

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Lucas Fiegenbaum de Oliveira

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE
DISPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO PARA CONTROLE DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

Porto Alegre
dezembro de 2016

LUCAS FIEGENBAUM DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE
DISPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO PARA CONTROLE DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Joel Avruch Goldenfum

Porto Alegre
dezembro de 2016

LUCAS FIEGENBAUM DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE
DISPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO PARA CONTROLE DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2016

Prof. Joel Avruch Goldenfum
Dr. pela University of London
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Joel Avruch Goldenfum (UFRGS)
Dr. pela University of London

Prof. Fernando Dornelles (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. André Luiz Lopes da Silveira (UFRGS)
Dr. pela Université Montpellier

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estabelecer comparações a respeito de dois dispositivos de infiltração que atuam sobre o controle de cheias: foram analisados o pavimento permeável e as duas trincheiras implantadas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS. A respeito das comparações, foram levados em consideração os aspectos, primeiramente, referentes à eficiência do controle do escoamento superficial, ou seja, qual dos dois dispositivos teve mais sucesso quanto à infiltração da água da respectiva área de contribuição no dispositivo. Posteriormente a isso, foi feita a análise comparativa referente aos custos de implantação: nesse caso, o critério levado em consideração foi a relação custo-benefício, levando em consideração o custo de implantação relacionado à área de contribuição. Por fim, foi comparado qual seria o custo para a implantação de uma rede de drenagem convencional no local, para realmente se poder concluir que os dispositivos são realmente viáveis. Para a revisão bibliográfica, foram utilizados livros, artigos, dissertações e teses referidas durante o trabalho. O que se pode concluir é que em relação ao desempenho do controle do escoamento superficial, ambos os dispositivos obtiveram resultados satisfatórios sobre o que estavam propondo. Quanto ao custo de implantação, os pavimentos permeáveis apresentaram um custo maior por área de drenagem do que as trincheiras de infiltração. Feita a comparação sobre custos entre o pavimento permeável e o sistema de drenagem convencional para uma área de pavimentação já existente, o sistema convencional apresentou os menores custos, embora não seja a solução ambiental mais adequada, entretanto, considerando uma área onde não havia pavimentação ainda, como um empreendimento novo, por exemplo, a implantação de pavimentos permeáveis mostrou-se com um custo menor, se comparado à implantação de uma rede de drenagem convencional mais a pavimentação dessa área, assim, recomendou-se a utilização da técnica dos pavimentos permeáveis para o caso de pavimentação a ser executada.

Palavras-chave: pavimento permeável; trincheiras; escoamento superficial; custo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa	16
Figura 2 – Cronograma de pesquisa	17
Figura 3 – Alteração do balanço hídrico após urbanização.....	20
Figura 4 – Diferenças no hidrograma devido à urbanização.....	21
Figura 5 – tipos de pavimentos permeáveis.....	25
Figura 6 – Seção transversal de uma trincheira de infiltração.....	26
Figura 7 – representação do fluxograma de viabilidade de pavimentos permeáveis.....	28
Figura 8 – Locais onde foram realizados ensaios.....	29
Figura 9 – Ensaio dos anéis concêntricos.....	30
Figura 10 – levantamento topográfico do local.....	33
Figura 11 – Ensaio do poço invertido.....	33
Figura 12 – esquema do ensaio do piezômetro auto-obturador.....	35
Figura 13 – Dimensões do reservatório do pavimento permeável.....	39
Figura 14 – quadro-resumo do dimensionamento para trincheiras.....	62
Figura 15 – projeto da trincheira I.....	63
Figura 16 – área de contribuição da trincheira II.....	63
Figura 17 – projeto da trincheira II.....	64
Figura 18 – área de contribuição da trincheira II.....	65
Figura 19 – tempo de retorno dos principais eventos observados.....	68
Figura 20 – relação entre volume escoado e precipitação para a trincheira I.....	68
Figura 21 – correlações entre as precipitações dos pluviógrafos e interceptação no pluviógrafo Galpão.....	69
Figura 22 – Coeficiente de escoamento na trincheira II.....	69
Figura 23 – dados de infiltração para a trincheira I.....	70
Figura 24 – Curva de infiltração da trincheira II.....	71
Figura 25 – observação da histerese na trincheira I.....	72
Figura 26 – Superdimensionamento devido à simplificação do método.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – taxa de infiltração para a parte de blocos vazados.....	31
Tabela 2 – taxa de infiltração para a parte de asfalto poroso.....	32
Tabela 3 – taxa de infiltração para a parte de blocos vazados.....	32
Tabela 4 – classificação dos solos.....	34
Tabela 5 – resultados encontrados para condutividade hidráulica.....	34
Tabela 6 – condutividade hidráulica pelo piezômetro auto obturador.....	35
Tabela 7 – propriedades do solo pelo ensaio CBR.....	36
Tabela 8 – valores adotados pelo autor.....	38
Tabela 9 – tabela resumo dos eventos de precipitação.....	42
Tabela 10 – valores do escoamento superficial.....	43
Tabela 11 – tabela-resumo dos dados de armazenamento dos reservatórios.....	45
Tabela 12 – valores de infiltração durante a precipitação.....	47
Tabela 13 – taxas de infiltração durante o período de esvaziamento.....	49
Tabela 14 – implantação do pavimento permeável com blocos vazados.....	50
Tabela 15 – implantação do pavimento permeável com asfalto poroso.....	50
Tabela 16 – orçamento previsto para a manutenção do pavimento permeável.....	51
Tabela 17 – perfil do solo onde foi implantada a trincheira I.....	54
Tabela 18 – perfil do solo onde foi implantada a trincheira II.....	55
Tabela 19 – resultados encontrados para a condutividade hidráulica da trincheira I.....	56
Tabela 20 – resultados encontrados pelo método do poço invertido.....	57
Tabela 21 – resultados encontrados para a condutividade hidráulica da trincheira II.....	58
Tabela 22 – dados pluviométricos da trincheira I.....	66
Tabela 23 – dados pluviométricos da trincheira II.....	67
Tabela 24 – orçamento para as trincheiras de infiltração do IPH.....	74
Tabela 25 – orçamento para manutenção da trincheira I.....	74
Tabela 26 – orçamento para manutenção da trincheira II.....	75
Tabela 27 – quadro comparativo com os custos de cada dispositivo.....	77
Tabela 28 – comparação dos custos da rede de drenagem com o pavimento permeável..	79
Tabela 29 – comparação dos custos de implantação em um local sem pavimentação.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

LL - limite de liquidez do solo

IP - índice de plasticidade do solo

ISC - índice de suporte califórnia do solo

V_{máx} - volume máximo de armazenamento do pavimento permeável

β - produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo

T - período de retorno

q_s - vazão de saída estimada para o pavimento permeável

η - porosidade do material de enchimento da trincheira

H - altura do reservatório do pavimento permeável e da trincheira

H' - altura do reservatório, considerando a declividade do terreno

I_o – declividade do terreno

C - coeficiente de escoamento

i - intensidade pluviométrica

A - área de contribuição da trincheira

ΔS - variação no armazenamento no pavimento permeável

P – precipitação acumulada

Inf – taxa de infiltração no pavimento permeável

A_{total} – área total de contribuição do pavimento permeável

A_{molhada} – área molhada do pavimento permeável

γ - razão entre a área de percolação e volume do dispositivo

B - largura da trincheira

L - comprimento da trincheira

ΔV - variação do volume de água dentro da trincheira

Δt - variação do tempo do armazenamento de água na trincheira

Q_e - vazão de entrada da trincheira

Q_s - vazão de saída da trincheira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVO DO TRABALHO	15
2.3 HIPÓTESE	15
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	16
2.6 DELINEAMENTO	16
3 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO E MEDIDAS DE CONTROLE	18
3.1 IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO.....	19
3.1.1 Aumento da área impermeável	19
3.1.2 Diminuição do tempo de concentração	20
3.2 MEDIDAS DE CONTROLE	21
3.2.1 Medidas não estruturais	21
3.2.2 Medidas estruturais	22
3.2.2.1 Pavimentos permeáveis	23
3.2.2.2 Trincheiras de infiltração	25
4 ANÁLISE DOS DIPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO DO IPH	27
4.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL DO IPH.....	27
4.1.1 Generalidades	27
4.1.2 Características Dos Locais De Implantação	29
4.1.3 Determinação Dos Materiais	36
4.1.3.1 Camada Superficial	36
4.1.3.2 Camada base ou reservatório.....	37
4.1.3.3 Interface entre as camadas.....	37
4.1.4 Critérios De Dimensionamento	38
4.1.5 Análise do desempenho	41
4.1.5.1 Chuvas.....	41

4.1.5.2 Coeficiente de Escoamento Superficial.....	42
4.1.5.3 Armazenamento no Reservatório.....	44
4.1.5.4 Taxa de infiltração no solo.....	45
4.1.6 Análise de custo	49
4.2 TRINCHEIRA I E II DO IPH.....	51
4.2.1 Generalidades	51
4.2.1.1 Vantagens e desvantagens da utilização.....	51
4.2.1.2 Manutenção	52
4.2.1.3 Execução.....	53
4.2.1.4 Gestão.....	53
4.2.2 Caracterização dos Locais de Implantação.....	54
4.2.2.1 Textura do solo	54
4.2.2.2 Ensaio de infiltração para as trincheiras I e II.....	55
4.2.3 Critérios de dimensionamento.....	58
4.2.4 Análise de desempenho.....	65
4.2.4.1 Chuvas.....	65
4.2.4.2 Interceptação vegetal e escoamento superficial.....	68
4.2.4.3 Vazões e velocidades de saída.....	70
4.2.4.4 O fenômeno da histerese na trincheira I.....	71
4.2.4.5 Superdimensionamento da trincheira pela simplificação do método.....	72
4.2.5 Análise de custo.....	73
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
5.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS DISPOSITIVOS NO CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	76
5.2 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DOS DISPOSITIVOS.....	77
5.3 IMPLANTAÇÃO DO PAVIMENTO PERMEÁVEL EM LOCAL COM PAVIMENTAÇÃO EXISTENTE.....	78
5.4 IMPLANTAÇÃO DO PAVIMENTO PERMEÁVEL EM UM LOCAL SEM PAVIMENTAÇÃO EXISTENTE.....	80
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Desde que começou a se organizar em sociedade, o ser humano tem mantido uma relação estreita com a água. Prova disso é que as primeiras civilizações sempre procuraram se alocar em margens de rios, para que o seu aproveitamento fosse otimizado. Paralelo a isso, foi necessário desenvolver estruturas que levassem para fora das cidades as águas residuais, seja a proveniente do esgoto, seja proveniente da chuva. Com o passar do tempo, o processo de urbanização tornou-se crescente, o que por consequência modificou o ambiente nas bacias, fazendo com que a precipitação esteja sujeita a caminhos alternativos que não sejam a interceptação vegetal, o escoamento superficial e o subterrâneo.

Uma das principais consequências da urbanização é a impermeabilização da bacia, aumentando o escoamento superficial e diminuindo o subterrâneo, fazendo com que haja um aumento da vazão de pico, em um tempo menor, sendo isso o maior contribuinte para o acontecimento de inundações. Para minimizar o problema do acúmulo da água pluvial nas cidades, as antigas soluções consistiam na canalização dessa água e transferência para algum corpo d'água, como um rio próximo, sem se preocupar com as consequências disso. Quando tal procedimento é adotado, a velocidade de escoamento aumenta, causando problemas como a erosão, transferindo os impactos para jusante. Tal abordagem para combater as inundações é conhecida como higienista.

No entanto, na maioria dos países desenvolvidos a priorização abordagem higienista vem sendo combinada com o uso de recursos sustentáveis, onde a água pluvial é amortecida com o gerenciamento integrado com a infraestrutura urbana, preservando as funções naturais da infiltração e a rede natural de escoamento. Esse tipo de desenvolvimento é conhecido como LID (Low Impact Development). Apesar disso, o Brasil é um país ainda em desenvolvimento quanto a essa nova tendência no tratamento da água pluvial, pois a maioria das obras realizadas aqui ainda tem relação com o aumento da tubulação de esgoto pluvial ou aumento de canais de escoamento, e o número de estudos referentes aos modelos sustentáveis de esgotamento pluvial na língua portuguesa e levando em conta o contexto urbano, social e econômico do Brasil ainda são escassos, o que motiva o trabalho.

Neste trabalho, então, será efetuada, através de dados existentes, uma análise comparativa entre dispositivos de infiltração, visando avaliar o desempenho destas estruturas no controle

da geração de escoamento superficial e também os custos para implantação e manutenção. Serão escolhidos e avaliados para esse estudo, os dispositivos de infiltração localizados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes de pesquisa do trabalho serão descritas nos itens a seguir:

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é baseada no seguinte propósito: qual dispositivos de infiltração, considerando o pavimento permeável e a trincheira de infiltração tem o controle do escoamento superficial mais eficiente e qual tem o melhor custo benefício, tanto referente à implantação, bem como a manutenção?

2.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho está centrado em avaliar o desempenho de dispositivos de infiltração, no controle da geração de escoamento superficial, através de dados de chuvas existentes, para avaliar a viabilidade técnica das implantações, no que se refere à eficiência do controle do escoamento e o custo de implantação e manutenção.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese que se trabalha é a de que os pavimentos permeáveis e as trincheiras de infiltração são dispositivos eficientes no controle do escoamento superficial cujo aumento do seu volume é uma consequência do processo de urbanização.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a analisar diferentes tipos de dispositivos de infiltração bem como compará-los entre si no que tange a eficiência de escoamento superficial em áreas de contribuição específicas

2.5 LIMITAÇÕES

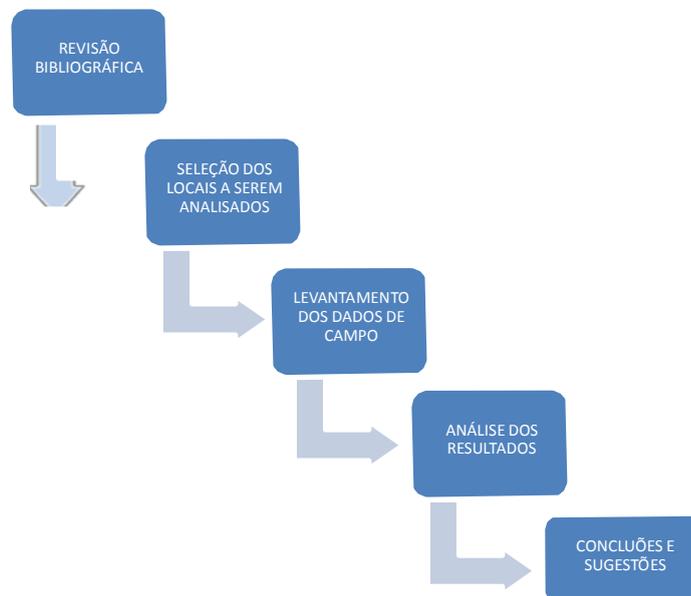
A limitação do trabalho se dá pelo fato dos dispositivos estarem localizados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, assim, a implantação de ambos os dispositivos em um local diferente, requereria estudos específicos sobre a nova área.

2.6 DELINEAMENTO

A realização do trabalho será dada de acordo com os processos a seguir, sendo que a sequência será dada pela figura 1 abaixo. Também estará descrito o cronograma das atividades na figura 2, e, por fim, será feita a descrição de cada atividade:

- a) revisão Bibliográfica;
- b) seleção dos locais a serem analisados;
- c) levantamento dos dados de campo;
- g) análise dos resultados;
- h) conclusões e sugestões.

Figura 1 - Diagrama das etapas de pesquisa



(fonte: Autor)

A primeira parte do trabalho consiste em pesquisa bibliográfica para a obtenção e revisão de conceitos importantes sobre o assunto, que serão utilizados durante todo o projeto. Para isso foram utilizados livros, artigos científicos, e também trabalhos de conclusão de curso referentes ao tema.

A segunda parte se refere à identificação e seleção de locais para aplicação do estudo. Essa parte é importante para se determinarem quais serão os sistemas de infiltração que serão avaliados no presente trabalho, no caso, foram escolhidos os dispositivos de infiltração do IPH.

Posteriormente a isso foram analisados os dados de campo já existentes referentes tanto às chuvas como também as características dos solos dos locais onde os dispositivos de infiltração foram implantados.

Por fim, a partir da análise dos dados encontrados, foi definido se o dispositivo é, ou não, eficiente, e, se a sua implantação é viável levando em consideração a eficiência no controle do escoamento superficial e ao seu custo de implantação e manutenção e foi sugerido, enfim, qual seria a melhor solução a ser adotada para um determinado local.

Figura 2: Cronograma do Projeto de Pesquisa

Etapas	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
Revisão Bibliográfica	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
seleção dos locais a serem simulados							x			
levantamento dos dados de campo								x	x	x
análise dos resultados										x
conclusões e sugestões										x

(fonte: Autor)

3 – EFEITOS DA URBANIZAÇÃO E MEDIDAS DE CONTROLE

De acordo com Tucci (2007, p. 87) ciclo hidrológico terrestre consiste em um processo natural no qual a água precipita sobre a superfície, sofre interceptação da vegetação e, pode transpirar, infiltrar, escoar superficialmente, ou evaporar para a atmosfera,. A água que infiltra penetra no solo e pode retornar para a superfície ou alimentar aquíferos. O excedente na superfície forma caminhos de escoamento natural sobre a superfície natural do terreno. Quando ocorre o desenvolvimento urbano, esse sistema natural sofre importantes alterações que afetam o balanço hídrico previamente existente, ainda mais se combinados com gestões inadequadas no ambiente urbano.

Baptista et al. (2005, p. 16) fornecem um pequeno histórico do problema da urbanização. O aumento das aglomerações urbanas a partir do século XIX trouxe dificuldades e desconforto resultantes da precariedade da infraestrutura de controle de presença de água nas cidades, sejam os cursos que já existiam naturalmente, como também as águas servidas e as águas de origem pluvial, sendo isso um fator determinante para as epidemias de cólera e tifo que assolaram a Europa na época

No século XX, constatou-se o aumento da população urbana. Em 1950 a população urbana mundial representava 25%, porém, é projetado que esse índice alcance 55% em 2025 (BAPTISTA et al., 2005, p. 17). Além disso, o fenômeno da acentuação da população urbana pode ser observado no Brasil, já que o índice já atingia 81% no ano 2000. Por fim Baptista et al. (2005, p. 20-21) concluem que a intensificação dos processos de urbanização com seus impactos, juntamente com o contexto da demanda ambiental crescente, tornou a questão da drenagem ambiental bastante complexa, pois envolve aspectos ambientais, sanitários e paisagísticos, além dos aspectos técnicos o que faz com que uma nova abordagem para o tratamento da questão da drenagem urbana, considerando agora sua interação com meios sustentáveis se imponha, levando a questionamentos dos aspectos técnicos atualmente adotados.

Por fim Goldenfum (2013, p. 4) cita que os problemas da impermeabilização de um ambiente anteriormente rural direcionam maior parcela de água pluvial a um escoamento superficial, dada a redução da interceptação, infiltração e evaporação que por consequência provocar uma

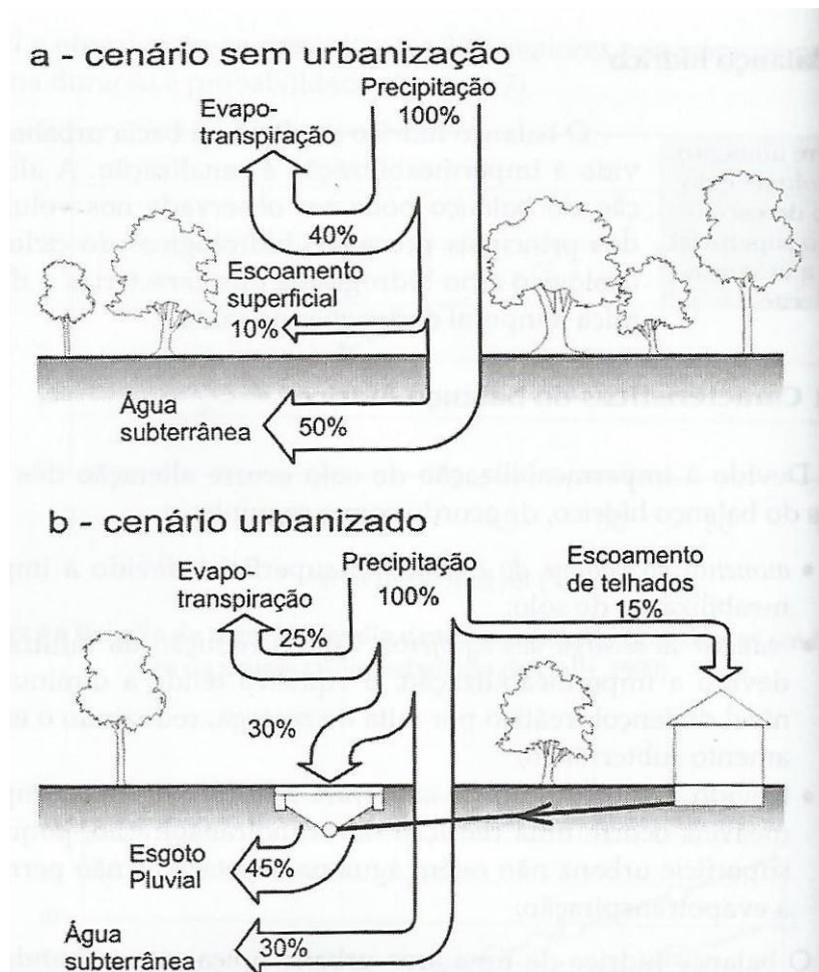
aceleração do movimento da água dentro da bacia, por reduzir o amortecimento e canalizar o escoamento

3.1 IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO

3.1.1 Aumento da área impermeável

Área impermeável é a superfície que contribui diretamente, ou através de condutos para a rede de drenagem gerando escoamento superficial. Há de se observar que nem todas as áreas têm contribuição direta, caso haja escoamento para superfícies permeáveis. As consequências do aumento da área impermeável segundo Tucci (2007, p. 95) se concentram em: aumento do volume de escoamento superficial, devido à retirada de uma superfície permeável, reduzindo a infiltração, a retirada da vegetação, que tem por consequências a redução da interceptação vegetal, reduzindo a evapotranspiração e também a redução da recarga dos aquíferos, já que há uma diminuição das superfícies de infiltração, assim, ele tende a diminuir o nível do lençol freático por falta de recarga, reduzindo o escoamento subterrâneo, como pode ser visto na figura 3

Figura 3: Alteração do balanço hídrico após urbanização

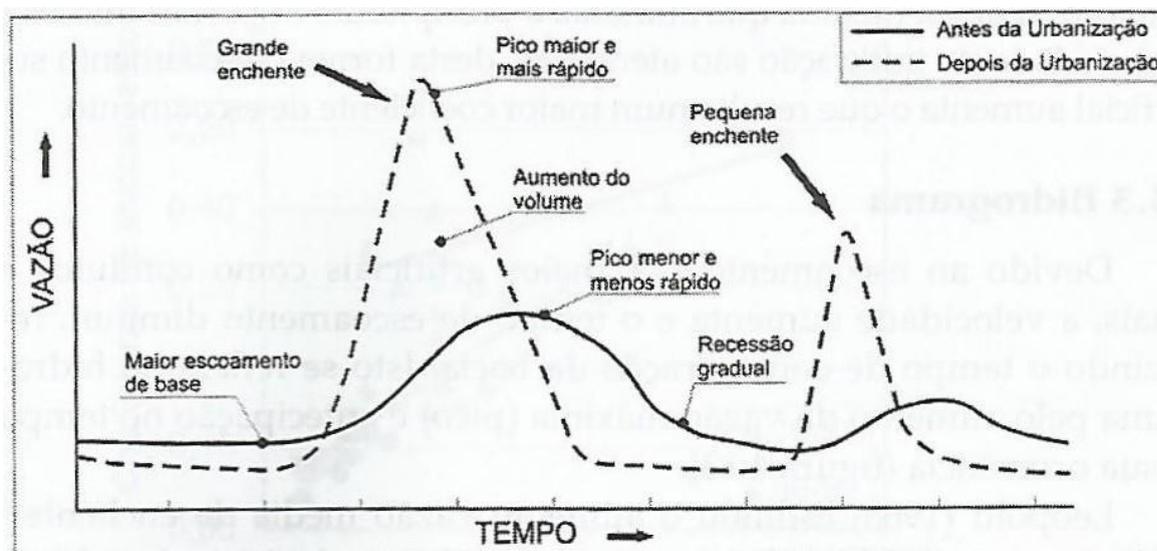


(fonte: TUCCI., 2007, p. 96)

3.1.2 Diminuição no tempo de concentração

De acordo com Tucci (2007, p. 90), define-se tempo de concentração como o tempo que o escoamento superficial leva para se deslocar do ponto mais extremo até a seção de saída da bacia hidrográfica. O tempo de concentração é reduzido quando ocorre a impermeabilização e principalmente quando são construídos canais e condutos que aumentam a velocidade de escoamento superficial. Esse aumento se reflete no hidrograma, aumentando a vazão máxima, em um tempo de ocorrência inferior como mostra a figura 4:

Figura 4: Diferenças no hidrograma devido à urbanização



(fonte: TUCCI., 2007, p. 102)

3.2 MEDIDAS DE CONTROLE

Segundo Tucci (2007, p. 141), as medidas de controle de inundação podem ser classificadas em dois grandes grupos: as medidas estruturais e as medidas não-estruturais.

3.2.1 Medidas não estruturais

As medidas não estruturais buscam minimizar os efeitos de enchentes sem construção de obras, incentivando a convivência da população com as inundações através de medidas preventivas, tais como sistemas de previsão e alerta, que visam evacuar a área antes da ocorrência da inundação, fazendo com que a população tenha mais tempo para tomar as medidas para reduzir os prejuízos. Ainda é possível realizar o zoneamento de áreas inundáveis, que é baseada no risco de enchente para um dado período de retorno em zonas da bacia. Esse estudo é importante pois a partir dele é que são determinadas que tipos de ocupações podem ser feitas nas zonas da bacia através de uma legislação e fiscalização apropriada (TUCCI, 2007, p. 157-172). Tucci (2007, p.173) ainda comenta sobre construções à prova de enchente que consistem em medidas como vedação nas aberturas das estruturas, elevação das estruturas existentes, construção de novas estruturas sobre pilotis, além da importância de uma regulamentação da ocupação da área de inundação, pois isso tenta

impedir que áreas de risco sejam ocupadas de forma irregular, sem o conhecimento das autoridades.

3.2.2 Medidas estruturais

As medidas estruturais são obras de engenharia que modificam o sistema fluvial, visando reduzir o risco de enchentes. As medidas estruturais podem ser classificadas em extensivas, quando as obras se concentram em modificações na bacia, e intensivas, quando as obras se concentram em modificações nos rios.

Tucci (2007, p. 147) explica que as medidas extensivas podem atuar tanto em uma parte da bacia como em sua totalidade. Esse tipo de medida combina efeitos de proteção ambiental, melhoria no plantio e conservação do solo com redução da vazão e pode-se considerar medidas como a cobertura vegetal, onde é armazenado parte do volume d'água pela interceptação vegetal, para aumentar a evapotranspiração e reduzir a velocidade de escoamento superficial pela bacia hidrográfica. É uma medida melhor aplicável para bacias com áreas pequenas, com área menor que 10 km² e o seu efeito é grande para eventos mais frequentes de alto risco de ocorrência. Outra medida desse tipo trata da recuperação ou da preservação de matas ciliares, que cria uma área de armazenamento temporário da água pluvial, entre o uso do solo limítrofe e o rio. Nesse caso, o efeito sobre a inundação é menor, mas associado à conservação das margens, permite manter a seção de escoamento e reduz o escoamento superficial direto sobre o rio.

As medidas estruturais intensivas, como já dito anteriormente, modificam o sistema fluvial através de obras no rio, tais como reservatórios, onde o controle de enchentes funciona retendo parte do volume do hidrograma, reduzindo a vazão de pico e o impacto à jusante da barragem (TUCCI, 2007, p. 148). Ainda podem ser considerados os diques, que são muros laterais de terra ou concreto construídos a uma certa distância da margem para protegerem populações ribeirinhas contra inundações da margem (TUCCI, 2007, p.153). O princípio se dá pelo confinamento da água, diminuindo o tamanho do leito, assim, para uma mesma vazão, a altura da lâmina d'água será maior, assim, é considerado um sistema de proteção localizado e devem-se evitar alturas muito elevadas, pois existe o risco de rompimento para uma enchente maior que a do projeto e, nesse caso, o impacto ambiental é maior do que se o dique não existisse (TUCCI, 2007, p.154), e, finalmente, as modificações no rio: As modificações visam

aumentar a vazão para um mesmo nível de lâmina d'água, e isso pode ser feito tanto aumentando a seção transversal do rio, como diminuindo sua rugosidade, nesse caso, o efeito seria um aumento da velocidade de escoamento, mas vale lembrar que essas medidas podem causar efeitos de sedimentação ou erosão à montante ou à jusante (TUCCI, 2007, p.155).

Dentre as medidas estruturais, destacam-se as medidas de controle de baixo impacto (LID - Low Impact Development), definidas por Tucci (2007) como o gerenciamento integrado da infraestrutura urbana, definindo a ocupação do espaço com preservação das funções naturais como a infiltração e a rede natural de escoamento, e, assim, priorizando a construção de pequenas estruturas de controle na fonte, ou seja, o local onde a precipitação atinge o solo. Estas estruturas buscam propiciar condições naturais de escoamento, incentivando o uso de dispositivos de infiltração, tais como pavimentos permeáveis, valas de infiltração, trincheiras de infiltração.

Nos próximos itens são apresentadas descrições de dispositivos de controle que foram utilizadas no presente trabalho, onde pretende-se comparar o desempenho de estruturas de infiltração no controle da geração de escoamento superficial.

3.2.2.1 Pavimentos permeáveis

Baptista et al. (2005, p. 216) descrevem que, em áreas urbanas, as superfícies destinadas ao sistema viário podem ocupar até 30% da área de drenagem da bacia e que a prática no Brasil é a adoção de pavimentos impermeáveis, o que contribui para o deflúvio em áreas superficiais e inundações urbanas. Visando controlar o escoamento pluvial na superfície, existem os pavimentos permeáveis e os pavimentos porosos. O autor também identifica três níveis de atuação desses pavimentos no controle da produção do escoamento superficial:

- a) pavimentos dotados de revestimentos superficiais permeáveis, que reduzem a velocidade escoamento superficial, ao mesmo tempo que retém pequenos volumes na própria superfície e infiltra parte das águas pluviais;
- b) pavimentos dotados de estrutura porosa, onde é efetuada detenção temporária da água pluvial, amortecendo as vazões e alterando o pico do hidrograma;
- c) pavimentos dotados de estrutura porosa e dispositivos facilitadores de infiltração, assim, tanto ocorre a detenção temporária como a infiltração da água pluvial. Portanto, ocorre o amortecimento das vazões, alteração no pico do hidrograma e redução do volume escoado;

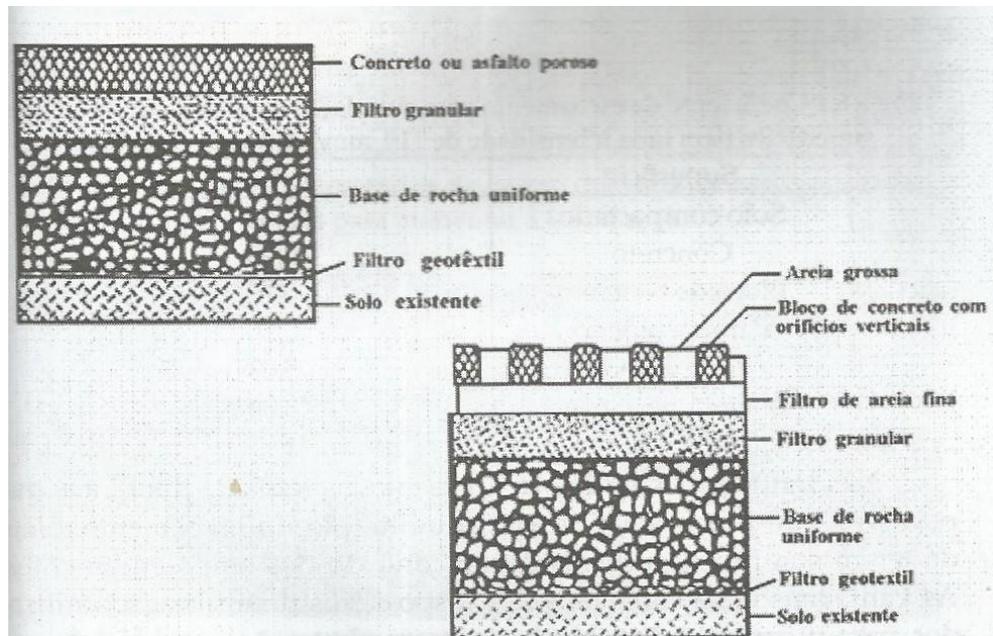
Baptista et al. (2005, p. 216) ainda afirmam que adotar um pavimento com superfície permeável ou semipermeável por si só não representa ganho significativo para os sistemas de drenagem. Logo, recomenda-se a adoção de uma estrutura porosa com reservação temporária das águas pluviais em seu interior, com possibilidade de infiltração

Ainda sobre pavimentos permeáveis Tucci (2007, p. 202) prevê que os mesmos podem ser de bloco vazado, concreto ou asfalto, sendo que esses dois últimos são construídos da mesma forma que pavimentos convencionais, porém, sem a presença de material fino. Sobre os aspectos construtivos, é necessário que a base esteja, pelo menos, 1,2 m acima do nível do lençol freático e o sistema de drenagem deve prever o esgotamento do volume existente na camada de solo num período de 6 a 12 horas.

Tucci (2007, p. 202) também avalia que as vantagens desse tipo de controle são a redução do escoamento superficial previsto em relação à superfície impermeável, possibilidade de redução dos condutos da drenagem pluvial, redução dos custos com drenagem pluvial e também a redução da lâmina d'água de estacionamentos e passeios, ao passo que as desvantagens são as de que o sistema requer uma manutenção frequente para que se evite o fenômeno da colmatção, possibilidade de contaminação do lençol freático e um maior custo direto de construção. A figura 5 mostra as possibilidades de constituição de um pavimento permeável.

Por fim, Silveira e Goldenfum (2007, p. 4) recomendam que todo pavimento tenha um reservatório para armazenamento da água da chuva, porque, na ausência desse, a eficiência do controle do escoamento se dará apenas pela capacidade de infiltração do mesmo, o que torna a solução menos eficiente

Figura 5: tipos de pavimentos permeáveis



(fonte: TUCCI, 2007, p. 203)

3.2.2.2 Trincheiras de infiltração

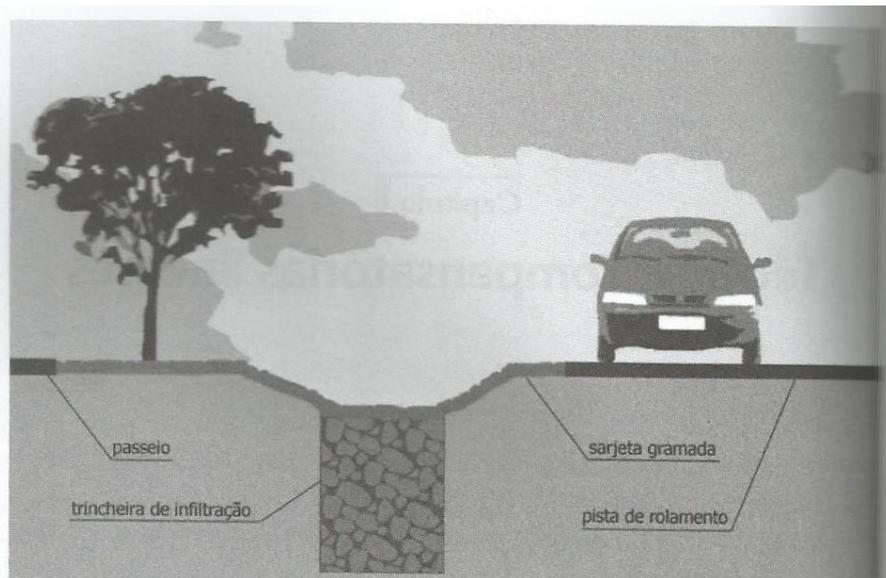
De acordo com Baptista et al. (2005, p. 173), trincheiras de infiltração são técnicas compensatórias lineares, implantadas junto à superfície ou, a pequena profundidade com a finalidade de recolher as águas pluviais de afluência perpendicular a seu comprimento, tanto favorecendo a infiltração como o armazenamento temporário. Diferentemente das valas, as trincheiras possuem dimensões reduzidas, embora o comprimento longitudinal seja mais significativo. O autor ainda descreve as trincheiras como dispositivos bastante versáteis, pois podem ser utilizadas em canteiros centrais e passeios, ao longo de sistemas viários, junto a estacionamentos, jardins terrenos esportivos e áreas verdes em geral.

Baptista et al. (2005, p. 174) ainda descrevem o funcionamento das trincheiras como um processo bastante simples: o acesso das águas superficiais à estrutura é efetuado diretamente pela superfície do dispositivo, ou através de um sistema de drenagem que efetua a coleta da água pluvial e escoar até a trincheira. A evacuação pode ser feita de duas formas distintas: nas trincheiras de retenção, a evacuação é efetuada por simples descarga à jusante por um dispositivo de deságue, e, nas trincheiras de infiltração, que será o modelo abordado de fato no trabalho, a evacuação pode ser feita pelas paredes laterais e pela base (BAPTISTA et al.,

2005, p. 174). Por outro lado, Silveira e Goldenfum (2007, p. 2) desconsideram a infiltração pelo fundo, admitindo a possibilidade de colmatção da base da estrutura. Quando é adotada a trincheira de infiltração consegue-se, além do rearranjo temporal das vazões, a redução dos volumes escoados superficialmente.

Sobre os aspectos construtivos, consta em Baptista et al. (2005, p. 175) que as trincheiras de infiltração devem ser preenchidas com material granular graúdo, geralmente pedra-de-mão, seixos ou brita, além da adoção de manta geotêxtil com o objetivo de evitar a passagem de finos, que causam o fenômeno da colmatção, como pode ser visto na figura 6. Tucci (2007, p. 200) mostra que as trincheiras de infiltração devem ser construídas em áreas com o nível do lençol freático baixo, cerca de 1,2 metro abaixo do solo para criar espaço para armazenamento e drenagem de fluxo, caso contrário, o dispositivo torna-se ineficiente.

Figura 6: Seção transversal de uma trincheira de infiltração



(fonte: BAPTISTA et al., 2005, p. 174)

Por fim, Baptista et al. (2005, p. 176) descrevem as vantagens do uso de trincheiras de infiltração, além do rearranjo da vazão no tempo e da redução do volume de escoamento superficial, já citadas, e são: o ganho financeiro, já que reduz a dimensão dos dispositivos de drenagem à jusante, o ganho paisagístico, pois possibilita a valorização do espaço urbano, além de demandar pouco espaço para a implantação dessa estrutura, e, por fim, o ganho ambiental, já que as trincheiras de infiltração possibilitam a recarga do lençol freático e podem melhorar a qualidade da água pluvial.

4 ANÁLISE DOS DIPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO DO IPH

O Instituto de pesquisas hidráulicas da UFRGS conta com três dispositivos de infiltração experimentais: o estacionamento após a passarela coberta do IPH, localizado na Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre foi executado com pavimentos permeáveis e analisados quando ao desempenho e viabilidade por Laura Albuquerque Accioli no ano de 2004. Também foram construídas duas trincheiras de infiltração que foram analisadas por Vladimir Caramori Borges de Souza em 2002, e cuja localização é a mesma. O presente trabalho fará uma comparação do desempenho desses quanto à sua eficiência, viabilidade e custos.

4.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL DO IPH

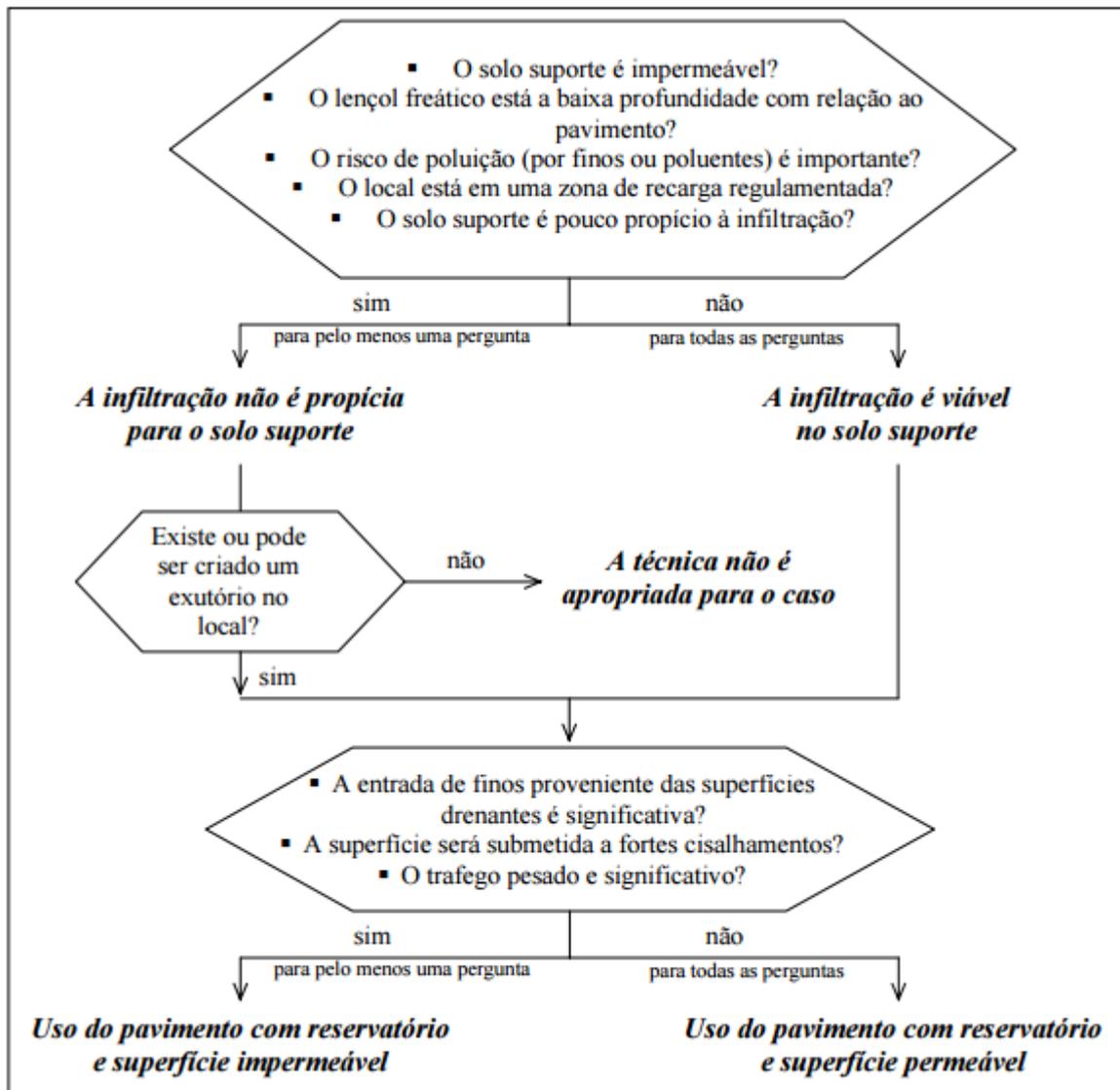
4.1.1 Generalidades

De acordo com Acioli (2005, p. 12-13), os pavimentos permeáveis tem como vantagens específicas a capacidade de fazer um tratamento preliminar da água da chuva, através da remoção dos poluentes na camada interna, além da diminuição da necessidade de meio-fio e canais de drenagem, o aumento da segurança e conforto em vias, pela diminuição de derrapagens e ruídos, além de ser um dispositivo de drenagem que se integra completamente à obra, não necessitando de espaço exclusivo para o dispositivo.

Por outro lado, Acioli (2005, p. 12-13), também cita as desvantagens específicas desse tipo de estrutura as quais podem ser consideradas: a pouca perícia dos engenheiros em relação à tecnologia, o pavimento poroso ter a tendência de se tornar obstruído, caso seja instalado inadequadamente, além de envolver um risco considerável quanto à colmatagem e o risco de contaminação de lençóis freáticos e aquíferos, dependendo da condição do solo.

Quanto à viabilidade de sua instalação, Acioli (2005, p. 14) faz uma análise para determinar se a implantação de um pavimento permeável é adequada ou não para um determinado local, conforme o fluxograma da figura 7 e, caso o resultado seja positivo, ajuda na escolha do tipo de estrutura de reservatório que deve ser usada nesse pavimento. Por fim, vale ressaltar que o fluxograma não é determinante, e sim, apenas um guia para auxílio na tomada de decisão, visto que, em caso de solos argilosos de baixa permeabilidade, são feitos estudos complementares.

Figura 7: representação do fluxograma de viabilidade de pavimentos permeáveis

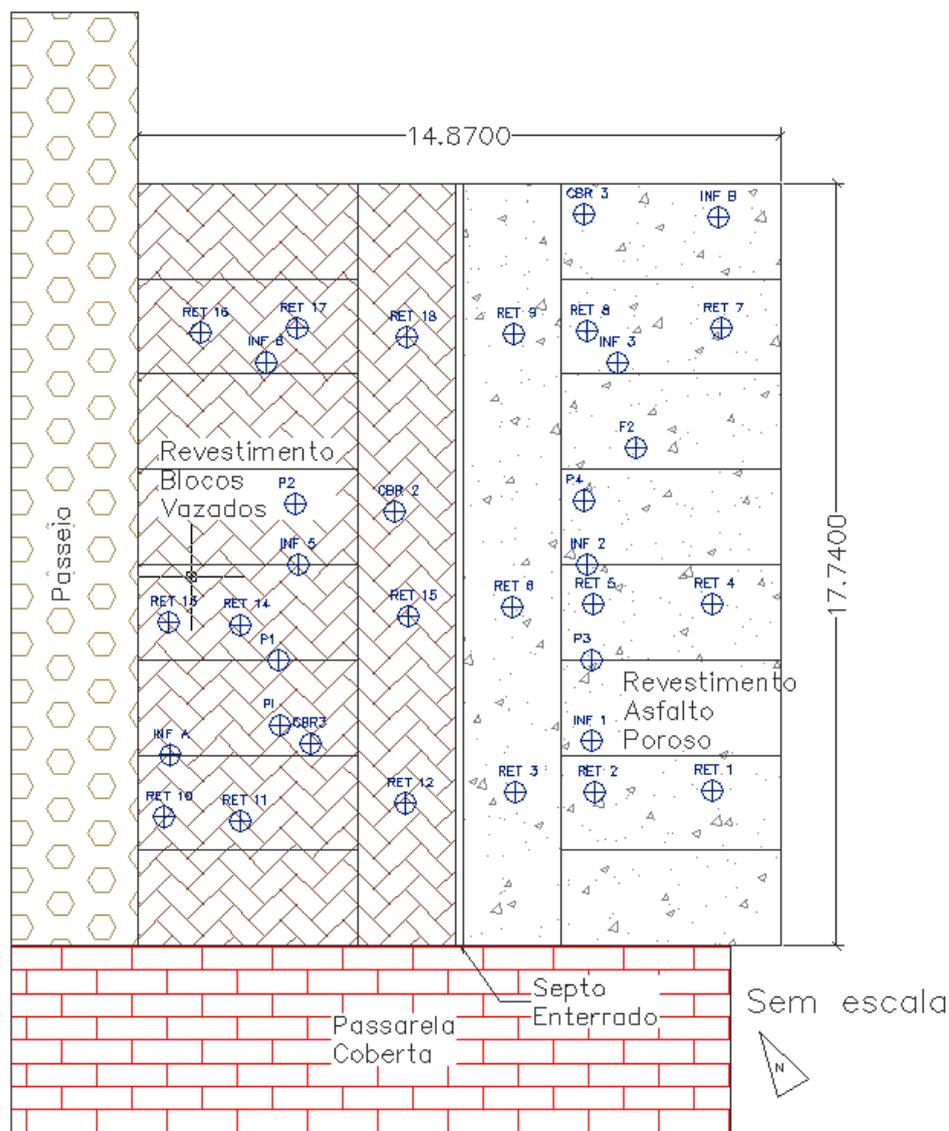


(fonte: ACIOLI,2005,p.15)

4.1.2 Características Dos Locais De Implantação

De acordo com Acioli (2005, p. 15), ao se implantar um pavimento permeável, serão determinadas as áreas que serão drenadas, assim como o seu uso, a existência de vegetação nos seus arredores, a topografia do local, existência de redes de água de esgoto, o tráfego ao qual será submetido o pavimento, entre outros. A figura 8 apresenta, em planta, os locais analisados do estacionamento, onde foram submetidos aos ensaios de anéis concêntricos, do poço invertido e do piezômetro auto-obturador:

Figura 8: Locais onde foram realizados ensaios

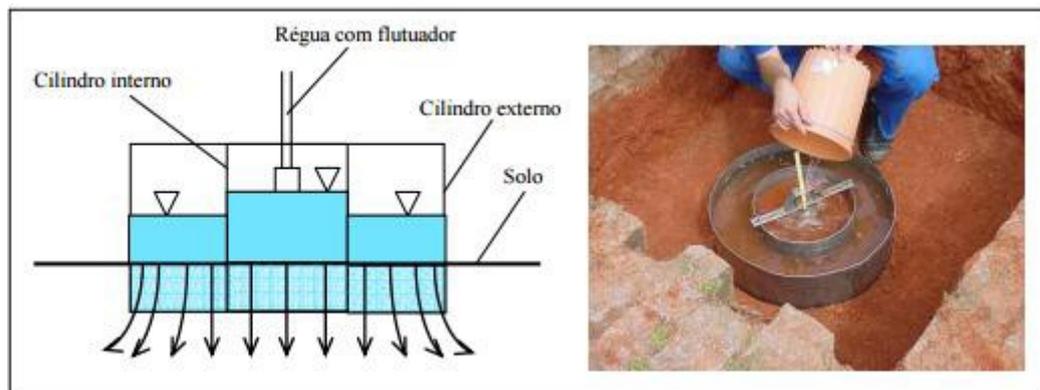


(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.41)

Quanto às características do solo suporte, Acioli (2005, p. 48-57) especifica os parâmetros os quais devem ser determinados, que são os seguintes: a taxa de infiltração do solo saturado,

que deve ser calculada por meio de ensaios realizados *in situ*, em diversos pontos do local da implantação, devendo ser determinada a curva de infiltração do solo até o seu ponto de saturação. Também deverá ser conhecida a capacidade de carga à compressão do solo e o seu comportamento em presença de água. Esse último é importante para se avaliar como evitar a contaminação do freático e detectar riscos de perda de capacidade de carga do solo em função do aumento da umidade. Para o solo suporte, foi realizado o teste dos anéis concêntricos conforme mostra a figura 9:

Figura 9: Ensaio dos anéis concêntricos



(fonte: ACIOLI,2005,p.48)

Em um ponto onde foi implementado o asfalto poroso e outro ponto onde foi implementado bloco vazado, conforme mostra a tabela 1, para a parte de blocos vazados e a tabela 2 para a parte de asfalto poroso:

Tabela 1: taxa de infiltração para a parte de blocos vazados

tempo de Infiltração [min]	Blocos Vazados [Ponto A]		
	Leitura [cm]	Varição da lâmina d'água [cm]	V médio infiltração [mm/h]
0	7,93		
1	7,98	0,05	30,0
2	8,02	0,04	24,0
3	8,04	0,02	12,0
4	8,06	0,02	12,0
5	8,08	0,02	12,0
10	8,12	0,04	4,8
20	8,15	0,03	1,8
30	8,20	0,05	3,0
45	8,24	0,04	1,6
60	8,27	0,03	1,2
90	8,31	0,04	0,8
120	8,35	0,04	0,8
180	8,40	0,05	0,5
240	8,60	0,20	2,0
360	8,80	0,20	1,0

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.49)

Tabela 2: taxa de infiltração para a parte de asfalto poroso

Asfalto poroso [Ponto B]				
tempo de infiltração [min]	Leitura [cm]	L corrigida [cm]	Varição da lâmina d'água [cm]	V médio infiltração [mm/h]
0	6,5			
1	6,8		0,3	180
2	6,9		0,1	60
3	7,0		0,1	60
4	7,1		0,1	60
5	7,2		0,1	60
10	7,5		0,3	36
20	7,9		0,4	24
30	8,3		0,4	24
45	8,8		0,5	20
60	9,3		0,5	20
90	10,1		0,8	16
120	10,8	8,4	0,7	14
180	9,8		1,4	14
240	10,8		1,0	10
360	12,2		1,4	7

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.49)

Após a escavação do reservatório, foram realizados mais testes para determinação da capacidade de infiltração do solo, utilizando o mesmo método, o dos anéis concêntricos, uma vez que os resultados variaram muito, um quadro-resumo dos resultados, juntamente com a taxa de infiltração média é apresentada na tabela 3, média também considera os valores encontrados nos testes anteriores:

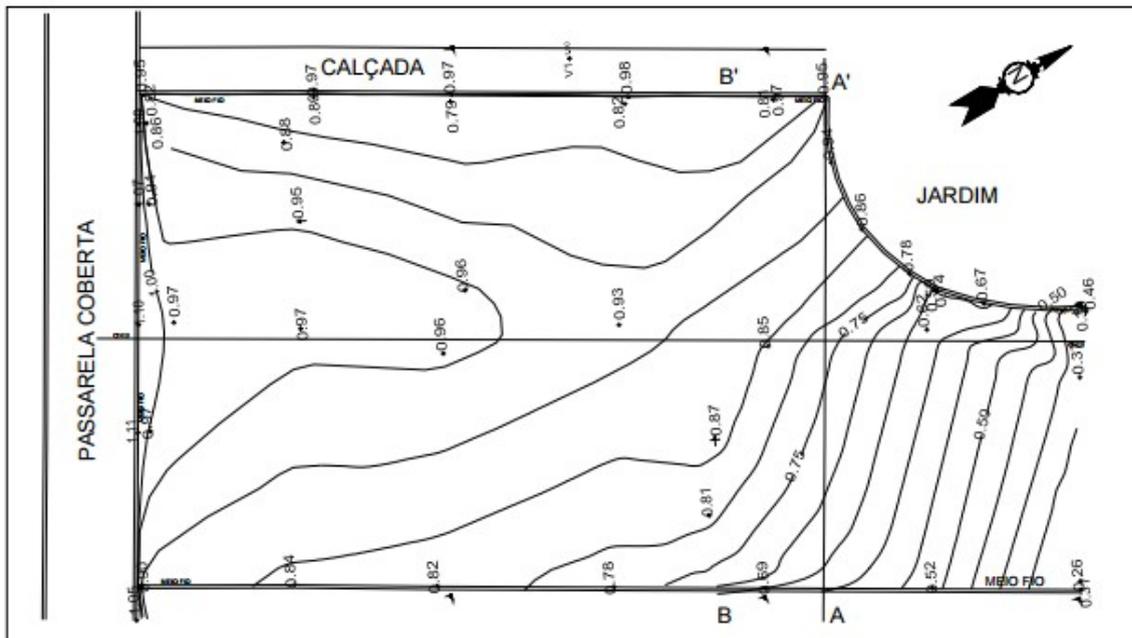
Tabela 3: taxa de infiltração para a parte de blocos vazados

Ensaio para o solo subjacente com anéis concêntricos (valores médios) [mm/h]			
Blocos Vazados		Asfalto Poroso	
INF 4	14,0	INF 1	15,9
INF 5	0,0	INF 2	5,8
INF 6	4,0	INF 3	10,0
Média	4,5 [mm/h]	Média	10,4 [mm/h]

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.52)

Acioli (2005, p. 50) também apresenta um levantamento topográfico do local. Essa determinação é importante para evitar que o estacionamento tivesse uma declividade muito alta, e não precisasse que o reservatório fosse dividido em cédulas. Pode ser visto na figura 10:

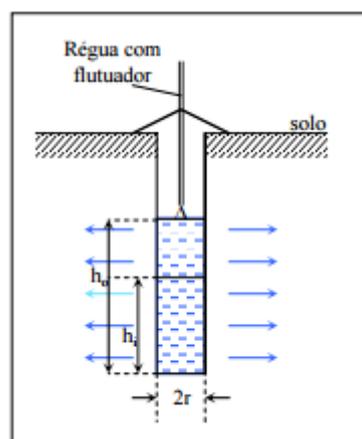
Figura 10: levantamento topográfico do local



(fonte: Acioli,2005,p.50)

Para a condutividade hidráulica, Acioli (2005, p. 53) realizou o ensaio do poço invertido, que consiste em abrir um poço, enchê-lo com água e medir a velocidade de abaixamento do seu nível, conforme mostra a figura 11. O processo é repetido até três vezes:

Figura 11: Ensaio do poço invertido



(fonte: ACIOLI,2005,p.53)

Esse ensaio expressa um índice de maior ou menor oposição do solo à passagem da água em seus poros, e a tabela 4 indica a classificação do solo de acordo com o *U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering*:

Tabela 4: Classificação dos solos

Classe	Condutividade K [mm/h]
Muito Lenta	menor que 1,3
Lenta	1,3 a 5,1
Moderadamente Lenta	5,1 a 20
Moderada	20 a 63
Moderadamente Rápida	63 a 127
Rápida	127 a 254
Muito Rápida	maior que 254

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.54)

A tabela 5 apresenta os resultados encontrados para as perfurações na região que estão indicadas na figura 8:

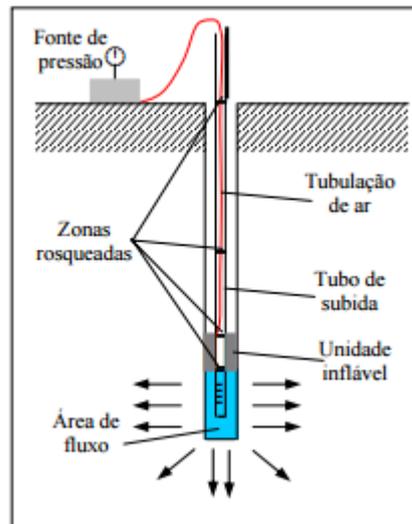
Tabela 5: resultados encontrados para condutividade hidráulica

Ponto	Condutividade hidráulica	
	[m/dia]	[mm/h]
P1	0,223	9,20
P2	0,389	16,20
P3	0,552	23,00
P4	0,531	22,12

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.54)

Além disso, foram feitos dois ensaios pelo piezômetro auto-obturador, que tem o mesmo princípio do poço invertido, porém, tem a vantagem de medir a condutividade hidráulica específica em cada camada do solo, conforme mostra o esquema da figura 12:

Figura 12: esquema do ensaio do piezômetro auto-obturador



(fonte: ACIOLI,2005,p.50)

Os resultados encontrados por Acioli (2005, p. 55) podem ser vistos na tabela 6 a seguir:

Tabela 6: condutividade hidráulica pelo piezômetro auto obturador

Condutividade hidráulica pelo piezômetro auto-obturador [mm/h]				
Ponto	Profundidade [m]			
	1	2	3	4
F1	4,93	28,12	31,75	-
F2	33,55	17,61	18,65	17,57

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.55)

Para se determinar a resistência à penetração de uma amostra saturada, assim, um pistão de 5cm penetra a uma velocidade de 1,25 mm/min. O valor da resistência é computado em porcentagem, sendo que 100 corresponde à penetração de uma amostra de brita graduada de elevada qualidade que foi adotada como padrão de referência (Acioli, 2005, p. 47). Os resultados obtidos estão na tabela 7:

Tabela 7: propriedades do solo pelo ensaio CBR

Furo	Profundidade [cm]	Compactação AASHTO		Ensaio Físicos		I.S.C			
		Densidade máxima [kg/m ³]	Umidade Ótima (%)	LL	IP	h (%)	Densidade	Exp.	ISC
1	24-120	1630	20,0	56	20	20	1654	0,19	20
1	120-200	1585	24,5	62	21	24,3	1568	0,50	5
2	22-125	1614	20,3	63	22	20	1607	0,36	14
2	125-200	1621	19,4	61	21	19,4	1647	1,35	4
3	20-90	1710	19,1	58	20	18,9	1728	0,96	8
3	90-150	1716	18,9	50	20	18,5	1685	1,20	6

(fonte: ACIOLI, 2005, p. 47)

Por fim, no que se referem aos estudos hidrogeológicos e hidrológicos, devem ser identificados as características do lençol freático, como as flutuações sazonais, cota e sua vulnerabilidade quanto à poluição. Vale lembrar que em casos onde o nível do lençol estiver em uma profundidade menor que um metro, ou é usado para abastecimento de água potável, é desaconselhado o uso de pavimentos permeáveis. Partindo para os estudos hidrológicos, esse deve englobar a vazão máxima de saída permitida, as características pluviométricas do local, a localização do exutório, as possíveis áreas de armazenamento de água e o coeficiente de escoamento das áreas contribuintes, para poder ser determinado o volume de estocagem.

4.1.3 Determinação dos Materiais

De acordo com Acioli (2005, p. 58), o material deve ser escolhido em função da espessura máxima aceitável da estrutura e das solicitações mecânicas, levando em consideração questões técnicas e econômicas.

4.1.3.1 Camada Superficial

O material da camada superficial deve resistir tanto às solicitações do tráfego quanto permitir a infiltração da água da chuva, assim, deve ser escolhido em função do uso e capacidade de infiltração. Outros aspectos devem ser considerados, como a estética, a aderência, a acústica, a resistência ao arrancamento, custo, disponibilidade e manutenção (ACIOLI, 2005, p. 58).

O termo pavimento permeável descreve basicamente três tipos de superfícies projetadas para diminuir o escoamento pluvial superficial, de acordo com Acioli (2005, p. 58): asfalto poroso

e concreto poroso, que são preparados de forma similar aos pavimentos convencionais, com a diferença de não haver em sua composição os agregados finos, dando assim, porosidade para que ocorra a infiltração. Ainda são descritos os blocos de concreto vazados intertravados, que possuem aberturas em sua estrutura, permitindo que a água infiltre no reservatório. Os blocos são assentados da mesma forma que os blocos de concreto intertravados convencionais e as aberturas podem ser preenchidas com areia, tufo de grama ou cascalho.

4.1.3.2 Camada base ou reservatório

O material da camada base tem como função transmitir os esforços da camada superficial para o solo suporte, e também fazer a função de reservatório provisória da água da chuva que até ocorra a infiltração no solo ou a sua drenagem pela rede lateral. Devem ser levados em consideração a compatibilidade com a camada superficial, o tipo de tráfego, aspectos construtivos, porosidade e custos.

De acordo com Acioli (2005, p. 59), o material mais comumente utilizado é do tipo granular, geralmente a brita. Sobre esse material, o autor aconselha que a mesma possua diâmetro superior a 10 mm, com a porcentagem de material siltoso menor que 3% e menos de 1% de material argiloso, e sua resistência deve ser suficiente para resistir às solicitações do tráfego, resistir ao atrito e evitar a sua fragmentação.

Em caso de tráfego pesado, a camada base deve ser tratada com material tratado com ligante betuminoso ou hidráulico, para conferir maior resistência e menor deformação à camada base. Nesse caso, por consequência, o custo será maior devido o acréscimo de material, e a capacidade de infiltração será menor, por será reduzido o número de vazios.

4.1.3.3 Interface entre as camadas

De acordo com a NBR 16416, o uso de geotêxtil entre a camada de assentamento e a base permeável não é recomendado. Dessa forma, o risco de colmatação do revestimento permeável é reduzido. Entre o fundo do reservatório e o subleito, o uso de membrana geotêxtil é opcional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015, p. 8-9). O pavimento permeável do IPH foi construído em 2002, sendo um projeto pioneiro no Brasil, e a referida norma não existia, assim, ainda incluía o uso de membrana geotêxtil em todas as interfaces da base permeável com o intuito de reduzir o risco de redução do volume de reservação por contaminação da base com material fino do solo

4.1.4 Critérios De Dimensionamento

O pavimento permeável do IPH consiste em uma obra num lote de estacionamento de 264 m², dividido em duas partes iguais onde, em uma metade, foi utilizado revestimento de asfalto pré-misturado a frio, e na outra metade, blocos vazados intertravados de concreto preenchidos com areia e grama. A espessura da camada drenante do pavimento permeável pode ser pré-dimensionada, através das seguintes equações (MOREIRA, s.d., p. 3):

$$V_{\text{máx}} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{b} \cdot \frac{c}{T^2} - \sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{q_s} \right)$$

Onde:

$V_{\text{máx}}$ = volume de dimensionamento [mm];

a, b, c = parâmetros da equação de Talbot;

β = produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo;

T = período de retorno considerado [10 anos];

q_s = vazão de saída constante do dispositivo ou vazão de infiltração [mm/h];

Os parâmetros adotados por Acioli (2005, p. 70) são apresentados na tabela 8 a seguir:

Tabela 8: valores adotados pelo autor

Variável	Valor
a	2611
b	0,171
c	16,9
β	1
Tr [anos]	10
q_s [mm/h]	1,5

(fonte: adaptado de ACIOLI, 2005, p.70)

Assim, o valor de $V_{\text{máx}}$ encontrado por Acioli (2005, p. 70) foi de 54,5 mm, posteriormente a isso, foi possível calcular a altura da camada drenante, que é dada pela fórmula:

$$\phi = \frac{\phi \phi \phi \acute{a}}{\eta}$$

η = porosidade da brita [%];

H = espessura da camada drenante [mm];

Para o cálculo da porosidade da brita, com um índice de vazios igual a 0,53. Acioli (2005, p. 70) determinou a porosidade como sendo igual a 0,37, chegando ao seguinte resultado:

$$\phi = \frac{54,5}{0,37} = 151[\phi \phi]$$

Por razões construtivas, Acioli (2005, p. 71) decidiu dar inclinação igual a 1%, então a altura do reservatório é dada pela equação:

$$\phi' = \phi + \frac{\phi \phi \cdot L}{2} = 151 + \frac{0,01 \cdot 18300}{2} = 243[\phi \phi]$$

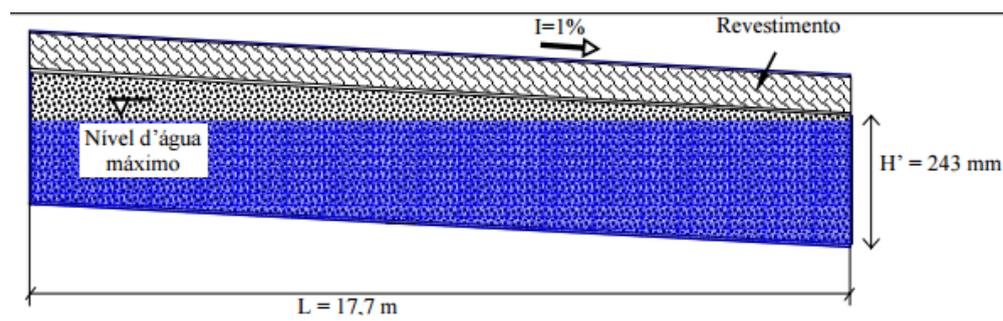
Onde:

H' é a altura do reservatório, considerando a declividade do terreno [mm];

Io é a declividade do terreno [%];

As dimensões encontradas para o reservatório estão na figura 13:

Figura 13: Dimensões do reservatório do pavimento permeável



(fonte: ACIOLI,2005,p.70)

De acordo com Acioli (2005, p.39) – “O local do experimento foi escolhido em função da representatividade do solo encontrado na base do pavimento, que é do tipo argiloso, com relação à cidade de Porto Alegre (IBGE, 2003)”. “O tráfego no estacionamento é considerado leve, pois não há o acesso de veículos pesados, além de a área servir apenas como estacionamento, não servindo de acesso para outras áreas”.

O dimensionamento das calhas de coleta do escoamento superficial foi dimensionado pelo método racional, que é dado por:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

onde

Onde:

Q é a vazão do exutório [m³/s];

C é o coeficiente de escoamento [adimensional];

i é a intensidade pluviométrica [mm/h];

A é a área de contribuição [km²];

O coeficiente de escoamento foi adotado de Acioli (2005, p. 72), que determinou 0,1 como referente às superfícies permeáveis, a área de contribuição foi considerada metade da área do pavimento, ou seja, 142 m² e a intensidade foi determinada a partir do tempo crítico da chuva de projeto da IDF de Bemfica (1999), respectivamente:

$$C = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 142}{142 + 142}}$$

$$i = \frac{21}{192 + 192}$$

O tempo crítico encontrado foi de 192 minutos, e, aplicando na equação de Bemfica (1999), encontra-se uma intensidade de 21 mm/h, que aplicando-se o método racional, encontra-se uma vazão de 0,1 l/s. Para um caso de impermeabilização futura, considerando um coeficiente de escoamento de 0,8, encontrou-se uma vazão de 0,661 l/s, e assim, Acioli (2005, p. 72) optou por uma calha de PVC de 125 mm de diâmetro com uma declividade de 1%.

Para o dimensionamento dos drenos extravasores foram considerados que na hipótese extrema, esses escoariam 90% da chuva de projeto, uma vez que o coeficiente de escoamento do pavimento permeável, 0,1. Foi utilizado novamente o método racional:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

onde

Onde foi encontrada uma vazão de 6,91 l/s, e Acioli (2005, p. 73) optou por três drenos de 100 mm de diâmetro.

4.1.5 Análise do desempenho

A análise do desempenho do pavimento foi realizada por meio de quatro critérios: primeiramente serão avaliadas as chuvas dos eventos, e posteriormente o escoamento superficial nos dois pavimentos, bem como o armazenamento dos dois reservatórios, e, por fim, a taxa de infiltração. Vale lembrar que o período de observação ocorreu entre o dia 3 de maio de 2004 e o dia do último evento de chuvas intensas, em 11 de novembro de 2004, assim, os eventos avaliados deverão constar entre essas duas datas.

4.1.5.1 Chuvas

Para os eventos selecionados, Acioli (2005, p. 99) determinou a precipitação total, tempo de duração, intensidade média e intensidade máxima das pancadas de 5, 10, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos e comparados com a curva IDF de Bemfica et al. (2000), dada por:

$$i = \frac{1297 \cdot \phi^{0,171}}{(\phi + \phi)^{0,85}}$$

A tabela 9 mostra um resumo dos eventos de precipitação analisados:

Tabela 9: Tabela resumo dos eventos de precipitação

Data	Precipitação [mm]	Duração [h:m:s]	I média [mm/h]	Período de Retorno [anos]	Volume precipitado [m ³]
04/05/2004	62,5	22:03:00	2,8	0,94	8,24
07/05/2004	62,3	42:02:00	0,8	0,01	4,25
14/05/2004	22,6	28:26:00	0,8	0,00	2,98
23/05/2004	9,1	4:52:00	1,9	0,00	1,21
25/05/2004	23,4	5:52:00	4,0	0,01	3,08
10/06/2004	83,1	13:55:00	6,0	7,65	10,96
24/06/2004	20,1	11:34:00	1,7	0,00	2,65
01/07/2004	30,7	6:40:00	4,6	0,05	4,05
03/07/2004	24,4	6:39:00	3,7	0,01	3,22
07/07/2004	9,7	3:38:00	2,7	0,00	1,27
14/07/2004	35,6	26:07:00	1,4	0,03	4,69
30/07/2004	55,1	39:33:00	1,4	0,27	7,27
06/08/2004	20,8	5:22:00	3,9	0,01	2,75
17/08/2004	32,5	42:43:00	0,8	0,01	4,29
10/09/2004	46,2	27:11:00	1,7	0,13	6,10
20/09/2004	115,8	59:19:00	2,0	14,23	15,28
28/09/2004	20,8	5:22:00	3,9	0,01	2,75
16/10/2004	37,1	12:00:00	3,1	0,08	4,98
18/10/2004	15,2	0:57:00	16,0	0,01	2,01
03/11/2004	18,5	3:50:00	4,8	0,00	2,45
05/11/2004	17,0	10:35:00	1,6	0,00	2,24
10/11/2004	90,4	48:28:00	1,9	4,01	11,93

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005, p.100)

O volume precipitado encontrado foi registrado através do *data logger* do dispositivo, descontando-se o volume ocupado pela brita (ACIOLI, 2005, p. 97).

4.1.5.2 Coeficiente de Escoamento Superficial

Acioli (2005, p. 100) considerou o monitoramento do volume escoado e comparado com o volume precipitado para o cálculo do escoamento superficial. Os volumes do escoamento superficial foram analisados em termos totais, assim, o foram calculados através da relação entre o volume escoado pela calha e volume precipitado sobre todo o pavimento, gerando a seguinte equação:

$$i = \frac{P_{coletado} - P_{calha}}{P_{pavimento}} \cdot 100$$

Onde:

$P_{coletado}$ é a precipitação coletada pela calha lateral [mm];

P_{calha} é a precipitação sobre a calha coletora lateral [mm];

$P_{pavimento}$ é o volume precipitado em todo o pavimento [mm];

A tabela 10 mostra os valores encontrados para os escoamentos superficiais, dividindo-os entre o pavimento de blocos vazados e o pavimento de asfalto poroso:

Tabela 10: valores do escoamento superficial

Data	Precipitação [mm]	Coeficiente de Escoamento (%)	
		Asfalto Poroso	Blocos Vazados
04/05/2004	62,5	SD	0
07/05/2004	62,3	SD	1,4
14/05/2004	22,6	0,8	0
23/05/2004	9,1	SD	0
25/05/2004	23,4	SD	0
10/06/2004	83,1	5	1
24/06/2004	20,1	0,7	0
01/07/2004	30,7	SD	0
03/07/2004	24,4	1,8	1,8
07/07/2004	9,7	0	0
14/07/2004	35,6	7,3	0
30/07/2004	55,1	9,5	0
06/08/2004	20,8	3,6	5,4
17/08/2004	32,5	6,1	3,8
10/09/2004	46,2	8,2	1,1
20/09/2004	115,8	7,7	9,8
28/09/2004	20,8	3,6	5,4
16/10/2004	37,1	6,2	4,5
18/10/2004	15,2	7,2	3
03/11/2004	18,5	2,2	0
05/11/2004	17	3	0
10/11/2004	90,4	13,5	12,8
	Média	5,288	5,111
	Desvio Pad.	3,621	3,489

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005, p.101)

Como resultado, concluiu-se que o pavimento de blocos vazados tem um desempenho equivalente ao pavimento de asfalto poroso, se forem considerados apenas os eventos onde

ocorreu escoamento superficial. Os resultados encontrados podem ser considerados satisfatórios, pois os coeficientes de escoamento médios para áreas pavimentadas são, em média, 80%.

A diferença entre os dois pavimentos foi explicada por Acioli (2005, p. 102), pelo fato de que os blocos vazados possuem aberturas maiores que a do asfalto poroso.

4.1.5.3 Armazenamento nos Reservatórios dos pavimentos

Acioli (2005, p. 104) afirma que a análise do armazenamento e da taxa de infiltração são importantes para se observar a interação entre o solo e a estrutura, então, pode ser avaliada a eficiência do dispositivo. Acioli (2005, p. 104) também observa que há um tempo de defasagem entre a precipitação e o enchimento do reservatório, que dependem de fatores como intensidade de chuva, condições de umidade do pavimento antes do início da precipitação e do tempo interno de distribuição da água nos poços dos sensores de nível que estava presentes no dispositivo.

Outro fato considerado por Acioli (2005, p. 104) foi a diferença do comportamento dos reservatórios dos pavimentos, onde o lado contendo asfalto poroso apresentou menores valores de armazenamento em relação ao lado com blocos vazados. Isso pode ser explicado pelo fato dos ensaios feitos determinarem que a taxa de infiltração encontrada para o lado com asfalto poroso é maior (10 mm/h contra 4,5 mm/h do lado com blocos vazados). Os resultados encontrados se apresentam na tabela 11 abaixo:

Tabela 11: Tabela-resumo dos dados de armazenamento dos reservatórios

Data	Precipitação [mm]	Volume precipitado [m ³]	Duração [h:m:s]	Asfalto Poroso		Blocos Vazados	
				Vol. Máx. [m ³]	Tempo Armaz. [h:m]	Vol. Máx. [m ³]	Tempo Armaz. [h:m]
04/05/2004	62,50	8,24	22:03:00	0,93	34:26:00	SD	SD
07/05/2004	62,30	4,25	42:02:00	0,55	35:26:00	SD	SD
14/05/2004	22,60	2,98	28:26:00	1,15	9:56:00	0,20	9:56:00
23/05/2004	9,10	1,21	4:52:00	1,26	8:25:00	SD	SD
25/05/2004	23,40	3,08	5:52:00	1,16	17:31:00	SD	SD
10/06/2004	83,10	10,96	13:55:00	1,47	27:58:00	1,52	13:08:00
24/06/2004	20,10	2,65	11:34:00	0,88	18:21:00	0,07	3:32:00
01/07/2004	30,70	4,05	6:40:00	1,71	19:54:00	SD	SD
03/07/2004	24,40	3,22	6:39:00	1,06	15:27:00	0,20	4:51:00
07/07/2004	9,70	1,27	3:38:00	0,72	6:03:00	-	-
14/07/2004	35,60	4,69	26:07:00	0,88	40:29:00	0,23	27:58:00
30/07/2004	55,10	7,27	39:33:00	0,73	45:31:00	0,18	30:14:00
06/08/2004	20,80	2,75	5:22:00	0,28	18:09:00	0,28	5:56:00
17/08/2004	32,50	4,29	42:43:00	1,82	40:49:00	0,17	13:03:00
10/09/2004	46,20	6,10	27:11:00	0,67	38:13:00	0,30	31:46:00
20/09/2004	115,80	15,28	59:19:00	0,80	72:28:00	0,97	60:35:00
28/09/2004	20,80	2,75	5:22:00	0,28	18:09:00	0,28	5:56:00
16/10/2004	37,10	4,89	12:00:00	0,41	18:08:00	0,53	10:12:00
18/10/2004	15,20	2,01	0:57:00	0,25	10:10:00	0,47	5:02:00
03/11/2004	18,50	2,45	3:50:00	0,27	3:20:00	0,46	3:58:00
05/11/2004	17,00	2,24	10:35:00	0,36	11:16:00	0,29	5:35:00
10/11/2004	90,40	11,93	48:28:00	0,41	60:26:00	1,93	25:35:00

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005,p.106)

4.1.5.4 Taxa de infiltração no solo

A análise da taxa de infiltração do solo feita por Acioli (2005) foi dividida em duas partes: durante a precipitação e durante o período de estiagem, ou seja, do esvaziamento do reservatório.

Na primeira análise, no balanço hídrico, a infiltração acumulada é dada pela diferença entre a parcela de precipitação acumulada que penetrou no reservatório e a variação do armazenamento, dividida pela área do pavimento, conforme a equação abaixo:

$$Q_{\text{total}} = \frac{(1 - C) \cdot P - \Delta S}{A_{\text{total}}}$$

Onde

P é a precipitação acumulada [mm];

C é o coeficiente de escoamento [adimensional];

ΔS é a variação no armazenamento [mm/h];

Inf é infiltração no pavimento permeável [mm/h];

Atotal é a área superficial do pavimento [m²];

Os valores encontrados estão na tabela 12 a seguir, e Acioli (2005) ressalta que foram considerados apenas os trechos em que havia precipitação e armazenamento:

Tabela 12: valores de infiltração durante a precipitação

Data	Asfalto Poroso			Blocos Vazados		
	Precip. [mm/h]	Horário Início-fim	Δ inf [mm/h]	Precip. [mm/h]	Horário Início-fim	Δ inf [mm/h]
04/05/2004	-	-	-	5,17	2:23-8:30	4,99
	-	-	-	1,22	8:30-14:08	0,90
	-	-	-	1,89	14:08-23:12	2,13
14/05/2004	0,17	15:33-20:05	0,37	0,68	14:28-2:06	0,49
	0,41	14:42-20:16	0,41	0,00	2:06-5:22	0,87
	-	-	-	0,67	12:18-1:37	0,41
25/05/2004	-	-	-	3,52	10:19-13:12	0,52
	-	-	-	2,74	13:12-15:09	3,43
	-	-	-	0,05	15:09-0:55	0,39
10/06/2004	5,44	14:12-19:12	5,23	4,73	10:42-13:07	1,40
			0,00	12,19	13:07-16:27	12,84
	1,38	19:44-1:16	2,09	0,78	16:27-19:14	1,13
	-	-	-	10,90	19:22-21:18	7,11
24/06/2004	-	-	-	3,90	8:36-11:51	2,26
	-	-	-	0,05	11:51-4:04	0,39
01/07/2004	-	-	-	6,47	8:08-10:34	1,72
	-	-	-	5,89	10:34-12:59	4,50
03/07/2004	1,67	6:26-8:43	1,20	12,91	6:08-7:46	2,98
	0,08	8:43-12:02	0,23	0,24	7:46-14:01	0,48
	1,74	12:02-12:37	1,63	0,00	14:01-20:31	0,92
07/07/2004	-	-	-	2,67	18:55-21:35	0,67
	-	-	-	0,21	21:35-3:44	1,25
14/07/2004	0,56	22:34-0:22	0,15	1,82	16:49-3:34	1,35
	1,66	0:22-2:40	0,15	0,72	3:34-19:10	0,75
	0,20	2:40-7:52	0,15	0,00	-	0,48
	0,85	7:52-16:48	0,15	0,00	-	0,00
30/07/2004	-	-	-	4,06	12:37-16:56	3,02
	-	-	-	0,87	16:56-1:40	0,90
	-	-	-	1,85	1:40-10:26	1,84
06/08/2004	2,10	21:11-1:40	2,08	2,36	17:46-2:04	2,01
	0,22	1:40-6:11	0,42	0,07	2:04-17:13	0,33
17/08/2004	0,97	14:53-23:46	0,86	1,12	7:37-2:11	0,93
	1,48	23:46-1:29	1,12	0,12	2:11-19:22	0,41
10/09/2004	1,45	7:01-21:53	1,41	2,48	5:54-12:07	1,48
	0,96	21:53-0:47	0,89	2,95	12:07-13:12	2,96
	1,58	0:47-3:12	1,30	0,83	2:36-14:14	0,35
	3,28	3:12-4:45	3,03	1,47	20:13-4:32	1,28
20/09/2004	-	-	-	2,78	7:01-18:00	2,66
	-	-	-	0,74	18:00-9:50	0,60
	-	-	-	1,13	6:50-16:20	1,31
	-	-	-	1,03	16:20-4:08	0,54
	-	-	-	2,84	16:34-16:34	3,69
28/09/2004	2,96	21:41-0:00	2,31	2,49	21:51-23:41	1,80
16/10/2004	3,99	14:30-21:26	4,20	3,96	15:00-21:36	3,99

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005, p.110)

Já no caso da análise da infiltração durante a estiagem, Acioli (2005, p. 113) considera que apenas a área do pavimento onde se localiza o acúmulo d'água, contribui para a infiltração no solo, assim, a infiltração acumulada é dada pela variação do armazenamento, dividida pela área de acumulação d'água do pavimento conforme a seguinte equação:

$$I_{ac} = \frac{-\Delta S}{A_{molhada} h}$$

Onde

ΔS é a variação no armazenamento [mm];

I_{ac} é a precipitação acumulada [mm/h];

$A_{molhada}$ é a área superficial com água acumulada [m²];

Os resultados encontrados podem ser observados na tabela 13 a seguir:

Tabela 13: taxas de infiltração durante o período de esvaziamento em mm/h

Data	Asfalto poroso	Blocos Vazados	Data	Asfalto poroso	Blocos Vazados
04/05/2004	SD	0,71	30/07/2004	2,53	1,05
	SD	0,46		1,25	0,69
	SD	2,28	06/08/2004	2,14	0,88
14/05/2004	2,30	1,19	17/08/2004	0,99	3,08
	2,19	0,94		1,07	0,53
25/05/2005	SD	0,88		1,31	0,46
10/06/2004	4,31	0,86		-	0,51
	3,32	0,62		-	1,89
24/06/2004	0,94	0,40	10/09/2004	1,06	0,36
01/07/2004	SD	1,19		0,75	0,53
	SD	0,42		1,17	0,81
	SD	0,89	20/09/2004	1,10	0,60
03/07/2004	1,19	0,38		-	1,16
	-	1,14	28/09/2004	1,36	0,68
07/07/2004	-	2,40	16/10/2004	1,58	0,73
	-	2,44	18/10/2004	1,40	0,65
14/07/2004	0,89	0,49	03/11/2004	2,50	2,80
	0,67	0,70	05/11/2004	1,34	0,82
	0,93	0,33	10/11/2004	2,23	0,63
	0,70	0,35		2,06	1,37
	1,13	0,75	média	1,60	1,00

(fonte: adaptado de ACIOLI,2005, p.114)

Acioli (2005, p. 113) observa que a diferença de taxas de infiltração em fases distintas é uma importante constatação em termos do dimensionamento do reservatório, onde as médias observadas indicam valores obtidos bem mais baixos que durante a precipitação:

4.1.6 Análise de custos

A análise de custos desse trabalho foi baseada em (MOREIRA, s.d., p. 6). Nele, o autor considera simplificações nos orçamentos como desconsiderar o cálculo de serviços básicos ou de menor importância, necessários para a execução do pavimento permeável. Por fim, a quantidade de material necessária para a implantação dos pavimentos foi baseada em Acioli (2005, p. 121).

Assim, para efeito de comparação, foram estimados apenas os serviços relativos à drenagem. Para o cálculo do custo de transporte do solo escavado nos diferente dispositivos, considerou-se 30% como fator de empolamento. A ideia nessa parte é apresentar um orçamento resumido

da implantação como da manutenção posterior com valores atualizados baseados no modelo orçamentário, usando valores do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) referente ao mês de agosto de 2016 (MOREIRA, s.d., p. 6).

Para a parte da execução, a tabela 14 mostra o valor total para a implantação do pavimento permeável na parte de blocos vazados:

Tabela 14: implantação do pavimento permeável com blocos vazados

Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83668	1.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	39,5	m ³	R\$ 79,27	R\$ 3.131,17
367	1.2	AREIA GROSSA POSTO JAZIDA/FORNECEDOR	13,2	m ³	R\$ 50,00	R\$ 660,00
4013	1.3	GEOTÊXIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	289,5	m ²	R\$ 7,17	R\$ 2.075,72
73765/001	1.4	PAVIMENTAÇÃO EM PARALELEPIEDO SOBRE COLCHAO DE PO DE PEDRA	144,8	m ²	R\$ 66,95	R\$ 9.694,36
73413	1.5	ESCAVAÇÃO MEC.VALA N ESCOR ATE 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	65,8	m ³	R\$ 13,56	R\$ 892,25
72895	1.6	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	65,8	m ³	R\$ 16,48	R\$ 1.084,38
73881	1.7	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXIL 200G/M2	289,5	m ²	R\$ 7,20	R\$ 2.084,40
					total	R\$ 19.622,27
					custo m ²	R\$ 135,51

(fonte: autor com referência no SINAPI)

Um orçamento simplificado para a parte com asfalto poroso é apresentado na tabela 15 a seguir:

Tabela 15: implantação do pavimento permeável com asfalto poroso

Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Quantidade	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83668	1.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	39,5	m ³	R\$ 79,27	R\$ 3.131,17
34770	1.2	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE P/ PAVIMENTAÇÃO CAP 50/70	10,1	m ³	R\$ 741,37	R\$ 7.487,84
4013	1.3	GEOTÊXIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	289,5	m ²	R\$ 7,17	R\$ 2.075,72
73413	1.4	ESCAVAÇÃO MEC.VALA N ESCOR ATE 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	52,6	m ³	R\$ 13,56	R\$ 713,26
72895	1.5	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	52,6	m ³	R\$ 16,48	R\$ 866,85
73881	1.6	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXIL 200G/M2	289,5	m ²	R\$ 7,20	R\$ 2.084,40
					total	R\$ 16.359,22
					custo m ²	R\$ 112,98

(fonte: autor com referência no SINAPI)

Quanto à manutenção do pavimento, foi elaborado também um orçamento simplificado com uma estimativa considerando que a manutenção seria realizada semanalmente:

Tabela 16: orçamento previsto para a manutenção do pavimento permeável

Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qty.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
6121	1.1	AUXILIAR DE SERVIÇOS GERAIS	1	H	R\$ 9,51	R\$ 9,51

(fonte: autor com referência no SINAPI)

Considerando que um ano tem 52 semanas, o custo anual de manutenção do pavimento é de R\$494,52, e, considerando que a vida útil de dispositivo é de 10 anos, o custo total de manutenção durante a vida útil do pavimento é de R\$4945,20.

4.2 TRINCHEIRA I E II DO IPH

4.2.1 Generalidades

4.2.1.1 Vantagens e Desvantagens da Utilização

De acordo com Souza(2002, p. 22), as vantagens específicas do uso de trincheiras em relação aos outros dispositivos de infiltração se devem ao fato de serem bem integradas visualmente, podendo estar cobertas ou não. Por outro lado, o autor cita as desvantagens do seu uso considerando a dificuldade de manutenção ao longo do tempo, e, caso o desempenho seja reduzido por colmatação, a estrutura inteira deverá ser substituída, e, além disso, o monitoramento do seu desempenho e funcionamento é difícil.

O uso de trincheiras, ainda, não é recomendado em determinadas situações que, de acordo com Souza (2002, p. 23), são determinadas por fatores como profundidade do nível do lençol freático e a qualidade e o tipo de solo, assim, não é recomendado o uso de trincheiras em locais onde o nível do lençol freático sazonal estiver a menos de 1,2 m abaixo do fundo da trincheira, assim como a camada impermeável. Também não se recomenda a implantação em solos com classificação C ou D do SCS, pois são solos com taxa de infiltração baixa, ou se a taxa de infiltração do mesmo for inferior a 8 mm/h. Por fim, também não se recomenda a sua instalação em solos aterrados, pois os mesmos têm tendência de saturação, dessa forma, seriam ineficientes quanto à infiltração.

Em função de alguns problemas que podem surgir a partir da utilização de dispositivos de infiltração Souza (2002, p. 25) sugere a criação de mapas de áreas propícias à utilização de

dispositivos de infiltração, e também mapas onde o uso deve ser proibido no ponto de vista de preservação do solo, nesse caso, devem não devem ser instaladas em áreas com riscos de deslizamentos, áreas degradadas com alta declividade, terrenos alagadiços e áreas sujeitas ao efeito de marés. Por fim, os autores observam a densidade de utilização: um dispositivo de infiltração não pode ter influência sobre o funcionamento de outro dispositivo, pois assim, reduz-se o desempenho de ambos os dispositivos.

4.2.1.2 Manutenção

De acordo com Souza (2002, p. 34), após a execução, pontos de erosão podem aparecer em locais de fluxo concentrado, como margens de pavimentos e calhas de telhados, e o solo erodido pode ser carregado para os as estruturas de infiltração, reduzindo, assim, o seu desempenho quanto a infiltração e percolação, porém, é possível reduzir a quantidade de sedimentos com pré-filtros e caixas de areia.

Quanto à manutenção em si, Souza (2002, p.35) afirma que a necessidade não é grande, porém, é difícil fazer com que os proprietários dos lotes executem a manutenção, pois as trincheiras são menores que a maioria dos outros dispositivos de infiltração, e, quando são subterrâneas, podem não ser visíveis, nem acessíveis. Como resultado, a população local não se preocupa com a manutenção das trincheiras como se preocuparia com os outros dispositivos que são maiores e visíveis.

Souza (2002, p. 35) descreve a manutenção padrão com aspectos que devem ser observados: a inspeção, que deve ocorrer várias vezes nos primeiros meses, e após, deve ser feita anualmente, ou após um grande evento de precipitação, para verificação de possibilidade de colmatação do local. A superfície pode ser inspecionada escavando-se uma espátula ou colher de pedreiro até a primeira camada do filtro geotêxtil, a cerca de 20 cm da superfície. A manutenção da faixa da cobertura vegetal deve ser inspecionada anualmente, quanto ao corte de grama, deve ser feito ao menos duas vezes por ano, e mais frequentemente em áreas residenciais, devendo-se também ter cuidado para que os restos de vegetação não entrem na trincheira, devendo ser levados para longe. As estruturas de pré-tratamento das trincheiras subterrâneas devem ser verificadas periodicamente e limpas quando o volume de sedimentos ocupar 10% ou mais da capacidade útil.

4.2.1.3 Execução

Segundo Souza (2002, p. 36), práticas incorretas de construção levam uma grande quantidade de trincheiras a falhar, seja por testes inadequados em campo para determinação das propriedades do solo, ou falta de controle do aporte de sedimentos às estruturas, assim, o bom funcionamento de uma trincheira está intimamente relacionado com boas práticas tanto na construção, como manutenção.

Boas práticas, ainda segundo Souza (2002, p. 36), podem ser consideradas como a não utilização de materiais pesados na área planejada para infiltração, para evitar a compactação do solo, a colocação de barreiras físicas ao redor da trincheira durante todas as fases de construção, para evitar a entrada de sedimentos e do escoamento trazendo os finos, evitar o uso de máquinas pesadas durante a escavação, e o material escavado deve ser colocado, no mínimo, a 3 m de distância da área escavada. Uma vez a trincheira escavada, deve-se ter cuidado na colocação do filtro geotêxtil, que deve ser colocado alinhado nas laterais e no fundo, devendo-se também ter o cuidado quanto ao modelo de filtro a ser colocado, pois há diferença significativa quanto à permeabilidade, durabilidade e resistência entre os mesmos. Além disso, devem-se prever cuidados com os agregados, pois se os mesmos não estiverem em um padrão de limpeza, podem causar colmatção precoce da estrutura. Um poço de observação deve ser instalado na trincheira para monitorar o seu desempenho e, caso seja subterrânea, marcar a sua localização. Por fim, deve ser feito o controle de sedimentos, que pode ser feito com a colocação de uma cobertura vegetal imediatamente após a execução da trincheira no seu entorno.

4.2.1.4 Gestão

Uma das dificuldades na utilização desse tipo de estrutura é a pequena quantidade de informações sobre o funcionamento e aspectos qualitativos. Assim, Souza (2002, p. 37), sugere que caiba ao poder público tomar a iniciativa de regulamentar o seu emprego, com os Planos Diretores, e com incentivos econômicos, como a redução de impostos.

A correta utilização das estruturas tem por questões o processo de educação do usuário, que deve entender o funcionamento e como deve ser feita a manutenção dos dispositivos, assim Souza (2002, p. 37) explica que devem ser criados manuais de usuário com explicações sobre projeto, operação e manutenção. Por fim, para garantir o perfeito estado de funcionamento,

são necessários trabalhos de fiscalização, com a busca pelo conhecimento sobre suas funções sendo frequente, objetivando o aprimoramento das técnicas.

4.2.2 Caracterização dos Locais de Implantação

4.2.2.1 Textura do solo

A textura é importante para poder ser classificado o solo. O ensaio feito por Souza (2002, p. 50), baseia-se no tempo necessário para a areia e o silte se depositarem, considerando uma mistura de solo em uma solução com água e dispersante em uma proveta. É sabido que as partículas de areia são as que se depositam mais rapidamente, e são quantificadas através de um hidrômetro, partindo do princípio da densidade relativa da mistura. Após, o silte é quantificado pelo densímetro e o que permanecer em suspensão é considerado argila.

Além disso, Souza (2002, p. 50-51) também descreve como as partículas são diferenciadas pelo tamanho, levando-se em conta o tempo que levam para sua deposição: partículas de areia (diâmetro maior que 0,05 mm) se depositam em 40 segundos, partículas siltosas (diâmetro entre 0,002 mm e 0,05 mm) se depositam em 7 horas e 52 minutos.

Para a trincheira I, o perfil do solo se apresenta na tabela 17 a seguir:

Tabela 17: perfil do solo onde foi implantada a trincheira I

Prof. [cm]	Argila [%]	Silte [%]	Areia [%]	Solo
0	20,2	20,2	59,7	Franco-Argiloso-Arenoso
30	18,3	16,3	65,4	Franco-Arenoso
60	24,1	20,1	55,7	Franco-Argiloso-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

(fonte: SOUZA,2002,p.54)

Para a trincheira II, o perfil do solo é apresentado na tabela 18 a seguir:

Tabela 18: perfil do solo onde foi implantada a trincheira II

Prof. [m]	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Tipo de Solo
0	35.64	17.03	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

(fonte: SOUZA,2002,p.60)

4.2.2.2 Ensaio de infiltração para as trincheiras I e II

Souza (2002, p. 53) utilizou o teste de infiltrômetro de cilindros concêntricos para determinar a condutividade hidráulica do solo onde foram implantadas ambas as trincheiras. A descrição do ensaio já foi mencionada no presente trabalho no item 4.1.2 e uma figura esquemática do ensaio foi mostrada na figura 9. A tabela 19 a seguir mostra os resultados encontrados para a condutividade hidráulica para o solo da trincheira I:

Tabela 19: resultados encontrados para a condutividade hidráulica no solo da trincheira I:

t [min]	Ensaio 1				Ensaio 3			Ensaio 4		
	Leitura	Leitura reench.	Δh [cm]	Vm Inf. [mm/h]	Leitura	Δh [cm]	Vm Inf. [mm/h]	Leitura	Δh [cm]	Vm Inf. [mm/h]
0	50,80		0,00		50,20			52,10		
1	49,50		1,30	780,00	49,80	0,40	240,00	51,30	0,80	480,00
2	49,30		0,20	120,00				51,25	0,05	30,00
3	49,10		0,20	120,00				51,20	0,05	30,00
4	48,90		0,20	120,00						
5	48,75		0,15	90,00	49,75	0,05	7,50	51,25	0,05	15,00
10	48,05		0,70	84,00	49,60	0,15	18,00	51,00	0,15	18,00
15				0,00						
20	46,90		1,15	69,00	49,35	0,25	15,00	50,80	0,20	12,00
30	45,90		1,00	60,00				50,60	0,20	12,00
40				0,00	48,90	0,45	13,50			
45	44,70		1,20	48,00						
60	43,70	51.40	1,00	40,00	48,45	0,45	13,50	50,00	0,60	12,00
75	50,20		1,20	48,00						
90	48,90		1,30	52,00	47,80	0,65	13,00	49,50	0,50	10,00
105	47,80		1,10	44,00						
120								49,05	0,45	9,00
150					46,55	1,25	12,50			
165	44,25		3,55	35,50						
170								48,30	0,75	9,00
180	43,55		0,70	28,00						
195	42,90		0,65	26,00						
210					45,30	1,25	12,50			

(fonte:SOUZA,2002,p.53)

Ainda para a trincheira I, foi realizado o ensaio do poço invertido, que também foi descrito no item 4.1.2 do presente trabalho e uma figura esquemática do mesmo foi apresentada na figura 11. Os resultados encontrados para condutividade hidráulica pelo método podem ser vistos na tabela 20 a seguir:

Tabela 20: resultados encontrados pelo método do poço invertido

Leitura [cm]	Δh [cm]	Tempo [min]	Δt [s]
32,5		0,0	
32,8	0,3	0,5	30
33,3	0,5	1,0	30
33,6	0,3	1,5	30
33,7	0,1	2,0	30
34,7	1,0	3,0	60
35,4	0,7	4,0	60
36,1	0,7	5,0	60
37,4	1,3	7,0	120
38,9	1,5	9,0	120
40,1	1,2	11,0	120
41,1	1,0	13,0	120
42,3	1,2	15,0	120
45,3	3,0	20,0	300
47,7	2,4	25,0	300
49,6	1,9	30,0	300
52,0	2,4	35,0	300
53,4	1,4	40,0	300
55,3	1,9	45,0	300

(fonte: SOUZA,2002,p.53)

Para a trincheira II, os resultados encontrados através do ensaio dos cilindros concêntricos são apresentados na tabela 21 a seguir:

Tabela 21: resultados da condutividade hidráulica para o solo da trincheira II

t [min]	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Leitura	Leitura reench.	Δh [cm]	Vm Inf. [mm/h]	Leitura	Leitura reench.	Δh [cm]	Vm Inf. [mm/h]	Leitura	Leitura reench.	Δh [cm]	Vm Inf. [mm/h]
0	49,35		0,00		49,70		0,00		49,65			
1	49,20		0,15	90,00	49,40		0,30	180,00	49,45		0,20	120,00
2	49,10		0,10	60,00	49,20		0,20	120,00	49,30		0,15	90,00
3	49,00		0,10	60,00	49,05		0,15	90,00	49,15		0,15	90,00
4	48,85		0,15	90,00	48,90		0,15	90,00	49,00		0,15	90,00
5	48,75		0,10	60,00	48,75		0,15	90,00	48,90		0,10	60,00
10	48,30		0,45	54,00	48,15		0,60	72,00	48,40		0,50	60,00
15	47,80		0,50	60,00	47,60		0,55	66,00	47,90		0,50	60,00
20	47,35		0,45	54,00	47,05		0,55	66,00	47,45		0,45	54,00
30	46,40		0,95	57,00	46,05		1,00	60,00	46,65		0,80	48,00
45	45,10		1,30	52,00	44,60		1,45	58,00	45,55		1,10	44,00
60	43,80		1,30	52,00	43,25	49,00	1,35	54,00	44,60		0,95	38,00
75	42,60	47,70	1,20	48,00	47,65		1,35	54,00	0,00		0,00	
90	46,45		1,25	50,00	46,30		1,35	54,00	42,45	49,50	1,65	33,00
105	45,25		1,20	48,00	43,75	51,95	2,55	51,00	47,75		1,75	35,00
120	44,05		1,20	48,00	49,20		2,75	55,00	46,15		1,60	32,00
150					46,45		2,75	55,00	44,70		1,45	29,00
180					43,80		2,65	53,00	0,00		0,00	
240					41,60		2,20	44,00	42,20	49,00	2,50	25,00
300									47,30		2,60	26,00
360									44,70		2,60	26,00

(fonte:SOUZA,2002,p.60)

4.2.3 Critérios de dimensionamento

De acordo com Silveira e Goldenfum (2007, p.1), para efeito de cálculo, os volumes podem ser expressos em lâminas de água equivalentes sobre a área em planta do dispositivo, assim, definem-se, inicialmente, as seguintes variáveis de massa (função do tempo):

H_E = lâmina d'água de entrada acumulada medida sobre a área em planta do dispositivo de infiltração.

H_S = lâmina d'água de saída acumulada, também medida sobre a área em planta do dispositivo de infiltração.

Silveira e Goldenfum (2007, p. 2) usam, ainda, curvas IDF de Talbot, pois essa permite solução explícita do volume máximo, sendo a sua transformação a partir de uma IDF

potencial feita da seguinte forma: primeiramente, considerar uma equação da curva IDF potencial, que é a usada geralmente dada por:

$$i = \frac{k}{(t + m)^n}$$

onde :

i = intensidade da chuva, em mm/h;

T = período de retorno, em anos;

t = duração da chuva, em minutos;

k, m, n e d são os parâmetros da equação;

A partir de simulações numéricas, puderam-se ser estabelecidas as seguintes expressões de conversão:

$$k = 0,68 \exp(0,06 T^{0,26} d^{1,13})$$

$$m = d$$

$$n = 1,32 T^{-2,28} d^{0,89}$$

Assim, agora se pode determinar a curva IDF de Talbot, dada por:

$$i = \frac{a}{t + b}$$

onde :

i = intensidade da chuva, em mm/h;

T = período de retorno, em anos;

t = duração da chuva, em minutos;

a, b e c são os parâmetros da equação;

Obtida a curva IDF de Talbot, Silveira e Goldenfum (2007, p. 2), determinam as equações das lâminas de entrada e de saída, que são dadas por:

$$Q_{in} = \frac{Q_{out}}{60(t + c)}$$

$$\frac{q_s}{\gamma} = \frac{H}{60}$$

onde :

q_s = vazão de saída constante do dispositivo, em mm/h;

γ = razão entre a área de percolação e volume do dispositivo, em 1/mm;

β = produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo;

H = profundidade média do volume de acumulação do dispositivo, em mm;

t = duração da chuva, em min;

Após a obtenção das equações das lâminas, o próximo passo é a determinação do volume máximo do dispositivo, feito a partir da maximização da diferença entre H_e e H_s (SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007, p. 2):

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{q_s (H_e - H_s)}{\gamma} = 0$$

A partir das expressões anteriores, pode ser obtido:

$$\frac{q_s}{\gamma} \left[1 - \frac{H_s}{H_e} \right] - \beta H_s = 0$$

Isolando-se essa equação em função do tempo que é obtida a máxima diferença entre os volumes (SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007, p. 2), chegando se à seguinte equação:

$$t = \sqrt{\frac{2 \beta H_e}{q_s}}$$

Como esse é o tempo da máxima diferença de volumes, ou seja, o tempo através do qual se pode calcular o volume de dimensionamento ou volume máximo, Silveira e Goldenfum (2007, p. 2) determinam a seguinte equação geral e pela qual a partir dela, podem-se obter os parâmetros de dimensionamento para diferentes dispositivos de infiltração:

$$V = \left(\sqrt{\frac{A}{60}} \sqrt{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{A}{60}} \sqrt{C} \sqrt{B} \sqrt{L} \right)^2$$

Para o dimensionamento específico de uma trincheira de infiltração, Silveira (2007, p. 4) considera que tanto o comprimento L como a largura B da trincheira são definidos. Portanto, a área de captação do dispositivo é BL. Assim é possível calcular β , definido por:

$$\beta = \frac{A}{BL}$$

onde:

A = área contribuinte à trincheira;

C = coeficiente de escoamento da área de contribuição

B = largura da trincheira

L = comprimento da trincheira

Vale lembrar que a unidade é adimensional, assim, deve se usar a mesma unidade para a área e para os comprimentos. Seguindo a metodologia de Cálculo, Silveira e Goldenfum (2007, p. 4) determinam a área de percolação, ou seja, de passagem da água da trincheira para o solo, corresponde à área das paredes laterais, que é determinada por:

$$\eta = \frac{2}{\beta}$$

onde:

B = largura da trincheira, em mm

Silveira e Goldenfum (2007, p. 5) mostram que a expressão de γ , independente de H, introduzida na de Vmax, estabelece uma equação do tipo:

$$\eta = (1 - 2\sqrt{\beta})^2$$

onde:

$$\eta = V_{\max}$$

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{\phi}{60}} \sqrt{\phi} \phi^{\frac{1}{2}}$$

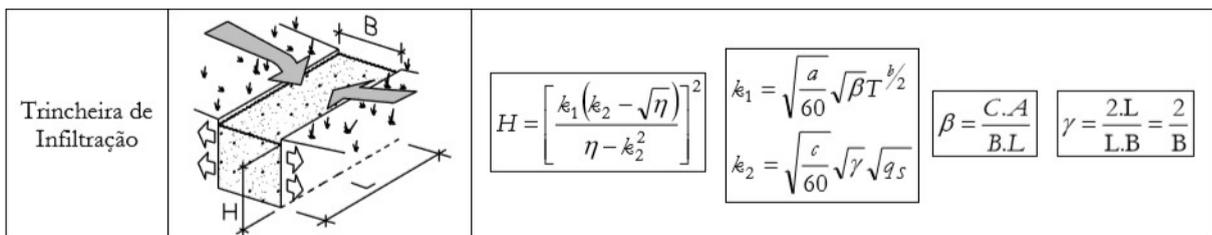
$$\phi_2 = \sqrt{\frac{\phi}{60}} \sqrt{\phi} \sqrt{\phi}$$

E η é a porosidade do material de enchimento da trincheira. Por fim, Silveira e Goldenfum (2007, p. 5) estabelecem a seguinte equação para o cálculo da profundidade de uma trincheira, onde a profundidade H é dada em milímetros:

$$\phi = \left[\frac{\phi_1(\phi_2 - \sqrt{\eta})^2}{\eta - k_2^2} \right]$$

Um quadro-resumo de cálculo para trincheiras é apresentado na figura 14:

Figura 14: quadro-resumo do dimensionamento para trincheiras



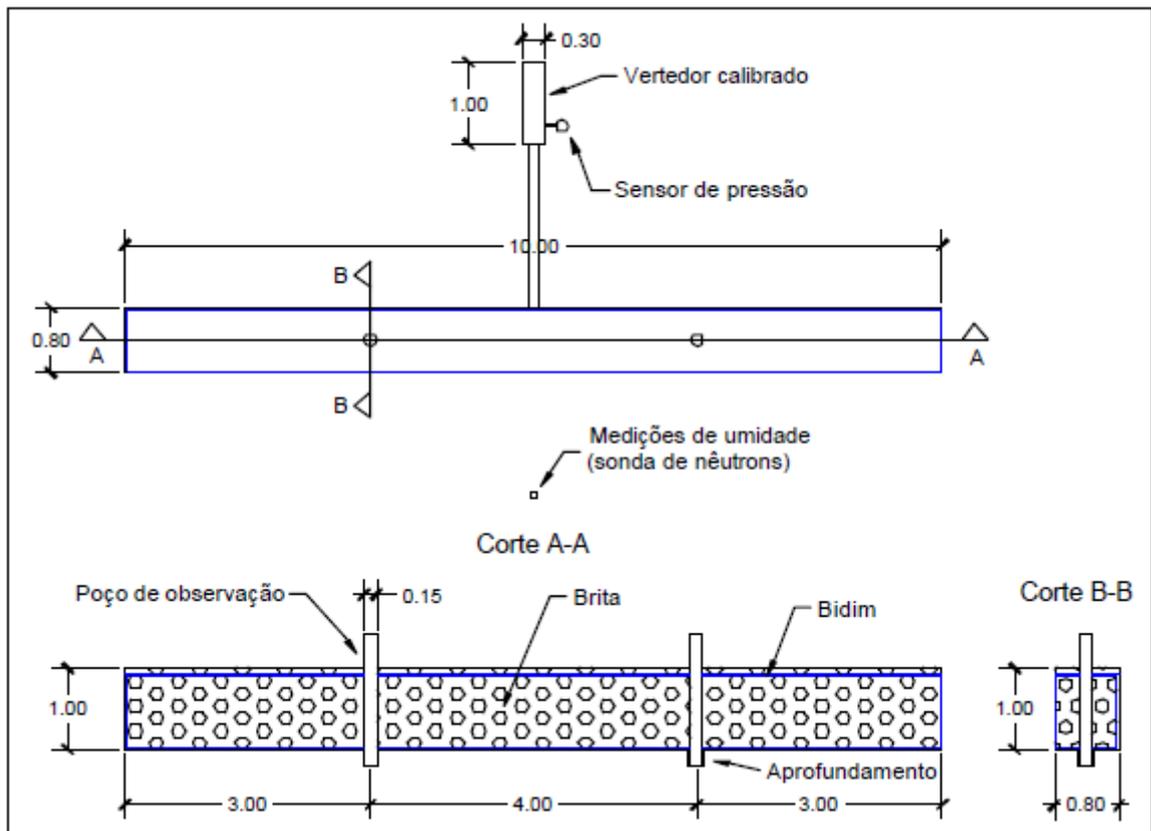
(fonte: adaptado de SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007, p.2)

Segundo Souza (2002 p. 55) existe dois tipos de trincheiras: infiltração total e parcial. No primeiro caso, a única saída da água infiltrada no dispositivo é feita pela infiltração do solo, já no segundo caso, podem ser previstos drenos para que a água seja jogada na rede de drenagem antes da infiltração.

Ainda sobre as estruturas de infiltração, Souza (2002, p. 55) afirma que caso haja falha na estrutura, é grande a chance de que tenha que haver sua troca total da estrutura, assim, recomenda uma filosofia de projeto conservadora, o dimensionamento deve ser feito de forma que se busquem as menores dimensões possíveis com o coeficiente de segurança máximo.

Assim, para o dimensionamento foi fixada a largura de 80 cm e a profundidade em 1m, parte onde o solo tem a camada argilosa, o comprimento adotado foi de 10 m, conforme mostra a figura 15 a seguir:

Figura 15: projeto da trincheira I



(fonte: SOUZA,2002,p.57)

Para a trincheira I, Souza (2002, p. 57), considerou, baseado na declividade do local, a trincheira I com uma área de contribuição de 600 m², que pode ser visto na figura 16 a seguir:

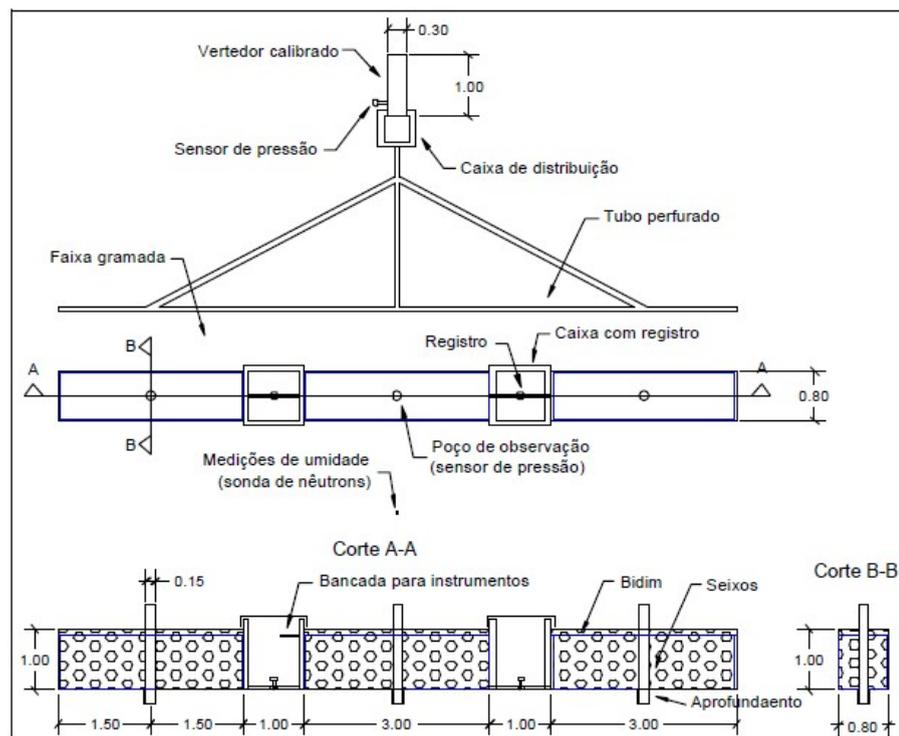
Figura 16: área de contribuição da trincheira II



(fonte: SOUZA,2002,p.58)

Já para a trincheira II, optou-se pela verificação do funcionamento em condições limites, dessa forma, foi adotada uma filosofia de projeto menos conservadora, adotando uma condutividade hidráulica intermediária dos valores encontrados (30 mm/h). Vale lembrar que para ambas as trincheiras foi adotado o tempo de retorno de 5 anos. As dimensões do projeto da trincheira II podem ser vistas na figura 17 a seguir:

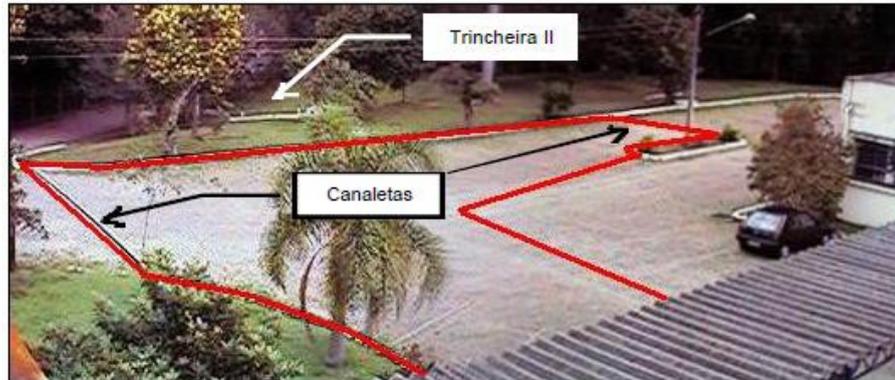
Figura 17: dimensões do projeto da trincheira II



(fonte: SOUZA,2002,p.63)

Diferentemente da trincheira I, a trincheira II já tinha limitadores já existentes, assim a área de contribuição foi determinada mais facilmente, determinado por Souza (2002, p. 64) em 450 m², a localização pode ser vista na figura 18 a seguir:

Figura 18: área de contribuição da trincheira II



(fonte: SOUZA,2002,p.64)

4.2.4 Análise de desempenho

4.2.4.1 Chuvas

A partir dos dados fornecidos dos registradores automáticos, Souza (2002, p. 71) formatou os dados de chuvas das trincheiras I e II conforme as tabelas 22 e 23 a seguir, que foram formatadas de modo que foram descritos somente os eventos utilizados por Souza (2002, p. 72), pois foram excluídos 15 eventos que, ou não apresentaram nível na trincheira, ou ocorreram falhas como entupimento das estruturas de condução de água ou falta de energia dos registradores:

Tabela 22: dados pluviométricos da trincheira I

Evento	duração (d hh:mm)	Pluviógrafo Galpão [mm]	Pluviógrafo Hidrologia [mm]	Vazão (l/s)	Volume Afluyente [m³]	Nível máx. [m]	H útil [m]
10/06/1999	0 21:30	SD	SD	4,470	27,900	0,97	0,83
09/08/1999	0 02:45	SD	SD	1,317	3,215	0,22	0,08
29/02/2000	0 07:35	SD	SD	4,077	4,368	0,27	0,13
04/03/2000	0 04:35	SD	SD	4,077	2,612	0,29	0,15
05/03/2000	0 05:35	SD	SD	3,321	9,146	0,30	0,16
24/03/2000	0 04:35	SD	SD	2,558	1,307	0,23	0,09
04/04/2000	0 07:05	SD	SD	2,870	2,587	0,29	0,15
19/04/2000	0 01:25	SD	SD	2,268	2,401	0,32	0,18
05/05/2000	0 10:55	SD	SD	4,782	5,885	0,37	0,23
08/06/2000	0 13:45	SD	SD	2,177	9,919	0,32	0,18
12/06/2000	0 02:55	SD	SD	3,944	4,062	0,36	0,22
03/07/2000	0 03:30	SD	SD	6,233	5,514	0,34	0,20
09/07/2000	0 14:55	SD	SD	5,397	5,490	0,39	0,25
10/07/2000	0 07:35	SD	SD	3,554	3,554	0,30	0,16
24/08/2000	0 06:05	13,4	15,8	5,890	4,414	0,33	0,19
28/08/2000	0 19:40	32,4	41,4	3,204	9,581	0,30	0,16
13/09/2000	0 05:30	falha	31,2	2,558	3,724	0,32	0,18
15/09/2000	0 15:15	30,8	36,2	3,687	3,817	0,26	0,12
19/09/2000	0 22:10	31,6	35,6	4,212	11,235	0,35	0,21
22/09/2000	0 15:25	45,2	48,8	4,931	24,406	0,78	0,64
25/09/2000	1 20:55	33,0	38,0	4,782	11,917	0,37	0,23
10/10/2000	0 04:25	17,8	22,2	5,239	5,871	0,28	0,14
13/10/2000	0 10:20	19,0	23,4	3,440	8,341	0,33	0,19
18/10/2000	0 09:00	30,4	39,6	9,896	11,152	0,46	0,32
06/11/2000	0 01:25	4,0	7,4	3,687	2,170	0,30	0,16
09/11/2000	0 04:35	22,2	30,2	7,338	8,341	0,44	0,30
13/11/2000	0 02:00	10,6	15,0	1,675	2,238	0,24	0,10
02/12/2000	0 07:31	25,8	37,6	5,397	7,284	0,50	0,36
19/12/2000	0 01:25	8,4	9,8	2,870	2,327	0,31	0,17
11/01/2001	0 05:15	28,4	40,0	4,350	8,043	0,41	0,27
17/01/2001	0 01:20	20,6	19,6	8,138	6,567	0,56	0,42
19/01/2001	1 01:45	22,6	28,8	2,363	4,284	0,32	0,18
27/01/2001	0 00:59	10,4	10,4	5,723	3,275	0,40	0,26
29/01/2001	0 11:14	10,2	23,6	1,189	1,984	0,23	0,09
28/03/2001	0 01:59	19,8	31,6	5,559	6,714	0,49	0,04
03/04/2001	0 01:10	16,6	16,4	2,763	1,560	0,22	0,08
10/09/2001	0 01:53	SD	25,4	3,204	2,747	0,32	0,18
01/10/2001	1 03:24	SD	78,2	2,459	8,808	0,30	0,16
02/10/2001	0 02:34	SD	8,4	2,979	2,111	0,31	0,17
12/11/2001	0 06:21	SD	36,4	1,915	3,254	0,24	0,10

(fonte: adaptado de SOUZA,2002,p.72-73)

Para a trincheira II, Souza (2002) analisou seis eventos, conforme a tabela 23 a seguir:

Tabela 23: dados pluviométricos para a trincheira II

Evento	duração (d hh:mm)	Pluviógrafo Hidrologia [mm]	Vazão (l/s)	Volume Afluyente [m ³]	Nível máx. [m]	H útil [m]
28/09/2001	0 07:38	13,80	0,940	3,124	0,061	0,42
02/10/2001	2 01:56	87,00	2,003	31,030	0,960	0,77
12/11/2001	0 13:23	36,40	2,060	3,881	0,930	0,74
28/01/2001	0 08:15	54,40	1,864	4,457	0,910	0,72
05/12/2001	0 09:13	29,80	falha	falha	0,780	0,59
14/02/2002	0 02:53	7,20	1,005	1,094	0,570	0,38

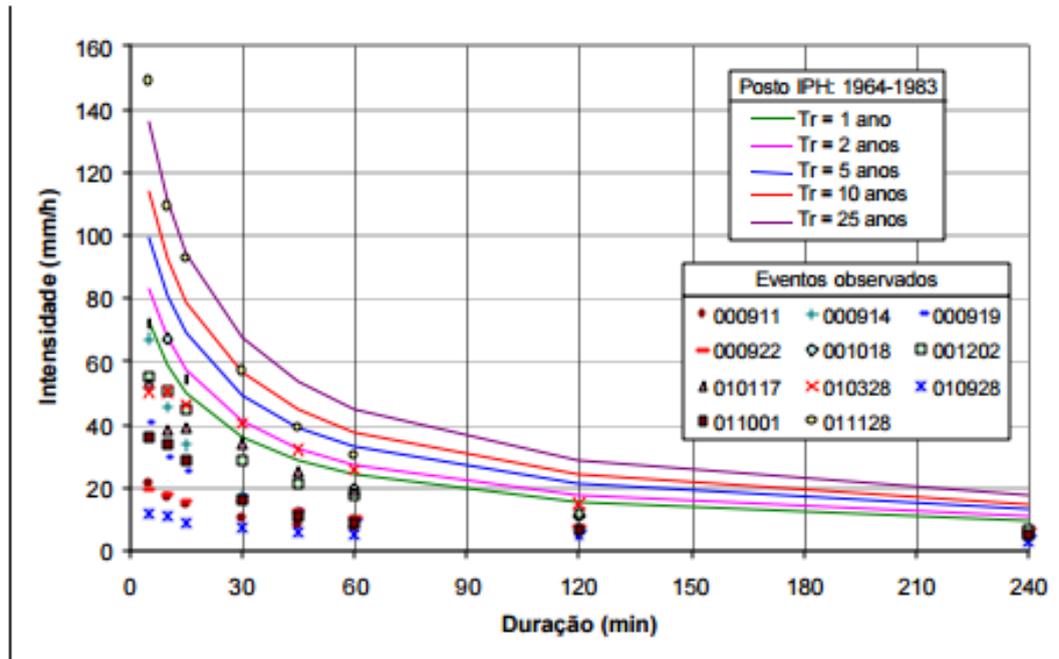
(fonte: adaptado de SOUZA,2002,p.72)

Quanto à análise dos eventos mais significativos, foi analisado o período de retorno de acordo com a equação do posto IPH (Goldenfum et al. 1990), que pode ser vista a seguir:

$$i = \frac{509,859 \cdot \diamond^{0,196}}{(\diamond + 10)^{0,72}}$$

O significado de cada variável já foi explicitado no item 4.2.3. A figura 19 a seguir mostra a inserção dos eventos pluviométricos na curva IDF referida. Pode-se notar que um evento ultrapassou o período de retorno do projeto, em 26/11/2001. Por fim, vale observar que Souza (2002) cita outras condições adversas para o funcionamento dos dispositivos de infiltração, como umidade antecedente do solo, volume precipitado anterior ao período crítico e a duração do evento.

Figura 19: tempo de retorno dos principais eventos observados

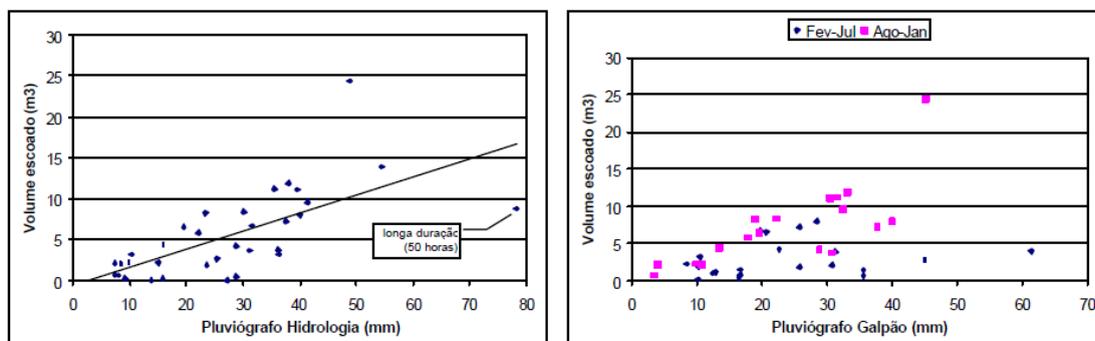


(fonte: SOUZA,2002,p.76)

4.2.4.2 Intercepção vegetal e escoamento superficial

De acordo com Souza (2002, p. 76-77), a intercepção vegetal e a geração de escoamento superficial também dependem das características do evento e da superfície de contribuição, pois quanto mais densa a vegetação, maior o índice de intercepção. Na trincheira de infiltração I, foram observadas perdas significativas por intercepção, retenção de folhas secas e irregularidades no pavimento da área contribuinte. A variação vista na figura 20 para o pluviógrafo Galpão é explicada pelo fato de haver presença maior de vegetação no solo no período entre fevereiro e julho.

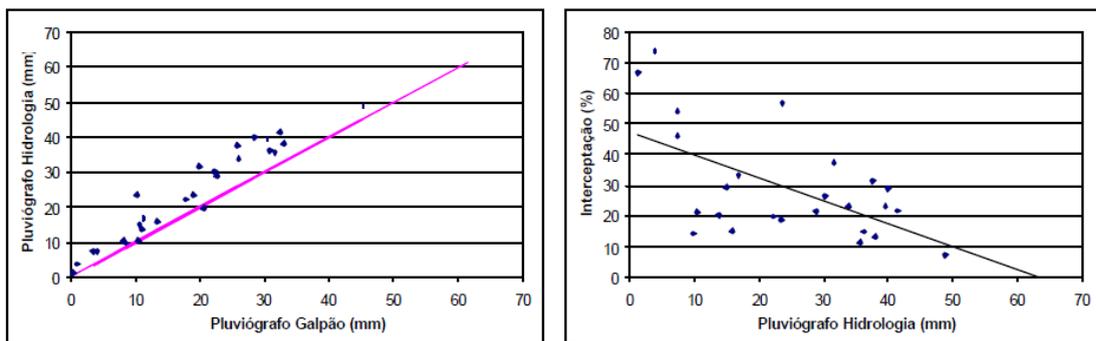
Figura 20: relação entre volume escoado e precipitação para a trincheira I



(fonte:SOUZA,2002,p.77)

Como o pluviógrafo Hidrologia não tem influência da vegetação, a figura 20 mostra ainda que o escoamento apresenta uma correlação melhor nesse pluviógrafo. Na figura 21 a seguir, Souza (2002, p. 77-78) mostra que houve uma boa correlação entre os eventos nos pluviógrafos, embora, caso seja analisado individualmente o pluviógrafo da estação Galpão, tenha apresentado maiores dispersões por razões já citadas como também pode ser visto na figura 21:

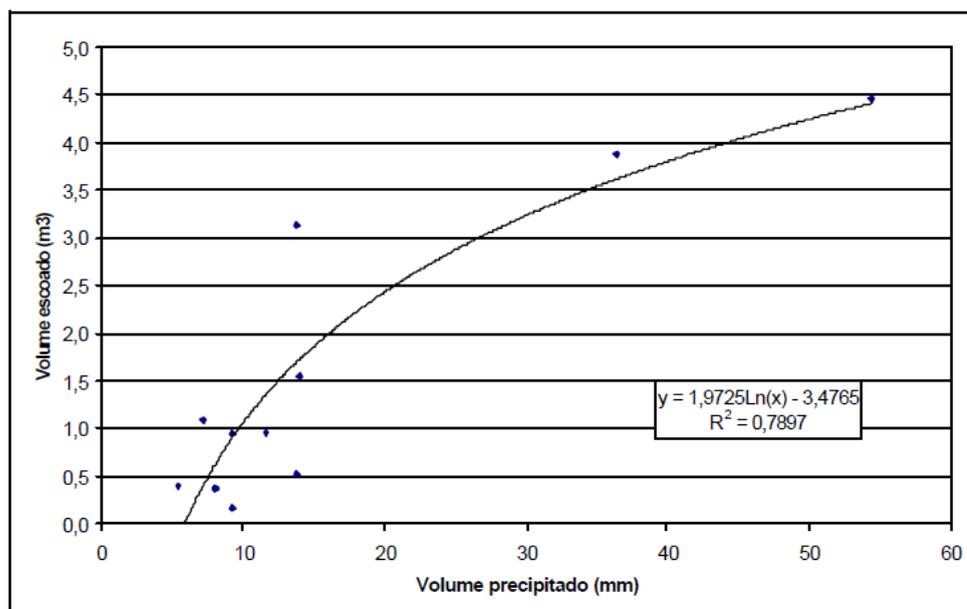
Figura 21: correlações entre as precipitações dos pluviógrafos e interceptação no pluviógrafo Galpão



(fonte: SOUZA,2002,p.78)

Para a trincheira II, Souza (2002, p. 78) pode estabelecer de uma forma mais direta a relação entre precipitação e volume escoado, pois para essa trincheira, as condicionantes não dependiam de eventos sazonais, embora haja eventos com variação significativa, devido ao período seco antecedente, conforme pode ser visto na figura 22 a seguir:

Figura 22: Coeficiente de escoamento na trincheira II



(fonte: SOUZA,2002,p.78)

4.2.4.3 Vazões e velocidades de saída

Souza (2002, p. 78-79) pretendia inicialmente determinar a vazão de saída da trincheira em função do nível d'água no seu interior, porém, o mesmo observou que o esvaziamento ocorre em um intervalo de tempo muito curto, que por consequência faz com que o período de medições na trincheira seja coincidente com o período de alimentação do dispositivo para o caso da trincheira I, assim não se observa ocorrência de esvaziamento puro. Assim, usou-se a equação da continuidade, dada por:

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

Onde:

ΔV é a variação do volume [m^3];

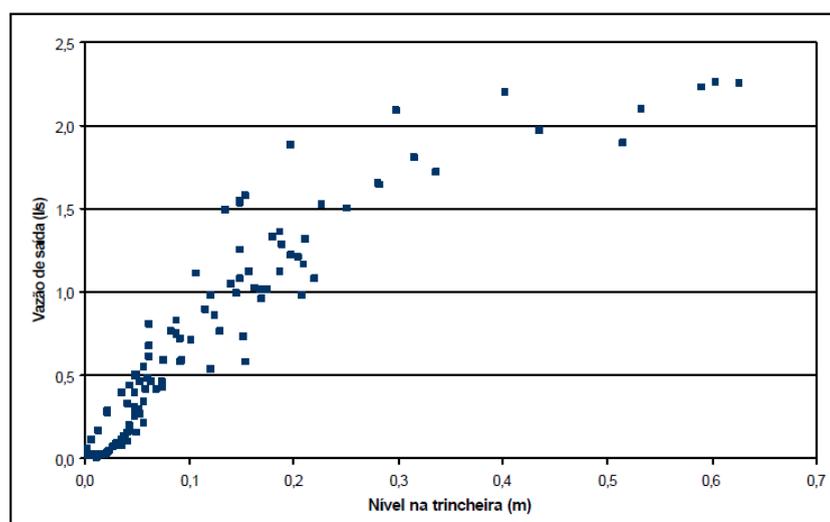
Δt é a variação do tempo [s];

Q_e é a vazão de entrada no dispositivo [m^3/s];

Q_s é a vazão de saída do dispositivo por infiltração [m^3/s];

Como o método envolve poucas variáveis e poucos erros associados, Souza (2002, p. 80) concluiu que a utilização de intervalo de esvaziamento puro apresenta melhores resultados. A figura 23 a seguir mostra as vazões de saída por infiltração na trincheira I para o evento ocorrido em 21/09/2000:

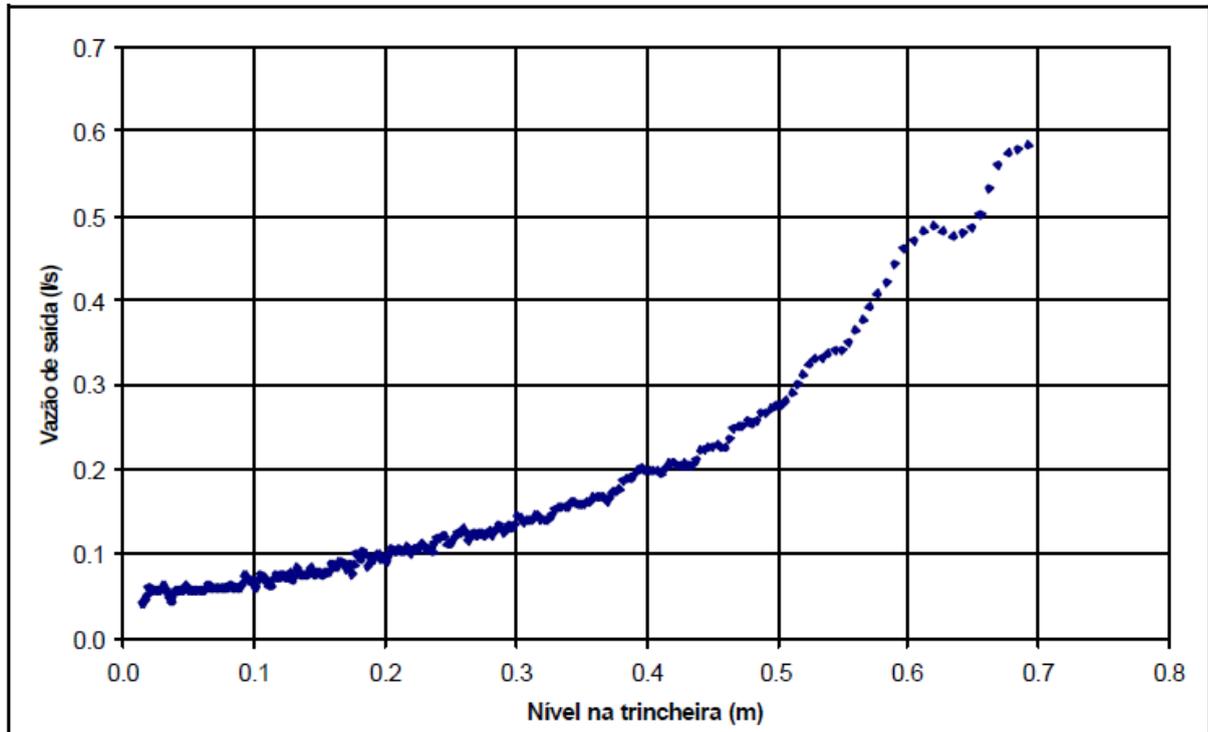
Figura 23: dados de infiltração para a trincheira I



(fonte: SOUZA,2002,p.80)

Para trincheira II, no entanto, Souza (2002, p. 80-81) observou que o esvaziamento ocorria de forma mais lenta, podendo ser observados intervalos de esvaziamento puro, assim, é possível obter a curva relacionando a vazão de saída da trincheira II por infiltração e o nível d'água no seu interior, conforme a figura 24 a seguir:

Figura 24: Curva de infiltração da trincheira II

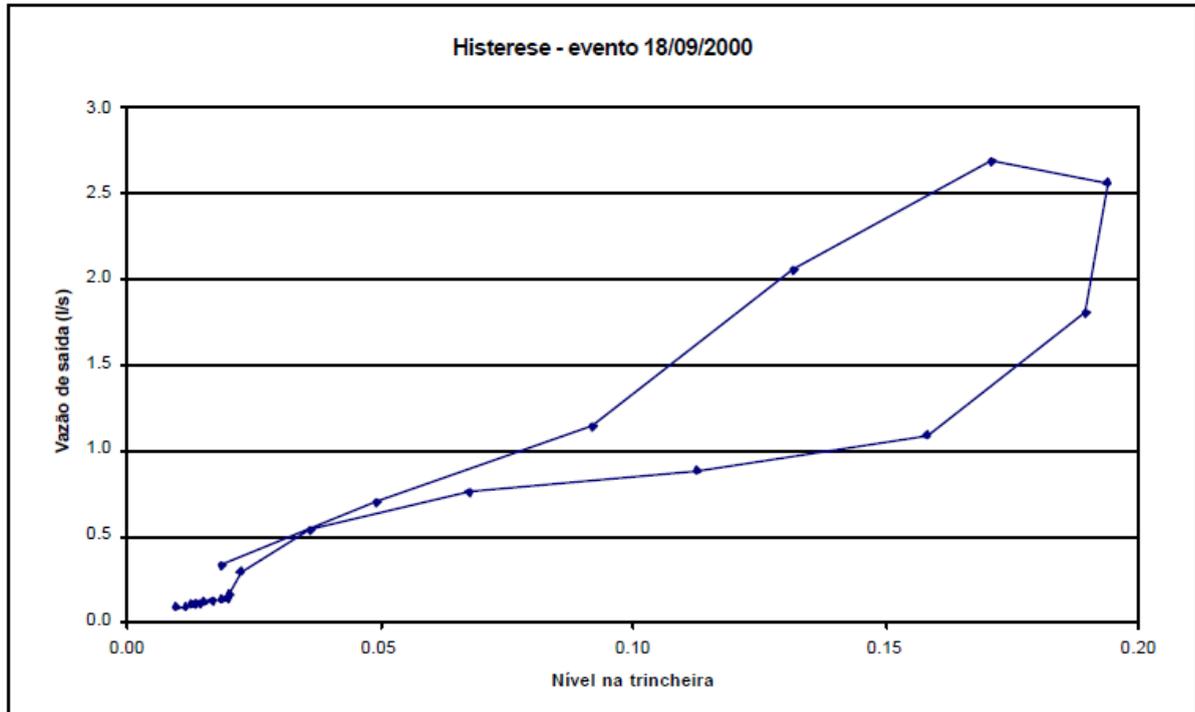


(fonte: SOUZA,2002,p.81)

4.2.4.4 Fenômeno da histerese na trincheira I

O fenômeno de histerese pode ser compreendido como o fato de o teor de água de um solo em equilíbrio é maior durante a drenagem do que durante o processo de umedecimento. Souza (2002, p. 85). O fenômeno tem varias causas como ângulos de contato diferentes entre o processo de umedecimento e drenagem, aprisionamento de ar, expansão contração e envelhecimento do solo e a distribuição irregular dos poros. A histerese pode ser observada para a trincheira I, conforme a figura 25 a seguir:

Figura 25: observação da histerese na trincheira I



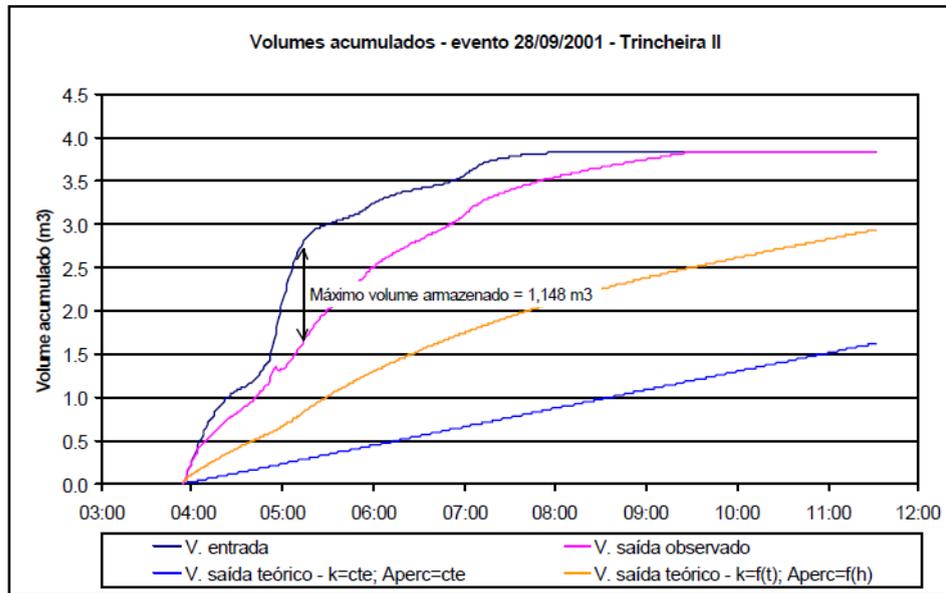
(fonte: SOUZA,2002,p.85)

Como o cálculo da vazão de saída foi considerado somente para o período de recessão, para a trincheira II não foi observada histerese.

4.2.4.5 Superdimensionamento da trincheira pela simplificação do método

Sobre o método de dimensionamento utilizado, Souza (2002, p. 91-92) fez algumas considerações que levaram ao superdimensionamento da estrutura, conforme a figura 26 a seguir:

Figura 26: Superdimensionamento devido à simplificação do método



(fonte:SOUZA,2002,p.92)

Foi levado em consideração que o dimensionamento foi feito com a utilização de taxas de infiltração, em função da condutividade hidráulica saturada: as taxas observadas de infiltração observadas são sempre superiores à condutividade saturada, pois o solo nunca chegou a atingir um estado de saturação, além disso, a área do fundo do dispositivo foi desprezada nos cálculos de infiltração, o fundo tem importante área de contribuição quanto à infiltração, a carga hidráulica no interior do dispositivo não foi considerada, embora o cálculo vazão de entrada e saída também sejam função da carga hidráulica e, por fim, devido ao pouco conhecimento que se tem quanto ao funcionamento de trincheiras de infiltração, o coeficiente de segurança utilizado foi alto, o que resultou na figura 26 mostrada anteriormente, onde os volumes de saída teóricos são menores se comparados aos volumes de saída observados.

4.2.5 Análise de custos

Assim como o caso dos pavimentos permeáveis, foi elaborado um orçamento simplificado baseado em (MOREIRA, s.d., p. 7-8), onde foi desconsiderado o cálculo de serviços básicos ou de menor importância também para o caso das trincheiras. O critério é o mesmo utilizado para os pavimentos permeáveis, conforme o item 4.1.6. e os resultados podem ser vistos na tabela 24 a seguir:

Tabela 24: orçamento para as trincheiras de infiltração do IPH

Implantação da Trincheira I						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83668	1.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	8	m ³	R\$ 79,27	R\$ 634,16
4013	1.2	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	29,6	m ²	R\$ 7,17	R\$ 212,23
73413	1.3	ESCAVACAO MEC.VALA N ESCOR ATE 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	8	m ³	R\$ 13,56	R\$ 108,48
72895	1.4	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	8	m ³	R\$ 16,48	R\$ 131,84
73881	1.5	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXTIL 200G/M2	29,6	m ²	R\$ 7,20	R\$ 213,12
74236/001	1.6	PLANTIO DE GRAMA BATATAIS EM PLACAS	60	m ²	R\$ 12,75	R\$ 765,00
83446	1.7	CAIXA DE PASSAGEM 30X30X40 COM TAMPA E DRENO BRITA	1	un.	R\$ 129,78	R\$ 129,78
75029/001	1.8	TUBO PVC CORRUGADO RIGIDO PERFURADO DN 150 P/ DRENAGEM FORNEC. E INSTALAÇÃO	30	m	R\$ 33,77	R\$ 1.013,10
					total	R\$ 3.207,71
					custo m ²	R\$ 5,35
Orçamento para a Trincheira II						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83668	1.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	7,2	m ³	R\$ 79,27	R\$ 570,74
4013	1.2	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	26,8	m ²	R\$ 7,17	R\$ 192,16
73413	1.3	ESCAVACAO MEC.VALA N ESCOR ATE 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	7,2	m ³	R\$ 13,56	R\$ 97,63
72895	1.4	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	7,2	m ³	R\$ 16,48	R\$ 118,66
73881	1.5	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXTIL 200G/M2	26,8	m ²	R\$ 7,20	R\$ 192,96
74236/001	1.6	PLANTIO DE GRAMA BATATAIS EM PLACAS	60	m ²	R\$ 12,75	R\$ 765,00
83446	1.7	CAIXA DE PASSAGEM 30X30X40 COM TAMPA E DRENO BRITA	1	un.	R\$ 129,78	R\$ 129,78
75029/001	1.8	TUBO PVC CORRUGADO RIGIDO PERFURADO DN 150 P/ DRENAGEM FORNEC. E INSTALAÇÃO	30	m	R\$ 33,77	R\$ 1.013,10
					total	R\$ 3.080,03
					custo m ²	R\$ 6,84

(fonte: Autor com base no SINAPI)

Na parte referente à manutenção, podem ocorrer diferenças, pois a área de contribuição das trincheiras não é a mesma, assim, os orçamentos foram feitos de forma separada em função da área de contribuição que deve ser cuidada, com os mesmos critérios do pavimento permeável conforme mostra a tabela 25 a seguir, referente à trincheira I:

Tabela 25: Orçamento para a manutenção da trincheira I

Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
6121	1.1	AUXILIAR DE SERVIÇOS GERAIS	4	H	R\$ 9,51	R\$ 38,04

(fonte: autor com base no SINAPI)

Os custos referentes à manutenção da trincheira II se apresentam na tabela 26 a seguir:

Tabela 26: Orçamento para a manutenção da trincheira II

Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
6121	1.1	AUXILIAR DE SERVIÇOS GERAIS	3	H	R\$ 9,51	R\$ 28,53

(fonte: autor com base no SINAPI)

Da mesma forma que foi considerada para os pavimentos permeáveis, de que um ano tem 52 semanas, estipulou-se que o custo anual de manutenção da trincheira I é de R\$1.978,08 e para a trincheira II é de R\$1.483,56. Por fim, considerando que a vida útil de dispositivo é de 10 anos, o custo total de manutenção durante a vida útil da trincheira I é de R\$19780,80 e o custo total durante a vida útil da trincheira II é de R\$14835,60.

Obtidos os valores referentes ao desempenho quanto ao escoamento superficial, e também os custos de implantação dos três dispositivos, devem-se fazer, agora, as comparações pertinentes ao trabalho, sobre qual dos dispositivos apresentou o melhor desempenho, também qual apresentou o melhor custo-benefício, e também se ambos são vantajosos em relação aos sistemas de drenagem convencionais, considerando os mesmos parâmetros.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Obtidos os resultados dos dispositivos quanto à sua eficiência no controle do escoamento superficial, agora deverá ser feita a análise entre eles para que se chegue à conclusão sobre qual deles é mais viável, ou ainda, se para a determinada área analisada, seria mais vantajoso a construção de uma rede de drenagem tradicional, vale lembrar que os resultados encontrados são válidos apenas para o clima e solo da região do IPH, em outras localidades, os mesmos devem ser analisados, pois os resultados encontrados podem ser diferentes.

5.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS DISPOSITIVOS NO CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Quando se refere ao controle do escoamento superficial, pôde-se concluir que os três dispositivos obtiveram relativo sucesso, pois, primeiramente, observando-se as tabelas 22 e 23 do trabalho, mostra que em nenhum momento a água infiltrada excedeu a altura útil da trincheira, também deve ser considerado que a mesma suportou bem um evento com período de retorno maior que 10 anos (ver figura 19), que excederia o que foi calculado para o projeto e que também o solo nunca atingiu o limite de saturação. A afirmação pode ser comprovada em (SOUZA, 2002, p. 86).

Sobre a eficiência do pavimento permeável, também pode-se dizer que esses atingiram valores satisfatórios no que propunha a autora. Acioli (2005, p. 126) concluiu que os valores encontrados para a taxa de escoamento superficial encontrada foi, em média, 5%, o que é um resultado muito bom, se for levado em consideração que em áreas pavimentadas, o valor do coeficiente de escoamento médio é em torno de 80% (ver página 39), sendo assim, uma ótima alternativa em áreas onde há circulação de pessoas e automóveis leves em áreas abertas pavimentadas. Vale ainda ressaltar que, como a autora utilizou dois materiais diferentes na implantação da estrutura, onde, no quesito permeabilidade, o bloco vazado levou vantagem sobre o asfalto poroso devido às maiores aberturas (ACIOLI, 2005, p. 39), porém, o solo onde foi implantado o pavimento com asfalto poroso tinha uma melhor taxa de infiltração (ACIOLI, p. 52), o que se pode concluir que é importante levar em conta com as duas

interveniências: tanto o material como a capacidade de infiltração do solo onde será implantado. Por fim, é importante destacar que o pavimento permeável, assim como a trincheira de infiltração, obtiveram resultados satisfatórios mesmo para eventos com período de retorno superiores que o do projeto (10 anos), conforme pode ser visto na tabela 9 do trabalho, onde mostra que a trincheira obteve bom desempenho em relação ao escoamento superficial mesmo para um evento com período de retorno de quase 15 anos.

Assim sendo, a conclusão que se chega é que, no quesito eficiência do escoamento, levando se em conta a proposta de cada dispositivo, ambas são alternativas viáveis no controle das cheias, até mesmo para períodos de retorno maiores que a de projeto.

5.2 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DOS DISPOSITIVOS

Levando em consideração o item 5.1 acima, que afirma que os dois dispositivos foram eficientes no que tange o escoamento superficial, é interessante comparar, então, qual seria mais vantajoso levando em consideração o seu custo-benefício. Para se chegar a uma conclusão, foi utilizado um raciocínio simples: qual dos dispositivos de infiltração oferece um menor custo de implantação pela área de drenagem e qual oferece o menor custo de manutenção. Os resultados obtidos para cada um nos itens 4.1.6 e 4.2.5 foram resumidos na tabela 27 a seguir:

Tabela 27: Quadro comparativo dos custos de implantação cada dispositivo

Dispositivo	Implantação [R\$]	Manutenção [R\$/semana]	Manutenção durante vida útil [10 anos]	Custo por m ² controlado [R\$/m ²]
Pavimento Permeável Asfalto Poroso	R\$ 19.622,27	R\$ 9,51	R\$ 4.945,20	R\$ 135,51
Pavimento Permeável Blocos Vazados	R\$ 16.359,22	R\$ 9,51	R\$ 4.945,20	R\$ 112,98
Trincheira I do IPH	R\$ 3.207,71	R\$ 38,04	R\$ 19.780,80	R\$ 5,35
Trincheira II do IPH	R\$ 3.080,03	R\$ 28,53	R\$ 14.835,60	R\$ 6,84

(fonte: autor, com base no SINAPI)

Por questões referentes a simplicidade dos aspectos construtivos, onde é sabido que o processo de construção de uma trincheira é mais simples que o de um pavimento permeável, o

custo para a implantação de uma trincheira é menor que o pavimento permeável Souza (2002, p. 94) estimou, em 2002, um valor na ordem de R\$400, levando-se em consideração apenas a estrutura, e, considerando o custo pela área de drenagem, as trincheiras também obtiveram vantagem, além disso, deve ser considerado o superdimensionamento no caso das trincheiras, que acaba mascarando a análise de custos descrita acima. Todavia, a implantação desses dispositivos está condicionada a certas especificações descritas no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre, que não recomenda a instalação desses dispositivos em: profundidade do lençol freático no período chuvoso menor que 1,20 m, abaixo da superfície infiltrante, além do caso de camada impermeável a 1,20 m ou menos da superfície infiltrante, também a superfície infiltrante preenchida (ao menos que este preenchimento seja de areia ou cascalho limpos), ou ainda, solos superficiais e subsuperficiais com uma taxa de infiltração saturada menor que 7,60 mm/h.

5.3 IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL EM LOCAL COM PAVIMENTAÇÃO EXISTENTE

Primeiramente, foi comparada a implantação de uma rede de drenagem com a dos pavimentos permeáveis em uma área com pavimentação existente. Assim, considerou-se nesse caso, a construção de um sistema de drenagem convencional junto ao pavimento existente, comparando com o custo da remoção do pavimento existente e a instalação de pavimentos permeáveis no local, conforme a tabela 28 a seguir. É importante observar que esse estudo foi baseado em uma área do IPH, caso a área de referência fosse outra, os mesmos estudos deveriam ser realizados e seria possível a obtenção de resultados diferentes. Observando os dados da tabela, poderá ser visto que, considerando o caso onde a pavimentação já é existente, o custo para a retirada do pavimento atual, mais a implantação de um pavimento permeável tem um custo maior que a construção de uma rede de drenagem convencional. Assim, desconsiderando as questões ambientais que envolvem o sistema de drenagem que leva o esgoto pluvial para jusante, o sistema de drenagem convencional pode ser considerado mais viável.

Tabela 28: comparação dos custos da rede de drenagem com o pavimento permeável

Orçamento para Implantação de rede convencional de drenagem						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83338	1.1	Escavação mecânica, a céu aberto, com Escavadeira Hidráulica	24	m³	R\$ 2,33	R\$ 55,92
93360	1.2	Reaterro Mecanizado de vala com Escavadeira Hidráulica	24	m³	R\$ 13,44	R\$ 322,56
38033	1.3	Tubo PVC corrugado, DN 200, rede coletora de esgoto	25	m	R\$ 48,44	R\$ 1.211,00
38034	1.4	Tubo PVC corrugado, DN 250, rede coletora de esgoto	25	m	R\$ 81,85	R\$ 2.046,25
73840/003	1.5	Assentamento Tubo PVC corrugado, DN 200	25	m	R\$ 4,25	R\$ 106,25
73840/004	1.6	Assentamento Tubo PVC corrugado, DN 250	25	m	R\$ 4,71	R\$ 117,75
83711	1.7	Poço de Visita em alvenaria, para rede D=1 M	1	un.	R\$ 3.058,54	R\$ 3.058,54
74206/001	1.8	Caixa Coletora, 1,20X1,20X1,50 M, Fundo e Tampa de Concreto	1	un.	R\$ 1.150,06	R\$ 1.150,06
83659	1.9	Boca de Lobo em Alvenaria e tampa de Concreto Armado	1	un.	R\$ 613,87	R\$ 613,87
					total	R\$ 8.682,20
					custo/m²	R\$ 33,01
Orçamento para Pavimento Permável revestimento de blocos vazados						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
92970	1.1	DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA C/ MARTELO PERFURADOR ESP. ATÉ 15 CM	144,8	m²	9,89	R\$ 1.432,07
93591	1.2	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 14 M3, EM VIA URBANA	480	m³xkm	2,12	R\$ 1.017,60
41722	1.3	COMPACTAÇÃO MECANICA A 100% DO PROCTOR NORMAL - PAVIMENTAÇÃO URBANA	12	m³	3,96	R\$ 47,52
					subtotal	R\$ 2.497,19
83668	2.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	39,5	m³	R\$ 79,27	R\$ 3.131,17
367	2.2	AREIA GROSSA POSTO JAZIDA/FORNECEDOR	13,2	m³	R\$ 50,00	R\$ 660,00
4013	2.3	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	289,5	m²	R\$ 7,17	R\$ 2.075,72
73765/001	2.4	PAVIMENTAÇÃO EM PARALELEPÍPEDO SOBRE COLCHÃO DE PO DE PEDRA	144,8	m²	R\$ 66,95	R\$ 9.694,36
73413	2.5	ESCAVAÇÃO MEC. VALA N ESCOR ATÉ 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	65,8	m³	R\$ 13,56	R\$ 892,25
72895	2.6	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	65,8	m³	R\$ 16,48	R\$ 1.084,38
73881	2.7	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXTIL 200G/M2	289,5	m²	R\$ 7,20	R\$ 2.084,40
					subtotal	R\$ 19.622,27
					total	R\$ 22.119,46
					custo/m²	R\$ 152,76
Orçamento para Pavimento Permável revestimento de alfalto poroso						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
92970	1.1	DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA C/ MARTELO PERFURADOR ESP. ATÉ 15 CM	144,8	m²	9,89	R\$ 1.432,07
93591	1.2	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 14 M3, EM VIA URBANA	480	m³xkm	2,12	R\$ 1.017,60
41722	1.3	COMPACTAÇÃO MECANICA A 100% DO PROCTOR NORMAL - PAVIMENTAÇÃO URBANA	12	m³	3,96	R\$ 47,52
					subtotal	R\$ 2.497,19
83668	2.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	39,5	m³	R\$ 79,27	R\$ 3.131,17
34770	2.2	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE P/ PAVIMENTAÇÃO CAP 50/70	10,1	m³	R\$ 741,37	R\$ 7.487,84
4013	2.3	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	289,5	m²	R\$ 7,17	R\$ 2.075,72
73413	2.4	ESCAVAÇÃO MEC. VALA N ESCOR ATÉ 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	52,6	m³	R\$ 13,56	R\$ 713,26
72895	2.5	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	52,6	m³	R\$ 16,48	R\$ 866,85
73881	2.6	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXTIL 200G/M2	289,5	m²	R\$ 7,20	R\$ 2.084,40
					subtotal	R\$ 16.359,22
					total	R\$ 18.856,41
					custo/m²	R\$ 130,22

(fonte: autor com base no SINAPI)

5.4 IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL EM LOCAL SEM PAVIMENTAÇÃO EXISTENTE

Para esse caso, será comparada a implantação para o caso de um empreendimento novo, cuja pavimentação ainda não foi implantada. Assim, foram comparados os custos para a instalação de uma rede de drenagem convencional, junto com um sistema de pavimentação

convencional, com um sistema de pavimentos permeáveis com infiltração total. Os custos de implantação para os dois casos estão na tabela 29, seguir:

Tabela 29: comparação dos custos de implantação em um local sem pavimentação

Orçamento para Implantação de rede convencional de drenagem						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83338	1.1	Escavação mecânica, a céu aberto, com Escavadeira Hidráulica	24	m ³	R\$ 2,33	R\$ 55,92
93360	1.2	Reaterro Mecanizado de vala com Escavadeira Hidráulica	24	m ³	R\$ 13,44	R\$ 322,56
38033	1.3	Tubo PVC corrugado, DN 200, rede coletora de esgoto	25	m	R\$ 48,44	R\$ 1.211,00
38034	1.4	Tubo PVC corrugado, DN 250, rede coletora de esgoto	25	m	R\$ 81,85	R\$ 2.046,25
73840/003	1.5	Assentamento Tubo PVC corrugado, DN 200	25	m	R\$ 4,25	R\$ 106,25
73840/004	1.6	Assentamento Tubo PVC corrugado, DN 250	25	m	R\$ 4,71	R\$ 117,75
83711	1.7	Poço de Visita em alvenaria, para rede D=1 M	1	un.	R\$ 3.058,54	R\$ 3.058,54
74206/001	1.8	Caixa Coletora, 1,20X1,20X1,50 M, Fundo e Tampa de Concreto	1	un.	R\$ 1.150,06	R\$ 1.150,06
83659	1.9	Boca de Lobo em Alvenaria e tampa de Concreto Armado	1	un.	R\$ 613,87	R\$ 613,87
					subtotal	R\$ 8.682,20
73849/001	2.1	AREIA ASFALTO A QUENTE (AAUQ) COM CAP 50/70, INCLUSO USINAGEM E APLICAÇÃO	20,93	m ³	R\$ 537,95	R\$ 11.259,29
95903	2.2	TRANSPORTE CAMINHÃO 10 M3 DE MASSA ASFALTICA PARA PAVIM. URBANA	418,6	m ³ xkm	0,78	R\$ 326,51
73710	2.3	BASE PARA PAVIMENTACAO COM BRITA GRADUADA, INCLUSIVE COMPACTACAO	20,93	m ³	78,79	R\$ 1.649,07
					subtotal	R\$ 13.234,88
					total	R\$ 21.917,08
					custo/m ²	R\$ 151,36
Orçamento para Implantação de Pavimento permeável revestimento de blocos vazados						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83668	1.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	39,5	m ³	R\$ 79,27	R\$ 3.131,17
367	1.2	AREIA GROSSA POSTO JAZIDA/FORNECEDOR	13,2	m ³	R\$ 50,00	R\$ 660,00
4013	1.3	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	289,5	m ²	R\$ 7,17	R\$ 2.075,72
73765/001	1.4	PAVIMENTACAO EM PARALELEPIEDO SOBRE COLCHAO DE PO DE PEDRA	144,8	m ²	R\$ 66,95	R\$ 9.694,36
73413	1.5	ESCAVACAO MEC. VALA N ESCOR ATE 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	65,8	m ³	R\$ 13,56	R\$ 892,25
72895	1.6	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	65,8	m ³	R\$ 16,48	R\$ 1.084,38
73881	1.7	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXTIL 200G/M2	289,5	m ²	R\$ 7,20	R\$ 2.084,40
95903	1.8	TRANSPORTE CAMINHÃO 10 M3 DE MASSA ASFALTICA PARA PAVIM. URBANA	418,6	m ³ xkm	0,78	R\$ 326,51
					total	R\$ 19.948,78
					custo/m ²	R\$ 137,77
Orçamento para Implantação de Pavimento permeável revestimento de asfalto poroso						
Código SINAPI	Item	Insumo/serviço	Qtd.	un.	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
83668	1.1	CAMADA DRENANTE COM BRITA NUM 2	39,5	m ³	R\$ 79,27	R\$ 3.131,17
34770	1.2	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE P/ PAVIMENTAÇÃO CAP 50/70	10,1	m ³	R\$ 741,37	R\$ 7.487,84
4013	1.3	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO AGULHADO DE FILAMENTOS CONTÍNUOS P/ DRENAGEM RT 14	289,5	m ²	R\$ 7,17	R\$ 2.075,72
73413	1.4	ESCAVACAO MEC. VALA N ESCOR ATE 1,5M C/RETRO MAT 1A COM REDUTOR	52,6	m ³	R\$ 13,56	R\$ 713,26
72895	1.5	CARGA, MANOBRA E DESCARGA DE MATERIAIS DIVERSOS COM BASCULANTE 6M3	52,6	m ³	R\$ 16,48	R\$ 866,85
73881	1.6	EXECUÇÃO DE DRENO COM MANTA GEOTÊXTIL 200G/M2	289,5	m ²	R\$ 7,20	R\$ 2.084,40
95903	1.7	TRANSPORTE CAMINHÃO 10 M3 DE MASSA ASFALTICA PARA PAVIM. URBANA	418,6	m ³ xkm	0,78	R\$ 326,51
					total	R\$ 16.685,73
					custo/m ²	R\$ 115,23

(fonte: autor com base no SINAPI)

Assim, considerando um local onde não haja pavimentação existente, os custos para qualquer um dos dois tipos de pavimentos permeáveis tornam-se mais vantajoso que a construção de um pavimento convencional e, junto a ele uma rede de drenagem.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após analisados os custos, primeiramente pode-se concluir que o custo de implantação por área de contribuição das trincheiras de infiltração foi mais vantajoso em relação aos custos dos pavimentos permeáveis. No entanto, deve-se observar que as trincheiras precisam de um local de implantação com características específicas, como a declividade e o nível do lençol freático, características que também devem ser observadas no caso dos pavimentos permeáveis.

Considerando, agora, que o pavimento já existe, porém, sem um sistema de drenagem, os custos para a implantação de um sistema de drenagem convencional, que conduz o escoamento superficial através de tubos e canais mostraram ser menores que os custos para a retirada do pavimento existente e a implantação de um sistema de pavimentos permeáveis por infiltração total. Porém, quando se considera um local onde não há pavimentação, a implantação de um sistema de pavimentos permeáveis tem um custo menor que o de implantação um pavimento convencional com um sistema de drenagem convencional. Vale ressaltar que a pesquisa foi feita considerando a área do IPH da UFRGS, em outras áreas, o resultado pode não ser o mesmo.

Portanto, o que sugere o trabalho é que, em empreendimentos com pavimentação existente, caso o critério de escolha seja exclusivamente o custo, se utilize o sistema de drenagem convencional, desde que não exceda a vazão máxima de entrada na rede de coleta pluvial estipulada pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre, caso contrário, é obrigatório também o controle na fonte. Porém, considerando um empreendimento novo, cuja pavimentação ainda não foi executada, a implantação de um pavimento permeável, além de controlar o escoamento superficial, que reduz o volume de esgoto pluvial jogado na rede de esgoto pluvial, obteve um custo de implantação menor que o do que um sistema de pavimentação com drenagem convencional, assim, recomenda-se a utilização do primeiro.

Para futuros trabalhos, é sugerido fazer uma comparação com o uso de valas de infiltração, ou ainda, fazer comparações com outros dispositivos de controle como microrreservatórios de retenção em uma mesma área, porém considerando uma região de solo sedimentar, uma vez que não se recomendam nesse tipo de solo os dispositivos analisados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle de escoamento superficial na fonte**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- BEMFICA, D. C. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre**, 1999. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Brasília, 2016. Disponível em: < http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_660>. Acesso em: 03 nov. 2016.
- DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS (Porto Alegre). **Plano diretor de drenagem urbana: manual de drenagem urbana**. Porto Alegre, 2005
- GOLDENFUM, J. A. **Análise quali-quantitativa de tecnologias sustentáveis para gerenciamento das águas pluviais urbanas**. 2013. 23 f. Projeto de Pesquisa para Renovação de Bolsa de Produtividade – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- GOLDENFUM, J. A.; SCHETTINI, E. B. C.; SILVESTRINI, J. H. 1990. **Chuvas intensas em Porto Alegre: determinação de curvas IDF**. 1990. 26f. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.
- MOREIRA, F. B.; **Avaliação dos custos de instalação de diferentes dispositivos de controle pluvial na fonte para a área de expansão do parque tecnológico do campus do vale**. 10f. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (Comunicação pessoal).
- SILVEIRA, A. L. L., GOLDENFUM, J. A. **Metodologia generalizada para pre-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, p.157 168, 2007.
- SOUZA, V. C. B., **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. 2002. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH; Rhama, 2007.