.

A vazão de saída foi determinada, quando possível, apenas na curva de recessão da trincheira. Desta forma, evitam-se possíveis erros na medição da vazão de entrada, tendo, neste caso, uma variável a menos a ser considerada (*I*).

No entanto, a recessão da trincheira I ocorre de forma muito rápida, não havendo a ocorrência de intervalos de esvaziamento puro, ou seja, durante todo o período de

monitoramento do evento, observa-se a entrada de água na trincheira. Nesse caso, a vazão de saída foi determinada pela utilização da equação da continuidade, considerando os dados de entrada e de nível no interior do dispositivo:

$$Q_s = Q_e - \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:  $Q_s$  = vazão de infiltração a partir da trincheira

$Q_e$  = vazão de entrada na trincheira

$DV/Dt$  = variação do volume no tempo

A determinação da vazão de saída foi a base de toda a análise de dados que será apresentada em capítulo específico.

### 3.2.4 - Tempo de esvaziamento e nível de colmatação do dispositivo

Tempo de esvaziamento e nível de colmatação são parâmetros importantes para o acompanhamento do funcionamento do dispositivo a longo prazo e serão obtidos pela análise conjunta das variáveis anteriores. A evolução da colmatação (ou perda da função de controle do escoamento) é verificada à medida em que o tempo de esvaziamento do dispositivo aumenta ou à medida que o nível atingido se torna maior, para eventos de mesma magnitude e para condições semelhantes de umidade do solo.

### 3.2.5 - Umidade do solo

Campanhas de medição da umidade, juntamente com o monitoramento da precipitação, permitem o estabelecimento de relações entre o tempo seco antecedente e a umidade do solo. Esta informação, confrontada com a curva de retenção do solo, é fundamental durante a fase de análise de dados e ajuste de modelos.

A umidade do solo a ser utilizado foi medida pela utilização de uma sonda de nêutrons, com medições em uma única vertical localizada 2 m a jusante das trincheiras, em três pontos na vertical (30 cm, 70 cm e 120 cm).

O princípio de operação da sonda de nêutrons baseia-se na emissão de nêutrons de alta energia, que colidem com núcleos de outros elementos no solo, principalmente hidrogênio. Essas colisões reduzem a energia dos nêutrons emitidos, provocando uma mudança de direção no movimento dos mesmos. Alguns nêutrons termalizados (por núcleos de hidrogênio)

retornam para o local de onde foram emitidos. Estes nêutrons refletem o conteúdo de água do solo (Beltrame e Taylor, 1979).

Para a utilização da sonda para medidas de umidade do solo, deve ser instalado um tubo de acesso, que permite que as leituras sejam feitas em diferentes profundidades. Este tubo tem a finalidade de guiar no solo a sonda, a qual deve ser calibrada antes do início de sua utilização. Essa calibração foi feita de acordo com os procedimentos descritos por Beltrame e Taylor (1979).

Os componentes básicos da sonda são: uma fonte de nêutrons de alta energia, um detector que capta os nêutrons termalizados, um contador de nêutrons detectados e um cabo conectando as duas partes.

#### Fontes de Erro:

- a) Erro de contagem aleatório: sendo a meia vida dos elementos que compõem a fonte radioativa da sonda bastante longa (454 anos), pode-se supor que a taxa média de emissão de nêutrons seja constante com o tempo. Entretanto, devido à natureza da reação radioativa, as taxas de emissão para prazos curtos variam ao redor da média. Tais desvios são aleatórios e seguem uma distribuição normal.
- b) Erros de contagem perto da superfície do solo: a sonda de nêutrons mede a umidade média de um volume finito de solo, de formato esférico e raio de influência da ordem de 90 a 200 mm (dependendo da umidade do solo e da fonte radioativa), a partir da fonte emissora. Sendo assim, a sonda não é sensível a mudanças espaciais rápidas do conteúdo de umidade do solo. Quando se está fazendo medições de umidade perto da superfície, alguns nêutrons podem escapar. Dessa forma, a contagem de nêutrons é reduzida e o volume de água no solo é subestimado. Este erro depende da umidade real do solo e da proximidade da fonte à superfície.
- c) Erros devidos à falta de calibração: pode-se incorrer em erros quando se supõe poder utilizar curvas de calibração, sem considerar a natureza do trabalho. Calder (apud Beltrame e Taylor, 1979) relata que a variação ocorrida na inclinação das curvas de calibração em campo para uma grande faixa de solos é de 19%. Devido a essas constatações, quando o objetivo for avaliar as mudanças temporais de umidade, as curvas dos fabricantes, ou mesmo as disponíveis na literatura para a mesma sonda e tubo de acesso, podem ser usadas, pois fornecem precisão suficiente.

### **3.3 - Critérios de dimensionamento**

#### **3.3.1 - Ensaios de caracterização**

A escolha do local de implantação do dispositivo foi efetuada de acordo com alguns critérios encontrados na literatura técnica disponível. O principal deles é dado pelas características do solo, em termos de tipo (arenoso, argiloso, etc.), curvas de infiltração, condutividade hidráulica saturada, dentre outras. O uso e a ocupação do solo são também importantes fatores de decisão da solução a ser adotada na microdrenagem.

Assim, a implantação do dispositivo se inicia por estudos de caracterização do solo nas áreas onde se pretende fazer a drenagem. Uma vez que o dimensionamento de dispositivos de infiltração é feito com base nas condições de infiltração do solo local, este é o primeiro ensaio que deve ser feito. Caso o solo não tenha características de infiltração dentro dos limites necessários, devem-se abandonar soluções do tipo infiltração, partindo-se para soluções de armazenamento, por exemplo, ou uma combinação de soluções.

Uma vez tendo sido feita a escolha prévia do local de implantação, através das curvas de infiltração, parte-se para uma caracterização mais detalhada do solo, determinando-se sua condutividade hidráulica saturada e seu perfil.

Para os ensaios de caracterização, vários métodos são disponíveis (como por exemplo, a aproximação pelo ensaio do duplo anel ou método do poço invertido, no caso da condutividade hidráulica saturada). No trabalho em questão, foram utilizados os seguintes (Cauduro e Dorfman, 1990).

- Curva de infiltração: infiltrômetro de cilindros concêntricos;
- Condutividade hidráulica: método do poço invertido e aproximação pela curva de infiltração;
- Perfil do solo: ensaio de textura;
- Curva de retenção da água no solo: ensaio das panelas de pressão.

A escolha destes métodos foi feita em função da simplicidade de aplicação, com resultados consideravelmente bons para a finalidade desejada, e da disponibilidade do equipamento no IPH.

##### **3.3.1.1 - Curva de infiltração: ensaio dos cilindros concêntricos**

No ensaio de infiltração pelos cilindros concêntricos, considera-se o valor estabilizado como sendo a condutividade hidráulica saturada, conforme apresentado na Figura 3.5. Este

ensaio é interessante por representar o comportamento do solo em diferentes estados de saturação.

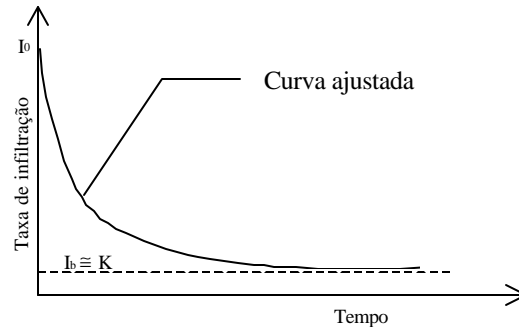


Figura 3.5 – Curva de infiltração característica

Com relação a este método, cabe ressaltar que nele se mede o movimento da água na vertical, com infiltração somente pelo fundo. A Figura 3.6 apresenta o esquema de montagem do ensaio de infiltração pelo método do infiltrômetro de cilindros concêntricos.

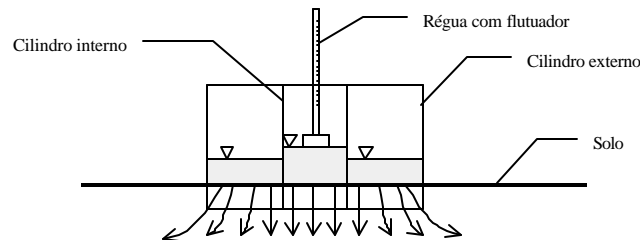


Figura 3.6 – Esquema de montagem do infiltrômetro de cilindros concêntricos

### 3.3.1.2 - Condutividade hidráulica: método do poço invertido

Para uma caracterização mais completa optou-se também por fazer o ensaio do poço invertido, que tende a dar apenas a permeabilidade horizontal. Este ensaio é feito em um poço cuja profundidade prepondera sobre o diâmetro (Figura 3.7).

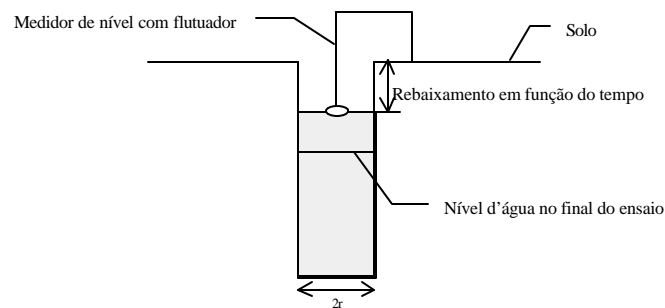


Figura 3.7 – Esquema de montagem do ensaio do poço invertido

De acordo com o U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering (Cauduro e Dorfman, 1990), o solo pode ser classificado conforme sua condutividade hidráulica saturada conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classes de condutividade hidráulica

Classe	K (mm/h)
Muito lenta	< 1,3
Lenta	1,3 a 5,1
Moderadamente lenta	5,1 a 20,0
Moderada	20,0 a 63,0
Moderadamente rápida	63,0 a 127,0
Rápida	127,0 a 254,0
Muito rápida	> 254,0

Deve ser observado, no entanto, que a condutividade hidráulica é afetada pela temperatura, composição iônica da água e presença de ar aprisionado, sendo que a relação com a temperatura da água ocorre na proporção inversa da viscosidade cinemática (Bouwer, 1969; Bouwer, 1978; Yamada, 1993) (Figura 3.8). Desta forma, espera-se que ocorram variações sazonais no comportamento da condutividade hidráulica e, conseqüentemente, das trincheiras.

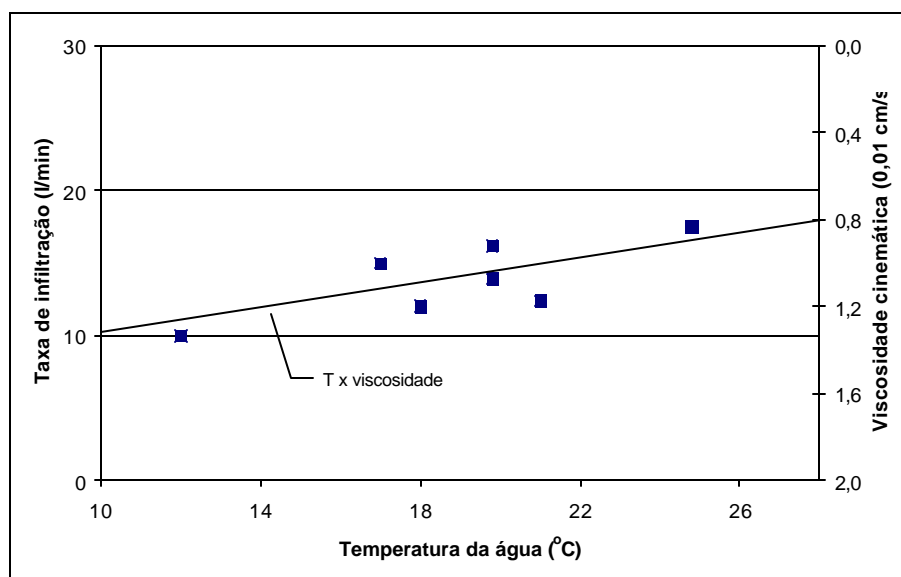


Figura 3.8 – Variação da velocidade de infiltração com a temperatura (Fonte: modificado de Yamada, 1993)

### 3.3.1.3 - Perfil do solo: ensaio de textura

A textura é um importante elemento de classificação e identificação do solo. O ensaio, descrito por Cauduro e Dorfman (1990), baseia-se no tempo necessário para a areia e o silte se



depositarem, considerando-se uma mistura do solo em uma solução de água e dispersante em um cilindro de sedimentação (proveta). A parcela de areia se deposita rapidamente e é quantificada através de um hidrômetro (pela medição da densidade relativa da mistura). Em seguida, deposita-se o silte, também quantificado através do hidrômetro. O que permanece em suspensão é a parcela de argila.

A diferenciação entre o tamanho das partículas é feita considerando-se o tempo necessário para cada uma delas se depositar. Em 40 segundos, as partículas de areia (diâmetro superior a 0,05 mm) se depositam e em 7:52 h as partículas de silte se depositam (partículas entre 0,002 mm e 0,05 mm).

#### 3.3.1.4 - Curva de retenção

O ensaio de determinação da curva de retenção de água pelo solo é efetuado pela aplicação de uma diferença de pressão entre faces opostas da amostra. Essa diferença de pressão faz com que a água saia da amostra, até que elas voltem a ficar em equilíbrio com a diferença de pressão aplicada. O ensaio pode ser efetuado de duas maneiras: através da aplicação de uma sucção, pela utilização dos pratos de sucção onde se aplica uma coluna d'água, ou de uma pressão, pela utilização das painéis de pressão (Figura 3.9). Para cada valor de pressão aplicado, mede-se o conteúdo de água, construindo-se a curva.

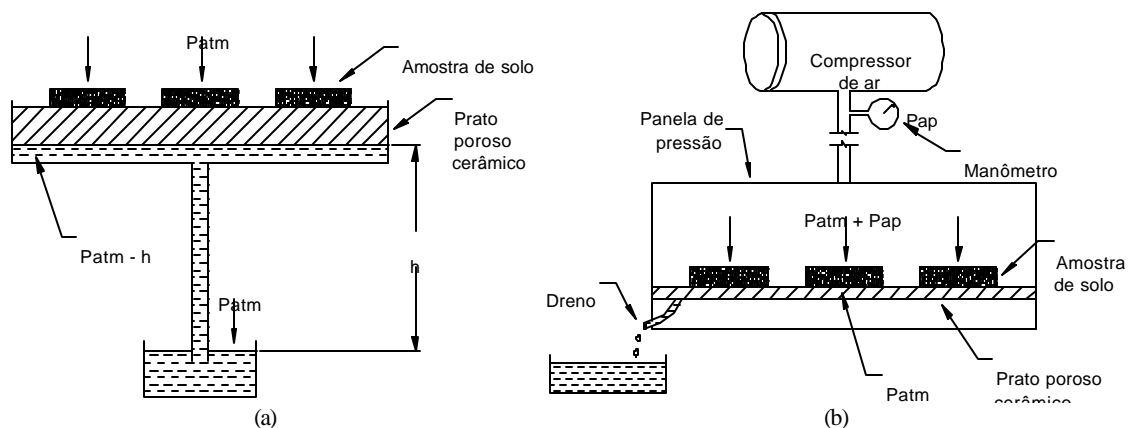


Figura 3.9 – Esquema de montagem (a) do prato de sucção e (b) da painéis de pressão (Fonte: Cauduro e Dorfman, 1990)

#### 3.3.2 - Coeficientes de segurança

A utilização de dispositivos de infiltração está sujeita a vários tipos de incertezas. As propriedades do solo, por exemplo, sofrem grandes variações de um local para outro, mesmo estando muito próximos. Essas incertezas podem estar relacionadas a:

- representatividade do ponto de medição em relação à área de estudos;
- incertezas devido aos métodos utilizados para medição das propriedades;
- influência da umidade do solo sobre suas propriedades, no momento da medição;
- possibilidade de modificação das propriedades com o tempo, devido a efeitos diversos, como de colmatção/compactação por exemplo;
- no caso da curva de infiltração, a profundidade pode ter influência no ensaio, devido à presença de camadas de diferentes tipos de solo, em diferentes níveis de compactação;
- existência de caminhos preferenciais de escoamento.

Os valores das taxas de infiltração podem variar de forma significativa com o tempo, em função da colmatção do dispositivo. A minimização deste efeito pode ser feita pela prevenção do aporte de sedimentos ao dispositivo, assim como uma adequada manutenção de rotina.

Em função dessas incertezas, são sugeridos coeficientes de segurança, reduzindo-se a condutividade hidráulica saturada no dimensionamento. Urbonas e Stahre (1993) sugerem um coeficiente da ordem de 2, enquanto Bettess (1996) sugere valores que variam de 1,5 a 10, conforme mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Coeficientes de segurança para o projeto de estruturas de infiltração (Bettess, 1996)

Área a ser drenada	Conseqüências da falha		
	Nenhum dano ou inconveniente	Inconveniente menor, como lâmina d'água em estacionamento	Danos a construções ou estruturas ou inconvenientes maiores, como inundação de ruas
< 100 m <sup>2</sup>	1,5	2	10
100 m <sup>2</sup> a 1000 m <sup>2</sup>	1,5	3	10
> 1000 m <sup>2</sup>	1,5	5	10

A respeito dos coeficientes de segurança, Zimmer *et al.* (1999) fazem um comparativo entre alguns métodos de dimensionamento de dispositivos de infiltração (norma alemã ATV 138, de 1990; solução explícita do balanço de massa, assumindo gradiente hidráulico unitário; solução de equação baseada na teoria de Green-Ampt; método de elementos finitos para solução da equação de Richard) e seus coeficientes de segurança. Os autores concluem que os métodos mais simples de dimensionamento são aqueles que apresentam maiores coeficientes de segurança.

### 3.4 - Instalação da Trincheira I

#### 3.4.1 - Descrição e caracterização do local de implantação

Com o objetivo de se evitar erros provocados pela ocorrência de macroporos ou de variabilidade local das características do solo, foram realizados vários ensaios de infiltração, buscando a melhor representação possível da condutividade hidráulica (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Ensaios de infiltração: método do infiltrômetro de cilindros concêntricos

t (min)	Ensaio 1				Ensaio 3			Ensaio 4		
	Leitura	Leitura Reenchimento	$\Delta h$ (cm)	$V_m$ Infiltr. (mm/h)	Leitura	$\Delta h$ (cm)	$V_m$ Infiltr. (mm/h)	Leitura	$\Delta h$ (cm)	$V_m$ Infiltr. (mm/h)
0	50.80				50.20	-		52.10	-	
1	49.50		1.30	780.0	49.80	0.40	240.0	51.30	0.80	480.0
2	49.30		0.20	120.0				51.25	0.05	30.0
3	49.10		0.20	120.0				51.20	0.05	30.0
4	48.90		0.20	120.0						
5	48.75		0.15	90.0	49.75	0.05	7.5	51.15	0.05	15.0
10	48.05		0.70	84.0	49.60	0.15	18.0	51.00	0.15	18.0
15										
20	46.90		1.15	69.0	49.35	0.25	15.0	50.80	0.20	12.0
30	45.90		1.00	60.0				50.60	0.20	12.0
40					48.90	0.45	13.5			
45	44.70		1.20	48.0						
60	43.70	51.40	1.00	40.0	48.45	0.45	13.5	50.00	0.60	12.0
75	50.20		1.20	48.0						
90	48.90		1.30	52.0	47.80	0.65	13.0	49.50	0.50	10.0
105	47.80		1.10	44.0						
120								49.05	0.45	9.0
150					46.55	1.25	12.5			
165	44.25		3.55	35.5				48.30	0.75	9.0
170										
180	43.55		0.70	28.0						
195	42.9		0.65	26.0						
210					45.30	1.25	12.5			

O ensaio do poço invertido foi efetuado com o objetivo de melhor caracterizar a condutividade hidráulica do solo. O resultado é apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ensaio de condutividade hidráulica saturada: método do poço invertido

Leitura (cm)	$\Delta h$ (cm)	Tempo (min)	$\Delta t$ (s)	Leitura (cm)	$\Delta h$ (cm)	Tempo (min)	$\Delta t$ (s)
32.5	-	0.0	-	40.1	1.2	11.0	120
32.8	0.3	0.5	30	41.1	1.0	13.0	120
33.3	0.5	1.0	30	42.3	1.2	15.0	120
33.6	0.3	1.5	30	45.3	3.0	20.0	300
33.7	0.1	2.0	30	47.7	2.4	25.0	300
34.7	1.0	3.0	60	49.6	1.9	30.0	300
35.4	0.7	4.0	60	52.0	2.4	35.0	300
36.1	0.7	5.0	60	53.4	1.4	40.0	300
37.4	1.3	7.0	120	55.3	1.9	45.0	300
38.9	1.5	9.0	120	-	-	-	-

O ensaio de textura, efetuado para a caracterização do perfil do solo, mostra que a trincheira está instalada em um solo com parcela significativa de argila, principalmente a partir da profundidade de 1,0 m (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Perfil do solo no local de instalação da trincheira.

Prof. (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Solo
0	20,2	20,2	59,7	Franco-argilo-arenoso
30	18,3	16,3	65,4	Franco-arenoso
60	24,1	20,1	55,7	Franco-argilo-arenoso
80	36,3	19,2	44,5	Franco-argiloso
100	46,8	16,3	37,0	Argiloso
120	47,8	15,2	37,0	Argiloso
160	44,8	16,3	38,9	Argiloso

A determinação da curva de retenção de água no solo (curva característica), apresentada na Figura 3.10, foi obtida através de ensaio pelo método das placas de pressão, apresentado por Cauduro e Dorfman (1990).

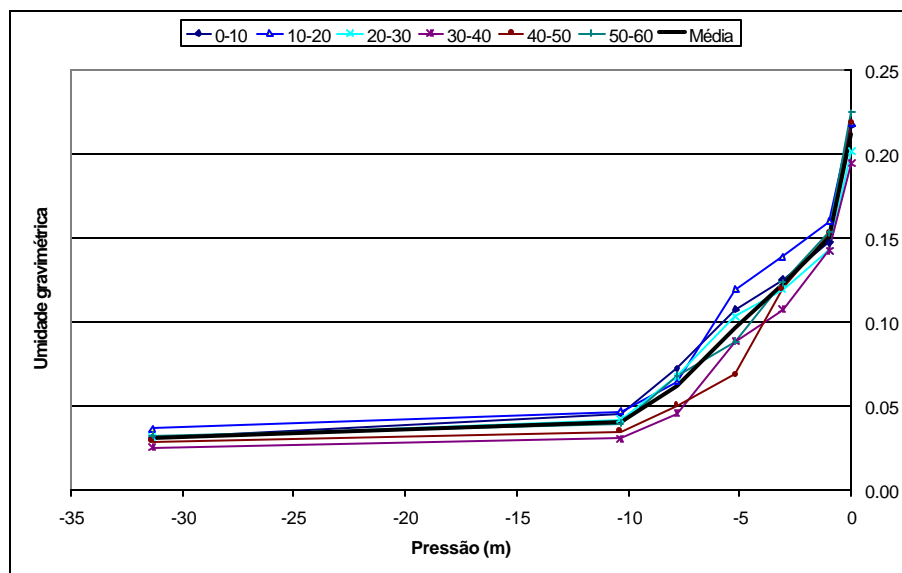


Figura 3.10 – Curva de retenção da água no solo (Trincheira I)

Destes ensaios, obtiveram-se os seguintes resultados para projeto e dimensionamento:

- aproximação no ensaio de infiltração: 9 a 26 mm/h
- método do poço invertido: 12,3 mm/h

Com os resultados destes ensaios, verifica-se que não há grande diferença entre a condutividade hidráulica medida pela aproximação da curva do ensaio de infiltração e a medida pelo ensaio do poço invertido, para o local onde as trincheiras foram instaladas,

estando o solo na classe moderadamente lenta para a condutividade hidráulica (Tabela 3.3). Sendo o ensaio dos cilindros concêntricos mais simples, ele pode ser usado na caracterização.

Utilizou-se o valor de condutividade hidráulica saturada igual a 10 mm/h para o dimensionamento da trincheira, estando assim a favor da segurança, já que este foi o menor valor encontrado nos ensaios de caracterização.

### 3.4.2 - Projeto e dimensionamento

Segundo o seu funcionamento, as trincheiras podem ser de dois tipos: infiltração total ou infiltração parcial. No primeiro caso, todo o volume do escoamento superficial é armazenado no dispositivo, sendo que a única saída de água se dá por infiltração no solo, para eventos com tempo de retorno igual ou inferior ao do projeto. As trincheiras de infiltração parcial possuem drenos no seu interior, que permitem que parte da água armazenada seja drenada para a rede de drenagem, antes que se infiltre.

Com base nos resultados dos ensaios de caracterização dos itens anteriores, procede-se ao dimensionamento dos dispositivos. O tempo de retorno utilizado é o mesmo que se utiliza em projetos da microdrenagem, variando de 2 a 10 anos. Para eventos de tempos de retorno superiores, o dispositivo trabalha como um sistema de infiltração parcial, amortecendo as vazões de pico e os volumes escoados. O dimensionamento para tempos de retorno superiores aos definidos resultaria em custos excessivos, tornando o projeto altamente antieconômico.

Para o projeto das estruturas de infiltração, deve-se ter em mente que, uma vez que a estrutura falhar (perder as funções de infiltração), a sua recuperação pode ser difícil, podendo ser necessária até a substituição. Por essa razão, Urbonas e Stahre (1993) recomendam uma filosofia de projeto conservadora, através da adoção de um coeficiente de segurança igual a dois na redução da condutividade hidráulica saturada. O dimensionamento deve ser feito de tal forma que a estrutura tenha as menores dimensões possíveis, mas com segurança razoável, para armazenar e percolar (infiltrar) a água da bacia de contribuição (Jonasson, 1984).

O projeto da trincheira de infiltração foi feito com base na metodologia descrita por Jonasson (1984) e Urbonas e Stahre (1993), que utilizam um método denominado "rain-envelope-method". Utilizou-se no dimensionamento um tempo de retorno de 5 anos (adotado na microdrenagem), para a curva IDF ajustada para o posto do IPH (1964-1983) por Goldenfium *et al.* (1990):

$$i_{máx} = \frac{509,859 T^{0,196}}{(t + 10)^{0,72}}$$

Equação 3.4

Projeteu-se a trincheira para drenar um trecho de rua pavimentada em paralelepípedo, correspondendo a uma área de 200 m<sup>2</sup>, que seria delimitada pelas guias da rua e por divisores artificiais a serem colocados. A dificuldade de delimitação precisa desta área, em função de suas características, fez com que a área de contribuição final fosse superior à de projeto. Desta forma, a trincheira recebe a contribuição de uma área de cerca de 600 m<sup>2</sup>.

Adotou-se um coeficiente de escoamento igual a 0,7, compatível com os valores apresentados por Araújo *et al.* (2000) para pavimentos em paralelepípedo. Em seu trabalho, os autores encontraram valores do coeficiente de escoamento entre 0,57 e 0,81 para este tipo de pavimento.

Fixou-se a largura da trincheira em 80 cm, que corresponde à largura padrão da pá de uma retroescavadeira, e a profundidade em 1,0 m, que corresponde à profundidade onde o solo começa a ter características mais argilosas, como mostrado na Tabela 3.7 (perfil do solo).

O valor de condutividade hidráulica saturada igual a 10 mm/h ( $2,8 \cdot 10^{-6}$  m/s) foi adotado (seção 3.3.1), sendo utilizado um coeficiente de segurança (igual a 2) recomendado por Urbonas e Stahre (1993), que é aplicado como redutor da condutividade hidráulica.

Com estes dados, procedeu-se ao dimensionamento, como recomendado por Urbonas e Stahre (1993), o que resultou no gráfico de volumes acumulados de entrada e saída (infiltração) do dispositivo apresentado na Figura 3.11, mostrando o ponto de máximo volume (ponto de dimensionamento). O processo de dimensionamento é iterativo, tendo sido iniciado para um comprimento de 5 m e chegando a um dimensionamento final para 10 m de comprimento (sendo 0,8 m a largura e 1,0 m a profundidade).

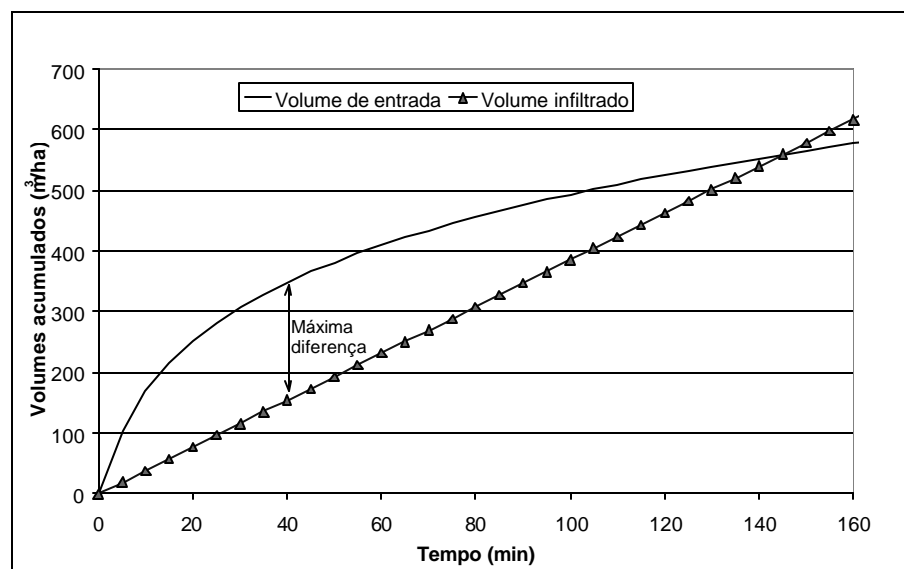


Figura 3.11 – Volumes de entrada e saída acumulados

Para o monitoramento, foram previstos dois poços de observação. O primeiro é utilizado para o sensor de nível, e o segundo, para medidas pontuais, permitindo verificar possível declividade da linha d'água. Pode, ainda, ser utilizado para a colocação de sondas de qualidade, coleta de amostras de água, dentre outras opções. A Figura 3.12 apresenta o projeto desta primeira trincheira.

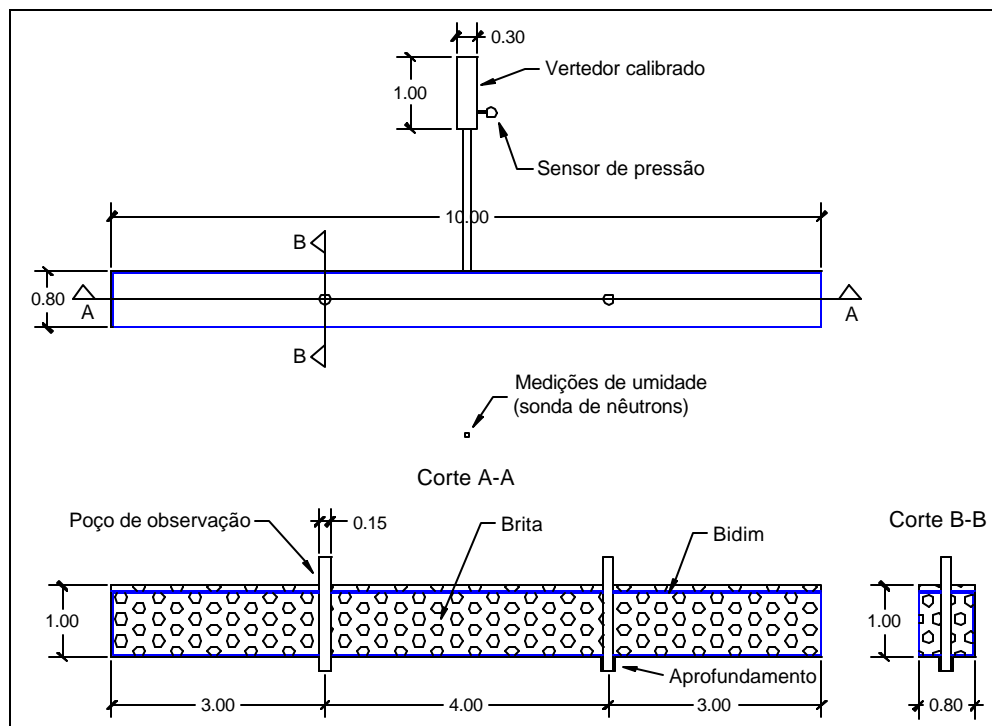


Figura 3.12 – Projeto da trincheira de infiltração I

### 3.4.3 - Localização/individualização da área de contribuição

Os dispositivos serão instalados com a finalidade de drenar áreas com taxas de impermeabilização normalmente encontradas no meio urbano, que geralmente são elevadas. A trincheira I foi instalada em uma área do IPH-UFRGS, recebendo as águas de uma rua pavimentada em paralelepípedo, com cerca de 600 m<sup>2</sup>. A individualização da área foi feita a partir de obstáculos físicos existentes (meio-fio, divisores da própria área, etc.) e através da construção de divisores na rua (quebra-molas), como mostrado na Figura 3.13.

Em conjunto com a individualização da área, faz-se uma caracterização em termos de cobertura vegetal, uso do solo, e uma estimativa do coeficiente de escoamento superficial, que será melhor detalhado a partir do monitoramento do dispositivo (volume escoado/volume precipitado). É importante, também, conhecer as vazões máximas e os volumes escoados atualmente verificados, para fins de controle da eficiência do dispositivo, após sua instalação.



Figura 3.13 – Individualização da área de estudos

#### 3.4.4 - Execução do dispositivo

Finalizando a etapa de implantação do dispositivo, foi feita a execução propriamente dita. As recomendações para a execução constantes na seção 2.5.6 tiveram que ser avaliadas e adaptadas, de forma a tornar a execução mais simples e aplicável às condições brasileiras, principalmente no que diz respeito aos equipamentos. Dessa forma, utilizou-se retroescavadeira comum (e não dotada de esteira) na escavação e a retirada do material escavado foi efetuada com caminhão comum (e não dotado de pneus fora de estrada, conforme recomendação).

Foi utilizado filtro geotêxtil do tipo bidim®, segundo especificações técnicas da BBA Group, e o enchimento da trincheira foi feito com brita 4, o que resultou em porosidade de 47%. Os poços de observação foram feitos com tubos de PVC de 150 mm perfurados, sendo mais profundos que a trincheira, em função da sensibilidade dos sensores, conforme item 3.2.3.

A utilização de dois poços de observação foi feita de forma a permitir a utilização de outros sensores, como de qualidade da água, por exemplo. Para os primeiros eventos, foi monitorado (de forma manual) o nível nos dois poços de observação, para identificar possível declividade da linha d'água no interior dos dispositivos. Não foi observada variação significativa na declividade da linha d'água, podendo o monitoramento ser feito em apenas um dos poços.

Após a execução, conclui-se a etapa de instalação do dispositivo com a colocação dos instrumentos. A Figura 3.14 e a Figura 3.15 mostram as fases da execução do dispositivo e a Figura 3.16 apresenta a trincheira pronta para monitoramento.





(a)



Aprofundamento para instalação do poço de observação

(b)

Figura 3.14 – (a) Escavação da trincheira e (b) colocação de bidim®



(a)



(b)

Figura 3.15 – (a) Enchimento da trincheira com brita e (b) fechamento



Figura 3.16 – Trincheira pronta, em monitoramento

### 3.5 - Instalação da Trincheira II

#### 3.5.1 - Descrição e caracterização do local de implantação

A caracterização desta trincheira foi feita pelos mesmos métodos e ensaios utilizados na trincheira I. Os ensaios de infiltração realizados apresentaram valores relativamente altos de condutividade hidráulica. Com a finalidade de se obter a melhor caracterização possível, foram efetuados 3 ensaios na mesma área, apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Ensaios de infiltração

t min	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Leitura	Leitura Reench.	$\Delta h$ cm	$V_m$ Infilt. mm/h	Leitura	Leitura Reench.	$\Delta h$ cm	$V_m$ Infilt. mm/h	Leitura	Leitura Reench.	$\Delta h$ cm	$V_m$ Infilt. mm/h
0	49.35		-	-	49.70		-	-	49.65		-	-
1	49.20		0.15	90.0	49.40		0.30	180.0	49.45		0.20	120.0
2	49.10		0.10	60.0	49.20		0.20	120.0	49.30		0.15	90.0
3	49.00		0.10	60.0	49.05		0.15	90.0	49.15		0.15	90.0
4	48.85		0.15	90.0	48.90		0.15	90.0	49.00		0.15	90.0
5	48.75		0.10	60.0	48.75		0.15	90.0	48.90		0.10	60.0
10	48.30		0.45	54.0	48.15		0.60	72.0	48.40		0.50	60.0
15	47.80		0.50	60.0	47.60		0.55	66.0	47.90		0.50	60.0
20	47.35		0.45	54.0	47.05		0.55	66.0	47.45		0.45	54.0
30	46.40		0.95	57.0	46.05		1.00	60.0	46.65		0.80	48.0
45	45.10		1.30	52.0	44.60		1.45	58.0	45.55		1.10	44.0
60	43.80		1.30	52.0	43.25	49.00	1.35	54.0	44.60		0.95	38.0
75	42.60	47.7	1.20	48.0	47.65		1.35	54.0	-		-	-
90	46.45		1.25	50.0	46.30		1.35	54.0	42.95	49.50	1.65	33.0
105	45.25		1.20	48.0	43.75	51.95	2.55	51.0	47.75		1.75	35.0
120	44.05		1.20	48.0	49.20		2.75	55.0	46.15		1.60	32.0
150					46.45		2.75	55.0	44.70		1.45	29.0
180					43.80		2.65	53.0	-		-	-
240					41.60		2.20	44.0	42.20	49.90	2.50	25.0
300									47.30		2.60	26.0
360									44.70		2.60	26.0

Procedeu-se, também, ao ensaio de textura para caracterização do perfil do solo, apresentado na Tabela 3.9. Assim como na trincheira I, verifica-se significativa parcela de argila.

Tabela 3.9 – Perfil do solo no local de instalação da trincheira II

Prof. (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Solo
0	34,64	17,3	48,04	Franco-argilo-arenoso
35	56,04	12,2	31,74	Argiloso
90	44,83	27,5	27,66	Argiloso
125	30,49	36,6	32,93	Franco-argiloso
165	23,21	41,4	35,42	Franco

A curva de retenção foi obtida a partir de amostragens do solo no local de implantação da trincheira, tendo sido coletadas três amostras indeformadas a cada 10 cm, até a profundidade de 60 cm. A Figura 3.17 apresenta a curva média para cada profundidade e a curva média de todo o ensaio, obtidas para a trincheira II.

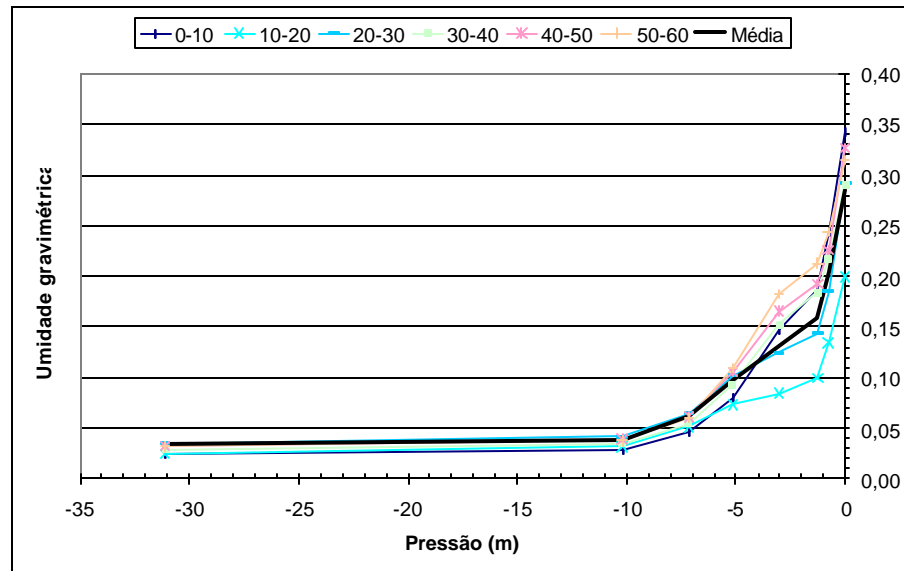


Figura 3.17 – Curva de retenção obtida no local de instalação da trincheira II

Também como resultado do ensaio para obtenção da curva de retenção, determinou-se a densidade e a porosidade do solo em cada camada, como apresentado na Tabela 3.10. Verifica-se maior densidade nas camadas superiores, em função da maior compactação superficial.

Tabela 3.10 – Densidade e porosidade do solo no local de implantação da trincheira II

Profundidade	$r$ (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
0-10	1,64	45,6
10-20	1,66	34,2
20-30	1,38	42,1
30-40	1,30	45,2
30-40	1,31	48,4
50-60	1,26	48,8

### 3.5.2 - Projeto e dimensionamento

Esta trincheira recebe a contribuição de uma área de 450 m<sup>2</sup>, apresentada na Figura 3.18, compreendida por um estacionamento pavimentado em paralelepípedo. Nesta segunda trincheira, não tendo medições para aferição do coeficiente de escoamento, optou-se por utilizar um coeficiente de escoamento de 0,57, estando este valor dentro da faixa de variação

para esse tipo de pavimento (Araújo *et al.*, 2000). A utilização de um valor mais baixo para o coeficiente de escoamento se justifica pela baixa declividade da área de contribuição (1,6%).

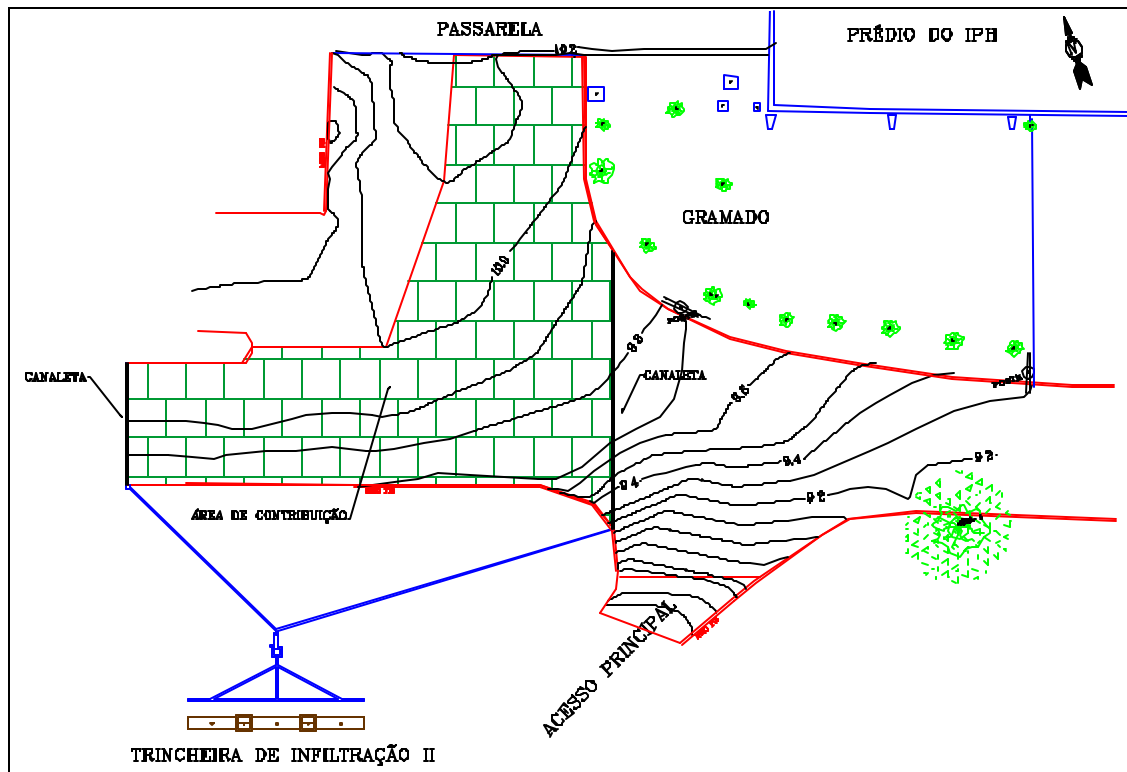


Figura 3.18 – Área de contribuição para a trincheira II

Nessa trincheira, optou-se pela verificação do seu funcionamento em condições limites, através de uma filosofia de projeto menos conservadora que a utilizada na primeira trincheira. Dessa forma, adotou-se um valor de condutividade hidráulica saturada entre o mínimo e o máximo obtidos nos ensaios de caracterização (30 mm/h). Pelo mesmo motivo, não foi utilizado coeficiente de segurança para a condutividade hidráulica.

Assim como para a trincheira I, utilizou-se o tempo de retorno de dimensionamento igual a 5 anos, para a curva IDF do posto do IPH (Equação 3.4).

A Figura 3.19 apresenta a curva de dimensionamento da trincheira II. Para esta, observa-se que o tempo crítico é menor do que o verificado para a trincheira I, uma vez que o solo apresenta condutividade hidráulica maior.

Com a finalidade de se variarem as dimensões (comprimento) da trincheira e de poder simulá-la em diferentes condições, ela foi planejada e construída em 3 módulos, separados por um registro. Assim, a instalação experimental permite a simulação de uma única trincheira de 9 metros ou de qualquer combinação entre cada módulo de 3 metros, havendo um poço de observação em cada módulo.

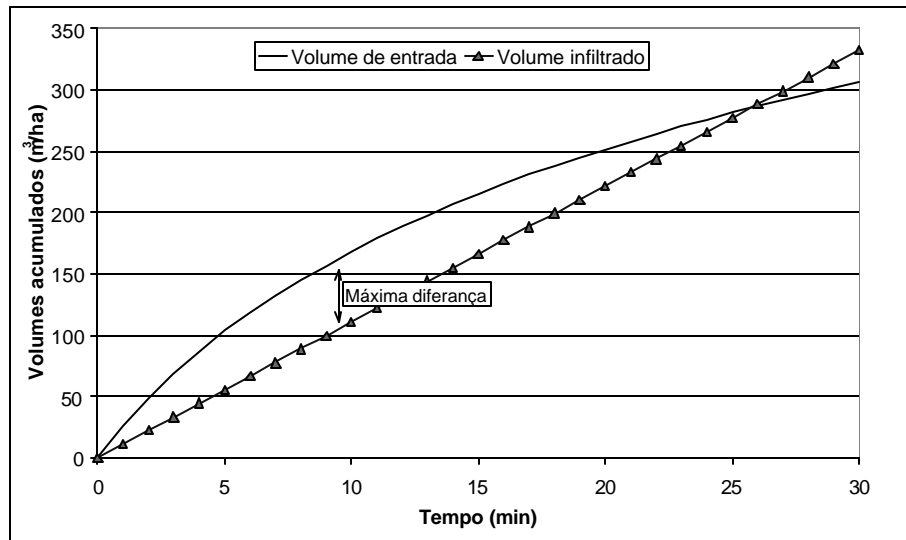


Figura 3.19 – Curva envelope de dimensionamento da trincheira II

Em função do excessivo aporte de material sólido observado na trincheira I, optou-se pela utilização de uma faixa gramada de 1 m como pré-filtro, conforme o projeto da trincheira apresentado na Figura 3.20.

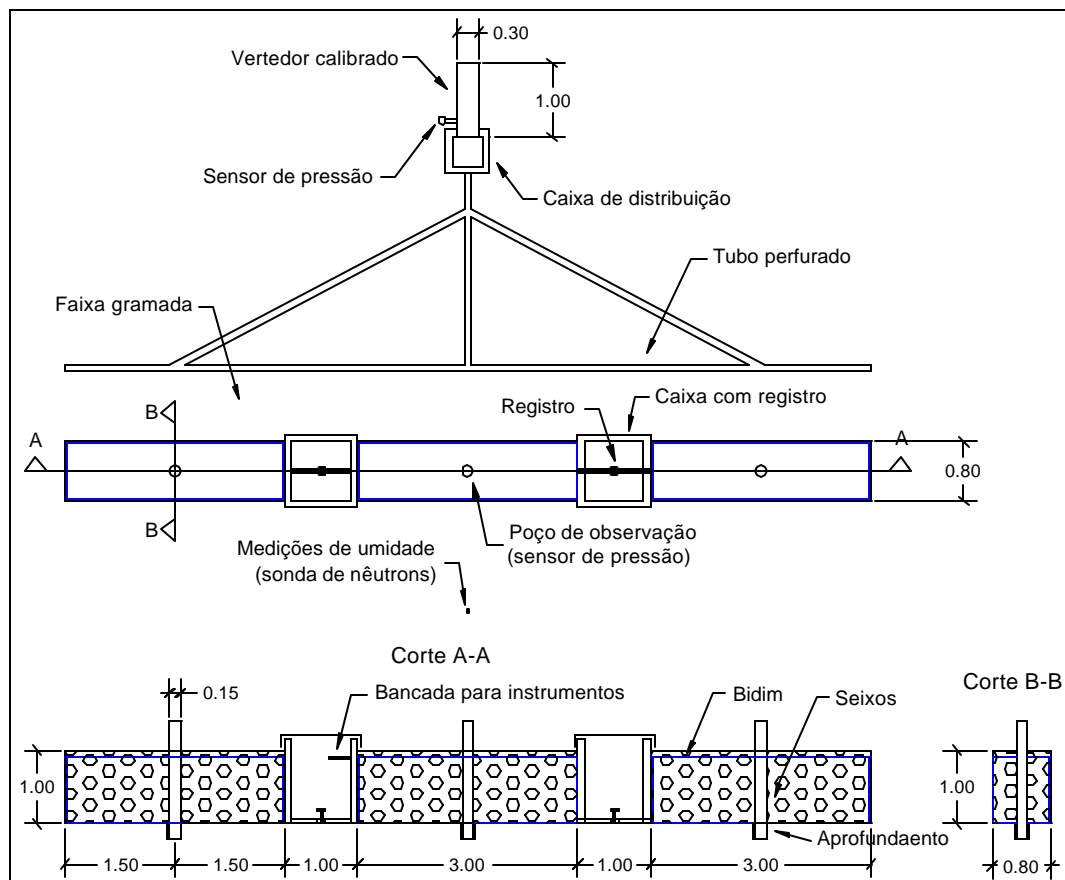


Figura 3.20 – Projeto da trincheira II

Com uma área de contribuição de 450 m<sup>2</sup> e uma trincheira de área útil de 7,2 m<sup>2</sup>, utilizou-se uma superfície de 1,6% do total.

### 3.5.3 - Localização/Individualização da área de contribuição

A individualização da área de contribuição foi feita a partir dos limitadores já existentes, como as guias do estacionamento e pela instalação de canaletas, a fim de direcionar o fluxo para o vertedor (Figura 3.21), através de tubos de PVC.

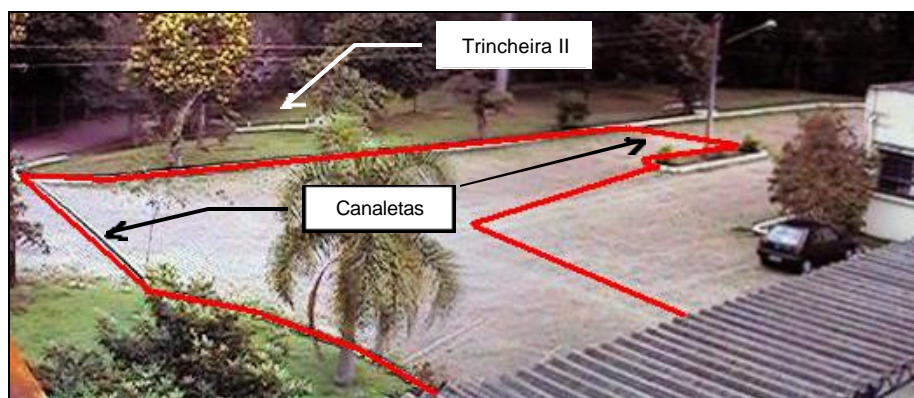


Figura 3.21 – Área de contribuição da trincheira II

### 3.5.4 - Execução do dispositivo

Este dispositivo foi totalmente construído de forma manual, incluindo a escavação, a construção das caixas de separação entre os módulos e o enchimento. Optou-se pela escavação manual de maneira a garantir uma maior precisão nas dimensões, declividade do fundo, etc., o que não seria conseguido com a escavação mecânica. No entanto, este procedimento aumenta a compactação do fundo, o que reduz as taxas de infiltração (aumenta a resistência hidráulica do fundo).

A utilização de seixo rolado no lugar da brita reduziu a porosidade do enchimento para 38%, o que significa uma perda de volume útil da trincheira. No entanto, a utilização de seixo rolado permite uma melhor composição com a paisagem e deve ser um dos aspectos a serem considerados na escolha dos materiais de construção da trincheira. Uma alternativa é a utilização de material menos nobre no interior da trincheira, mas com porosidade mais alta, e material de melhor qualidade na superfície, para composição com o paisagismo.

Os poços de observação para instalação dos sensores na trincheira foram executados em tubos de PVC de 150 mm perfurados. O fundo do poço de observação, no qual o sensor de



pressão foi instalado, encontra-se 19 cm abaixo do fundo da trincheira, em função da sensibilidade dos sensores.

A separação entre os 3 módulos foi feita em caixas de alvenaria. Apesar da utilização de impermeabilizante na argamassa, foi observado vazamento entre as caixas, na junta de colocação dos registros. Este problema teve que ser resolvido antes do início do monitoramento.

A Figura 3.22 apresenta a fase de execução e a Figura 3.23 apresenta a trincheira pronta para o monitoramento.



Figura 3.22 – Escavação e enchimento da trincheira



Figura 3.23 –Trincheira II: fechamento e pronta para o monitoramento

### **3.6 - Monitoramento contínuo dos dispositivos**

O monitoramento da Trincheira I se iniciou em maio de 1999. O primeiro evento foi observado no dia 11 de junho de 1999, tendo ocorrido um período de falhas entre maio e agosto de 2001. O período de monitoramento se estendeu até fevereiro de 2002,

correspondendo a 33 meses. Apesar de a trincheira II ter sido concluída em janeiro de 2001, a instrumentação (e conseqüentemente o monitoramento) só foi efetivada em setembro de 2001, e o monitoramento foi feito até fevereiro de 2002, correspondendo a um período de 6 meses.

Os dispositivos foram monitorados através da utilização de instrumentos dotados de registradores automáticos ("data loggers"). Os dados são registrados continuamente, com intervalos de 5 minutos para a precipitação e 1 minuto para os dados de vazão de entrada (linígrafos situados nos vertedores, a montante dos dispositivos) e para o nível no interior dos dispositivos.

Os registradores da trincheira I armazenam 6144 leituras, o que faz com que os dados devam ser lidos após cada evento ou antes de 4,2 dias (a partir do início do evento) no máximo. Para a trincheira II, foi utilizado um único registrador com capacidade de 4000 leituras, o que significa um período máximo de 2,7 dias. A Figura 3.24 mostra os sensores utilizados na trincheira I (com registrador automático incluído em cada um) e o esquema de coleta de dados da trincheira II.

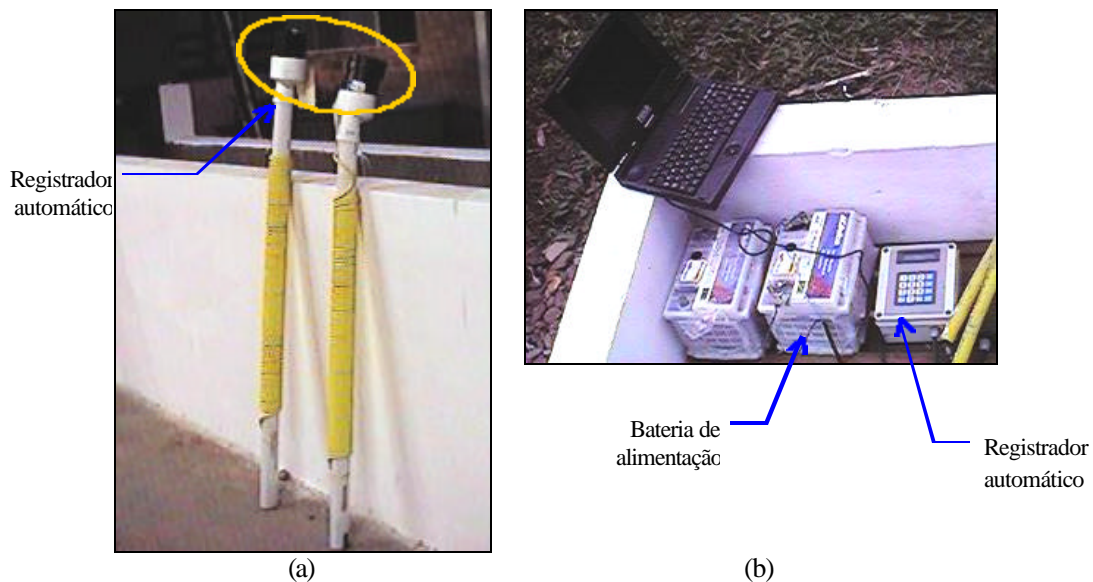


Figura 3.24 – (a) sensores de pressão da trincheira I e (b) monitoramento na trincheira II

De acordo com os dados observados e com o funcionamento do dispositivo e dos instrumentos instalados, alguns ajustes se fizeram necessários de forma a melhorar o desempenho no monitoramento, como, por exemplo, a uniformização do intervalo de discretização. Os ajustes podem ser feitos, também, de forma a solucionar problemas de excesso de sedimentos e folhas, que podem comprometer o funcionamento do dispositivo a longo prazo.



Diversos problemas foram encontrados entre o final da etapa de execução e o monitoramento:

- material em suspensão: excesso de sedimentos e matéria orgânica afluentes à trincheira I;
- vandalismo: roubo do pluviógrafo, resultando em um período relativamente longo de falta de dados de chuva;
- adequação de equipamentos: a precisão dos equipamentos utilizados não é a mais adequada para as medições na Trincheira I;
- defeitos construtivos: para a construção da trincheira II em módulos, que permitem a variação do comprimento e a simulação de três dispositivos diferentes, houve dificuldade em se evitar o vazamento de água de um módulo para o outro, passando pela caixa dos registros. Foram necessárias várias camadas de impermeabilizante;
- falha de monitoramento: para alguns eventos, foi observada perda de água após a passagem pelo vertedor na trincheira I, ocasionando a perda de informações da entrada;
- material de baixa qualidade: dificuldade em conseguir material granular limpo para enchimento do dispositivo, o que acelera o processo de colmatção reduzindo a vida útil, como mostrado na Figura 3.25;



Figura 3.25 – Material de enchimento da trincheira II, com grande parcela de material fino

Em função destes e de outros problemas, diversas modificações foram implementadas durante esta fase. Uma delas foi a instalação de uma caixa de areia, com tela para separação

também de folhas, a montante da trincheira I. Mesmo com esta caixa, grande quantidade de sedimentos finos e matéria orgânica continuou chegando até a trincheira.

Para a trincheira I, optou-se por manter, após o vertedor, uma faixa gramada, de cerca de 1,0 m, que funciona como um pré-filtro, aumentando a eficiência na retenção de material que poderia acelerar o processo de colmatação do dispositivo.

Para resolver o problema da precisão de leituras, instalaram-se, na trincheira II, sensores de pressão com uma faixa de medição menor e com maior precisão, a fim de se reduzirem as incertezas.

### **3.7 - Considerações finais**

A execução dos dispositivos de infiltração foi feita considerando-se as recomendações encontradas na literatura, mas com diversas adaptações para as condições brasileiras, principalmente no que se refere aos métodos construtivos e materiais utilizados.

Diversos problemas tiveram que ser resolvidos antes e durante o monitoramento na trincheira I, o que permitiu melhor planejamento da trincheira II.

A seleção dos equipamentos de controle e medição foi feita segundo a sua disponibilidade no IPH, no caso da trincheira I. Isto fez com que os sensores utilizados não fossem os mais adequados para a situação, não permitindo uma precisão tão boa nos dados.

Para a trincheira II foram adquiridos novos sensores, escolhidos para a faixa de medição das variáveis envolvidas, permitindo maior precisão.

A construção da trincheira II em três módulos permite uma grande flexibilidade ao experimento, podendo-se variar suas dimensões (simulando um único módulo de 3, 6 ou 9 metros) ou ainda a simulação de três módulos independentes, mas com as mesmas características.

A alteração de comprimento não foi implementada durante o desenvolvimento deste trabalho, em função do curto tempo de monitoramento. No entanto, o trabalho com trincheiras de infiltração está apenas começando e o monitoramento deve ser contínuo, de forma a se obter padrões de funcionamento de longo prazo e critérios de projeto e dimensionamento mais bem definidos.

A continuidade do projeto de pesquisa prevê a variação do comprimento da trincheira, através da abertura e fechamento dos registros entre os módulos, o monitoramento contínuo da umidade do solo, através de sondas TDR (“time domain reflectometer”), assim como o monitoramento contínuo de variáveis de qualidade.

## Capítulo 4

---

"A análise de dados depende sempre da maneira como são obtidos. Não há procedimento estatístico em condições de emprestar estrutura lógica a dados coletados de maneira inapropriada".  
*M. Weatherall*

### 4 - ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados se iniciou simultaneamente ao monitoramento e foi dividida em:

- 1) seleção de eventos: os eventos chuvosos que não geraram escoamento para o interior dos dispositivos, assim como aqueles em que o nível atingido não ultrapassou 10 cm (altura útil, conforme 3.2.3), foram eliminados;
- 2) formatação dos dados: os dados obtidos dos registradores automáticos ("data loggers") foram trabalhados, eliminando-se intervalos de nível zero, de forma a facilitar a sua análise;
- 3) ajustes de modelos: buscou-se um modelo que representasse o funcionamento do dispositivo, através de parâmetros que representassem as condições da interface *obra-solo*;
- 4) comportamento de longo prazo e vida útil: através do ajuste dos modelos, buscou-se verificar o comportamento deste dispositivo ao longo do tempo, através da evolução dos seus parâmetros que representam a colmatação.

Essa etapa compreende todo o desenvolvimento do trabalho a partir dos dados obtidos na fase de monitoramento. Neste capítulo discute-se o comportamento das trincheiras para cada um dos principais eventos observados, identificando-se as principais condicionantes do funcionamento e o comportamento para diferentes condições dos dispositivos. Apresenta-se, da mesma forma, a evolução das condições de funcionamento, determinante para o bom desempenho do dispositivo.

Bertrand-Krajewski (2000) define que um evento chuvoso é independente de outro se os efeitos resultantes do primeiro cessaram antes do início do segundo (Figura 4.1). Da

mesma forma, será definido um evento observado na trincheira como sendo o período em que foram observados níveis d'água no interior do dispositivo. A presença de intervalos de tempo em que o nível é nulo só será considerada como separação entre eventos quando estes intervalos forem relativamente grandes, de tal forma que o dispositivo possa recuperar parte das condições de funcionamento anteriores ao evento. Deve ser observado que muitos eventos pluviométricos não podem ser caracterizados como eventos para efeito de análises da trincheira se não forem suficientes para gerar escoamento na área de contribuição e, conseqüentemente, não provocarem nível no interior das trincheiras.

Com esta definição, a Figura 4.1 apresenta dois casos em que, dependendo da duração do intervalo de chuva nula, dois intervalos de precipitação podem ou não ser considerados como partes do mesmo evento. Em alguns casos, mesmo quando se observam intervalos de nível nulo no interior da trincheira, pode-se considerar um único evento, visto que os efeitos da umidade no solo ainda afetam o comportamento do dispositivo. Para este trabalho, utilizou-se o critério de consideração de eventos independentes quando as trincheiras permanecerem vazias por intervalos superiores a 12 horas.

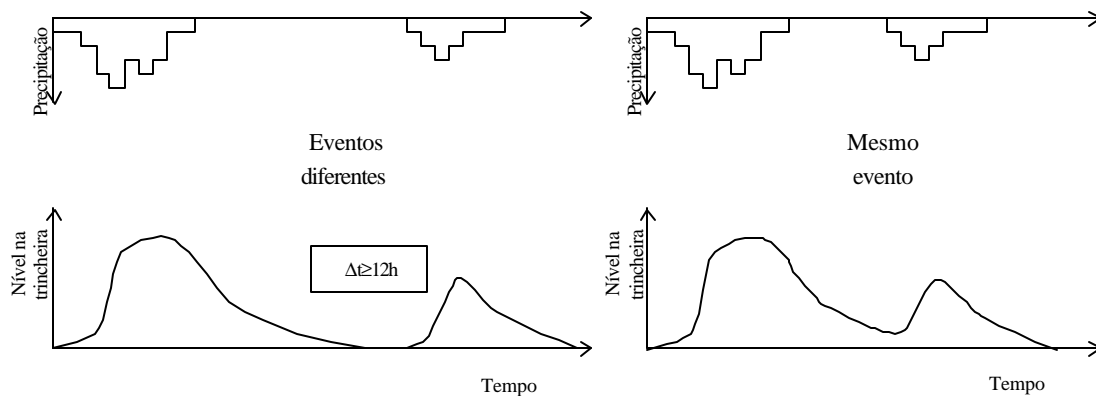


Figura 4.1 – Definição de evento  
(Fonte: modificado de Bertrand-Krajewski, 2000)

#### 4.1 - Formatação dos dados

Inicialmente, efetua-se um trabalho de formatação dos dados fornecidos pelos registradores automáticos (eliminação de períodos secos, alteração do formato dos arquivos para facilitar leitura) e de cálculo de vazões/volumes afluentes (a partir da curva-chave do vertedor definida no item 4.3.4), de nível efetivo no interior da trincheira (o nível zero é de 14 cm para a trincheira I e 19 cm para a trincheira II), e de volume total precipitado. A Figura 4.2 apresenta os arquivos de dados da trincheira I (vertedor e trincheira), antes e depois da

formatação inicial. O registrador automático da trincheira II apresenta no mesmo arquivo os dados do vertedor e da trincheira (Figura 4.3).

Vertedor - trincheira I		Arquivo de origem: 000922V.txt			
Data hora	Nível(m)	Delta H(m)	Q(l/s)	V.ac.(m <sup>3</sup> )	
09/21,11:45, .7995868	0.799587	0.000000	0.000000	0.884195	
09/21,11:46, .8007242	0.800724	0.001137	0.000034	0.884197	
09/21,11:47, .8018616	0.801862	0.002275	0.000213	0.884210	
09/21,11:48, .8075488	0.807549	0.007962	0.005994	0.884570	
09/21,11:49, .8325723	0.832572	0.032985	0.264271	0.900426	
09/21,11:50, .8393969	0.839397	0.039810	0.436109	0.926593	
09/21,11:51, .8393969	0.839397	0.039810	0.436109	0.952759	
09/21,11:52, .8553209	0.855321	0.055734	1.068649	1.016878	
09/21,11:53, .863283	0.863283	0.063696	1.525141	1.108387	
09/21,11:54, .8701075	0.870107	0.070521	2.000109	1.228393	
09/21,11:55, .8746573	0.874657	0.075071	2.362546	1.370146	
09/21,11:56, .8757947	0.875795	0.076208	2.459099	1.517692	
09/21,11:57, .8780696	0.878070	0.078483	2.659521	1.677263	
09/21,11:58, .8769321	0.876932	0.077345	2.558080	1.830748	
09/21,11:59, .8723824	0.872382	0.072796	2.176618	1.961345	
09/21,12:00, .8666952	0.866695	0.067108	1.752582	2.066500	
Trincheira de infiltração I		Arquivo de origem: 000922T.txt			
Data hora	nível(m)				
09/21,11:40, -6.928573E-03	0.0				trincheira seca
09/21,11:45, -6.928573E-03	0.192921				
09/21,11:50, -6.928573E-03	0.251163				
09/21,11:55, .1929214	0.266009				
09/21,12:00, .2511634	0.274003				
09/21,12:05, .2660094	0.293417				
09/21,12:10, .2740034	0.284281				
09/21,12:15, .2934174	0.255731				
09/21,12:20, .2842814	0.212335				
09/21,12:25, .2557314	0.183785				
09/21,12:30, .2123354	0.178075				
09/21,12:35, .1837854	0.168939				
09/21,12:40, .1780754	0.160945				
09/21,12:45, .1689394	0.184927				
09/21,12:50, .1609454	0.315115				
09/21,12:55, .1849274	0.454439				
09/21,13:00, .3151154	0.465859				
09/21,13:05, .4544394	0.414469				
09/21,13:10, .4658594	0.348233				
09/21,13:15, .4144694					
09/21,13:20, .3482334					

Figura 4.2 – Dados fornecidos pelos registradores automáticos na trincheira I, antes e após formatação

0645 01/10 18:06 0.000000 380.000000	
0646 01/10 18:07 0.000000 380.000000	Lâmina sobre o vertedor (mm) (zero = 380)
0647 01/10 18:08 0.000000 380.000000	
0648 01/10 18:09 0.000000 380.000000	
0649 01/10 18:10 0.000000 380.000000	
0650 01/10 18:11 0.000000 381.000000	
0651 01/10 18:12 0.000000 427.000000	Nível no interior da trincheira (mm)
0652 01/10 18:13 17.000000 443.000000	
0653 01/10 18:14 95.000000 458.000000	
0654 01/10 18:15 219.000000 457.000000	
0655 01/10 18:16 268.000000 460.000000	
0656 01/10 18:17 330.000000 463.000000	
0657 01/10 18:18 407.000000 465.000000	
0658 01/10 18:19 486.000000 470.000000	
0659 01/10 18:20 575.000000 470.000000	
0660 01/10 18:21 673.000000 472.000000	
0661 01/10 18:22 769.000000 463.000000	
0662 01/10 18:23 845.000000 465.000000	

Figura 4.3 – Dados fornecidos pelos registradores automáticos na trincheira II

Após esta formatação, os eventos são caracterizados conforme apresentado na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 e a partir dessa caracterização inicia-se o trabalho de análises dos dados propriamente dito. Durante o período de monitoramento foram observados 90 eventos na trincheira I, dos quais 15 foram eliminados por não terem apresentado nível na trincheira ou por falha no monitoramento (entupimento das estruturas de condução de água, falta de bateria nos registradores, etc.). Na trincheira II, foram observados 18 eventos.

Tabela 4.1 – Características dos eventos observados na trincheira I

i	Evento	Duração na trincheira (d hh:mm)	Chuva "G" (mm)	Chuva "H" (mm)	Qp (l/s)	Volume Afluente (m <sup>3</sup> )	Nível máximo (m)	Altura útil (cm)
1	990610	0 21:30	SD	SD	4.78 *	27.90 *	0.97	0.83
2	990618	0 05:30	SD	SD	1.128	3.840	0.21	0.07
3	990628	0 04:10	SD	SD	1.069	2.940	0.19	0.05
4	990703	0 11:45	SD	SD	2.763	4.212	0.21	0.07
5	990721	0 16:10	SD	SD	1.189	12.313	0.21	0.07
6	990730	0 03:40	SD	SD	0.852	2.408	0.21	0.07
7	990809	0 02:45	SD	SD	1.317	3.215	0.22	0.08
8	990830	0 05:50	31.2	SD	0.956	3.914	0.20	0.06
9	990901	0 01:20	12.8	SD	1.384	1.230	0.20	0.06
10	990906	0 02:15	16.4	SD	0.098	0.472	0.14	-
11	990908	0 06:55	35.6	SD	2.558	0.707	0.14	-
12	990917	0 00:50	10.2	SD	0.160	0.257	0.12	-
13	991004	0 04:48	21.8	SD	falha	falha	0.19	0.05
14	991014	0 14:45	30.8	SD	0.373	2.122	0.15	0.01
15	991106	0 23:55	61.4	SD	1.012	4.010	0.20	0.06
16	991216	0 00:30	12.4	SD	2.177	1.011	0.19	0.05
17	000126	0 04:55	25.8	SD	0.956	1.907	0.17	0.03
18	000211	0 00:45	6.8	SD	falha	falha	0.26	0.12
19	000229	0 07:35	SD	SD	4.077	4.368	0.27	0.13
20	000304	0 04:35	SD	SD	4.077	2.612	0.29	0.15
21	000305	0 05:35	SD	SD	3.321	9.146	0.30	0.16
22	000318	0 07:35	SD	SD	2.000	0.783	0.19	0.05
23	000324	0 04:35	SD	SD	2.558	1.307	0.23	0.09
24	000327	0 05:40	SD	SD	0.105	0.727	0.19	0.05
25	000404	0 07:05	SD	SD	2.870	2.587	0.29	0.15
26	000414	0 07:00	SD	SD	falha	falha	0.34	0.20
27	000417	0 02:00	SD	SD	0.852	1.015	0.18	0.04
28	000419	0 01:25	SD	SD	2.268	2.401	0.32	0.18
29	000505	0 10:55	SD	SD	4.782	5.885	0.37	0.23
30	000608	0 13:45	SD	SD	2.177	9.919	0.32	0.18
31	000612	0 02:55	SD	SD	3.944	4.062	0.36	0.22
32	000617	0 03:15	SD	SD	falha	falha	0.19	0.05
33	000618	0 17:40	SD	SD	falha	falha	0.15	0.01
34	000630	0 07:05	SD	SD	0.289	2.147	0.15	0.01
35	000703	0 03:30	SD	SD	6.233	5.514	0.34	0.20
36	000709	0 14:55	SD	SD	5.397	5.490	0.39	0.25
37	000710	0 07:35	SD	SD	3.554	3.554	0.30	0.16
38	000824	0 06:05	13.4	15.8	5.890	4.414	0.33	0.19
39	000828	0 19:40	32.4	41.4	3.204	9.581	0.30	0.16

Tabela 4.1– Características dos eventos observados na trincheira I (continuação)

i	Evento	Duração na trincheira (d hh:mm)	Chuva "G" (mm)	Chuva "H" (mm)	Q <sub>p</sub> (l/s)	Volume Afluyente (m <sup>3</sup> )	Nível máximo (m)	Altura útil (cm)
40	000913	0 05:30	falha	31.2	2.558	3.724	0.32	0.18
41	000915	0 15:15	30.8	36.2	3.687	3.817	0.26	0.12
42	000919	0 22:10	31.6	35.6	4.212	11.235	0.35	0.21
43	000922	0 15:25	45.2	48.8	4.931	24.406	0.78	0.64
44	000925	1 20:55	33.0	38.0	4.782	11.917	0.37	0.23
45	001005	0 20:10	26.0	33.8	falha	falha	0.30	0.16
46	001010	0 04:25	17.8	22.2	5.239	5.871	0.28	0.14
47	001013	0 10:20	19.0	23.4	3.440	8.341	0.33	0.19
48	001018	0 09:00	30.4	39.6	9.896	11.152	0.46	0.32
49	001020	0 01:35	3.4	7.4	0.470	0.775	0.18	0.04
50	001106	0 01:25	4.0	7.4	3.687	2.170	0.30	0.16
51	001109	0 04:35	22.2	30.2	7.338	8.431	0.44	0.30
52	001113	0 02:00	10.6	15.0	1.675	2.238	0.24	0.10
53	001128	0 00:55	11.2	16.8	0.404	0.673	0.15	0.01
54	001202	0 07:31	25.8	37.6	5.397	7.284	0.50	0.36
55	001219	0 01:25	8.4	9.8	2.870	2.327	0.31	0.17
56	010111	0 05:15	28.4	40.0	4.350	8.043	0.41	0.27
57	010117	0 01:20	20.6	19.6	8.138	6.567	0.56	0.42
58	010119	1 01:45	22.6	28.8	2.363	4.284	0.32	0.18
59	010127	0 00:59	10.4	10.4	5.723	3.275	0.40	0.26
60	010129	0 11:14	10.2	23.6	1.189	1.948	0.23	0.09
61	010328	0 01:59	19.8	31.6	5.559	6.714	0.49	0.35
62	010403	0 01:10	16.6	16.4	2.763	1.560	0.22	0.08
63	010424	0 11:08	45.0	falha	1.128	2.788	0.20	0.06
64	010427	0 19:09	35.6	falha	0.622	1.492	0.18	0.04
65	010430	0 23:13	16.6	falha	0.470	0.865	0.18	0.04
66	010906	0 00:24	SD	27.2	0.204	0.098	0.13	-
67	010910	0 01:53	SD	25.4	3.204	2.747	0.32	0.18
68	010917	0 04:16	SD	28.8	1.236	0.582	0.18	0.04
69	011001	1 03:24	SD	78.2	2.459	8.808	0.30	0.16
70	011002	0 02:34	SD	8.4	2.979	2.111	0.31	0.17
71	011018	0 00:26	SD	15.8	0.289	0.296	0.15	0.01
72	011112	0 06:21	SD	36.4	1.915	3.254	0.24	0.10
73	011123	0 00:19	SD	9.2	1.012	0.324	0.17	0.03
74	011128	0 05:14	SD	54.4	5.258	13.914	falha	-
75	020114	0 00:33	SD	8.0	1.675	0.680	0.20	0.06

OBS: 1) Os eventos hachurados não foram analisados, por de serem pouco significativos ou por apresentarem falhas

2) Desta tabela foram eliminados os eventos chuvosos que não geraram escoamento e os eventos que não foram registrados por falta de bateria nos sensores

SD: sem dados

<sup>(1)</sup> O nome do evento é formado pelo ano, mês e dia de coleta dos dados do mesmo

<sup>(2)</sup> Precipitação observada no pluviógrafo na área da trincheira I (Galpão), embaixo de árvores

<sup>(3)</sup> Precipitação observada no pluviógrafo na área da trincheira II (Hidrologia), em cima do telhado

\* Sem controle na entrada

Tabela 4.2 – Características dos eventos observados na trincheira II

i	Evento	Duração na trincheira (d hh:mm)	Chuva "H" (mm)	Q <sub>p</sub> (l/s)	Volume Afluente (m <sup>3</sup> )	Nível máximo (m)	Altura útil (cm)
1	010928	0 07:38	13.8	0.940	3.124	0.61	0.42
2	011002	2 01:56	87.0	2.003	31.030	0.96	0.77
3	011008	0 04:52	9.2	0.419	0.942	0.24	0.05
4	011018	0 03:40	14.0	0.909	1.545	0.25	0.06
5	011112	0 13:23	36.4	2.060	3.881	0.93	0.74
6	011123	0 00:59	9.2	0.359	0.162	0.18	-
7	011128	0 08:15	54.4	1.864	4.457	0.91	0.72
8	011205	0 09:13	29.8	falha	falha	0.78	0.59
9	020114	0 01:49	8.0	0.818	0.380	0.17	-
10	020201	0 00:35	8.0	0.909	0.367	0.09	-
11	020213	0 00:54	falha	0.601	0.318	0.19	-
12	020214	0 02:53	7.2	1.005	1.094	0.57	0.38

OBS: 1) Os eventos hachurados não foram analisados, por de serem pouco significativos ou por apresentarem falhas  
 2) Desta tabela foram eliminados os eventos chuvosos que não geraram escoamento e os eventos que não foram registrados por falta de bateria nos sensores

Destes eventos, alguns foram eliminados em função dos baixos níveis observados no interior dos dispositivos, sendo analisados 40 eventos para a trincheira I e 6 eventos para a trincheira II. A Tabela 4.3 e a Tabela 4.4 apresentam a distribuição dos eventos observados e dos eventos analisados nas trincheiras I e II, respectivamente.

Tabela 4.3 – Relação entre eventos observados e eventos analisados na trincheira I

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1999	-	-	-	-	-	3/1	3/0	2/1	4/0	2/0	1/0	1/0
2000	1/0	2/1	5/3	4/2	1/1	5/2	3/3	3/2	5/5	6/3	4/3	3/2
2001	5/5	0/0	2/1	4/1	falha	falha	falha	falha	5/1	4/2	4/1	1/0
2002	4/0	4/0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 4.4 – Relação entre eventos observados e eventos analisados na trincheira II

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	1/1*	4/1**	4/2	1/1
2002	4/0	4/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* As observações se iniciaram no fim do mês

\*\* Evento pode ser dividido em três eventos consecutivos

Deve ser observado que, em função das características da área de contribuição, a trincheira I apresenta menor quantidade de eventos analisados do que a trincheira II para um mesmo período de monitoramento. De fato, a superfície de contribuição da trincheira I apresenta maior retenção e, conseqüentemente, menor coeficiente de escoamento.



## **4.2 - Seleção de eventos**

Com base na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2, foram eliminados de uma primeira análise os eventos de menor significância (hachurados), ou seja, aqueles cujo nível d'água na trincheira não ultrapassou 10 cm de altura útil (cerca de 25 cm para a trincheira I e 30 cm para a trincheira II). A consideração de altura útil se deve ao aprofundamento do poço de observação (14 cm na trincheira I e 19 cm na trincheira II), em função da sensibilidade dos sensores de pressão (em torno de 10 cm), conforme explicado no item 3.2.3.

No início do monitoramento da trincheira I foi observado um período relativamente seco, com chuvas de menor importância. Nesse mesmo período, a trincheira estava com a capacidade de infiltração máxima (sem nenhum efeito de colmatção). Em função disto, os níveis observados foram os menos significativos. Portanto, o período de análises mais detalhadas foi iniciado em fevereiro/2000 e, mesmo após esse período inicial, alguns eventos foram descartados da análise por serem pouco significativos. Deve ainda ser observado que diversos eventos chuvosos não apresentaram escoamento superficial e, portanto, não entraram na análise.

Cada evento selecionado é composto por dados de precipitação (não disponíveis para todo o período de monitoramento), vazão (volume) afluyente ao dispositivo e nível no seu interior. Além disto, fazem parte do conjunto de dados medições pontuais de umidade do solo.

## **4.3 - Avaliação dos processos e fenômenos envolvidos**

Com os dados disponíveis, foi possível fazer uma avaliação de alguns processos envolvidos no funcionamento dos dispositivos: precipitação, interceptação, geração do escoamento superficial, infiltração. Além disso, foram verificados fenômenos como histerese nas vazões de infiltração (ou velocidades de infiltração) durante a subida e a descida de nível nas trincheiras, bem como a possível ocorrência de escoamento preferencial na trincheira I. Esses processos e fenômenos serão discutidos a seguir.

### **4.3.1 - Análise da precipitação**

Para os eventos mais significativos (nível efetivo no interior da trincheira superior a 20 cm), analisou-se o período de retorno da precipitação em função da curva IDF calculada para o posto do IPH (Equação 3.4), como apresentado na Figura 4.4. A equação desse posto foi determinada para durações de até 180 min e tempo de retorno variando de 2 a 100 anos (Goldenfum *et al.* 1990).

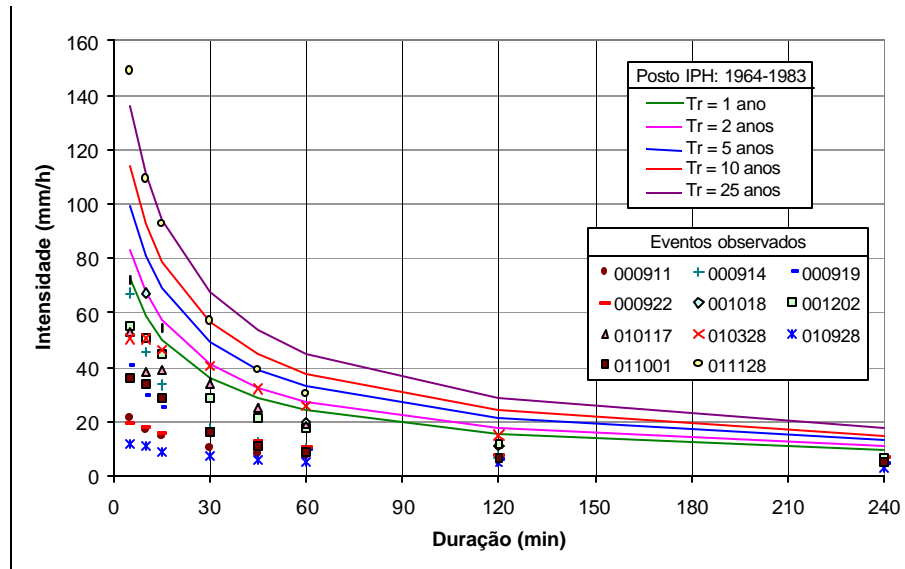


Figura 4.4 – Tempos de retorno dos principais eventos observados

Verifica-se que, para o período monitorado, um evento ultrapassou o tempo de retorno de projeto. O evento ocorrido em 26/11/2001 (011128), com precipitação total de 54,6 mm distribuídos em 7:50 horas, apresentou para duração de 30 minutos um período de retorno em torno de 10 anos (28,4 mm).

Além do período de retorno crítico, as condições de umidade antecedentes do solo, o volume precipitado anterior ao período crítico do evento e a duração do evento podem criar condições críticas para o funcionamento dos dispositivos de infiltração, mesmo para eventos mais freqüentes.

Para exemplificar, o evento observado na trincheira I em 21/09/2000 (000922), com 64 cm de altura útil, foi o mais crítico, mesmo o tempo de recorrência da precipitação não tendo ultrapassado 1 ano. O volume total escoado durante este evento foi de 24,4 m<sup>3</sup> para uma precipitação total de 48,6 mm em cerca de 15 horas. Anteriormente, foram registrados vários eventos (todos com tempo de recorrência inferior a 1 ano) que contribuíram para a saturação do solo, com 105 mm em dez dias antecedentes.

#### 4.3.2 - Interceptação vegetal e geração do escoamento superficial

Da mesma forma que o intervalo de recorrência do evento, a interceptação vegetal e a geração do escoamento superficial também dependem fortemente das características do evento (duração, total precipitado, distribuição temporal) e das características da superfície de

contribuição (quanto maior a quantidade de folhas sobre a superfície, maior a retenção e menor o escoamento gerado; quanto mais densa a vegetação, maior a interceptação).

Na trincheira de infiltração I observaram-se perdas significativas por interceptação da precipitação e por retenção nas folhas secas e irregularidades do paralelepípedo. Quando se analisa apenas a precipitação do pluviógrafo Galpão, que está sob árvores, observa-se variação no coeficiente de escoamento (Figura 4.5-b) de um evento para outro. Tal variação ocorre em função da maior ou menor presença de folhas nas árvores e no solo (queda natural das folhas das árvores ou por limpeza da superfície), de acordo com o período do ano. Há uma tendência de ocorrência das menores perdas entre agosto e janeiro, quando a superfície já foi lavada e não ocorre grande queda de folhas das árvores. Dessa forma, o coeficiente de escoamento apresenta melhor correlação com os dados do pluviógrafo Hidrologia (Figura 4.5-a), que não depende de variações sazonais, como a cobertura da superfície de contribuição.

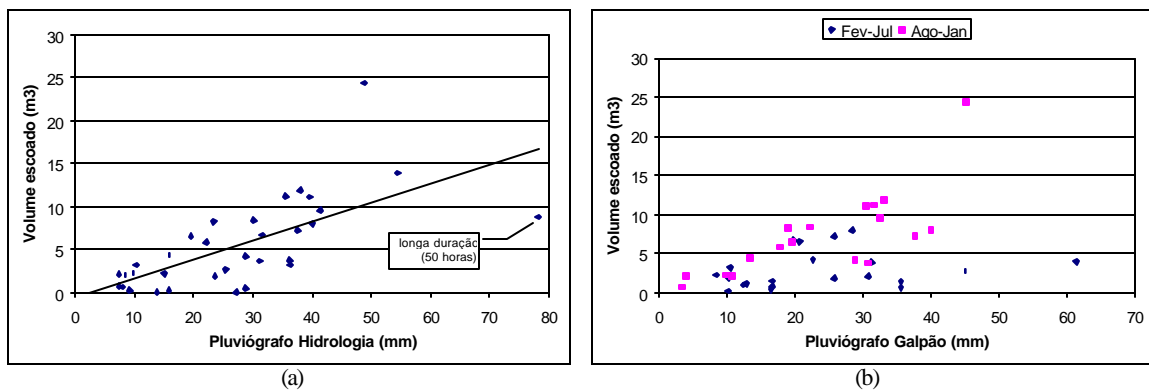


Figura 4.5 – Coeficiente de escoamento: precipitação / volume escoado (trincheira I)

Deve ser observado que parte da superfície de contribuição não sofre a influência das árvores, mas, na outra parcela, existe grande quantidade de folhas de árvores sobre a superfície de contribuição, além de esta ser bastante irregular, o que favorece a retenção da água, reduzindo significativamente o coeficiente de escoamento. A dispersão observada na Figura 4.5-b se deve, principalmente, à variação nas medições da precipitação, em função das variações nas condições da superfície de contribuição.

A precipitação observada nos dois pluviógrafos apresentou boa correlação (Figura 4.6-a). Analisando-se separadamente, verifica-se que o pluviógrafo colocado sob as árvores (pluviógrafo Galpão) apresenta maior dispersão (Figura 4.6-b). Tal dispersão pode ser explicada pela variação na interceptação vegetal em função da cobertura foliar das árvores na área de contribuição.

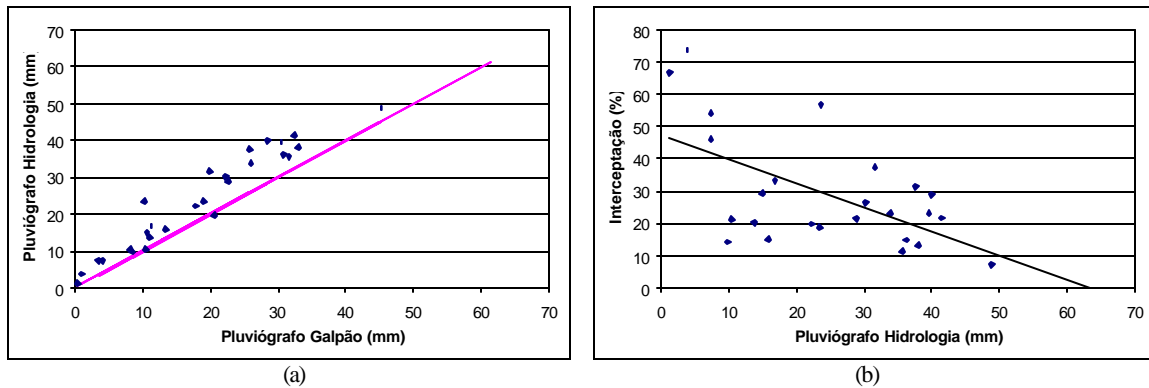


Figura 4.6 – (a) correlação entre precipitação “G” e “H” e (b) Interceptação vegetal

Com relação à trincheira II, pode-se estabelecer de forma mais direta a relação entre a precipitação e o volume escoado (Figura 4.7), uma vez que os condicionantes para a geração do escoamento não estão ligados a efeitos sazonais. Ainda assim, observa-se variação significativa, em função do período seco antecedente.

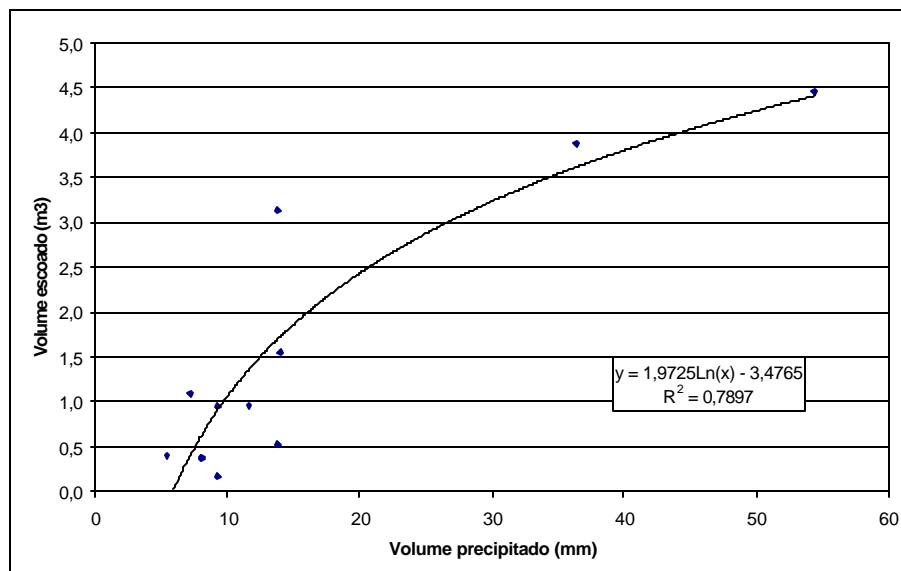


Figura 4.7 – Coeficiente de escoamento na trincheira II: volume precipitado / volume escoado

#### 4.3.3 - Cálculo das vazões e volumes de entrada nos dispositivos

As vazões e os volumes de entrada nos dispositivos foram determinados através das curvas de calibração dos vertedores (Equação 3.1 e Equação 3.2) e dos níveis d'água medidos pelos sensores colocados juntos a estes vertedores.

Na trincheira I utilizaram-se, inicialmente, intervalos de discretização diferentes para a entrada (1 minuto) e o nível observado na trincheira (5 minutos). A partir da segunda quinzena de novembro/2000 foram utilizados intervalos de discretização de 1 minuto para os dois sensores.

Após essa alteração, observou-se a ocorrência de uma defasagem entre a entrada e a resposta de nível de aproximadamente quatro minutos (podendo variar em função das características iniciais do evento), como mostrado na Figura 4.8.

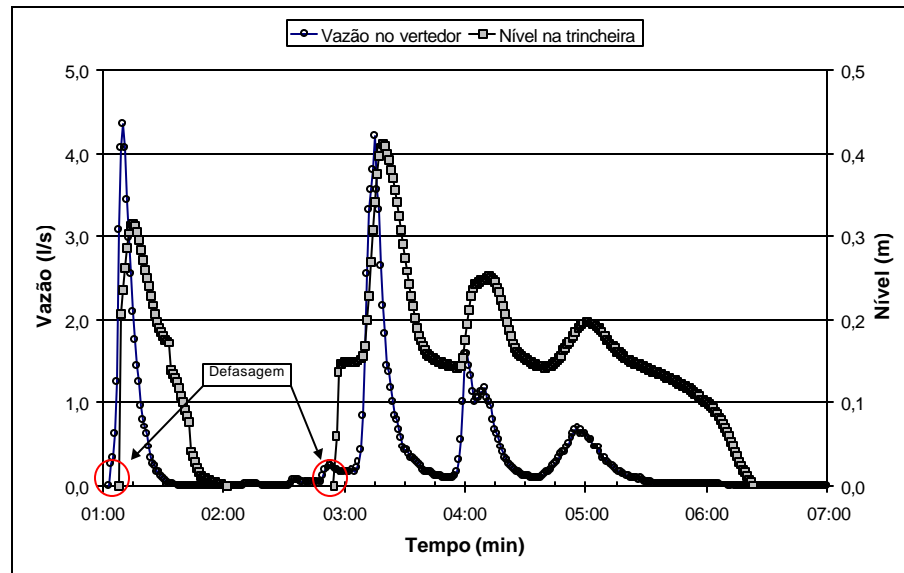


Figura 4.8 – Defasagem entre a entrada e a resposta na trincheira

Na trincheira II, essa defasagem também ocorreu, tendo sido um pouco maior (da ordem de dez minutos). No entanto, o tempo médio de defasagem varia para cada evento, dependendo das vazões afluentes no início do evento, bem como das condições iniciais de umidade da superfície de controle. O tempo de percurso entre o vertedor e a trincheira é menor quando o evento apresenta maiores vazões no início: a faixa gramada se satura mais rapidamente e a água atinge a trincheira em menor intervalo de tempo.

#### 4.3.4 - Cálculos de vazões e velocidades de saída (infiltração)

Inicialmente tentou-se determinar as vazões de saída da trincheira em função do nível d'água no seu interior, o que possibilitaria o ajuste de uma curva de saída. No entanto, verificou-se, no caso da trincheira I, que o esvaziamento ocorre em um intervalo de tempo muito curto, fazendo com que o período de medições na trincheira seja coincidente com o período de alimentação do dispositivo (Figura 4.9). Dessa forma, na trincheira I não se observam intervalos de tempo com ocorrência de esvaziamento puro. Em função disto, as vazões de saída foram determinadas utilizando-se a equação da continuidade (Equação 4.1).

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_e - Q_s$$

Equação 4.1

onde:  $DV$  = variação do volume  
 $Dt$  = variação do tempo  
 $Q_e$  = vazão de entrada  
 $Q_s$  = vazão de saída por infiltração

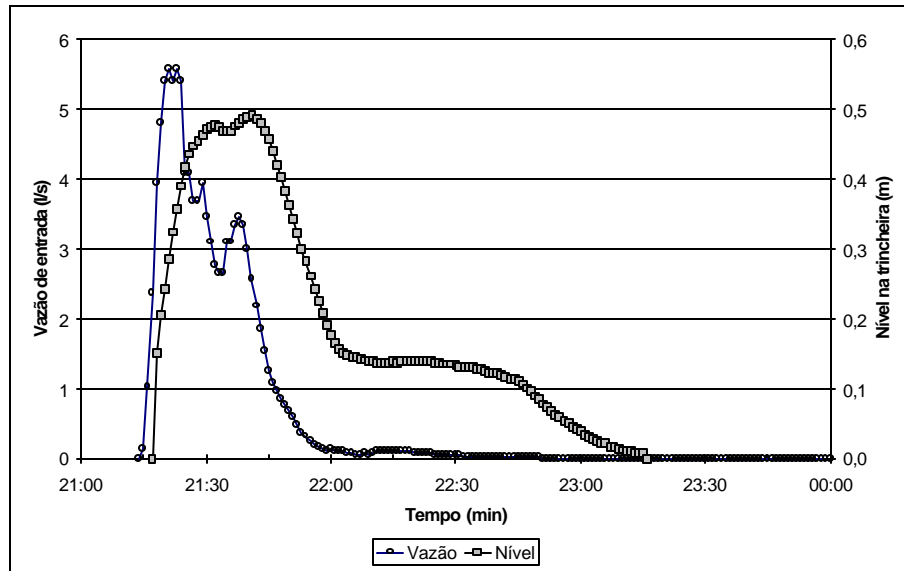


Figura 4.9 – Medições na trincheira coincidentes com período de alimentação (evento 25/03/2001)

A utilização de intervalos de esvaziamento puro no cálculo das vazões e velocidades de saída apresenta melhores resultados, com menor dispersão. Isso ocorre em função da menor quantidade de variáveis envolvidas na análise e, conseqüentemente, os erros associados são menores. A Figura 4.10 apresenta as vazões de saída observadas na trincheira I em função do nível no seu interior para o evento 000921 (dia 21/09/2000).

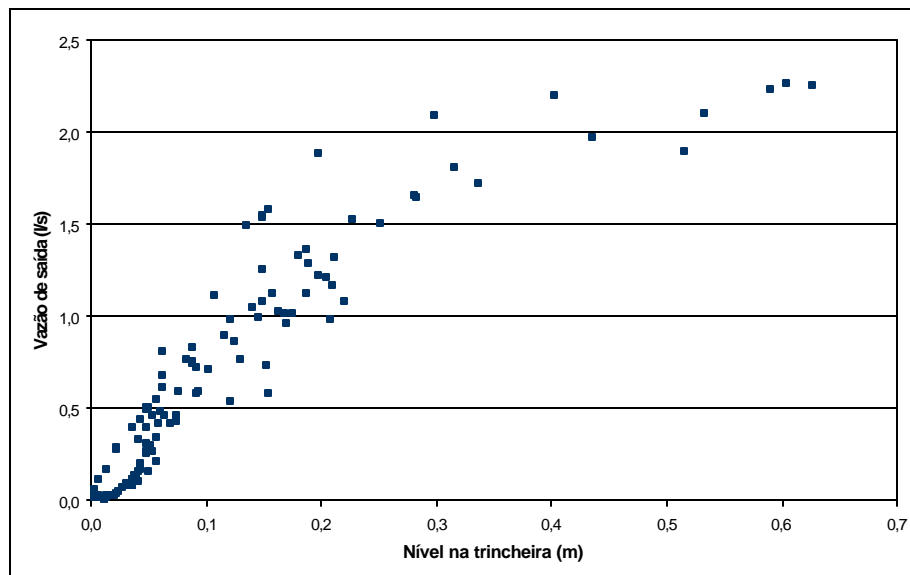


Figura 4.10 – Curva de infiltração em função do nível para a trincheira I (21/09/2000)

Para a trincheira II, no entanto, observa-se que o esvaziamento ocorre de forma mais lenta, verificando-se a ocorrência de intervalos de esvaziamento puro (Figura 4.11), o que permite que se obtenha uma curva relacionando a vazão de saída com o nível d'água no interior da trincheira (Figura 4.12).

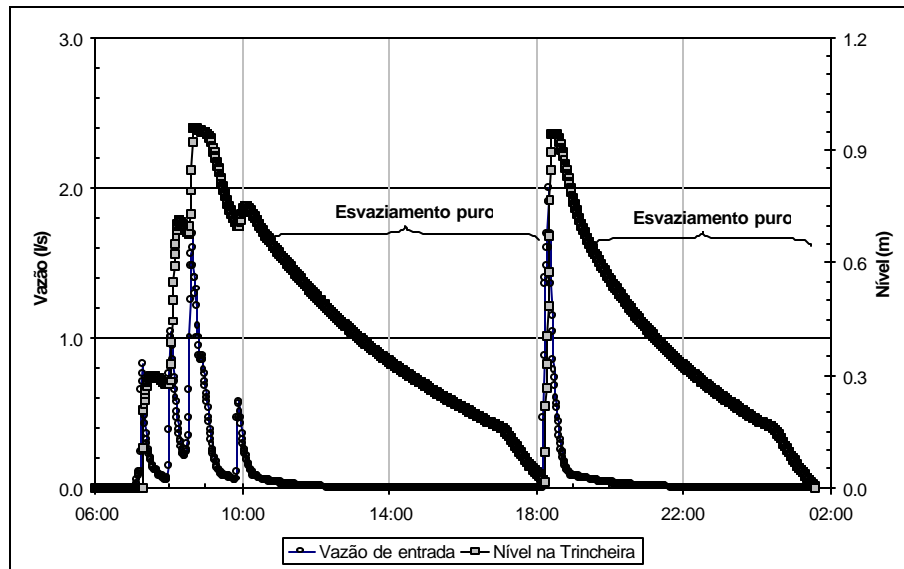


Figura 4.11 – Período de esvaziamento puro

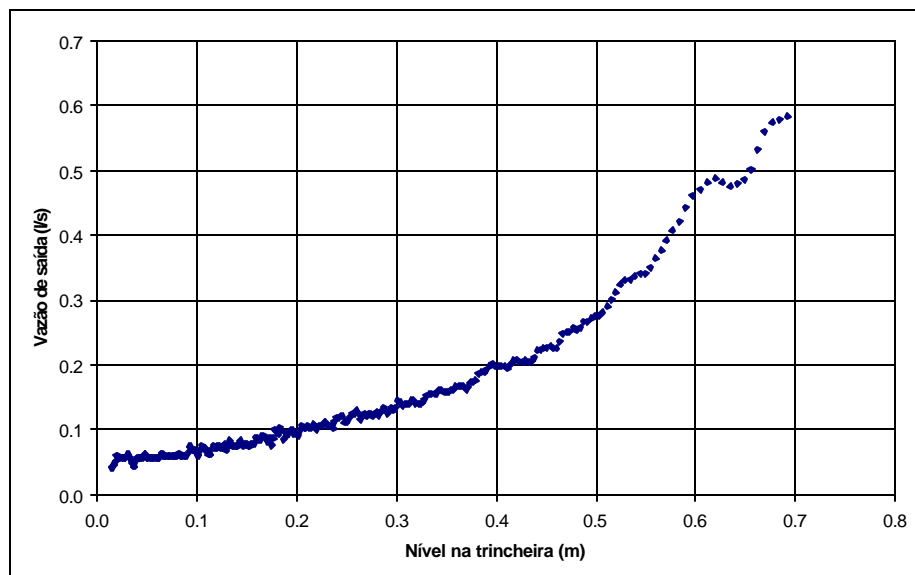


Figura 4.12 – Curva de infiltração em função do nível na trincheira II (01/10/2001)

Na observação de picos sucessivos (como o da Figura 4.11) o esvaziamento da trincheira ocorre de forma mais rápida quando o solo se encontra com maior umidade, ou seja, apresenta maiores velocidades de infiltração no final do evento, efeito contrário ao

inicialmente esperado. Este fato ocorreu tanto para a trincheira II, onde foram observados eventos e/ou picos sucessivos em um mesmo dia (01/10/2001), quanto para a trincheira I, onde se observou uma seqüência de eventos em dias consecutivos (setembro de 2000, Figura 4.13).

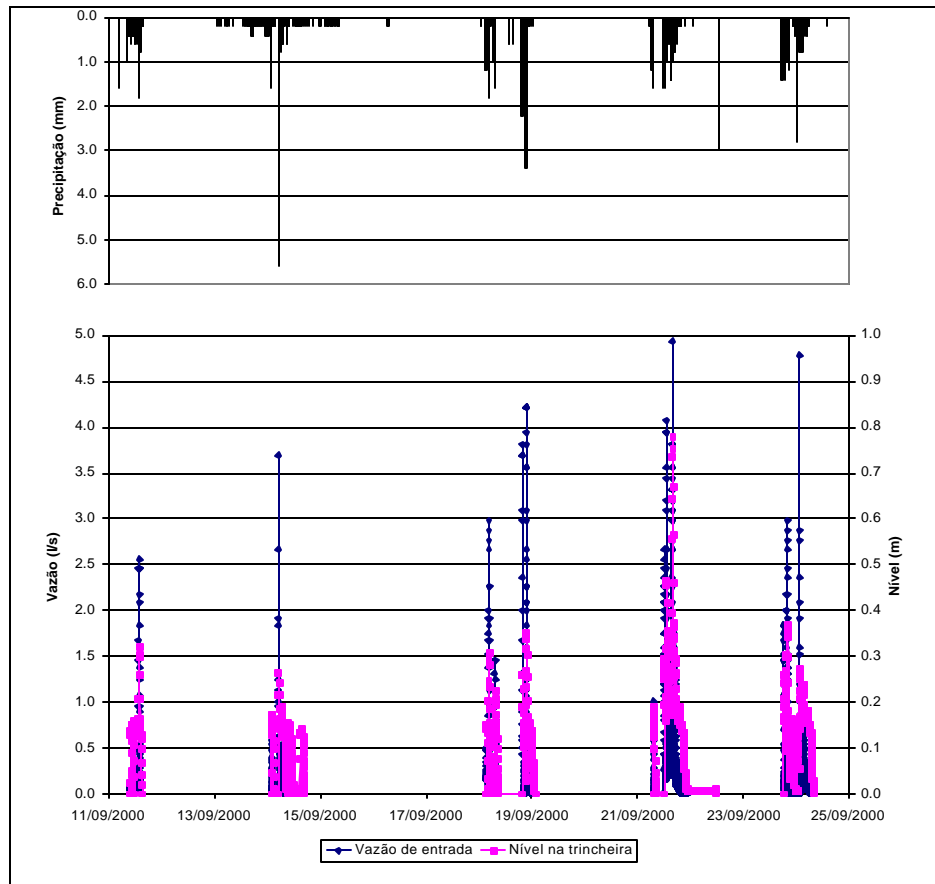


Figura 4.13 – Eventos consecutivos na trincheira I

No monitoramento de uma trincheira de infiltração em área residencial na Austrália, Werf *et al.* (1999) encontraram resultados semelhantes, com maiores velocidades de infiltração para o solo saturado, durante 1 mês de monitoramento.

As maiores velocidades de infiltração para o solo mais úmido podem ser explicadas pelo estabelecimento de conectividade entre os poros do solo, obtida pelo preenchimento destes poros.

Como o esvaziamento da trincheira II ocorre de forma lenta, é possível a verificação de esvaziamento puro para praticamente todos os eventos observados. A Tabela 4.5 apresenta o tempo gasto para o nível na trincheira baixar de 40 cm para o nível 0, em esvaziamento puro para alguns eventos, com os respectivos valores médios de velocidade de infiltração.



Tabela 4.5 – Tempo gasto para baixar 40 cm na trincheira II em esvaziamento puro (horas)

Evento	Início (nível 40 cm)	Fim (nível 0 cm)	Duração (h)	Taxa média de infiltração (mm/h)
010928	28/09/2001 05:15	28/09/01 09:22	4:07	23,8
0011002	30/09/2001 22:40	01/10/2001 03:30	4:50	20,3
	01/10/2001 11:13	01/10/2001 16:14	5:01	19,5
	01/10/2001 19:44	01/10/2001 23:41	3:57	24,8
011112	10/11/2001 22:02	11/11/01 01:04	3:02	32,3
011128	27/11/2001 00:35	27/11/01 02:53	2:18	42,6
011205	05/12/2001 09:59	05/12/01 13:48	3:49	25,7
020214	13/02/2002 15:38	13/02/2002 17:06	1:28	69,2

#### 4.3.5 - Escoamento de saída

Os ensaios de infiltração na trincheira I apresentaram velocidades de infiltração da ordem de 200 mm/h para o solo não saturado (no início dos ensaios), estabilizando-se em valores da ordem de 10 mm/h para o solo saturado (final dos ensaios). As velocidades de infiltração observadas durante os eventos, no entanto, atingem valores que variam de 400 a 800 mm/h, não chegando a ocorrer estabilização.

Na trincheira II, os ensaios apresentam velocidades máximas da ordem de 200 mm/h, estabilizando-se para o solo saturado em torno dos 30 mm/h. Para os eventos observados, os valores de velocidade de infiltração ficaram dentro dos limites verificados nos ensaios de caracterização. Em alguns eventos, a trincheira atingiu velocidades de infiltração da ordem de 300 mm/h, quando a trincheira encontra-se com grande carga hidráulica (nível d'água alto).

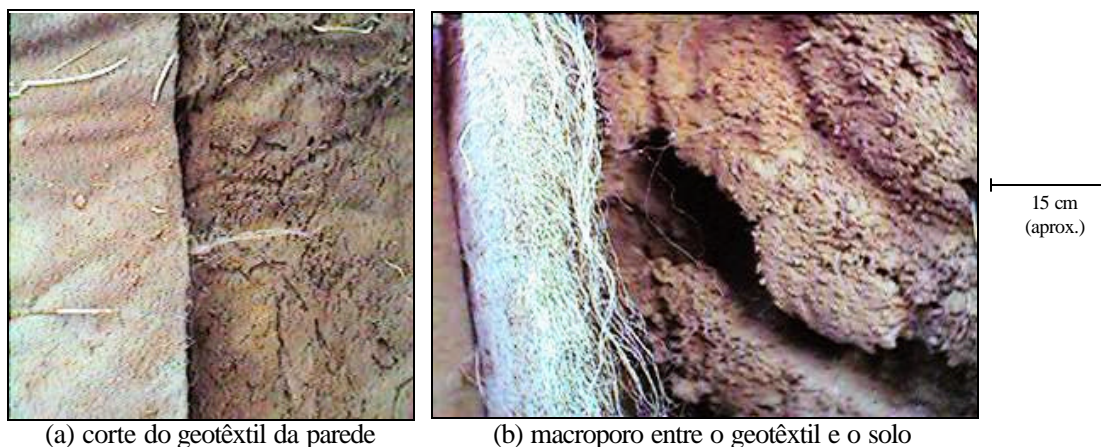
A grande magnitude das vazões de saída encontradas na trincheira I, em relação aos ensaios efetuados antes da instalação, conduziu a duas interpretações. A primeira delas é a ocorrência de escoamento preferencial. A segunda interpretação leva em consideração as diferenças entre as condições dos ensaios e do funcionamento real do dispositivo, mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Variações entre as condições dos ensaios de caracterização e o funcionamento real

<b>Ensaio de infiltração: cilindros concêntricos</b>	<b>Funcionamento real do dispositivo</b>
Infiltração ocorre entre 15 e 20 cm abaixo da superfície do solo	Infiltração ocorre principalmente em torno de 1 m de profundidade
Carga hidráulica em torno de 7 cm	Carga hidráulica pode chegar a 1 m
Movimento da água na vertical	Saída da água pelo fundo e pelas paredes do dispositivo
Infiltração ocorre em uma área pequena, limitando a possibilidade de macroporos	Grande superfície de infiltração, aumentando a possibilidade de ocorrência de macroporos em algum ponto

Um outro indicativo da ocorrência de escoamento preferencial na trincheira I está na forma das curvas de infiltração em função do nível no seu interior. A curva da trincheira I tem a concavidade voltada para baixo, enquanto que a trincheira II apresenta concavidade para cima. A forma da curva da trincheira II também foi observada por Gautier (1998) em monitoramento de bacias de infiltração na França. Esta é também a forma apresentada pelos modelos de Bouwer (1969) e Green-Ampt.

A hipótese de ocorrência de escoamento preferencial na trincheira I foi reforçada por um ensaio destrutivo efetuado no mês de março/2002. Neste ensaio, foi observada a presença de caminhos de pequenos animais entre o geotêxtil das paredes e o solo, como mostrado na Figura 4.14. Este ensaio será mais bem detalhado em itens seguintes.



(a) corte do geotêxtil da parede

(b) macroporo entre o geotêxtil e o solo

Figura 4.14 – Macroporo na trincheira I

#### 4.3.6 - O fenômeno da histerese

O potencial matricial e o teor de água não seguem uma relação unívoca. As curvas observadas na drenagem são de fato diferentes das observadas durante o umedecimento. A relação  $f_m(q)$ , sendo  $f$  o potencial matricial e  $q$  a umidade, depende, conseqüentemente, da direção na qual o teor de água e o potencial matricial evoluem, ou seja, depende do histórico do processo. O teor de água de um solo em equilíbrio em um determinado potencial matricial é, portanto, maior enquanto o solo se encontra em fase de drenagem do que durante o processo de umedecimento (Musy e Soutter, 1991). Este fenômeno é denominado *histerese*.

A Figura 4.15 apresenta o efeito “bolha de tinta”, que ilustra de forma esquemática a ocorrência desse fenômeno, que pode ter as seguintes causas (Wheater, SD; Musy e Souter, 1991):

- ângulos de contato diferentes para o umedecimento e a drenagem;
- aprisionamento de ar;
- expansão, contração e envelhecimento do solo provocam mudanças na estrutura;
- distribuição irregular dos poros.

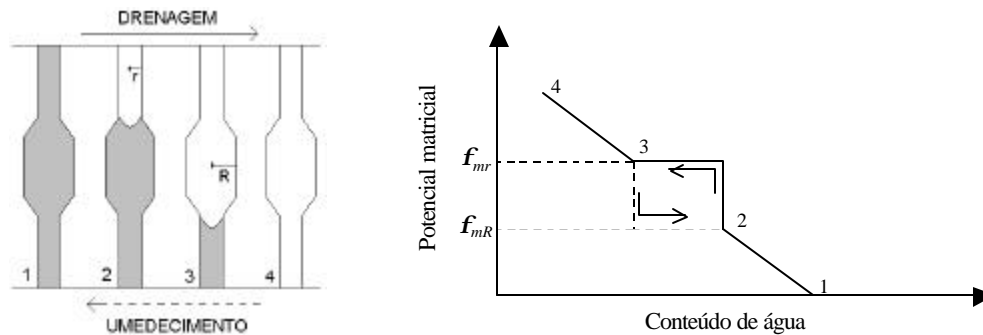


Figura 4.15 – Efeito “bolha de tinta”

A histerese foi observada em alguns eventos da trincheira I. Na trincheira II, o cálculo da vazão de saída foi considerado somente na recessão, o que não permitiu a observação da histerese. A Figura 4.16 apresenta a histerese observada na trincheira I para o evento de 18/09/2000.

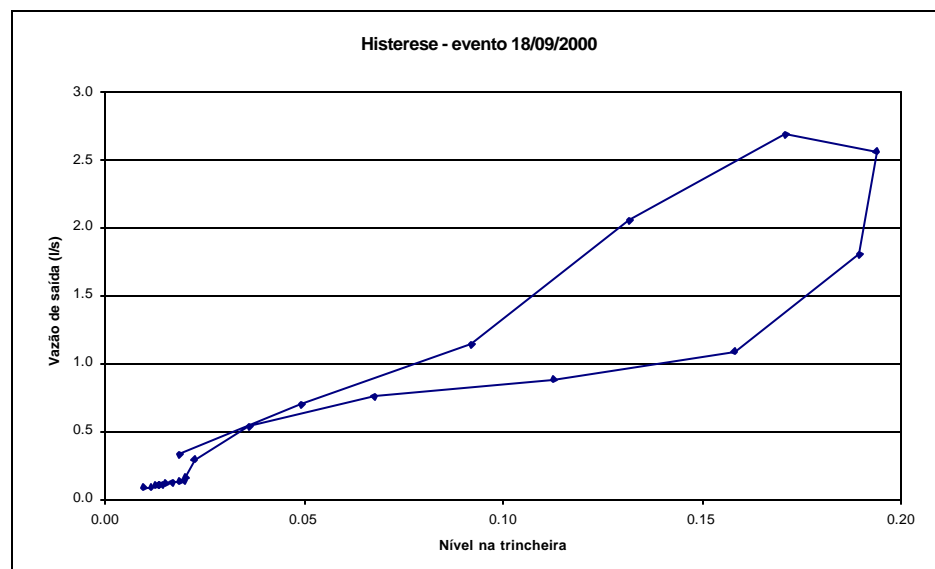


Figura 4.16 – Histerese na trincheira I

Para alguns eventos observou-se, entretanto, um caminho inverso ao esperado, ou seja, maiores velocidades de infiltração durante o processo de esvaziamento (recessão) da trincheira. Também esta observação pode ser explicada pelo estabelecimento de conectividade

entre os poros durante o processo de enchimento e/ou pela ocorrência de escoamento preferencial.

#### **4.4 - Eficiência do dispositivo (volumes e vazões controladas)**

A eficiência dos dispositivos será dada pela sua capacidade em controlar o escoamento, pelos níveis atingidos em relação à magnitude dos eventos, pelo tempo necessário para o esvaziamento (necessidade de controlar eventos sucessivos) e pela necessidade de manutenção de rotina.

Para todos os eventos observados (90 na trincheira I e 18 na trincheira II), verificou-se completo controle do escoamento, não havendo escoamento remanescente, mesmo tendo ocorrido um evento (26/11/2001) que superou o período de retorno do projeto. Assim, atingiram-se condições melhores que as de pré-ocupação (em termos de controle do escoamento superficial).

Os tempos de esvaziamento dos dispositivos após cada evento foram relativamente baixos, o que permite que eventos sucessivos possam ser controlados sem maiores riscos de insuficiência, como foi o caso do evento observado na trincheira II em 01/10/2001.

Deve ser observado, no entanto, que o desempenho dos dispositivos depende fortemente das condições do solo e das características dos eventos. Os eventos mais críticos para as trincheiras não são, necessariamente, os de maior tempo de retorno para as precipitações. Durante o monitoramento, os mais representativos observados nas trincheiras I e II (apresentados na Figura 4.17 e na Figura 4.18, respectivamente), têm alta frequência (ambos com tempo de recorrência inferior a um ano), mas as características de distribuição temporal da precipitação e a umidade antecedente do solo determinaram as condições de funcionamento dos dispositivos.

O total precipitado nos cinco dias antecedentes ao evento de maior período de retorno, por exemplo, foi de 11,6 mm. No entanto, tanto para a trincheira I quanto para a trincheira II, o nível máximo observado ocorreu para eventos de períodos de retorno inferiores a um ano, mas com precipitação total de 63 mm para a trincheira I e 75 mm para a trincheira II nos cinco dias antecedentes ao evento.

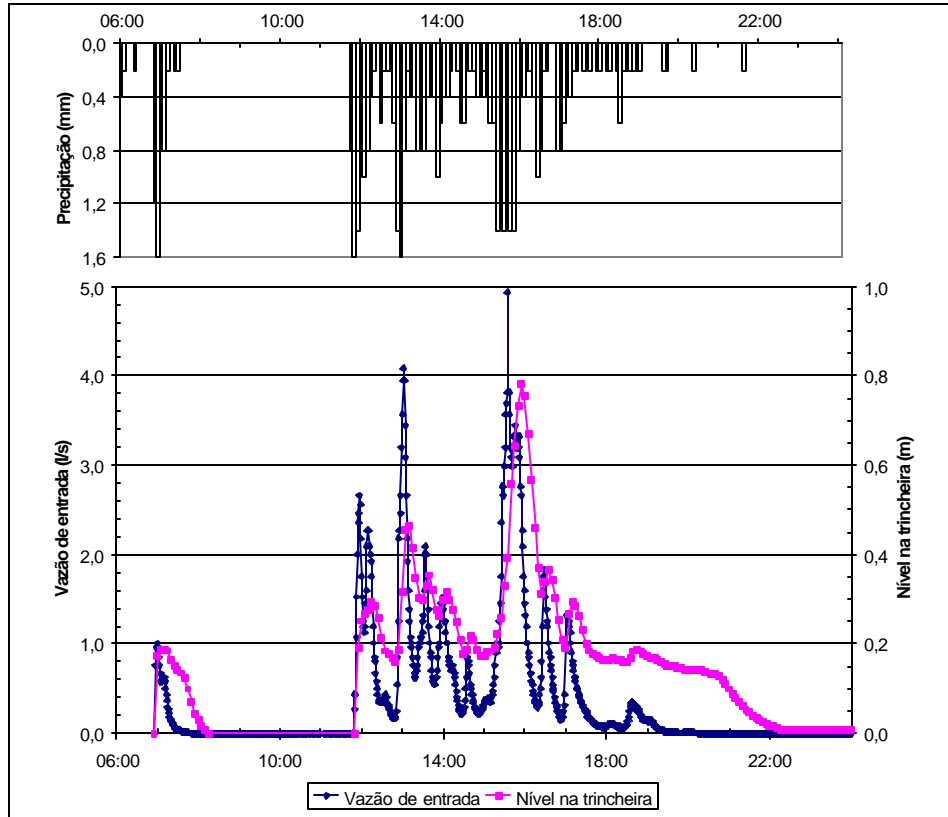


Figura 4.17 – Evento observado na trincheira I (21/09/2000)

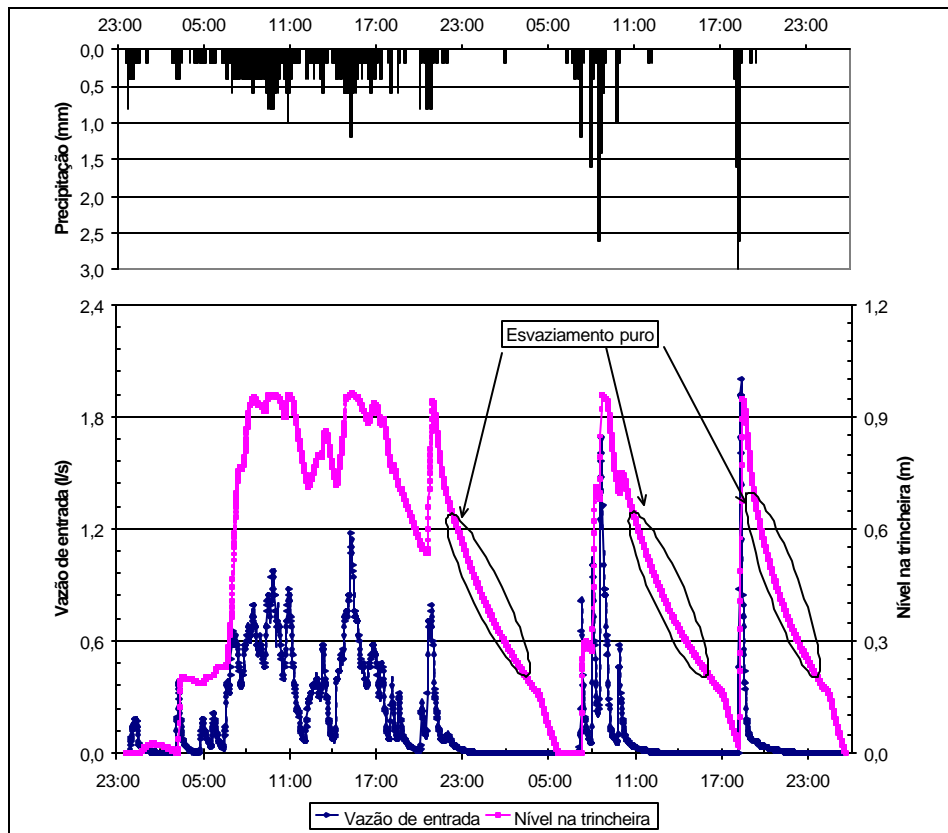


Figura 4.18 – Evento observado na trincheira II (01/10/2001)

Diversas modificações tiveram que ser implementadas durante a fase de monitoramento. A principal delas diz respeito ao controle de sedimentos afluentes à trincheira, que pode reduzir significativamente a vida útil do dispositivo. Nesse sentido, foi instalada uma caixa de areia a montante do vertedor na trincheira I, sendo colocada em seu interior uma tela para remoção de folhas. Ainda assim uma grande quantidade de material fino passa por esses dispositivos auxiliares.

Na trincheira I, a grande quantidade de folhas acabou provocando perturbações no monitoramento, entupindo em alguns eventos as estruturas destinadas a conduzir a água até o dispositivo (Figura 4.19-a) e acelerando a colmatação da primeira camada (Figura 4.19-b), como será apresentado em itens seguintes.



Figura 4.19– (a) tela da caixa de areia entupida e (b) material em suspensão colmatando primeira camada da trincheira

Na trincheira II, a presença de sedimentos e folhas de árvores não é significativa, não ocasionando problemas, nem para o monitoramento, nem para a trincheira. O material em suspensão que chega nessa trincheira fica retido, ou nas caixas de distribuição, ou na faixa gramada entre a tubulação de distribuição e a trincheira.

#### **4.5 - Comportamento de longo prazo e vida útil**

Um dos pontos importantes que deve ser verificado no uso de dispositivos de infiltração, e que até o momento é pouco conhecido, é o funcionamento a longo prazo, a vida útil e a perda de suas funções por colmatação.

Os dados relativos às curvas de infiltração foram analisados ao longo do tempo, com o objetivo de se verificar a perda da função de infiltração dos dispositivos por colmatação. A partir desta análise, dispositivos de controle de lixo, sedimentos, folhas, devem ser propostos, com o objetivo de se garantir a eficiência do dispositivo a longo prazo. Deve ser observado



que as curvas de infiltração verificadas para cada evento são diferentes, em função das condições de umidade do solo e das características de cada evento.

Na trincheira I observou-se acentuado nível de colmatação da primeira camada, provocada pelo aporte excessivo de sedimentos e folhas das árvores da área de contribuição, apesar das tentativas de se controlar esse material. A Figura 4.20 mostra a situação da primeira camada de geotêxtil nesta trincheira.



Figura 4.20 – Colmatação da camada superior da trincheira (geotêxtil)

Apesar desta colmatação na camada superior, o geotêxtil desempenhou bem sua função de pré-filtro, garantindo a manutenção das taxas de infiltração do solo, como mostrado na Figura 4.21. Nesta figura, pode-se observar que houve a manutenção das taxas de infiltração para o nível 10 cm. As variações observadas são função das condições do solo antes dos eventos.

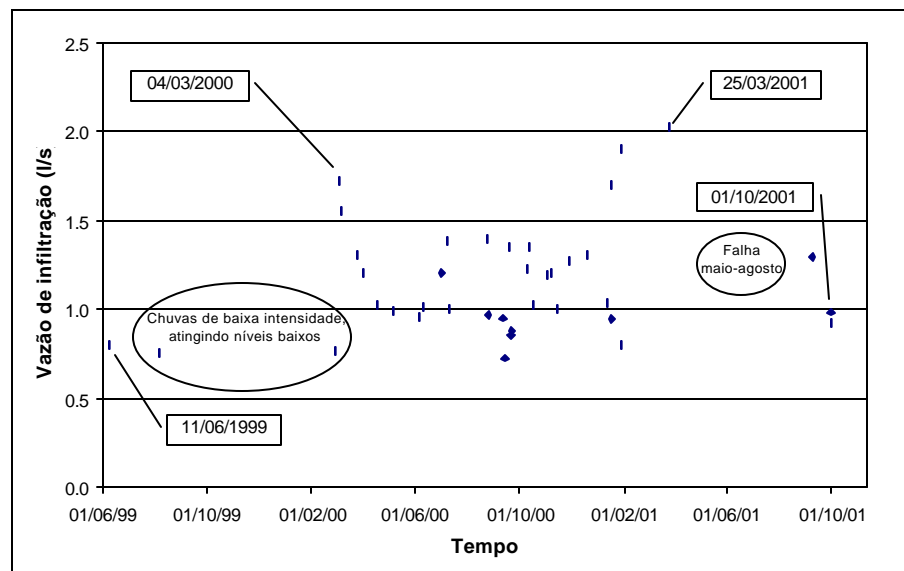


Figura 4.21 – Evolução da curva de infiltração (nível h=10 cm)

Nos períodos de inverno as taxas são mais homogêneas, refletindo a menor variação das condições de umidade do solo. No verão, por outro lado, as condições podem variar rapidamente, apresentando grandes dispersões nos dados observados.

Com o objetivo de confirmar a eficiência da primeira camada de geotêxtil trabalhando como pré-filtro, procedeu-se a um ensaio destrutivo, coletando-se amostras no interior da trincheira I, observando-se o material existente em cada camada. Verificou-se que o material poroso e o fundo da trincheira ficaram completamente protegidos da entrada de material fino. Todo o material fino (colmatante potencial da trincheira) ficou retido na primeira camada, em função do filtro geotêxtil, como ilustrado na Figura 4.22. A maior parte do material retido na primeira camada é composta por matéria orgânica (folhas das árvores na superfície de contribuição).

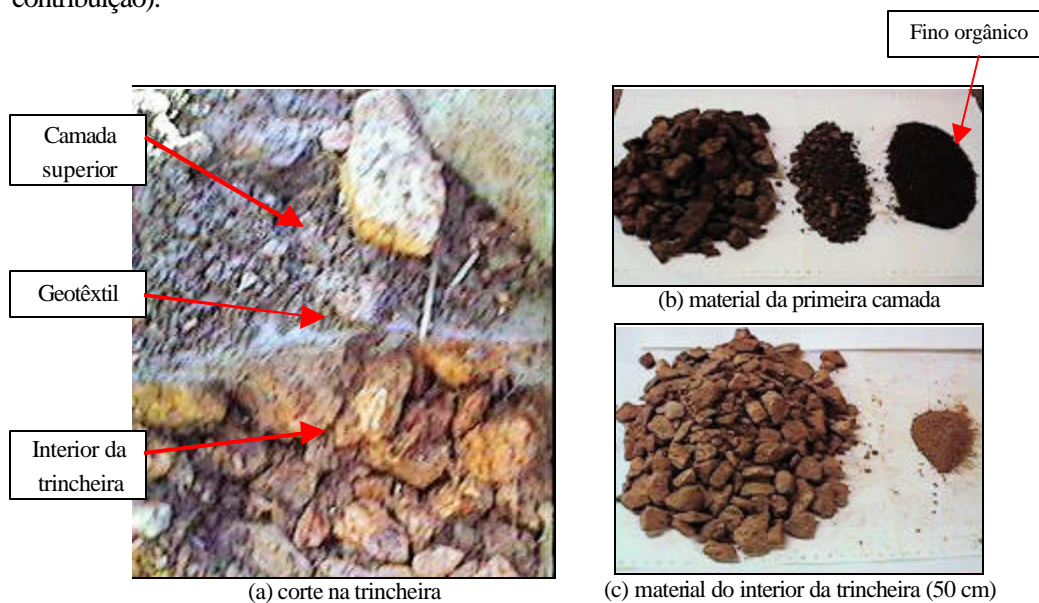


Figura 4.22 – Ensaio destrutivo na trincheira I

A Figura 4.23 mostra o geotêxtil amostrado em três condições: novo, no fundo da trincheira (com uma parcela de material fino) e na camada superficial da trincheira (com grande quantidade de material fino e matéria orgânica).

Devido ao uso recente, ainda não há resultados conclusivos a respeito da vida útil desse tipo de dispositivo. No entanto, alguns autores têm apresentado trabalhos com dispositivos em funcionamento satisfatório com alguns anos de operação. Gautier (1998) apresenta um estudo feito em poços de infiltração cuja data de implantação é 1965, sendo que em 1992 estes poços tornaram-se insuficientes, não pela perda de desempenho, mas sim pelo aumento dos volumes escoados causados pelo aumento da impermeabilização. Barraud (2000) apresenta a reabilitação de uma bacia de retenção-infiltração que está em operação há cerca de



30 anos, apresentando-se hoje completamente colmatada. Após a reabilitação, a bacia voltará a fazer parte do sistema. Balades *et al.* (1998) e Auriat (1997) apresentam uma trincheira de infiltração que está em pleno funcionamento em Bordeaux (França), desde 1990, sem nenhuma manutenção, desempenhando com eficiência sua função. Outros autores (Schueler, 1987; Urbonas e Stahre, 1993), em trabalhos anteriores, sugeriam vida útil em torno de 15 anos.



Figura 4.23 – Condições do geotêxtil no interior da trincheira

Com relação às trincheiras instaladas no IPH-UFRGS, o curto intervalo de tempo de monitoramento não permite o estabelecimento da vida útil. Observa-se que a trincheira I, após 33 meses de funcionamento, mantém praticamente inalteradas as condições de infiltração. No entanto, apresenta sua primeira camada em avançado estado de colmatção, em função do excessivo aporte de material em suspensão. A vida útil destes dispositivos pode, portanto, ser sensivelmente aumentada com eficiente prevenção do aporte de sedimentos e com a substituição da primeira camada quando esta se apresentar colmatada.

#### **4.6 - Considerações sobre o método de dimensionamento**

No método de dimensionamento utilizado (“rain-envelope-method”), descrito na seção 2.5.2, são feitas as seguintes considerações:

- o dimensionamento é feito com a utilização de taxas de infiltração constantes, em função da condutividade hidráulica saturada: as taxas de infiltração observadas no monitoramento são sempre superiores à condutividade hidráulica saturada, uma vez que o solo não chega a atingir um estado de saturação. Para exemplificar esse efeito, no início dos ensaios de caracterização, o solo apresenta taxas de infiltração

da ordem de 200 mm/h, reduzindo-se para valores da ordem de 30 mm/h com o solo saturado (trincheira II);

- a área do fundo do dispositivo é desprezado nos cálculos da infiltração, em função da rápida colmatção: os eventos observados mostraram que o fundo tem importante contribuição na infiltração de água a partir do dispositivo. A camada superficial da trincheira, com o filtro geotêxtil, tem importante função na proteção do fundo, impedindo a passagem de sedimentos e retardando o processo de colmatção, fato confirmado pelo ensaio destrutivo;
- não consideração da carga hidráulica no interior do dispositivo: vazões e velocidades de saída a partir do dispositivo são função da carga hidráulica (Figura 4.12). Mesmo modelos simples de infiltração da água no solo, como o de Green-Ampt, consideram um termo (geralmente carga de pressão) em que a carga hidráulica está considerada;
- coeficiente de segurança: a falta de conhecimento preciso do funcionamento da trincheira e dos parâmetros do solo leva à adoção de coeficientes de segurança, como aquele sugerido por Urbonas e Stahre (1993), quando a condutividade hidráulica é reduzida pela metade.

O resultado dessas simplificações é o superdimensionamento da estrutura, apresentado na Figura 4.24.

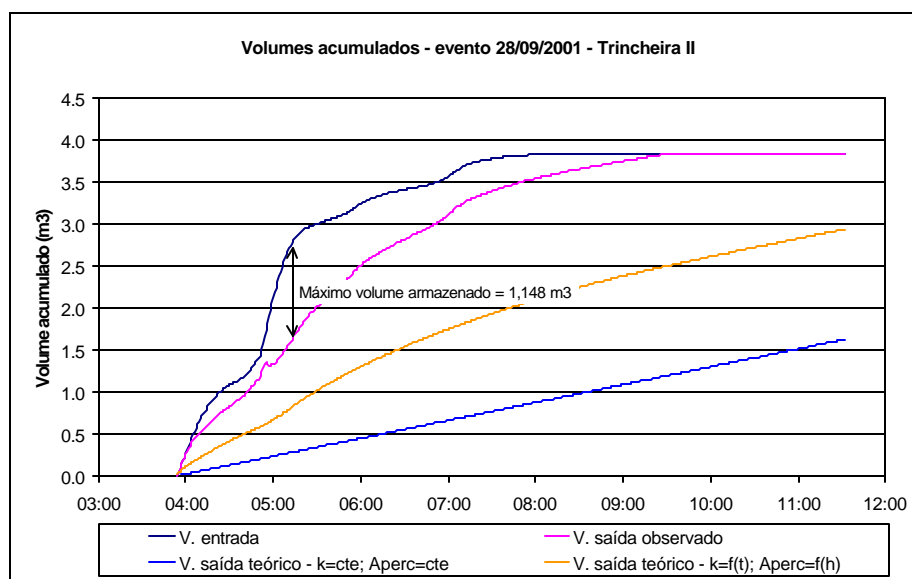


Figura 4.24 – Superdimensionamento devido a simplificações no método (evento observado)

O resultado desse superdimensionamento pôde ser visto no monitoramento da trincheira I, dimensionada para receber a contribuição de uma área de 200 m<sup>2</sup> e que atualmente recebe a contribuição de uma área cerca de 3 vezes maior, tendo sido utilizado, no máximo, cerca de 70% do volume disponível.

Na trincheira II não foram utilizados coeficientes de segurança no dimensionamento e ainda assim apresenta-se eficiente no controle do escoamento, tendo sido utilizado cerca de 72% do volume para um evento de 10 anos de tempo de retorno para a duração de 30 minutos.

Outro fator importante a considerar é o fato de que os ensaios de infiltração são executados na superfície do solo (profundidades da ordem de 20 cm), onde ocorre uma camada de matéria orgânica. O processo de infiltração na trincheira, por outro lado, ocorre em profundidades da ordem de 1 metro. Da mesma forma, o ensaio de infiltração pelo método dos cilindros concêntricos considera uma carga hidráulica que varia de 2,5 cm a 7 cm, enquanto na trincheira a carga hidráulica pode chegar a 1,0 m (no evento da Figura 4.24 a carga hidráulica chegou a 0,415 m).

Outros métodos de caracterização poderiam ser propostos, através da realização de ensaios de infiltração nas profundidades máximas previstas para a trincheira. No entanto, este certamente não seria um procedimento a ser adotado quando da instalação de trincheiras, devido às dificuldades de operacionalização.

A dificuldade de determinação precisa das características do solo associada à variabilidade das condições de funcionamento justifica a adoção de estruturas superdimensionadas. A utilização do coeficiente de segurança sugerido por Urbonas e Stahre (1993) significa um aumento de cerca de 40 a 50% no custo total do dispositivo.

#### **4.7 - Práticas de manutenção**

Durante o período de monitoramento, a manutenção se restringiu à limpeza dos dispositivos auxiliares (caixa separadora de material grosseiro e caixa do vertedor), sendo feita após cada evento observado, e ao controle da vegetação do entorno, evitando que esta ocupasse a área da trincheira.

O aporte de sedimentos e folhas para a trincheira I foi elevado, causando uma colmatação significativa da primeira camada, mas que não afetou o desempenho da trincheira. Esta primeira camada desempenhou satisfatoriamente a função de pré-filtro, e deve ser substituída quando seu estado de colmatação atingir níveis elevados, o que não ocorreu durante o período de monitoramento.

As práticas de manutenção podem ser menos frequentes à medida que a eficiência de remoção do material em suspensão seja maior. Na trincheira I, a quantidade de material em suspensão foi sempre elevada, em função da vegetação na área de contribuição e da constante movimentação de areia.

A remoção neste caso não foi muito eficiente, o que ocasionou tanto problemas para o monitoramento, pelo entupimento das estruturas que conduzem a água até o dispositivo, quanto problemas de colmatção precoce da primeira camada.

No caso da vegetação, recomenda-se que sejam colocados obstáculos para evitar a entrada da vegetação no dispositivo, facilitando sua manutenção (estas obstruções não foram colocadas nos dispositivos monitorados). Tais obstáculos podem ser bastante simples, como a colocação de tábuas nas bordas do dispositivo.

#### **4.8 - Extensão da aplicação**

A utilização destes dispositivos depende, basicamente, das características do solo no local de implantação. Assim, a utilização em solos com menor capacidade de infiltração poderá ser feita, mediante instalação de drenos suplementares que garantam o esvaziamento da trincheira. Dessa forma, os dispositivos irão trabalhar através da infiltração, e também, durante o evento, haverá uma vazão de contribuição para a rede coletora, regulada de acordo com a vazão de pré-desenvolvimento ou de restrições da própria rede.

Alguns cuidados devem ser tomados na utilização de dispositivos de infiltração em solos erodíveis, o que pode ocasionar problemas para as estruturas vizinhas.

#### **4.9 - Análise de custos**

Questões relativas ao custo na aplicação dos dispositivos também ainda não estão muito bem definidas. Pensando em termos de cada estrutura individualmente, os custos são relativamente baixos, da ordem de R\$ 400,00 para trincheiras com as dimensões das instaladas para o desenvolvimento deste trabalho.

Os custos para o desenvolvimento deste trabalho estão relacionados com a implantação das duas trincheiras de infiltração e dos instrumentos de monitoramento, estando distribuídos conforme Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Custos relacionados ao desenvolvimento do trabalho

Descrição	Trincheira I	Trincheira II
Escavação <sup>1</sup>	150,00	350,00
Geotêxtil	119,60	99,00
Material de enchimento <sup>2</sup>	180,00	252,50
Pluviógrafo <sup>3</sup>	0,00	0,00
Linígrafo trincheira (sensor de pressão) <sup>4</sup>	0,00 <sup>3</sup>	1800,00
Linígrafo vertedor	0,00 <sup>3</sup>	2100,00
Material de laboratório para ensaios <sup>3</sup>	0,00	0,00
Vertedor de alumínio com caixa em acrílico	200,00	200,00
Canaletas para condução da água até a trincheira	0,00	500,00
Tubos e conexões <sup>5</sup>	65,00	0,00 <sup>6</sup>
Manutenção dos equipamentos <sup>5</sup>	140,00	160,00
Manutenção (pintura e impermeabilização de caixas)	0,00	300,00
Total	854,60	5761,50

<sup>1</sup> A trincheira I teve escavação mecânica e a II manual. O custo para a trincheira II inclui escavação, enchimento, confecção de caixas entre os módulos e colocação de registros entre os módulos.

<sup>2</sup> A trincheira I foi fechada com brita 4 e a II com seixo rolado.

<sup>3</sup> Material já existente no IPH

<sup>4</sup> Para a trincheira I foram utilizados sensores Global Water® e para a trincheira II sensores Druck ®

<sup>5</sup> Baterias, correção de divisores d'água, etc. Custo aproximado

<sup>6</sup> Já incluídos no custo de execução de canaletas

Considerando-se somente os custos de execução dos dispositivos (escavação, geotêxtil, enchimento), no caso das trincheiras do IPH, estes foram de R\$ 450,00 e R\$ 700,00 para as trincheiras I e II, respectivamente (sem considerar instrumentação), que drenam áreas de 600 m<sup>2</sup> e 450 m<sup>2</sup>. Deve-se observar que o custo da trincheira II é composto por escavação manual e construção de caixas de alvenaria entre os módulos, o que encareceu o dispositivo.

Tais custos não consideram, entretanto, efeitos de economia de escala (redução no custo de escavação), nem os benefícios gerados pela utilização dos dispositivos (redução da rede de microdrenagem). O uso conjunto com o sistema convencional permite o melhor controle do escoamento superficial, podendo, em alguns casos, haver a redução do custo total da drenagem. Esta redução pode ser ainda mais significativa considerando-se a redução dos prejuízos causados por cheias. Além disso, a utilização dos dispositivos analisados permite a manutenção das dimensões da maior parte do sistema de drenagem, evitando os transtornos causados pela ampliação.

Baptista *et al.* (1998) apresentam um projeto de drenagem feito por trincheiras de infiltração, em que a economia total em relação ao projeto convencional foi de cerca de 35%. Esse projeto foi desenvolvido no município de Igarapé-MG, região metropolitana de Belo Horizonte.

Em uma tentativa de se estimar o efeito do uso de dispositivos de infiltração sobre o escoamento em uma bacia urbana e sobre os custos de solução dos problemas de drenagem

desta bacia, Souza *et al.* (2001) realizaram simulações numéricas em uma bacia urbana em Porto Alegre-RS, considerando a utilização de trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e microrreservatórios de detenção no lote. Os resultados das simulações em que foram utilizadas trincheiras de infiltração em conjunto com a solução clássica apresentaram custos cerca de 35% mais baixos do que os custos da solução clássica (sem trincheira).

Deve ser observado que, nas simulações de Souza *et al.*, foram utilizados valores limites de condutividade para as trincheiras de infiltração e os pavimentos permeáveis (de acordo com Urbonas e Stahre, 1993 e Araújo *et al.* (2000)) e que, à medida que o solo apresenta maiores valores de condutividade hidráulica, as dimensões dos dispositivos tendem a ser menores e, conseqüentemente, os custos serão menores. A Figura 4.25 apresenta curvas de custos obtidas com base nos custos de materiais utilizados na construção das trincheiras do IPH-UFRGS. Estas curvas serão diferentes, em função de variações regionais de custos, mas servem para dar uma idéia da ordem de grandeza.

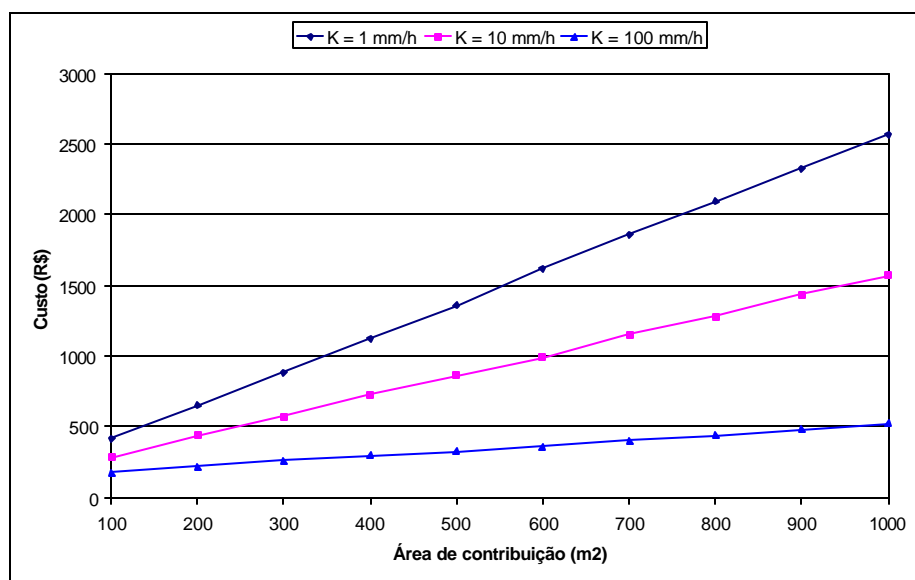


Figura 4.25 – Custo de trincheiras de infiltração  $\times$  área de contribuição  $\times$  condutividade hidráulica

#### 4.10 - Considerações finais

Mesmo ocorrendo um evento mais crítico do que o do projeto durante o período de monitoramento, as trincheiras trabalharam com uma certa folga. A trincheira I atingiu a altura máxima de 78 cm (altura útil de 64 cm), o que significa um nível de folga de 36 cm. Deve ser observado, ainda, que a área de contribuição atual para essa trincheira é maior do que a área

do projeto em mais de três vezes (200 m<sup>2</sup> para o projeto contra cerca de 600 m<sup>2</sup> para a situação atual).

Na trincheira II a folga foi menor, em função dos valores adotados para o dimensionamento (não consideração de coeficiente de segurança e valor mais baixo do coeficiente de escoamento). No entanto, mesmo esta trincheira trabalhou de forma satisfatória.

O bom desempenho da trincheira I não deve ser tomado, no entanto, sem qualquer restrição, devendo ser considerados que os altos valores de infiltração observados não são condizentes com os ensaios de permeabilidade efetuados antes da instalação da trincheira. Assim, algumas hipóteses devem ser consideradas: 1) existência de caminhos preferenciais; 2) os ensaios de infiltração na superfície não são adequados para se verificar a permeabilidade de um solo em profundidade, de maneira global; 3) a consideração da condutividade hidráulica saturada durante o dimensionamento não inclui o efeito de sucção do solo, ocasionando superdimensionamento; 4) os efeitos da carga hidráulica alteram significativamente o processo de infiltração.

Considerando o “rain-envelope-method”, pode-se verificar o superdimensionamento ocasionado a partir das curvas teóricas de dimensionamento e da observação do comportamento da trincheira para um evento real (Figura 4.24). O Anexo A1 apresenta recomendações para projeto de trincheiras de infiltração, considerando adaptações feitas para as condições brasileiras, de acordo com discussões apresentadas neste capítulo.

Os dispositivos mostraram eficiência no controle do escoamento superficial, não tendo ocorrido escoamento remanescente em nenhum dos eventos observados, mesmo tendo sido a precipitação de tempo de retorno superior ao de projeto para a duração crítica das trincheiras (evento de 28/11/2001).

Modelos numéricos que buscam representar a infiltração podem dar uma contribuição significativa para o entendimento do funcionamento das trincheiras e dos processos envolvidos. Portanto, o ajuste de modelos aos dados obtidos nas trincheiras será objeto de um capítulo à parte.

## Capítulo 5

---

"Eu, que sei prever a trajetória dos astros, nada sei dizer sobre o movimento de uma pequena gota d'água."  
*Galileo Galilei*

### 5 - AJUSTE DE MODELOS

O uso recente e a escassez de estudos sobre os dispositivos de infiltração resultam na dificuldade de obtenção de informações sobre seu funcionamento, sobretudo em países em desenvolvimento, como o Brasil.

Assim, a utilização de modelos sobre os dados das trincheiras monitoradas no IPH-UFRGS pode fornecer importantes subsídios para o maior conhecimento das trincheiras, fornecendo elementos para sua aplicação e gestão. Dessa forma, a modelagem foi aplicada neste trabalho com o objetivo de testar a aplicabilidade de modelos já utilizados em outros dispositivos de infiltração (Gautier, 1998), instalados em solos com características diferentes e sujeitos a outros tipos de solicitação. A continuidade do projeto permitirá, também, a avaliação das alterações no funcionamento dos dispositivos a longo termo, assim como variações de funcionamento para diferentes condições de campo.

A modelagem necessita de que se identifiquem não só os objetos, como também os fenômenos aos quais aqueles são submetidos; e entre estes fenômenos, os que importam representar em relação aos objetivos da modelagem (Gautier, 1998).

Assumindo que o objetivo será o de representar o funcionamento quantitativo do dispositivo e sua evolução no tempo, devem-se visualizar dois níveis do modelo:

1. representação do funcionamento do dispositivo para um dado evento;
2. representação do funcionamento a longo termo, integrando os fenômenos associados, sendo, aparentemente, a colmatação o mais importante. Este fenômeno traduz bem a idade do dispositivo e integra fenômenos quantitativos e qualitativos.



Inicialmente havia sido proposta a utilização de modelos como os de Horton (1949), Philip (1957) e Green e Ampt, para a representação do funcionamento quantitativo dos dispositivos. No entanto, tal utilização não permitiria a avaliação, de forma direta, do estado de colmatagem.

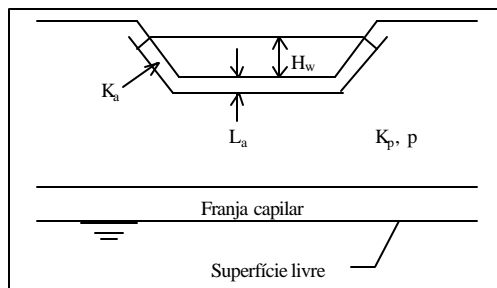
O modelo de Bouwer (1969), por sua vez, foi utilizado por Gautier (1998) para representar o funcionamento quantitativo de bacias de infiltração na França, fornecendo bons resultados. Tem a vantagem de apresentar apenas dois parâmetros: o primeiro se refere à resistência hidráulica ( $R$ ) e caracteriza o estado de colmatagem do dispositivo; e o segundo está ligado ao ambiente do dispositivo, caracterizado pela pressão intersticial ( $P$ ) abaixo da camada colmatada.

Bouwer ressalta que a utilização de tratamento teórico para representar o processo de infiltração requer a adoção de simplificações, considerando-se algumas condições de contorno, em função da complexidade do processo. A formulação do modelo para representar os dispositivos de infiltração, bem como suas simplificações, serão apresentadas a seguir.

Esse modelo foi selecionado por ter apresentado bons resultados quando aplicado a outros tipos de dispositivos de infiltração (Gautier, 1998) e por apresentar, de forma direta, um parâmetro relativo ao “envelhecimento” do dispositivo (parâmetro de resistência hidráulica), em função do seu estado de colmatagem.

### 5.1 - Modelo de Bouwer

Este modelo foi apresentado por Bouwer (1969) para canais ou bacias de realimentação do freático, sem especificação da geometria do problema a ser tratado. A Figura 5.1 apresenta a notação utilizada no modelo, na consideração de existência de uma camada de colmatagem relativamente fina, que restrinja o fluxo.



- $H_w$ : altura d'água no dispositivo
- $L_a$ : espessura da camada colmatada
- $K_a$ : condutividade hidráulica da camada colmatada
- $P$ : pressão intersticial do solo subjacente
- $K_p$ : condutividade hidráulica do solo subjacente

Figura 5.1 – Notação utilizada no modelo de Bouwer (1969)

Para que a formulação do modelo seja válida, a camada de colmatção que restringe a infiltração deve ter origem natural, ou seja, deve ocorrer em função de sedimentação de argilas, silte ou areia fina, ou ainda pela ocorrência de colmatção biológica (Bouwer, 1978).

Se a condutividade hidráulica ( $K_a$ ) da camada colmatada é suficientemente baixa, de tal forma que a vazão no solo subjacente seja inferior à condutividade hidráulica à saturação, o solo sob a camada colmatada estará não-saturado. Essa hipótese é válida para a condição de que a superfície livre do freático seja suficientemente profunda para que o fundo do dispositivo se encontre acima da franja capilar.

Nessas condições, e em regime permanente, a vazão através da camada colmatada é função unicamente da gravidade. Ocorre, portanto, gradiente hidráulico unitário.

A carga de pressão ( $P$ ) entre a camada colmatada e a franja capilar do solo abaixo do dispositivo é uniforme (fluxo como função da gravidade). Assim, a vazão de infiltração, em qualquer ponto do fundo do dispositivo, pode ser expressa pela lei de Darcy:

$$q = K_a \cdot \frac{H_w + L_a - P}{L_a} \quad \text{Equação 5.1}$$

A relação entre a carga de pressão ( $P$ ) e a condutividade hidráulica saturada ( $K_p$ ) abaixo da camada de restrição (camada colmatada) pode ser expressa por uma função (Figura 5.2). Ta relação é característica para cada tipo de solo, e sua determinação deve ser feita experimentalmente e/ou através de ajustes de modelos, como os de Burdine (1953) ou Mualem (1976), à curva de retenção ( $q=f(P)$ ), ajustada por um modelo como o de van Genuchten (1980).

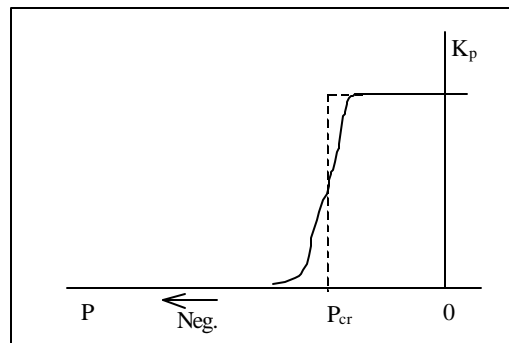


Figura 5.2 – Forma da curva que relaciona a condutividade hidráulica com a pressão capilar (Fonte: Bouwer, 1969)

Gardner exprimiu essa relação sob a seguinte forma (Musy e Soutter., 1991; Bouwer, 1969):

$$K_p = \frac{a}{(-P)^n + b} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $n$  são coeficientes, cujos valores são obtidos para cada tipo de solo.

Dessa equação tira-se que, para o solo saturado ( $P=0$ ), o valor da condutividade hidráulica ( $K_p$ ) é igual a  $a/b$ .

Uma vez que o gradiente hidráulico abaixo da camada de restrição é igual a 1,  $K_p$  e  $q$  são numericamente iguais. Assim, isolando-se  $P$  na Equação 5.2 e substituindo-se  $P$  na Equação 5.1, obtém-se uma expressão não explícita de  $q$ :

$$q = K_a \cdot \frac{H_w + L_a + (a/q - b)^{1/n}}{L_a} \quad \text{Equação 5.3}$$

Um processo iterativo deverá ser utilizado para a solução da Equação 5.3, uma vez que o valor de  $q$  na expressão não está explícito. Uma outra alternativa é o uso de simplificações, objetivando contornar essa dificuldade, como será mostrado a seguir.

Observando-se a relação entre  $K_p$  e  $P$ , verifica-se que ela tem uma forma sigmóide, apresentada na Figura 5.2. Assume-se que a redução de  $K_p$  acontece em uma faixa relativamente estreita de  $P$ , o que é particularmente verdadeiro para solos granulares uniformes, para os quais a curva  $K_p=f(P)$  pode ser aproximada (simplificada) por uma escalar. O centro dessa curva é denominado  $P_{cr}$  (carga de pressão crítica ou simplesmente pressão crítica) e definido por Bouwer segundo a Equação 5.4.

$$P_{cr} = \frac{\int K_p \cdot dP}{K} \quad \text{Equação 5.4}$$

onde  $K$  é  $K_p$  em  $P=0$ . A integração da curva para obtenção do valor  $P_{cr}$  deve ser feita entre  $P=0$  e um valor de  $P$  onde o valor de  $K_p$  se torne insignificante quando comparado ao valor de  $K$ .

Outra simplificação leva em consideração que a espessura da camada de restrição ( $L_a$ ) é relativamente pequena, quando comparada com  $(H_w - P_{cr})$ , podendo ser desprezada. Além disso, o valor atual de  $L_a$  é de difícil determinação, o que conduz à adoção de um termo de resistência hidráulica ( $R_a$ ) para representar a camada de restrição. O termo de resistência hidráulica fica, portanto, definido conforme a Equação 5.5.

$$R_a = \frac{L_a}{K_a} \quad \text{Equação 5.5}$$

Efetuada-se as simplificações acima descritas, a expressão da vazão por unidade de área do dispositivo é apresentada na Equação 5.6.

$$q = \frac{H_w - P_{cr}}{R_a} \quad \text{Equação 5.6}$$

## 5.2 - Considerações sobre o modelo de Bouwer

A utilização de um valor constante igual a  $P_{cr}$ , que resulta na Equação 5.6, é particularmente válida para solos granulares, onde a variação de  $K_p$  em função de  $P$  ocorre em uma faixa relativamente estreita de  $P$ . Para solos argilosos, no entanto, essa variação ocorre de forma gradual, o que pode resultar em valores calculados para a infiltração bastante diferentes do real. De acordo com Bouwer (1969), a ordem de grandeza dos valores  $P_{cr}$  é a seguinte:

- cerca de -20 cm de coluna d'água para areias grossas e médias;
- de -50 cm a -100 cm de coluna d'água para areias finas e solos argilo-arenosos;
- inferior a -150 cm de coluna d'água para siltes e argilas não estruturados.

Gautier (1998) justifica a simplificação na curva de  $K_p=f(P)$  e a utilização de um valor constante igual a  $P_{cr}$ , considerando que os dispositivos de infiltração, em geral, são utilizados em solos cuja permeabilidade é relativamente elevada, como nos solos arenosos. No entanto, o que se verifica é que os limites para a utilização dos dispositivos de infiltração não devem ser fixados somente nos solos arenosos.

As trincheiras de infiltração no IPH-UFRGS, por exemplo, estão instaladas em solo com textura argilo-arenosa e permeabilidade relativamente baixa. Da mesma forma, Argue (1999) coloca como “um mito” a limitação de dispositivos de infiltração aos solos arenosos, estando de acordo com Bettess (1996), que limita a utilização de dispositivos de infiltração

aos solos de condutividade hidráulica acima de  $3 \times 10^{-10}$  m/s (0,001 mm/h), valor muito baixo se comparado com o de solos arenosos (valores acima de  $10^{-2}$  m/s, Tabela 2.4).

Verifica-se, portanto, a necessidade de adequação dessa simplificação aos casos onde a variação de  $K_p$  em função de  $P$  não ocorre de forma tão rápida.

### 5.3 - Aplicação do modelo às trincheiras de infiltração

A Equação 5.6 fornece a vazão por unidade de área do dispositivo. Assim, a obtenção da vazão de infiltração é obtida pela integração dessa função pela área molhada no interior dos dispositivos.

A deposição de sedimentos no fundo dos dispositivos ocorre de forma mais rápida do que nas paredes e, portanto, a colmatagem do fundo tende a ocorrer de forma mais rápida. Dessa forma, faz-se necessário um tratamento diferenciado para estas duas superfícies. O parâmetro de resistência hidráulica será, pois, tratado separadamente para o fundo e para as paredes, sendo introduzidos os valores de  $R_f$  (resistência hidráulica do fundo) e  $R_p$  (resistência hidráulica das paredes), e a verificação da contribuição de cada uma dessas superfícies será feita de forma independente, como apresentado na Figura 5.3.

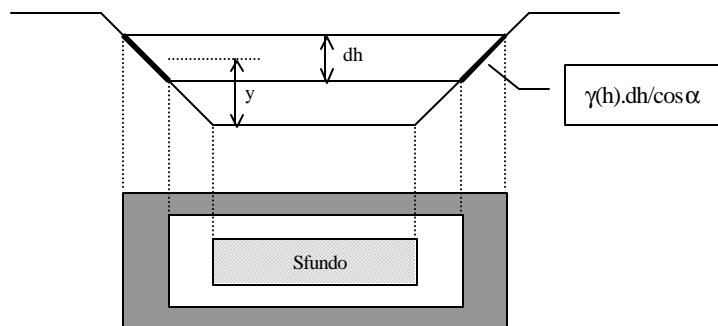


Figura 5.3 – Representação das áreas de infiltração para um dispositivo qualquer

Desenvolvendo-se a Equação 5.6 separadamente para o fundo e para as paredes, obtém-se a contribuição de cada uma dessas superfícies para a infiltração total do dispositivo.

#### 5.3.1 - Infiltração pelo fundo

Fazendo-se a integração da Equação 5.6 para o fundo da trincheira, obtém-se a equação de infiltração pelo fundo, apresentada na Equação 5.7.

$$Q_f(h) = \frac{h - P}{R_f} \cdot S_f \quad \text{Equação 5.7}$$

onde:  $Q_f(h)$  = vazão de infiltração pelo fundo do dispositivo em função do nível d'água

$h$  = altura d'água no interior do dispositivo

$R_f$  = resistência hidráulica do fundo

$S_f$  = área do fundo

$P$  = pressão intersticial entre a camada colmatada e a franja capilar

### 5.3.2 - Infiltração pelas paredes

Uma simplificação necessária é a consideração de resistência hidráulica uniforme sobre toda a parede. Esta resistência, no entanto, aumenta com a profundidade, uma vez que a parte superior do dispositivo trabalha com menor frequência e que a água infiltrada é menos carregada de sedimentos em função da deposição dos mesmos. Da mesma forma, faz-se a simplificação de infiltração perpendicular às paredes. Tais simplificações são as mesmas efetuadas por Gautier (1998) no seu trabalho com bacias de infiltração.

Nessas condições, a infiltração pelas paredes pode ser expressa na forma da Equação 5.8.

$$Q_p(H) = \int_{h=0}^{h=H} \frac{(H-h) - P}{R_p} \text{per}(h) \cdot \frac{dh}{\cos \alpha}, \quad \text{sendo} \quad \text{Equação 5.8}$$

$\alpha = p/2$

onde:  $Q_p$  = vazão infiltrada pelas paredes do dispositivo em função de  $h$

$R_p$  = resistência hidráulica das paredes

$\text{per}(h)$  = perímetro do dispositivo em função de  $h$

$\alpha$  = ângulo médio dos taludes em relação à vertical

A expressão de  $\text{per}(h)$  é função da geometria do dispositivo, que, no caso das trincheiras instaladas no IPH-UFRGS, é constante (paredes verticais,  $\alpha=0$ ,  $\cos \alpha=1$ ), sendo igual a 21,6 m e 19,6 m para as trincheiras I e II, respectivamente.

Desenvolvendo-se a Equação 5.8, obtém-se a expressão da vazão de saída do dispositivo pelas paredes em função do nível d'água em seu interior, apresentada na Equação 5.9.

$$Q_p(H) = \frac{per}{R_p} \left[ \frac{H^2}{2} - P.H \right] \quad \text{Equação 5.9}$$

onde:  $Q_p(H)$  = vazão de infiltração pelas paredes do dispositivo

$H$  = altura d'água no interior do dispositivo

$R_p$  = resistência hidráulica das paredes

$P$  = pressão intersticial entre a camada colmatada e a franja capilar

$per$  = perímetro do dispositivo, constante para as trincheiras

### 5.3.3 - Infiltração total e função objetivo

Desta forma, a infiltração total a partir do dispositivo, apresentada na Equação 5.10, é a soma da infiltração pelo fundo e da infiltração pelas paredes.

$$Q_{inf}(H) = \frac{per}{2.R_p} . H^2 + \left[ \frac{S_f}{R_f} - \frac{P.g}{R_p} \right] . H - \frac{P.S_f}{R_f} \quad \text{Equação 5.10}$$

onde:  $Q_{inf}(H)$  = vazão total de infiltração do dispositivo

$H$  = altura d'água no interior do dispositivo

$per$  = perímetro do dispositivo, constante para as trincheiras

$S_f$  = área do fundo

$R_f$  = resistência hidráulica do fundo

$R_p$  = resistência hidráulica das paredes

$P$  = pressão intersticial entre a camada colmatada e a franja capilar

Os parâmetros a ajustar são, portanto, a resistência hidráulica do fundo ( $R_f$ ), a resistência hidráulica das paredes ( $R_p$ ) e a pressão intersticial entre a camada colmatada e a franja capilar ( $P$ ).

Com o objetivo de se evitar subjetividade e facilitar a calibração, foi utilizada uma rotina computacional baseada em um método de algoritmo genético (SCE-UA: Shuffled Complex Evolution – University of Arizona), desenvolvida por Duan *et al.* (1992) e adaptada por (Collischonn e Tucci, 2001). Utilizou-se uma função objetivo baseada na minimização do erro padrão, apresentada na Equação 5.11.

$$F.O. = \text{Mínimo} \left( \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 5.11}$$

onde:  $F.O.$  = função objetivo a minimizar

$Q_{obs}$  = valores observados de infiltração em função do nível na trincheira

$Q_{calc}$  = valores calculados pela Equação 5.10 de infiltração em função do nível

$n$  = número de pontos observados no evento que está sendo ajustado

## 5.4 - Resultados do ajuste do modelo

### 5.4.1 - Trincheira I

A trincheira I apresentou grande dispersão nos dados de infiltração em função do nível d'água no seu interior, como é mostrado na Figura 5.4, reflexo das variações nas condições de funcionamento.

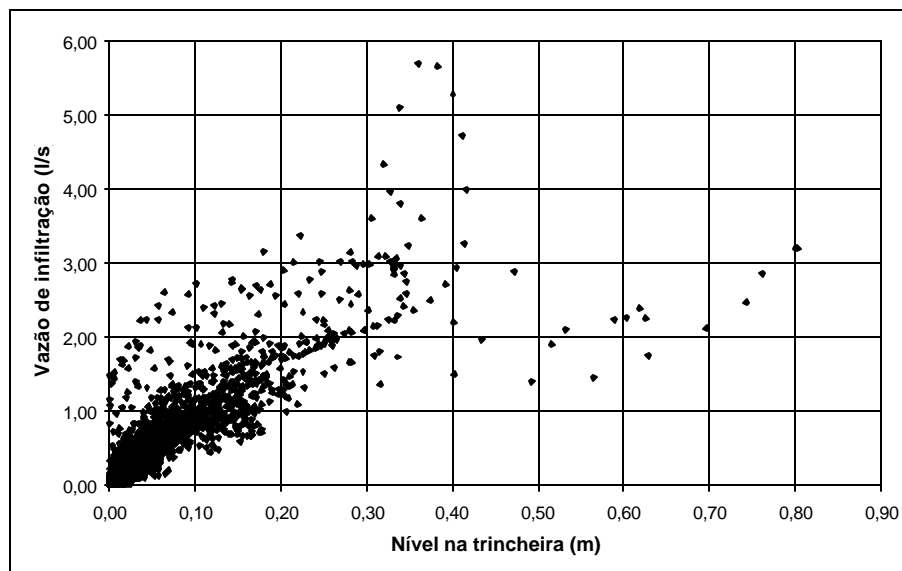


Figura 5.4 – Vazão de infiltração em função do nível: eventos analisados na trincheira I

Procedeu-se ao ajuste do modelo (Equação 5.10), com a função objetivo apresentada na Equação 5.11, aos dados da trincheira I, sem nenhuma consideração adicional. O resultado é apresentado na Figura 5.5. Como pode ser observado, a concavidade apresentada pelos dados conduz à obtenção de um vabres negativos para a resistência hidráulica, o que é fisicamente inconsistente.



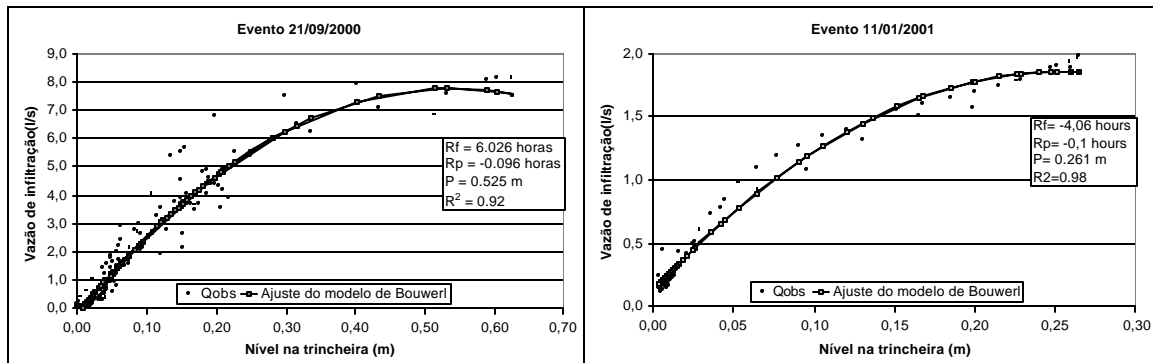


Figura 5.5 – Ajuste do modelo à eventos da trincheira I

Para eventos em que o nível no interior do dispositivo foi mais baixo, não se percebe a formação da concavidade para baixo e, conseqüentemente, o ajuste do modelo não é representativo (Figura 5.6).

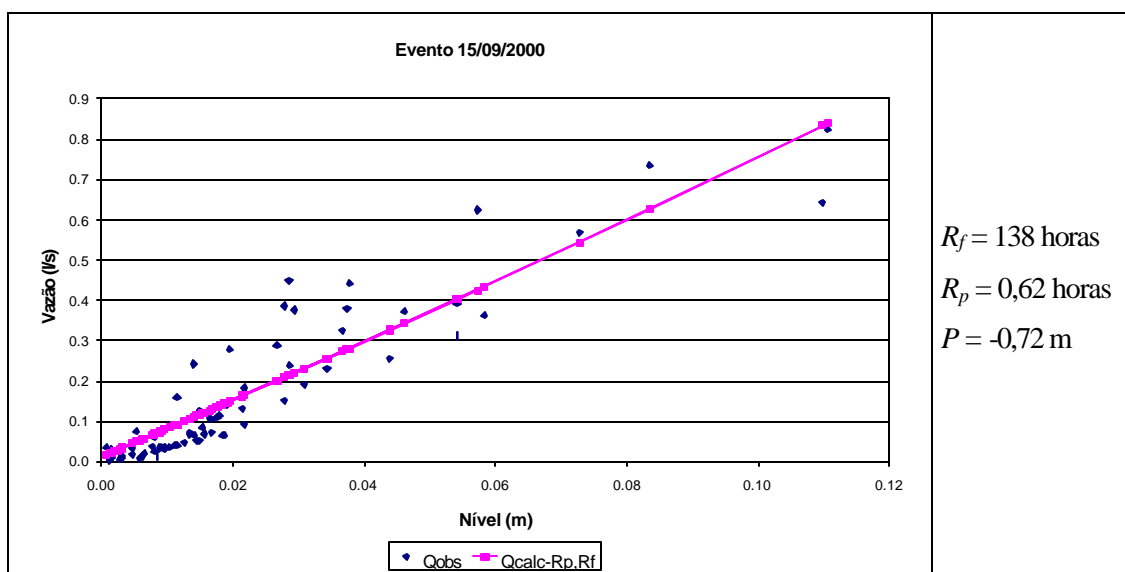


Figura 5.6 – Ajuste do modelo para um evento pouco significativo

O mau ajuste do modelo aos dados observados conduziu às seguintes hipóteses:

- 1) ocorrência de escoamento preferencial;
- 2) inexistência de uma camada de restrição suficientemente colmatada (hipótese do modelo de Bouwer);
- 3) erro devido a simplificações do modelo, tais como a consideração de  $P = P_{cr}$  (constante).

Essas hipóteses serão discutidas no item 5.4.2, após a apresentação dos resultados do ajuste do modelo aos dados da trincheira II.

### 5.4.2 - Trincheira II

Ao contrário do que ocorreu com a trincheira I, os dados da trincheira II apresentaram concavidade voltada para cima (Figura 5.7), o que permitiu melhor ajuste do modelo, com a obtenção de valores dentro da faixa esperada.

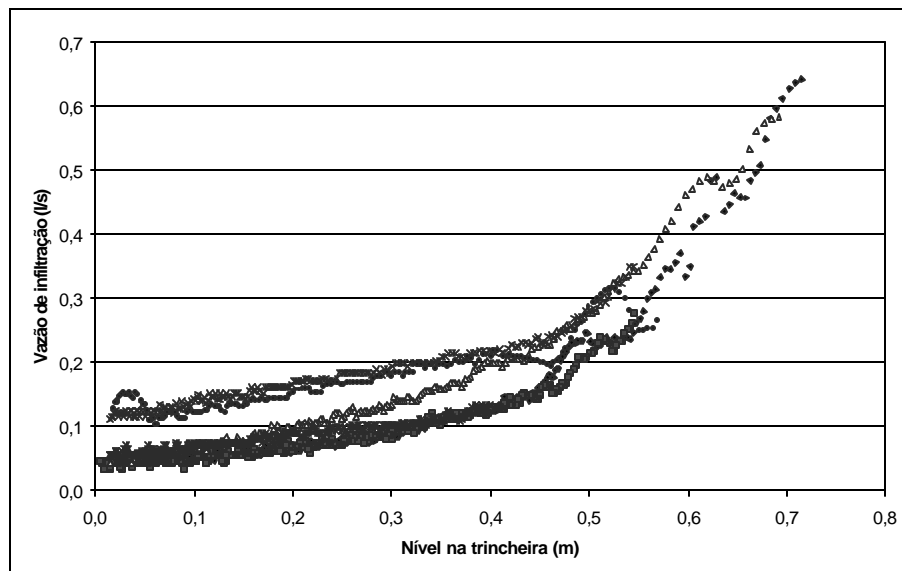


Figura 5.7 – Vazão em função do nível na trincheira II

Com o avanço do processo de colmatção, é de se esperar a obtenção de maiores valores para a resistência hidráulica do fundo. Mesmo no início do monitoramento, esses valores tendem a ser maiores, em função de a trincheira II ter sido construída com escavação manual e, conseqüentemente, apresentar um estado inicial de compactação do solo no fundo. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros ajustados para alguns eventos (Figura 5.8) e o ajuste global (Figura 5.9).

Tabela 5.1 – Parâmetros ajustados para alguns eventos da trincheira II

Evento	$R_f$ (h)	$R_p$ (h)	$P$ (m)
011001	240,9	8,1	-0,46
	46,1	14,6	-0,48
	161,0	7,0	-0,48
011112	14,4	30,0	-0,76
011128	25,4	45,1	-0,65
011205	16,3	37,1	-0,84
Ajuste global	35,5	10,3	-0,48

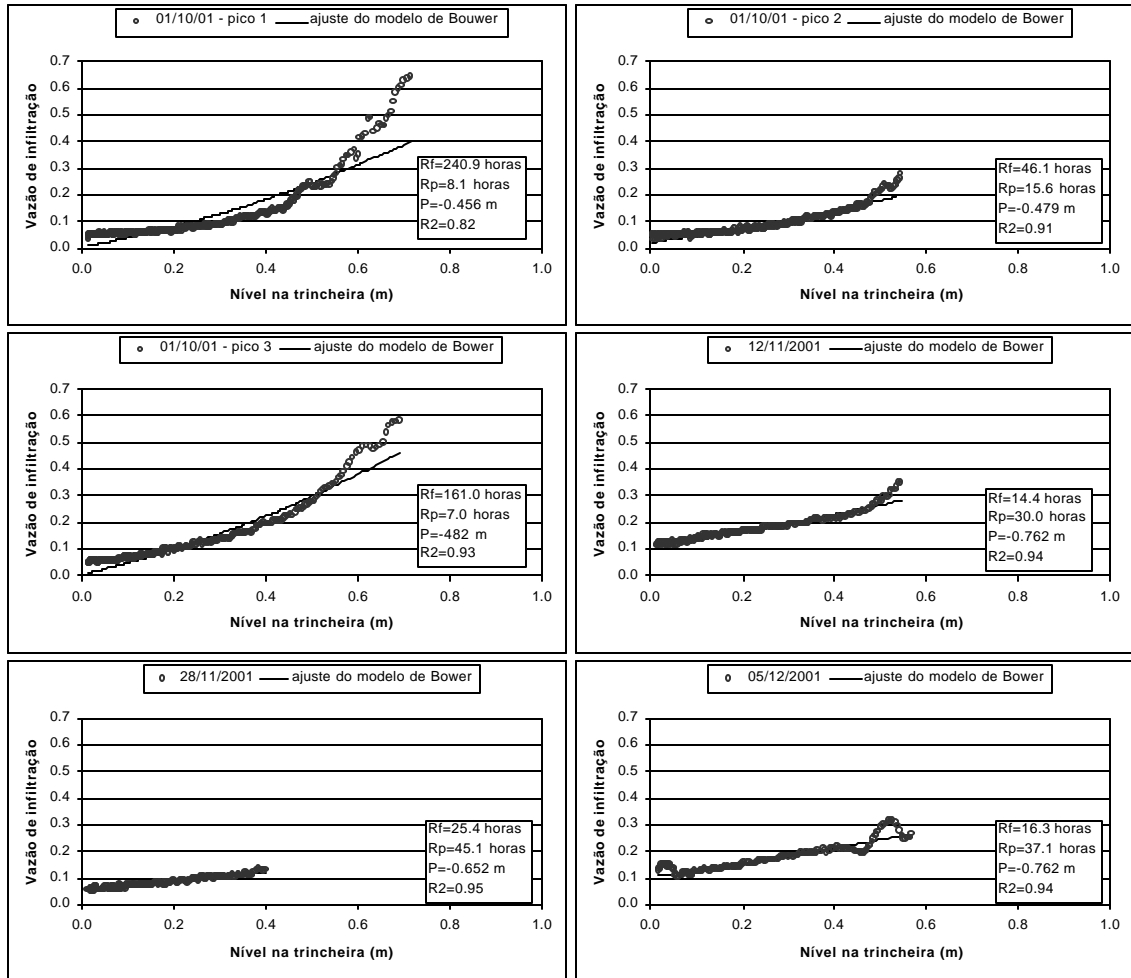


Figura 5.8 – Ajuste do modelo aos principais eventos observados na trincheira II

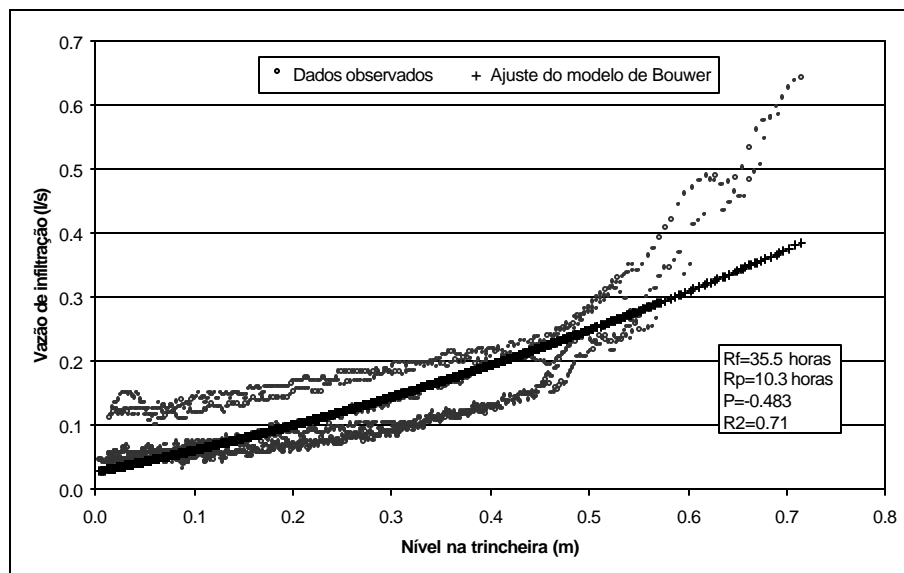


Figura 5.9 – Ajuste global na trincheira II

Os eventos 011112, 011128 e 011205 apresentaram valores de resistência hidráulica das paredes maiores que os verificados para o fundo (efeito contrário ao esperado). Deve ser observado que estes eventos atingiram níveis mais baixos e que o comportamento do dispositivo sofre uma mudança a partir do nível 45 cm, aproximadamente (Figura 5.7). Até o nível 45 cm, a vazão de saída tem uma relação aproximadamente linear com o nível, mudando essa tendência a partir desse nível.

Para o ajuste global, verifica-se o comportamento conforme o esperado, ou seja, maior resistência hidráulica do fundo e, conseqüentemente, maior influência das paredes para a infiltração.

A grande variação nos parâmetros reflete o baixo nível de colmatação do dispositivo, visto que este é bastante novo (12 meses de operação). A inexistência de uma camada de restrição faz com que as condições de umidade do solo no entorno da trincheira tenham maior importância no seu funcionamento que o nível de colmatação.

No que se refere ao ajuste do parâmetro  $P$ , o modelo apresentou bons resultados, já no ajuste inicial. Os valores calibrados estão dentro da faixa de medições de umidade ao longo do monitoramento dessa trincheira. As medições de umidade efetuadas entre outubro de 2001 e fevereiro de 2002 apresentaram valores entre 11,3% e 20,4%, estando a média em 15,6% (Tabela 5.2). Estes valores de umidade correspondem a pressões de cerca de -5,5 m (solo seco, umidade 11,3%) e de -1,0 (solo úmido, umidade 20,4%) (conforme curva de retenção apresentada na Figura 3.17).

Considerando que o ajuste dos modelos é efetuado durante os eventos e, portanto, o solo encontra-se com umidade alta, os valores obtidos para o ajuste (Tabela 5.1) são compatíveis com as condições do solo. No ajuste dos modelos, o valor médio de  $P$  obtido (-0,59) apresenta-se compatível com um solo ainda com maior umidade do que durante as medições de umidade, o que é justificado pela infiltração da água no solo durante os eventos.

Embora os parâmetros ajustados aos dados da trincheira II tenham significado físico, o ajuste do modelo não foi muito bom, como apresentado na Figura 5.8. Em função do mau ajuste, foram levantadas as mesmas hipóteses apresentadas para a trincheira I:

- 1) ocorrência de escoamento preferencial;
- 2) inexistência de uma camada de restrição suficientemente colmatada (hipótese do modelo de Bouwer);
- 3) simplificações do modelo, tais como a consideração de  $P=P_{cr}$  (constante).

Tabela 5.2 – Medições de umidade na área da trincheira II (usando sonda de nêutrons)

Data – Hora	Leitura média		Umidade gravimétrica (%)	Umidade calculada (%)			
	30 cm	70 cm		120 cm	30 cm	70 cm	120 cm
Calibração	520	-	-	100			
08/10/01 15:50	158.0	159.7	142.0	17.4	18.2	18.4	16.7
10/10/01 15:20	155.0	162.3	146.0	20.4	17.9	18.6	17.1
19/10/01 15:20	155.0	165.0	144.7	20.3	17.9	18.9	16.9
25/10/01 15:20	146.7	162.7	137.0	17.6	17.1	18.7	16.2
31/10/01 16:00	132.0	155.0	146.0	12.7	15.7	17.9	17.1
08/11/01 15:50	135.7	151.0	137.7	16.3	16.1	17.5	16.3
12/11/01 17:15	150.7	164.7	145.3	19.4	17.5	18.9	17.0
23/11/02 00:00	82.7	97.7	132.7	13.3	10.9	12.4	15.8
10/12/02 00:00	109.3	102.3	135.7	16.5	13.5	12.8	16.1
04/01/02 00:00	86.7	95.7	134.0	11.3	11.3	12.2	15.9
25/01/02 17:00	132.0	149.3	132.3	14.9	15.7	17.4	15.7
29/01/02 16:00	126.7	145.0	127.3	13.8	15.2	17.0	15.3
01/02/02 16:00	126.3	138.7	124.0	11.9	15.2	16.4	14.9
27/02/02 16:00	124.0	138.3	121.7	11.4	14.9	16.3	14.7
06/03/02 00:00	137.7	143.0	122.0	16.3	16.3	16.8	14.7
Média				15.6	15.6	16.7	16.0
Mínima				11.3	10.9	12.2	14.7
Máxima				20.4	18.2	18.9	17.1
Desvio				3.1	2.2	2.3	0.8

A hipótese de escoamento preferencial na trincheira I, já levantada anteriormente em função da análise do seu funcionamento e do ensaio destrutivo (item 4.5), fica reforçada com o resultado da modelagem. Os parâmetros ajustados para essa trincheira, diferentemente da trincheira II, não apresentam consistência física. Na trincheira II, por sua vez, os resultados da modelagem apresentaram-se mais consistentes, apesar de não ter sido observado um ajuste perfeito. A utilização de um modelo que leve em consideração o escoamento preferencial em macroporo pode esclarecer melhor esta questão. Por não fazer parte dos objetivos desse trabalho, a modelagem do dispositivo considerando escoamento preferencial deverá ser verificada na continuidade do projeto.

A formação de uma camada de restrição suficientemente colmatada (hipótese básica do modelo de Bouwer) pode ser uma das explicações para que o modelo não tenha apresentado bom ajuste aos dados das trincheiras, sobretudo com relação à trincheira II. Isso se justifica pelo curto intervalo de tempo de monitoramento e pela proteção das camadas mais profundas das trincheiras (superfícies principais na infiltração) promovida pelas camadas superiores e pelo filtro geotêxtil. A continuidade no monitoramento das trincheiras permitirá uma avaliação mais detalhada desse item.

A compensação das simplificações do modelo de Bouwer (apresentadas no item 5.1) pode ser feita mediante a atualização, a cada intervalo de tempo, das condições de umidade do solo. Esta compensação será apresentada a seguir.

### **5.5 - Recomendação para modificação no modelo**

O ajuste do modelo não considera a variação do valor de  $P$  durante o evento. Como é apresentado na Tabela 5.2, o valor inicial de umidade do solo pode estar entre cerca de 9,5% e cerca de 22%, e, conseqüentemente, o valor de  $P$  deve estar entre  $-6$  e  $-0,9$  m, como foi explicado acima, o que representa uma variação relativamente grande. Esta variação se reflete no comportamento da infiltração no solo e justifica um ajuste não tão perfeito do modelo tanto aos dados da trincheira I quanto aos da trincheira II.

A modificação proposta leva em consideração a variação das condições iniciais do solo e também a variação que ocorre durante o evento. Um modelo como o de Van Genuchten (1980) ou o de Brooks e Corey (1964) pode ser ajustado à curva de retenção da água no solo (curva característica), fornecendo subsídios para a obtenção da curva que relaciona a condutividade hidráulica ( $K$ ) e a pressão intersticial ( $P$ ), através de um modelo como o de Mualem (1976) ou Burdine (1953). Os valores iniciais de  $K$  e  $P$  podem ser estimados a partir da relação entre a umidade do solo e o período seco antecedente.

A aplicação dessas modificações permite a atualização dos valores de  $P$  e  $K$  no ajuste do modelo, evitando-se a adoção de um valor constante para  $P_{cr}$ . Embora as modificações propostas tragam maior complexidade ao modelo, seu ajuste continua a ser feito baseado em dados de fácil obtenção, como o período seco antecedente e as curvas de retenção.

### **5.6 - Considerações finais**

O modelo de Bouwer havia sido recentemente usado para bacias de infiltração em solo com alta permeabilidade (Gautier, 1998), apresentando bons resultados. Para as trincheiras do IPH-UFRGS, no entanto, o ajuste não foi tão bom quanto o esperado.

Mesmo considerando que o ajuste não tenha sido como o esperado, a trincheira II apresentou melhores resultados do modelo do que a trincheira I, o que reforça a hipótese de escoamento preferencial na trincheira I. Nesta, a concavidade dos dados observados conduz a valores sem significado físico para o parâmetro de resistência hidráulica das paredes (valor negativo).

Gautier (1998) encontrou valores infinitos para a resistência hidráulica do fundo, o que significa colmatação completa do mesmo. Para as trincheiras do IPH-UFRGS, esse fato não ocorreu, em função de estes dispositivos serem relativamente novos, apresentando baixos níveis de colmatação.

É de se esperar que com o tempo os valores de resistência hidráulica aumentem, com o avanço do processo de colmatação. Devido ao curto intervalo de tempo de monitoramento, não foram observadas modificações significativas que indicassem essa tendência.

## Capítulo 6

---

"No fundo, sabe-se apenas que, enquanto se sabe pouco, com o saber cresce a dúvida".  
*Goethe*

### 6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este trabalho apresentou a avaliação do uso de trincheiras de infiltração, considerando algumas adaptações e limitações para as condições brasileiras (no que se refere aos processos hidrológicos, fatores climáticos, tipo, uso e ocupação do solo, materiais e métodos construtivos) em relação aos critérios e recomendações presentes na literatura. Os resultados de eficiência obtidos pelo monitoramento contínuo das duas trincheiras apresentadas mostraram-se satisfatórios.

O monitoramento das duas trincheiras do IPH-UFRGS mostrou a eficiência no uso desse tipo de dispositivo no controle do escoamento superficial. Durante o período de monitoramento (33 meses para a trincheira I e 6 meses para a trincheira II), não ocorreu escoamento remanescente para nenhum dos eventos observados, mesmo tendo sido observado um evento de tempo de retorno superior ao de projeto.

Deve ser observado que os dispositivos de infiltração não têm o compromisso de controle total do escoamento (caso das trincheiras do IPH). Os planos diretores de drenagem urbana que estão sendo implementados nas principais cidades brasileiras, juntamente com os manuais de drenagem, permitem escoamento remanescente do lote (cujos limites estão ainda em discussão) (Porto Alegre, 2000). Dessa forma, a eficiência da trincheira bem como o dimensionamento podem ser otimizados pela utilização de trincheiras desconectadas ("off line") ou pela utilização de drenagem complementar no seu interior (tubo perfurado ligado à rede de microdrenagem local), cuja capacidade seja limitada pela vazão de pré-ocupação.

#### Ensaio de caracterização

O dimensionamento das trincheiras pode ser feito com base em ensaios de caracterização simples, como o do duplo anel para estimativa da taxa de infiltração. No entanto, deve-se fazer mais de um ensaio, visto que a variação nos resultados pode ser grande,



além de se retirar a camada superficial do solo, com o objetivo de se obter maior representatividade nos ensaios.

### **Crítérios de dimensionamento e coeficientes de segurança**

Os critérios de dimensionamento utilizados geraram superdimensionamento da estrutura. No entanto, a dificuldade de determinação precisa das características do solo e a grande variabilidade das condições de funcionamento de dispositivos de infiltração justificam a adoção de estruturas ligeiramente superdimensionadas (o uso de coeficiente de segurança igual a 2, reduzindo a condutividade hidráulica saturada, significa um aumento entre 40 e 50% no volume dimensionado e, conseqüentemente, no custo).

Para os dispositivos de infiltração de pequeno porte, as conseqüências (prejuízos) de uma possível falha não são grandes (é o caso das trincheiras), o que torna discutível a adoção de coeficientes de segurança. No entanto, para dispositivos maiores, as conseqüências podem ser graves e, portanto, o rigor no dimensionamento deve ser maior.

O fundo dos dispositivos pode ser considerado como parte da área disponível para a infiltração, visto que o geotêxtil colocado na camada superficial das trincheiras protege o material de enchimento e as camadas inferiores (fundo) da entrada de sedimentos, reduzindo as chances de colmatação.

### **Eficiência do dispositivo**

A eficiência das trincheiras se mostra pelos baixos níveis d'água atingidos, pelo completo controle do escoamento superficial (sem escoamento remanescente) e pelos baixos tempos de esvaziamento observados, permitindo o controle de eventos sucessivos. Os dispositivos podem, portanto, ser um eficiente elemento de controle do escoamento na fonte, contribuindo para o bom funcionamento do sistema de drenagem pluvial. Mesmo considerando a alta porcentagem de argila do solo no qual as trincheiras foram instaladas, o desempenho foi satisfatório para as duas trincheiras.

O máximo volume d'água armazenado na trincheira I representou 64% do volume disponível. Na trincheira II, mesmo sem a utilização de coeficientes de segurança, o máximo volume observado foi de 77% do disponível. Verificou-se que o funcionamento crítico não ocorre, necessariamente, para o evento de maior tempo de recorrência. O evento crítico para as duas trincheiras apresentou tempos de recorrência modestos (ambos inferiores a um ano), e o evento de maior tempo de recorrência (10 anos para 30 minutos de duração) apresentou

volumes utilizados inferiores a estes. A umidade inicial do solo e a duração do evento são determinantes no funcionamento dos dispositivos.

### **Escoamento preferencial**

As características do funcionamento da trincheira I levaram à hipótese de escoamento preferencial em macroporos. Os valores de taxa de infiltração observados atingiram índices da ordem de 800 mm/h, bastante superiores aos verificados durante os ensaios de caracterização (cerca de 200 mm/h no início dos ensaios). Além disso, os tempos de recessão (esvaziamento) foram curtos, sendo da mesma ordem de grandeza que os de ascensão (pouco superior a uma hora). A forma das curvas de infiltração como função do nível na trincheira é um outro indicativo do escoamento preferencial, apresentando concavidade inversa ao esperado. Esta hipótese foi reforçada pelo ensaio destrutivo.

A trincheira II, por sua vez, apresentou comportamento homogêneo, com menor dispersão nos dados e a concavidade da curva de infiltração em função do nível d'água no seu interior esteve dentro do esperado. Os valores de infiltração verificados se apresentaram compatíveis com os ensaios de caracterização: entre 200 mm/h (no início do evento ou ensaio) e 20 mm/h (para o solo com elevado índice de saturação).

### **Comportamento de longo prazo e vida útil**

A avaliação do estado de colmatação dos dispositivos só pode ser feita de forma preliminar, visto que o tempo de funcionamento de ambas as trincheiras é bastante curto. Pode-se dizer que, em 33 meses de funcionamento para a trincheira I e 13 meses para a trincheira II (para esta, apenas os 6 últimos foram monitorados), as taxas de infiltração permaneceram constantes em relação ao início do funcionamento. As variações nestas taxas ocorrem principalmente em função das variações do estado inicial de umidade do solo, havendo, aparentemente, variação sazonal.

O comportamento da trincheira I apresentou-se diferenciado entre o inverno e o verão, com menor dispersão no inverno, em função da menor variação da umidade do solo nesta época e maior dispersão no verão.

A continuidade no monitoramento das duas trincheiras pode permitir uma avaliação mais precisa do processo de colmatação e, conseqüentemente, da vida útil desses dispositivos.

### **Aplicação de modelo de simulação numérica**

O comportamento observado na trincheira I resultou no ajuste insatisfatório do modelo de Bouwer, escolhido para representar o funcionamento quantitativo das trincheiras. A trincheira II, por outro lado, apresentou melhor ajuste do modelo, mas ainda não satisfatório. Uma modificação no modelo, de forma a torná-lo mais abrangente, é sugerida para trabalhos futuros, consistindo na atualização dos parâmetros a cada intervalo de tempo, de forma a considerar as modificações de funcionamento em função das mudanças de umidade do solo.

Os parâmetros ajustados para o modelo de Bouwer apresentaram dispersão relativamente grande para a trincheira II, o que reflete a inexistência de uma camada de restrição suficientemente colmatada, hipótese básica do modelo. Como a camada de colmatagem não se apresenta ainda formada, a resistência hidráulica varia de acordo com o estado de saturação do solo, justificando a dispersão nos parâmetros.

### **Estruturas auxiliares de controle de sedimentos e práticas de manutenção**

A trincheira I apresenta colmatagem acentuada na primeira camada, o que reflete o excessivo aporte de sedimentos para esta trincheira. No entanto, o seu funcionamento no que se refere à infiltração permanece inalterado. A manutenção natural seria a substituição da primeira camada (primeiros 15 cm), uma vez que o seu interior está protegido pelo geotêxtil.

O estado de colmatagem superficial mostra a necessidade de controle do aporte de sedimentos para os dispositivos, seja através de uma faixa gramada entre o ponto de contribuição e a trincheira (sistema utilizado na trincheira II), seja pela utilização de estruturas que removam de forma eficiente o sedimento presente no escoamento. O aporte e a permanência de sedimentos na camada superficial das trincheiras podem, dentre outras coisas, provocar o nascimento de vegetação, com conseqüente redução na sua eficiência.

### **Análise de custos**

No que se refere aos custos, foram obtidos valores de R\$ 450,00 e R\$ 700,00 para as trincheiras I e II, respectivamente, referente à instalação do dispositivo, não incluindo custos relacionados à instrumentação. Deve ser observado que na trincheira I foi utilizada escavação mecânica, sendo necessário o pagamento do serviço mínimo (4 horas), sendo que a escavação durou cerca de 30 minutos. Na trincheira II os custos incluem escavação manual e confecção das caixas de alvenaria entre os módulos. Verifica-se que o custo de materiais e mão-de-obra mínima para trincheiras, com mesmas dimensões das trincheiras do IPH-UFRGS, está em torno dos R\$ 400,00. Deve ser observado que estas trincheiras apresentam controle total do

escoamento e que os custos podem ser reduzidos quando se utiliza o controle parcial ou quando o solo apresenta maiores valores de condutividade hidráulica.

### **Perspectivas**

Para a continuidade do trabalho sobre as trincheiras, é importante a consideração de variáveis qualitativas, considerando o risco de contaminação do solo e do aquífero, assim como o monitoramento contínuo da umidade do solo. A alteração nas dimensões da trincheira (através de registros de fundo) permitirá uma avaliação mais precisa dos métodos de dimensionamento adotados.

Da mesma forma, e com o objetivo de garantir o bom funcionamento dos dispositivos de infiltração, é recomendável que se façam levantamentos da densidade máxima de infiltração de cada região da cidade, de acordo com o tipo de solo. A avaliação combinada de soluções, como microrreservatórios, trincheiras, pavimentos permeáveis, em conjunto com o sistema convencional de drenagem, pode fornecer importantes elementos para a tomada de decisão sobre qual solução adotar.

A modificação proposta no modelo de Bouwer e/ou a utilização de modelos que integrem o escoamento preferencial em macroporo, pode dar respostas mais conclusivas à algumas questões levantadas durante o monitoramento.

O estado atual de conhecimento sobre as trincheiras de infiltração permite sua utilização como elemento do sistema de drenagem urbana. O Anexo A1 apresenta recomendações para a utilização de trincheiras, adaptadas para as condições brasileiras com base nas observações sobre as instalações experimentais do IPH-UFRGS:

- critérios de concepção e projeto;
- ensaios de caracterização;
- metodologia de dimensionamento;
- recomendações para a construção;
- dispositivos auxiliares de controle de material em suspensão;
- práticas de manutenção;
- custos;
- limitações de aplicação.

Deve-se observar que a utilização de dispositivos de infiltração de pequeno porte, como as trincheiras ou os poços de infiltração, é preferível às grandes estruturas, como as bacias de retenção/infiltração, que recebem a contribuição de áreas maiores. No entanto,

apesar de o controle na fonte ser mais eficiente, quando existe o risco de contaminação do solo ou do lençol freático (caso de áreas industriais, por exemplo), a dificuldade de se controlar o que está sendo lançado individualmente conduz à utilização de controle concentrado, em grandes bacias de retenção/infiltração (Barraud, 2001). A utilização de controle concentrado só é aceitável quando não houver lançamento de esgotos cloacais na rede pluvial.

Na geração atual, os dispositivos de infiltração são caracterizados pela multifuncionalidade, apresentando boa integração com o espaço urbano. É desejável que os elementos de controle do escoamento urbano façam parte do ambiente, facilitando sua operação e estimulando a manutenção em função de outros usos.

O sistema de drenagem no Brasil encontra-se em fase de discussão, sendo propostas novas alternativas, mas não existindo maiores preocupações com a qualidade da água no meio urbano. Raramente se discute o aspecto de integração das soluções adotadas com o espaço urbano.

Espera-se que este trabalho tenha dado uma contribuição positiva para o conhecimento do funcionamento dos dispositivos de infiltração, estimulando sua adoção em conjunto com o sistema de drenagem e promovendo a valorização do espaço urbano.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRA, S. G. 2001. Estudo experimental de microrreservatórios para controle do escoamento superficial. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. 2000. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, V.5, n.3, p.21-30, jul/set.
- ARGUE, J. R. 1999. An exploration of some "myths" about infiltration systems in source control technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. Proceedings. Sydney. p.563-570.
- ATV COMMITTEE WORK. 1990. Construction and dimensioning of facilities for decentralised percolation of non-harmful polluted precipitation water. Bonn. 36f. (ATV Standard A-138).
- AURIAT, V. 1997. Comportement hydraulique d'une tranchée drainante. Site d'exploitation avenue G. Eiffel (Pessac): rapport de stage. Bordeaux: Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement du Sud-Ouest. 41f.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N.; ALFAKIH, E. 1994. Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien. Paris: Lavoisier. 372p.
- BALADES, J. D.; BERGA, P.; BOURGOGNE, P., 1998. Impact d'une tranchée drainante par temps de pluie. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. p.551-558.
- BALADES, J. D.; TRINCAT, A. M. 1998. Reduction des impacts des rejets urbains de temps de pluie: role d'une tranchée drainante. Bordeaux: Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement du Sud-Ouest. 39f.

- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; SOUZA, V. C. B.; COSTA, L. S. G. M. 1998. Utilização de tecnologias compensatórias no projeto de um sistema de drenagem urbana. In: CONGRESO NACIONAL DEL AGUA, 17., 1998, Santa Fe [e] SIMPOSIO DE RECURSOS HIDRICOS DEL CONOSUR, 2., 1998, Santa Fe. Anales. Santa Fe: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional Del Litoral. V.2, p.248-257.
- BARDIN, J.-P. 1999. Contribution à une meilleure connaissance du fonctionnement qualitatif des bassins de retenue soumis en permanence à un débit traversier avec la prise en compte des incertitudes. 443p. Tese (Doutorado) - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- BARRAUD, S. 2001. Hydrologie urbaine. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées, Unité de Recherche Genie Civil. Comunicação pessoal.
- BARRAUD, S. (Coord.). 2000. Amélioration des méthodes d'aide à la décision en matière de stratégies d'infiltration en vue de cerner les conditions de développement d'un service durable de l'assainissement: rapport final. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées. 109f.
- BARRAUD, S.; GAUTIER, A.; BARDIN, J. P.; RIOU, V., 1998. The impact of intentional infiltration on soil and groundwater - a case study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. p.449-456.
- BBA GROUP. [ca. 2000]. Geotêxtil especificações técnicas: bidim®. São Paulo. Não paginado.
- BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. 1979. Uso da Sonda de Nêutrons para pesquisa na área de Ciência do Solo: I - Técnicas de uso. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 13f.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J. -L.; LAPLACE, D.; JOANNIS, C.; CHEBBO, G. 2000. Mesures en Hydrologie Urbaine et assainissement. Paris: Lavoisier. 794p.
- BETTES, Roger. 1996. Infiltration drainage: manual of good practice. Longon: CIRIA. 107p. (Construction Industry Research and Information Association. Report 156).

- BOTELHO, M. H. C. 1998. Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nas cidades. São Paulo: Edgard Blücher. 237p.
- BOUWER, H. 1978. Groundwater hydrology. New York: McGraw-Hill. 480p.
- BOUWER, H. 1969. Theory of seepage from open channels. Advances in hydrosciences, New York, V.5, p121-172.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. 1964. Hidraulic properties of porous media. Fort Collins: Colorado State University. 27p. (Hydrology papers, n.3).
- BURDINE, N. T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. Transactions of the Society of Petroleum Engineers of AIME, New York, V.198, p.71-78.
- CAMPANA, N. A. 1995. Impacto da urbanização nas cheias urbanas. 214f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. [1990]. Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem. Porto Alegre: PRONI: IPH/UFRGS. 216p.
- CHEBBO, G. 1992. Solides des rejets pluviaux urbains caracterisation et traitabilité. 413P. Tese (Doutorado) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- CHOCAT, B. (coord.). 1997. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris: Lavoisier. 1124p.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. 2001. Calibração automática global do modelo IPH-2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju. Anais. [Porto Alegre]: ABRH. 1 CD.
- CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. 1998. Controle do escoamento com detenção em lotes urbanos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, V.3, n.4, p.19-31, out/dez.



- DETAI, M.; DUMOUTIER, N.; HAEFNER, H.; VIGNIER, V. 1994. Incidence de la réalimentation artificielle de nappe sur la qualité de la ressource. In: COLLOQUE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE INTERNATIONAL, 1994, Marseille. HYDROTOP 94. Marseille.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1992 Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, Washington, V.28, n.4. p.1015-1031.
- FUJITA, S. 1996. Measures to promote stormwater infiltration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 7., 1996, Hannover. Proceedings. Hannover. p.407-412.
- GAUTIER, A.; BARRAUD, S.; BARDIN, J. P. 1999. An approach to the characterisation and modelling of clogging in storm water infiltration facilities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. Proceedings. Sydney. p.1007-1015.
- GAUTIER, A. 1998. Contribution à la connaissance du fonctionnement d'ouvrages d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial urbain. 251p. Tese (Doutorado) – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- GENZ, F. 1994. Parâmetros para a previsão e controle de cheias urbanas. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GLADWELL, J. S. 1993. Urban water management problems in the humid tropics: some technical and non-technical considerations. In: BONELL, M.; HUFSCHMIDT, M. M.; GLADWELL, J. S. (Ed.). Hydrology and water management in the humid tropics. Cambridge: University Press. p.414-436
- GOLDENFUM, J. A.; SCHETTINI, E. B. C.; SILVESTRINI, J. H. 1990. Chuvas intensas em Porto Alegre: determinação de curvas I-D-F. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 26f.

- HAMACHER, R.; HAUßMANN, R.; AACHEN. 1999. Infiltration of storm water: a concept for urban drainage planning - construction - maintenance - costs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. Proceedings. Sydney. p.1217-1224.
- HARMS, R. W. 1996. Stormwater infiltration in Germany - Technical standards. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 7., 1996, Hannover. Proceedings. Hannover. p.497-501.
- HASEGAWA, T.; NAKANISHI, M.; FUJIURA, S. 1999. Evaluation method of storm water infiltration system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. Proceedings. Sydney. p.1927-1934.
- Horton, R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. Proceedings Soil Science Society of America, Madison, V.5, p.399-417.
- IDE, C. N.; DE LUCA, S. J. 1985. Qualidade da drenagem pluvial urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 6., 1985, São Paulo. Anais. São Paulo. ABRH. V.3. p.135-141.
- IBGE, 2002. Dados populacionais. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>.
- ISHIZAKI, K; IMBE, M.; NI, G; TAKESHIMA, M. 1996. Background of rainwater infiltration technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 7., 1996, Hannover. Proceedings. Hannover. p.377-382.
- IPH. 1997a. Avaliação e controle dos impactos ambientais decorrentes da urbanização. Pesquisa PRONEX MCT/CNPq/FINEP e MEC/CAPES. Porto Alegre: IPH-PROPUR-CEPSRM-CESUP: UFRGS, FEPAM-FZB:RS.
- IPH. 1997b. Controle de cheias devido à urbanização. Programa RECOPE-REHIDRO/MCT/FINEP.
- JONASSON, S. A., 1984. Dimensioning Methods for Stormwater Infiltration Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3., 1984, Göteborg. Proceedings. Göteborg: Chalmers University of Technology. V.3, p.1037-1046.

- KAMPFMANN, W.; WEGNER, H. 1996. Ecological improvement of the water cycle in urban areas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 7., 1996, Hannover. Proceedings. Hannover. p.413-418.
- LEEFLANG, M.; MONSTER, N.; VAN DE VEN, F. 1998. Design graphs for stormwater infiltration facilities. *Hydrological Sciences Journal*, Wallingford, V.43, n.2, p.173-180, Apr.
- MIKKELSEN, P. S. 1991. Design/Modelling of stormwater infiltration. In: GROTTKER, M.; SCHILLING, W. Hydrological and pollutional aspects of stormwater infiltration: proceedings of the Second European Junior Scientist Workshop. Luzern. p.21-36.
- MINAGAWA, K. 1990. The storm water infiltration system in housing complexes and the follow-up survey. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 5., 1990, Osaka. Proceedings. Osaka. p.771-776.
- MUALEM, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Washington, V.12, n.3, p.513-522, June.
- MUSY, A.; SOUTTER, M. 1991. Physique du sol Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- NASCIMENTO, N. O., BAPTISTA, M. B., SOUZA, V. C. B., 1997. Sistema 'HIDROURB' para o pré-dimensionamento de soluções compensatórias em drenagem urbana: parte 1 conceitos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória. Anais. São Paulo: ABRH. V.3, p.669-676.
- NASCIMENTO, N. O., 1996. Tecnologias Alternativas em Drenagem Urbana: curso. Belo Horizonte: Escola de Engenharia/UFMG.
- PHILIP, J.R. 1957. The theory of infiltration: 4. sortivity and algebraic infiltration equations. Soil Science, Baltimore, V.84, p.257-264.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. 2000. Plano diretor de drenagem urbana: manual de drenagem urbana. Porto Alegre. V.6.

- PORTO, R.; ZAHED FILHO, K.; TUCCI, C., BIDONE, F. 1997. Drenagem urbana. In TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH. Cap.21, p.805-847.
- SCHUELER, T. R., 1987. Controlling Urban Runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 229p.
- SILVEIRA, A. L. L. 2001. Problems of urban drainage in developing countries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 4., 2001, Lyon. Novatech 2001. Lyon: GRAIE. V.1, p.143-150.
- SILVEIRA, A. L. L. 1999. Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 2001, Belo Horizonte. Anais. [Porto Alegre]: ABRH. 1 CD.
- SILVEIRA, A. L. L. 1998. Hidrologia Urbana no Brasil. In BRAGA, B.; TUCCI, C.; TOZZI, M. (Org.). Drenagem Urbana: gerenciamento, simulação, controle. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Cap. 1, p.7-25. (ABRH Publicações n.3).
- SOUZA, V. C. B.; CRUZ, M. A. S.; ARAÚJO, P. R. 2001. Control of urban runoff at source in the Moinho basin Porto Alegre, Brasil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 4., 2001, Lyon. Novatech 2001. Lyon: GRAIE. V.1, p.1019-1022.
- TUCCI, C. E. M. 1995. Inundações urbanas. In TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (Org.). Drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH: Ed. da Universidade/UFRGS. Cap.1, p.15-36.
- TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. 1995. Controle do impacto da urbanização. In TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (Org.). Drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH: Ed. da Universidade/UFRGS. Cap.7, p.277-347.
- URBONAS, B.; STAHERE, P., 1993. Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 447p.

- VALIRON, F.; TABUCHI, J.-P. 1992. Maitrise de la pollution urbaine par temps de pluie: état de l'art. Paris: Lavoisier. 564p.
- VAN DER WERF, E.; ARGUE, J. R.; PEZZANITI, D. 1999. Some unexpected results from infiltration testes in Shallow clay over rock. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. Proceedings. Sydney. p.555-562.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, V.44, p.892-898.
- WARNAARS, E.; LARSEN, A. V.; JACOBSEN, P.; MIKKELSEN, P. S., 1998. Long-term hydrologic behavior of stormwater infiltration trenches in a central urban áreas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. p.533-540.
- WHEATER, H. S. [199-]. Hydrological processes: a course on the hydrological relationships of soils, vegetation and the atmosphere. London: Imperial College of Science and Technology. Paginação irregular.
- YAMADA, K. 1993. Infiltration pitch for individual houses to mitigate storm water impact. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 6., 1993, Niagara Falls. Proceedings. Niagara Falls. p.110-114.
- ZIMMER, U.; GEIGER, F. W.; CAESPERLEIN, G. 1999. Safety factors for the design of infiltration facilities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. Proceedings. Sydney. p.256-264.
- ZIMMER, U.; GEIGER, W. F.; WINZIG, G.; BURGHARDT, W. 1998. Use of finite element methods to optimise the construction of infiltration trenches and reservoir structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN DRAINAGE, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. p.505-512.

## ANEXOS

### A1 – Recomendações para projeto

O bom funcionamento das trincheiras de infiltração é função não só de um correto dimensionamento do dispositivo, mas principalmente da sua correta concepção e dos cuidados durante a fase de construção e manutenção. Estas recomendações servem de referência para a concepção e o projeto de trincheiras de infiltração para o controle do escoamento urbano na fonte e são o resultado de um trabalho de tese desenvolvido a partir de observações em duas trincheiras de infiltração instaladas no IPH-UFRGS, buscando a adaptação de técnicas existentes para as condições brasileiras.

#### A1.1 - Concepção de projeto

As trincheiras de infiltração são valetas preenchidas por material granular, resultando em um reservatório de pedras para onde a água do escoamento pluvial é direcionada, ficando armazenada até sua infiltração no solo e/ou sua drenagem para a rede pluvial. A Figura A1.1 apresenta a conformação de uma trincheira de infiltração típica.

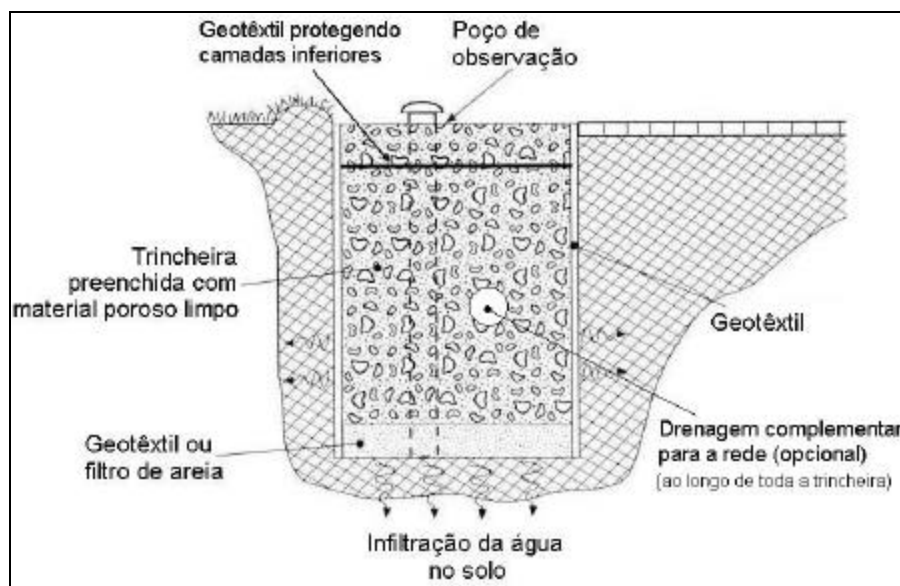


Figura A1.1 – Configuração sugerida para a trincheira

Deve ser observado que a forma da trincheira pode variar, em função do melhor arranjo urbanístico. Neste caso, sua utilização poderá ser feita ao longo de calçadas, em jardins, entre baias de estacionamentos, etc.

Quanto à sua disposição, as trincheiras podem ser superficiais ou enterradas. As trincheiras superficiais são preferíveis, em função da facilidade de acesso para manutenção e para avaliação do seu estado de funcionamento. As trincheiras enterradas são utilizadas quando há necessidade de uso do espaço para outras finalidades.

As trincheiras podem trabalhar no controle total do escoamento (saída somente por infiltração) ou no controle parcial (infiltração de parte do escoamento combinada com uma parcela drenada para a rede de drenagem).

As trincheiras para controle parcial são recomendadas quando a condutividade hidráulica do solo é muito baixa. Neste caso, coloca-se um dreno suplementar no seu interior, ligado à rede de drenagem. A máxima vazão de saída do dreno suplementar é definida pela regulamentação existente, pela vazão de pré-desenvolvimento e/ou pelas limitações das redes de jusante.

A escolha do material de enchimento deve levar em consideração dois fatores:

- 1) eficiência: dimensionamento otimizado pela utilização de material de alta porosidade;
- 2) integração com o espaço urbano: melhor integração com material mais nobre (seixo rolado, por exemplo).

Uma alternativa é a utilização de material mais poroso ou de menor custo no interior da trincheira e material mais nobre, como seixo rolado, na camada superficial. A porosidade de alguns materiais para enchimento é apresentada na Tabela A1.1. Os valores reais de porosidade devem ser medidos para cada caso.

Tabela A1.1 – Porosidade média para alguns materiais de enchimento

<b>Material</b>	<b>Porosidade efetiva (%)</b>
Brita grossa	30
Cascalho de granulometria uniforme	40
Brita graduada (menores que 1/4")	30
Areia	25
Seixo rolado	15-25

Fonte: (Urbonas e Stahre, 1993)

## **A1.2 - Ensaio de caracterização**

O bom dimensionamento das trincheiras de infiltração depende da correta caracterização do local de implantação. O principal parâmetro no projeto das trincheiras é a sua capacidade de absorção da água, representada pela condutividade hidráulica do solo. Diversos métodos são disponíveis para a determinação deste parâmetro, sendo os mais

simples o método do infiltrômetro de cilindros concêntricos (ou duplo anel) e o método do poço invertido. A condutividade hidráulica saturada apresentada por alguns tipos de solo é mostrada na Tabela A1.2. Estes valores de referência não dispensam ensaios de caracterização no local de implantação.

Tabela A1.2 – Condutividade hidráulica saturada de alguns tipos de solos

Tipo de solo	Condutividade hidráulica saturada (m/s)
Cascalho	$10^{-3}$ a $10^{-1}$
Areia	$10^{-5}$ a $10^{-2}$
Silte	$10^{-9}$ a $10^{-5}$
Argila saturada	$< 10^{-9}$
Solo cultivado	$10^{-10}$ a $10^{-6}$

(Fonte: Urbonas e Stahre, 1993)

Uma descrição resumida dos ensaios é apresentada a seguir, sendo detalhada por Cauduro e Dorfman (1990). Os ensaios devem ser repetidos em pelo menos três pontos diferentes no local de instalação da trincheira, de forma a se obter uma maior representatividade nos resultados. Além destes, recomenda-se um ensaio de textura, com o objetivo de determinar o perfil do solo.

#### A1.2.1 - Curva de infiltração: ensaio dos cilindros concêntricos

No ensaio de infiltração pelos cilindros concêntricos (Figura A1.2), considera-se o valor estabilizado como sendo a condutividade hidráulica saturada, conforme apresentado na A1.3.

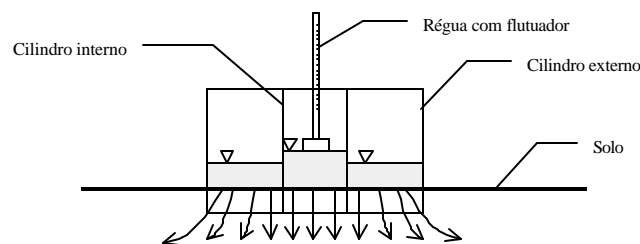


Figura A1.2 – Esquema de montagem do infiltrômetro de cilindros concêntricos

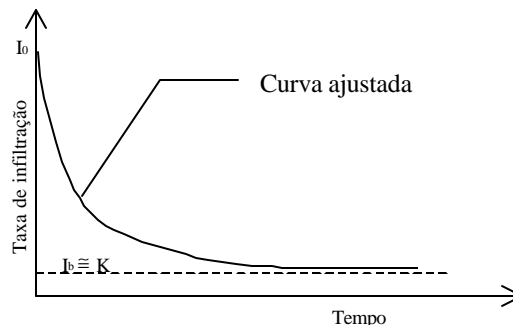


Figura A1.3 – Curva de infiltração característica



O ensaio consiste na instalação dos cilindros concêntricos, cravando-os no solo. Coloca-se água no cilindro externo e no cilindro interno (onde as leituras são feitas), disparando-se um cronômetro. Faz-se a leitura inicial de nível, continuando-se a leitura, em intervalos de tempo definidos previamente, até a estabilização (o que depende da natureza do solo).

A realização desse ensaio deve ser feita retirando-se a primeira camada de solo (cerca de 20 cm), para a obtenção de maior representatividade do ensaio em relação à instalação da trincheira.

#### A1.2.2 - Condutividade hidráulica: método do poço invertido

Esse método consiste na abertura de um poço com a utilização de um trado (geralmente de 12 cm). O poço é preenchido por algumas vezes antes do início do ensaio, com a finalidade de umedecer previamente o solo. Em seguida enche-se o poço e inicia-se imediatamente a leitura dos níveis d'água, determinando-se o rebaixamento em função do tempo.

No caso de o solo apresentar camadas com diferentes valores de condutividade hidráulica, pode-se fazer a medição em cada camada, bastando para isto que se faça o poço na profundidade da camada de interesse. O esquema de montagem é apresentado na Figura A1.4.

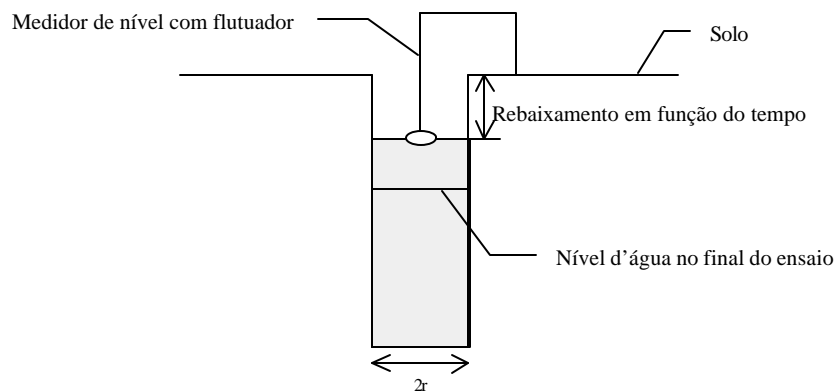


Figura A1.4 – Montagem do poço invertido

Em seguida ao ensaio em campo, efetuam-se os cálculos da condutividade hidráulica, baseando-se na seguinte equação:

$$K = 1,15.r. \frac{\log\left(h_{i(1)} + \frac{r}{2}\right) - \log\left(h_{i(2)} + \frac{r}{2}\right)}{t_{i(2)} - t_{i(1)}} \quad \text{Equação A1.1}$$

sendo:

$K$  = condutividade hidráulica

$r$  = raio do poço

$h_{i(1)} + r/2$  = altura correspondente a um dado ponto da reta interpolatriz

$h_{i(2)} + r/2$  = altura correspondente a um segundo ponto da reta interpolatriz

$t_{i(1)}$  = tempo correspondente à primeira leitura ( $h_{i(1)} + r/2$ ) na reta interpolatriz

$t_{i(2)}$  = tempo correspondente à segunda leitura ( $h_{i(2)} + r/2$ ) na reta interpolatriz

A reta interpolatriz é determinada como a reta de melhor ajuste para os valores obtidos, quando estes estão colocados em uma escala monolog (log para os valores de altura ( $h_i + r/2$ ) colocados nas ordenadas e escala linear para o tempo ( $t_i$ ) colocado no eixo das abcissas). Foi desenvolvido pelo setor de Água e Solo do IPH o programa “SOLOS”, que efetua estes cálculos a partir dos dados obtidos durante o ensaio.

### A1.3 - Metodologia de cálculo

A metodologia de dimensionamento utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, recomendada por Jonasson (1984) e Urbonas e Stahre (1993), é chamada de método da curva-envelope (“Rain-envelope-method”). É uma metodologia simples, baseada no balanço de massa na trincheira. O volume de armazenamento é determinado pela máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e saída. Uma vez que o volume acumulado de saída depende das dimensões da trincheira, este é um processo iterativo:

- 1) constrói-se a curva de volumes acumulados de entrada ( $V_e$ ), com base na curva IDF local;
- 2) estimam-se as dimensões iniciais da trincheira e determina-se o volume da trincheira para estas dimensões ( $V_t$ );
- 3) constrói-se a curva de volumes acumulados de saída ( $V_s$ ), com base na condutividade hidráulica saturada e nas dimensões atuais;
- 4) identifica-se o ponto de máxima diferença entre as curvas de volumes acumulados de entrada e saída ( $V_{m\acute{a}x} = V_e - V_s$ );
- 5) levando-se em consideração a porosidade do material de enchimento ( $f$ ), determinar o volume necessário de armazenamento ( $V_{dim} = V_{m\acute{a}x} / f$ ),

- 6) compara-se o volume da trincheira ( $V_t$ ) com o volume de dimensionamento ( $V_{dim}$ ):
- se  $V_t \gg V_{dim} \Rightarrow$  reduzem-se as dimensões da trincheira e recomeça-se no passo 3;
  - se  $V_t < V_{dim} \Rightarrow$  aumentam-se as dimensões da trincheira e recomeça-se no passo 3;
  - se  $V_t \geq V_{dim} \Rightarrow$  fim do processo de dimensionamento.

A determinação dos volumes acumulados de entrada pode ser feita utilizando-se a Equação A1.2. Nesta equação, considera-se um acréscimo de 25% pela utilização de bloco único de precipitação.

$$V_e = 1,25 \cdot \left[ 3600 \cdot C \cdot \left( \frac{I_T}{1000} \right) \cdot t \cdot A \right] \quad \text{Equação A1.2}$$

onde:

$V_e$  = volume acumulado de entrada;

$C$  = coeficiente de escoamento da superfície de contribuição;

$I$  = intensidade da precipitação com  $T$  anos de período de retorno e duração  $t$

$t$  = tempo;

$A$  = área de contribuição.

Os volumes acumulados de saída são obtidos pela Equação A1.3, baseada na equação de Darcy e considerando-se o solo saturado (gradiente hidráulico unitário).

$$V_s(t) = k \cdot \frac{A_{perc}}{2} \cdot 3600 \cdot t_p \quad \text{Equação A1.3}$$

onde:

$V_s$  = volume acumulado de saída;

$k$  = condutividade hidráulica saturada;

$A_{perc}$  = área de infiltração/percolação;

$t$  = tempo;

Em função da grande variabilidade das propriedades do solo e da dificuldade de determinar, de forma precisa, as propriedades do solo, recomenda-se a utilização de um coeficiente de segurança igual a 2 na redução da condutividade hidráulica saturada.

No caso de utilização de trincheira para controle parcial do escoamento, deve-se levar em consideração a estrutura de saída para a rede de drenagem no cálculo dos volumes acumulados de saída. A vazão de saída para a rede deve ser definida em função das vazões de pré-ocupação e/ou através de determinação do órgão responsável pela drenagem (capacidade de redes de jusante).

#### **A1.4 - Recomendações para a construção**

O bom funcionamento da trincheira a sua vida útil dependem, dentre outros fatores, de alguns cuidados na sua execução:

- 1) a instalação da trincheira só deve ser feita quando a área já tiver sido ocupada, evitando-se sua colmatação durante o processo de ocupação da área;
- 2) escolha do material de enchimento: o material de enchimento deve ser o mais limpo possível, evitando-se a colmatação precoce da estrutura;
- 3) deve-se instalar um poço de observação, de forma a se monitorar o desempenho do dispositivo;
- 4) a instalação de estruturas de controle de sedimentos é fundamental, principalmente nos casos de trincheira enterrada ou quando a contribuição é direta (sem faixa gramada);
- 5) as trincheiras não devem ser instaladas em áreas com grande densidade de árvores: as folhas das árvores aceleram o processo de colmatação da trincheira e as raízes podem provocar o rompimento do geotêxtil, eliminando-se a proteção por ele promovida.

#### **A1.5 - Dispositivos auxiliares para controle de material em suspensão**

O aporte de sedimentos para a trincheira deve ser controlado, sob risco de colmatação precoce da primeira camada, reduzindo o intervalo necessário para uma manutenção mais dispendiosa. Desta forma, são sugeridos dois níveis de controle do aporte de material em suspensão:

- 1) havendo possibilidade, desconexão das áreas impermeáveis: deixar uma faixa gramada entre o ponto de contribuição e a trincheira;
- 2) instalação de caixas de areia e/ou telas para separação de material sólido;

### **A1.6 - Manutenção**

As trincheiras superficiais exigem trabalhos de manutenção relativamente frequentes, sobretudo quando elas estão instaladas em locais com vegetação. Os trabalhos de manutenção consistem em:

- limpeza de dispositivos auxiliares de controle de material em suspensão;
- remoção de vegetação;
- substituição da primeira camada da trincheira (incluindo geotêxtil), em caso de colmatação que prejudique a entrada de água (colmatação crônica da primeira camada).

A frequência destas atividades varia de acordo com as características da área de contribuição e do local de instalação do dispositivo. Deve-se, portanto, fazer verificações periódicas das condições de funcionamento dos dispositivos, principalmente após eventos chuvosos importantes.

### **A1.7 – Custos**

Os custos de instalação de trincheiras de infiltração dependem, basicamente, da área a ser drenada e da condutividade hidráulica do solo. Tais custos estão relacionados a:

- 1) mão de obra: escavação e enchimento da trincheira;
- 2) materiais: enchimento, geotêxtil e poço de observação.

O custo de instalação de uma trincheira de 10 m de comprimento, 1,0 m de profundidade e 0,8 m de largura é da ordem de R\$ 450,00. Uma trincheira com estas dimensões é suficiente para drenar uma área de cerca de 350 m<sup>2</sup> para um solo com condutividade hidráulica saturada da ordem de 30 mm/h.

### **A1.7 - Limitações**

A utilização de trincheiras de infiltração é recomendada para pequenas áreas de drenagem, tais como lotes individuais, quarteirões, praças, parques. Seu uso não é recomendável nos seguintes casos:

- camada impermeável pouco profunda;
- alta declividade do terreno no local de instalação;
- lençol freático elevado ou terrenos alagadiços;

- áreas sujeitas a efeitos de maré;
- áreas com riscos de deslizamentos;
- devem ser tomados cuidados adicionais em áreas industriais, com grande potencial de contaminação do solo e lençol freático e/ou em aterros;

***A2 - Informações adicionais***

