

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA

LUCAS SAUER MOREIRA

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA INFILTRAÇÃO AO LONGO DO
TEMPO EM UM PAVIMENTO DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE
CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2018

LUCAS SAUER MOREIRA

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA INFILTRAÇÃO AO LONGO DO
TEMPO EM UM PAVIMENTO DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Alessandro Pansera

TOLEDO

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 182

Análise da redução da infiltração ao longo do tempo em um pavimento de blocos intertravados de concreto

por

Lucas Sauer Moreira

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13:50 h do dia **13 de Novembro de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^a MSc Patricia Cristina Steffen
(UTFPR – TD)

Prof^o Dr. Elmagno C. Santos Silva
(UTFPR – TD)

Prof Dr. Wagner Alessandro Pansera
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

Moreira, Lucas Sauer. Análise da redução da infiltração ao longo do tempo em um pavimento de blocos intertravados de concreto. 64f. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

A impermeabilização urbana é um problema que tem sido enfrentado por grandes cidades, sobretudo nas últimas décadas. A grande impermeabilização do solo faz com que a água precipitada pela chuva não infiltre, como geralmente acontece em um terreno natural, aumentando o escoamento superficial e gerando alagamentos que trazem sérios danos econômicos e riscos à saúde pública. Tendo em vista que o sistema de drenagem convencional não é uma solução adequada para tratar esse problema, tem-se investido na drenagem urbana sustentável. Entre essas medidas sustentáveis estão a elaboração de leis de uso e ocupação do solo e a utilização de pavimentos permeáveis, como o de blocos intertravados de concreto. Inclusive, alguns municípios já têm aceitado esse tipo de pavimento como área permeável em um terreno. Entretanto, a elaboração de pavimentos permeáveis raramente segue a norma ou a literatura especializada para a sua execução e nenhum cuidado é tomado em relação à sua manutenção, conduzindo a pavimentos inadequadamente dimensionados no que tange à característica de drenagem. Portanto, este trabalho visou analisar a infiltração nesses tipos de pavimentos mais comumente executados ao longo do tempo. Para tanto, um novo pavimento de blocos intertravados de concreto foi confeccionado e a análise se deu de acordo com os diferentes materiais utilizados na camada de assentamento, uma mistura de areia média com pedrisco, pó de pedra e somente areia média, no decorrer de 12 meses através dos ensaios do infiltrômetro de anéis concêntricos e da norma americana ASTM C1701. Os dois ensaios levaram a conclusões similares, mostrando uma redução da capacidade de infiltração do pavimento ao longo de 12 meses. Obteve-se que a permeabilidade das partes do pavimento constituídas da mistura de areia média com pedrisco e só areia média na camada de assentamento são consideradas médias, com taxas de infiltração após 12 meses de $2,01 \cdot 10^{-5}$ e $1,70 \cdot 10^{-5}$ m/s, respectivamente, e a parte com pó de pedra tendo permeabilidade considerada baixa, inviabilizando a utilização desse material. Verificou-se, também, a influência da distribuição granulométrica na capacidade de infiltração do pavimento, não sendo só o tamanho dos grãos importante, mas também a uniformidade dos mesmos para proporcionar um número de vazios adequado.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Pavimentos Permeáveis. Impermeabilização.

ABSTRACT

Moreira, Lucas Sauer. Infiltration reduction analysis over time in an interlocking concrete block pavement. 62f. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

Waterproofing is a problem that has been faced by big cities, especially in recent decades. The soil waterproofing causes that the water precipitated by the rain does not infiltrate as it happens in a natural terrain. It increases the superficial runoff and generates floods that bring serious economic damages and risks to public health. Considering that the conventional drainage system is not an adequate solution to face this problem, it has been invested in sustainable urban drainage. Among these sustainable measures are the land use laws and the use of permeable pavements, such as interlocking concrete blocks. In fact, some counties have already accepted this type of pavement as a permeable area in a terrain. However, the elaboration of permeable pavements rarely follows the norm or the specialized literature for its execution and no care is taken in relation to its maintenance, leading to improperly scaling in relation to the drainage characteristic. Therefore, this research aims to analyze the infiltration in these types of pavements most commonly executed over time. In order to do so, a new concrete interlocking block pavement was built and the analysis was made according to the different materials used in the settlement layer that was a mixture of medium sand with pea gravel, stone powder, and medium sand, in the course of 12 months through the tests of the Double Ring Infiltrometer and the American standard ASTM C1701. The two tests led to similar conclusions, showing a reduction of the infiltration capacity of the pavement over the course of 12 months. It was obtained that the permeability of the parts of the pavement constituted of the mixture of medium sand with pea gravel and only medium sand in the layer of settlement are considered medium, with infiltration rates after 12 months of $2,01 \cdot 10^{-5}$ and $1,70 \cdot 10^{-5}$ m/s, respectively, and the part with stone powder has permeability considered low, rendering ineffective the use of this material. It was also verified the influence of the granulometric distribution on the infiltration capacity of the pavement, not only the size of the grains being important, but also the uniformity of the grains to provide a suitable number of voids.

Key-words: Urban drainage. Permeable Pavements. Waterproofing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção tipo de um pavimento permeável de acordo com a NBR 15953/2011	13
Figura 2 – Seção de um pavimento permeável comumente executado	14
Figura 3 – Ciclo Hidrológico	17
Figura 4 – Curva de infiltração de acordo com o modelo de Horton	19
Figura 5 – Representação da utilização de anéis concêntricos.....	20
Figura 6 – Modelo de Horton para pavimentos permeáveis	20
Figura 7 – Hidrograma típico resultante da ocorrência de uma precipitação	22
Figura 8 – Comparação esquemática entre os hidrogramas de uma bacia rural e posteriormente urbanizada.....	23
Figura 9 – Médias mensais de precipitação da cidade de Toledo – Pr.	32
Figura 10 – Fluxograma da pesquisa.	33
Figura 11 – Representação do pavimento	34
Figura 12 – Infiltrômetro de anéis concêntricos.....	36
Figura 13 – Instalação do anel cilíndrico	38
Figura 14 – Faixas granulométricas dos materiais da camada de assentamento	40
Figura 15 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para o solo	41
Figura 16 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para a areia média	42
Figura 17 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para o pó de pedra.....	42
Figura 18 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para areia média com pedrisco	43
Figura 19 – Modelos de Horton para cada material de assentamento	44
Figura 20 – Resultados do ensaio dos anéis concêntricos na parte do pavimento constituído de areia média na camada de assentamento	45
Figura 21 – Resultados do ensaio dos anéis concêntricos na parte do pavimento constituído de pó de pedra na camada de assentamento	45
Figura 22 – Resultados do ensaio dos anéis concêntricos na parte do pavimento constituído de pedrisco com areia média na camada de assentamento	46

Figura 23 – Comparativo dos modelos de Horton do pavimento.....47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Típicos valores do coeficiente de <i>runoff</i> em áreas urbanas	21
Tabela 2 – Coeficientes de escoamentos pelas superfícies.....	28
Tabela 3 – Valores típicos de taxa de infiltração de solos.....	30
Tabela 4 – Dados do ensaio de granulometria.....	40
Tabela 5 – Parâmetros da equação de Horton dos materiais	43
Tabela 6 – Parâmetros da equação de Horton do pavimento	46
Tabela 7 – Parâmetros da equação de Horton do experimento de Jabur et al.	48
Tabela 8 – Taxa de infiltração	49
Tabela 9 – Graus de permeabilidade do pavimento estudado (inicial).....	50
Tabela 10 – Graus de permeabilidade do pavimento estudado após 12 meses.....	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo Geral.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	16
2.1 CICLO HIDROLÓGICO.....	16
2.2 INFILTRAÇÃO	17
2.2.1 Modelo da capacidade de infiltração de Horton.....	18
2.3 ESCOAMENTO SUPERFICIAL	21
2.4 DRENAGEM URBANA	24
2.4.1 Drenagem urbana sustentável.....	25
2.5 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	27
2.5.1 O pavimento permeável ideal	27
2.5.2 A situação atual dos pavimentos permeáveis no Brasil.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 DESCRIÇÃO CLIMÁTICA DA REGIÃO DO EXPERIMENTO	32
3.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	33
3.3 COLETA DE DADOS.....	34
3.3.1 Infiltrômetro de Anéis Concêntricos	34
3.3.2 Norma Americana ASTM C1701	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE ASSENTAMENTO	40
4.2 INFILTRÔMETRO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS	44
4.3 ASTM C1701	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	54

APÊNDICE A – TABELAS COM DADOS COLETADOS EM CAMPO DO ENSAIO DE INFILTRÔMETRO DE ANÉIS CONCÊNTRICOS	57
APÊNDICE B – TABELAS COM DADOS COLETADOS EM CAMPO DO ENSAIO DA NORMA AMERICANA ASTM C1701	64

1 INTRODUÇÃO

O ser humano modifica o ambiente em que vive. Desde os primeiros povoados nossa espécie tem utilizado e modificado em seu benefício a natureza, sem se preocupar necessariamente com as consequências.

Com o advento da indústria, houve um grande êxodo rural, aumentando drasticamente a população urbana e, com isso, a necessária modificação do ambiente natural. Entretanto, essa modificação foi totalmente desorganizada e descontrolada, levando a sérios problemas, entre os quais se destaca a drenagem urbana (PINTO, 2011).

Essa urbanização descontrolada e sem preocupação ambiental, resultou em altas taxas de impermeabilização do solo, favorecendo a ocorrência de alagamentos, principalmente em grandes cidades, como São Paulo, onde esse problema comumente faz parte do noticiário (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Atualmente, esse êxodo ainda existe em consequência à mecanização da agricultura. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), em 2014, 54% da população mundial vivia em áreas urbanas, uma proporção que deve chegar a 66% em 2050 que, considerando o aumento populacional, significa 6 bilhões de habitantes vivendo nas cidades do planeta (O GLOBO, 2014).

Portanto, os problemas de grandes aglomerados urbanos tenderão a aumentar, a menos que soluções sustentáveis sejam tomadas.

Essas soluções sustentáveis, no que diz respeito especificamente à drenagem urbana, são aquelas em que há a criação de medidas que contrabalanceiem as modificações impostas ao ambiente natural pela urbanização, tentando manter esse ambiente o mais próximo possível do natural (CHRISTOFIDIS, 2010).

Entre essas medidas destacam-se as leis de uso e ocupação do solo e a utilização de pavimentos permeáveis.

Como exemplo da utilização de leis de uso e ocupação do solo há os municípios que têm exigido em seus planos diretores que uma parte do terreno urbano, geralmente entre 15% e 30% seja mantida permeável para controlar a impermeabilização das superfícies. (MARCHIONI, SILVA, 2010).

Com objetivo de proporcionar o aumento da infiltração no solo, tem sido implantado com sucesso em países como Estados Unidos e Inglaterra o chamado pavimento permeável, que consiste da utilização de superfícies que permitem a passagem da água para camadas subjacentes (REVISTA PRISMA, 2011).

No Brasil, o uso desse tipo de pavimento, especialmente o de blocos intertravados de concreto, tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, incentivado, entre outros fatores, por leis que consideram pavimentos permeáveis como áreas não impermeabilizadas de um terreno. Entretanto, a execução correta e a manutenção periódica desse tipo de pavimento podem ser essenciais para que ocorra uma adequada infiltração da água precipitada, o que não vem acontecendo no país. (JABUR et al. 2015; MARTINS, 2014).

Portanto, este trabalho buscou a análise da infiltração ao longo do tempo em um pavimento permeável, do tipo blocos intertravados de concreto, executado de acordo com a metodologia e materiais empregados na cidade de Toledo-PR.

1.1 JUSTIFICATIVA

O pavimento permeável feito com blocos intertravados de concreto possui norma específica para a sua execução, a NBR 15953/2011, Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução, que estabelece critérios quanto à execução e o tipo de material a ser utilizado. Ela especifica que o pavimento deve ter uma camada de assentamento, além de camada de base e sub-base, feitos com materiais pétreos granulares para que haja uma quantidade adequada de vazios, de forma a permitir a adequada infiltração da água, como mostra a figura 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

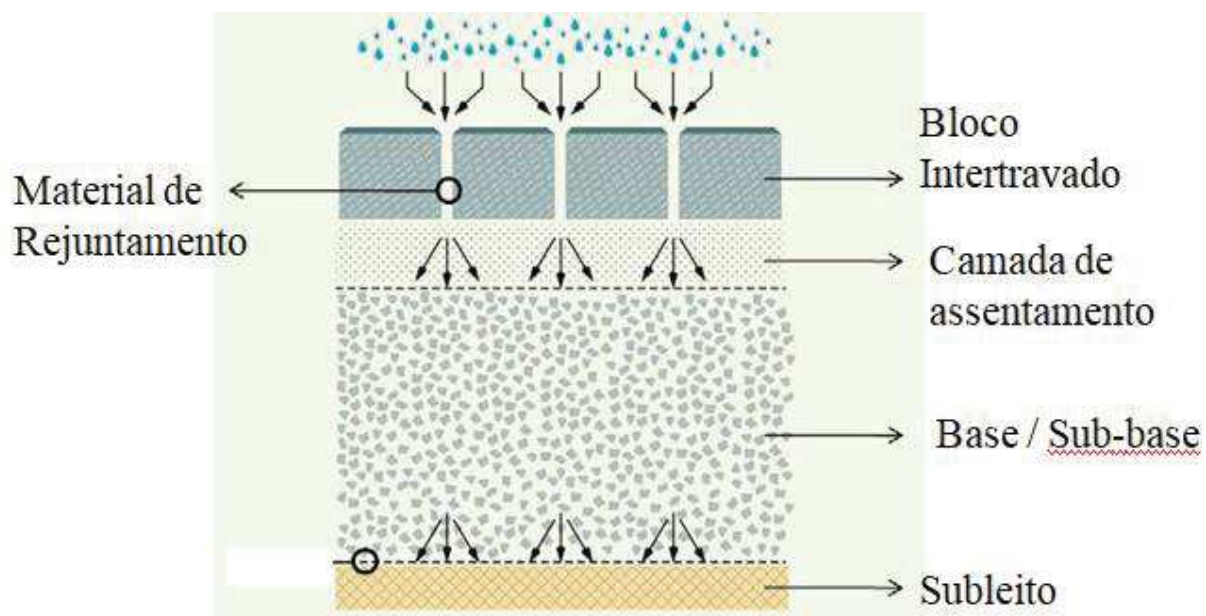


Figura 1 – Seção tipo de um pavimento permeável de acordo com a NBR 15953/2011
Fonte: Marchioni e Silva (2010, p.8)

Entretanto, nota-se um claro descumprimento dessa norma, como verificado por Martins (2014). O autor constatou que o pavimento executado na cidade de Pato Branco-PR, é diferente do descrito pela NBR 15953/2011. Há apenas uma camada de assentamento diretamente sobre o subleito, não havendo camada de base ou sub-base que proporcionaria a retenção de água, como mostra a figura 2. Além do mais, a camada de assentamento, geralmente, possui granulometria inferior à recomendada, já que se costuma usar areia e pó de pedra, diminuindo a infiltração.



→ Bloco Intertravado

→ Camada de assentamento

→ Subleito

Figura 2 – Seção de um pavimento permeável comumente executado
 Fonte: Martins (2014, p.42)

Isso acontece porque, segundo Moretti (1997), o passeio público ou áreas de garagem (onde é mais usual o uso desse pavimento) é de responsabilidade do proprietário do lote e, por isso, muitas vezes não há a preocupação com a necessidade de conhecimento técnico para a execução dos mesmos.

Logo, o problema constatado por Martins (2014), apesar de ser específico da cidade de Pato Branco, pode ter abrangência nacional.

A manutenção é outra questão dessa problemática. Mesmo pavimentos adequadamente projetados e executados tendem a perder a capacidade de infiltração ao longo do tempo. Estudos realizados em alguns países reportados por Pratt *et al.* (2002, apud BUTLER; DAVIES, 2004) indicam que a taxa de infiltração de um pavimento permeável pode reduzir ao longo de sua vida útil até 10% em relação ao total quando novo. Para limitar essa impermeabilização da superfície, a Associação de pesquisa e informação da indústria da construção do Reino Unido (Construction Industry Research and Information Association, CIRIA), recomenda que seja feita manutenção pelo menos duas vezes ao ano.

Como algumas prefeituras têm considerado pavimentos permeáveis como área permeável em suas leis de uso e ocupação do solo e não há uma fiscalização adequada de como esse pavimento está sendo executado, nem se há manutenção periódica ou não, fazem-se necessários estudos de infiltração ao longo do tempo

nesses pavimentos que realmente são executados na prática, com o objetivo de se obter valores que justifiquem seu uso em áreas que devem ser permeáveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a infiltração no pavimento permeável de blocos intertravados de concreto, verificando a possibilidade de ser considerado parte da solução da redução do escoamento superficial.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Medir a taxa de infiltração ao longo do período de 12 meses, utilizando o método da norma americana ASTM C1701 e a metodologia dos anéis concêntricos, em um pavimento novo e confeccionado com diferentes materiais na camada de assentamento;
- Traçar uma curva de infiltração para cada tipo de material de assentamento;
- Definir a permeabilidade ou não do pavimento estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

A água está em constante movimento pela Terra e essa movimentação é denominada de ciclo hidrológico. Esse movimento tem ocorrido por bilhões de anos e toda a vida do planeta depende dele.

Esse ciclo tem o sol como principal fonte de energia e a gravidade terrestre como principal força atuante. O sol aquece a água, evaporando-a. As correntes de ar levam o vapor para cima na atmosfera junto com água da evapotranspiração, onde as temperaturas mais baixas fazem com que ela se condense em nuvens. As correntes de ar movem as nuvens ao redor do planeta fazendo com que as partículas de água colidam entre elas e se tornem maiores até que seu peso seja suficiente para que precipitem como chuva ou, em climas mais frios, em forma de neve. Essa água, principalmente no caso da chuva, cai até a superfície, onde pode ser interceptada pela camada vegetal ou alguma depressão do relevo, infiltrar ou escoar superficialmente (USGS, 2016).

Da água da chuva que chega até o solo, parte dessa infiltra e escoar sub-superficialmente até corpos d'água próximos (escoamento sub-superficial). Outra parte infiltrada percola até os aquíferos (percolação), que escoam lentamente até rios e lagos (PAZ, 2015).

O restante da chuva que atinge o solo e não consegue infiltrar fica retida em depressões ou, se houver alguma inclinação do terreno, escoar superficialmente (escoamento superficial) até rios, lagos e oceanos (PAZ, 2015).

A figura 3 representa um esquema do ciclo hidrológico destacando as principais etapas que o caracterizam.

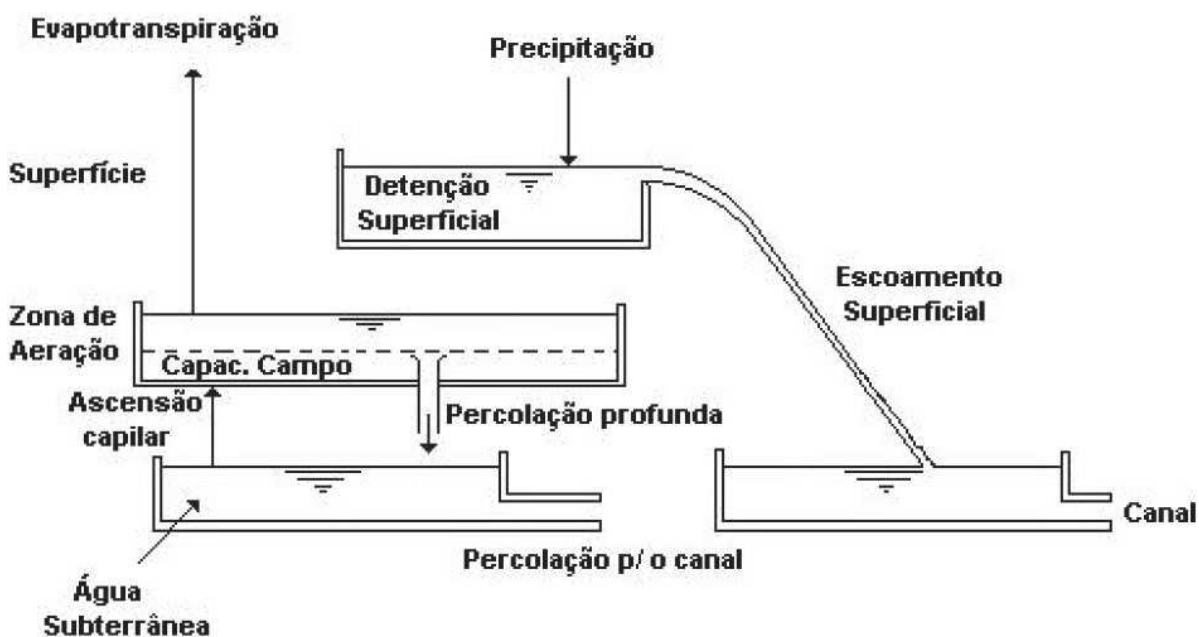


Figura 3 – Ciclo Hidrológico
 Fonte: Porto e Filho (2000, p.11)

2.2 INFILTRAÇÃO

A infiltração é o processo em que a água adentra o solo através dos seus vazios. Cada solo tem uma taxa de infiltração que é definida como a quantidade de água que penetra por sua superfície em um determinado período de tempo. A magnitude dessa taxa depende de vários fatores como o tipo de solo (argila, silte, areia, pedregulhos), compactação, teor de umidade, etc. (BUTLER; DAVIES, 2004).

A máxima taxa de infiltração que um solo pode ter é definida como sua capacidade de infiltração e varia de acordo com a umidade presente no mesmo. Um solo seco tem uma capacidade de infiltração alta, mas que, à medida que esse vai umedecendo, essa capacidade vai diminuindo. Esse processo pode ser medido e representado matematicamente através de modelos de infiltração (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

A importância da infiltração no ciclo hidrológico está relacionada, principalmente, à recarga do aquífero subterrâneo e à diminuição do escoamento superficial. O aquífero subterrâneo é o principal responsável pelo abastecimento das

nascentes d'água e a impermeabilização do solo pode eliminá-las, diminuindo ou até mesmo acabando com a vazão de um rio. Já o aumento do escoamento superficial, que também está relacionado à impermeabilização, pode gerar alagamentos (PINTO; PINHEIRO, 2006).

2.2.1 Modelo da capacidade de infiltração de Horton

Esse modelo recebe o nome em homenagem a Robert Elmer Horton, que o propôs em 1939. É uma relação empírica, comumente usada em modelos de drenagem urbana, que descreve bem o comportamento decrescente da capacidade de infiltração (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

A figura 4 apresenta graficamente o modelo de Horton que é dado pela equação 1:

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-k.t} \quad (1)$$

onde:

$f(t)$ = capacidade de infiltração em um instante qualquer (mm/h);

f_c = capacidade de infiltração em condição de saturação (mm/h);

f_o = capacidade de infiltração em condição de solo seco (mm/h);

t = tempo (h);

k = parâmetro determinado a partir de medições de campo (h^{-1}).

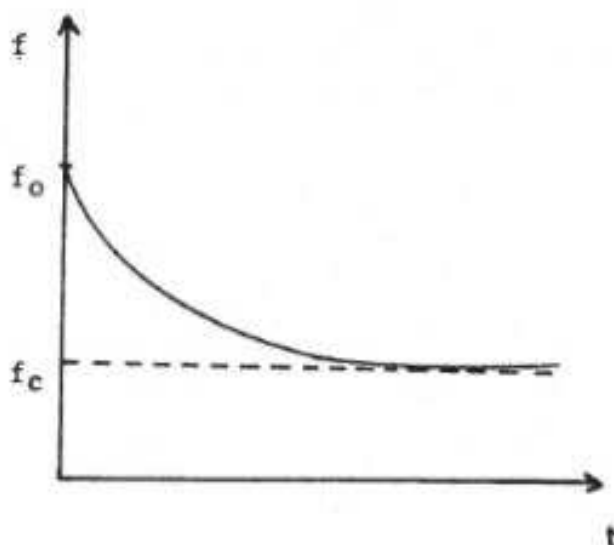


Figura 4 – Curva de infiltração de acordo com o modelo de Horton
Fonte: Adaptado de Paz (2004, p.78)

O modelo de Horton, apesar de simples, explica muito bem a interação solo e chuva. Quando a intensidade da chuva é menor do que a capacidade de infiltração do solo, toda água infiltra. Quando essa intensidade é maior, parte da água não consegue penetrar e fica retida na superfície. E, caso essa superfície apresente alguma declividade, a água começa a escoar, iniciando o processo de escoamento superficial (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

Uma metodologia simples para a obtenção de dados para o uso desse modelo é o método do infiltrômetro dos anéis concêntricos (Figura 5), que foi utilizado por Jabur et al. (2015) na medição da infiltração em pavimentos permeáveis. A figura 6 mostra o resultado obtido para o concreto poroso, demonstrando que os valores medidos se aproximam muito bem de uma curva exponencial como prevê o modelo de Horton.

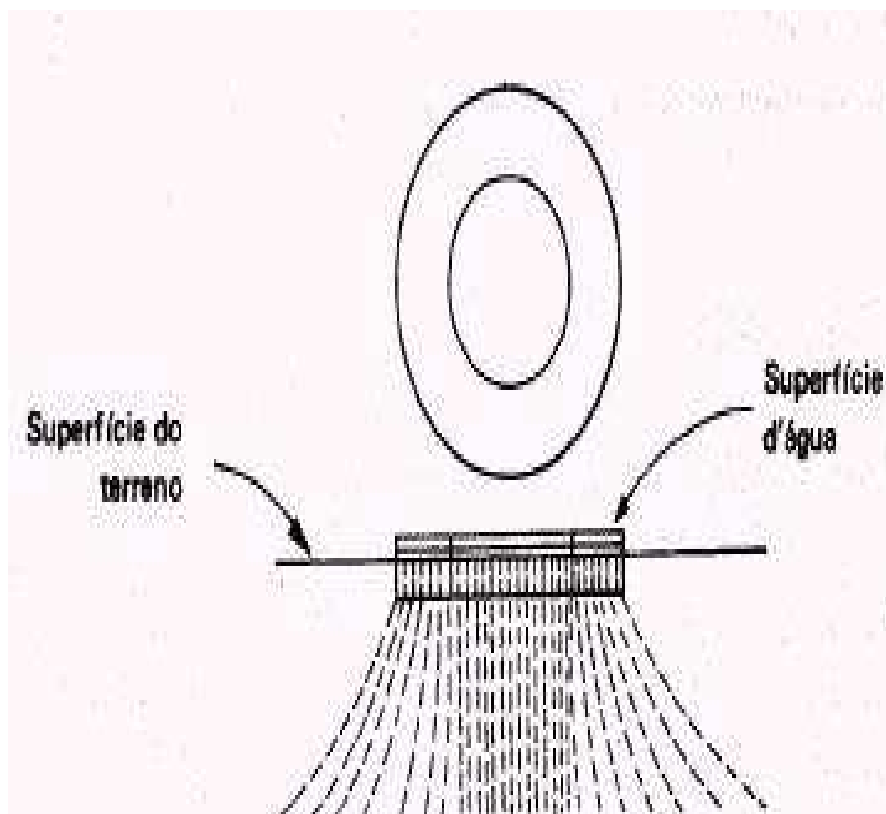


Figura 5 – Representação da utilização de anéis concêntricos
 Fonte: Paz (2004)

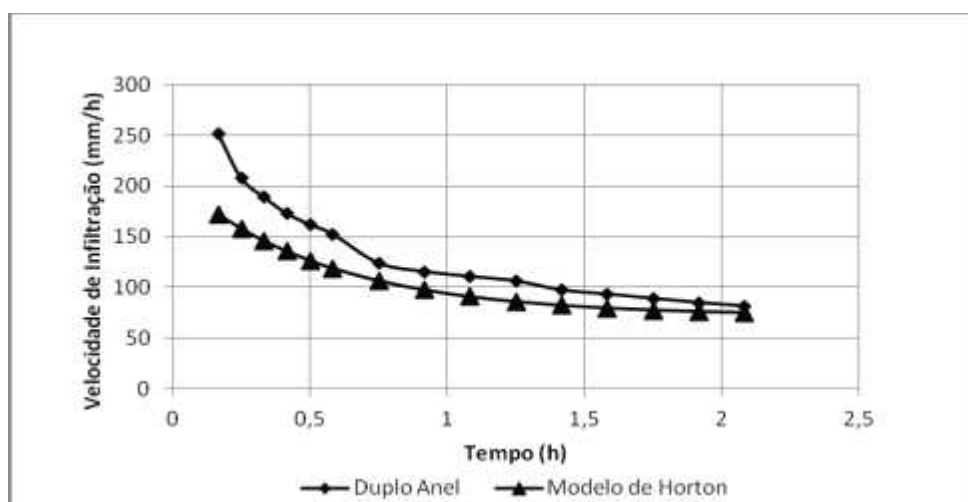


Figura 6 – Modelo de Horton para pavimentos permeáveis
 Fonte: Jabur et al. (2015)

2.3 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial pode ser definido como o excesso de água que não consegue infiltrar no solo e escoar devido à força gravitacional. Uma maneira simplificada, embora comum, de estimar esse escoamento superficial é através da chuva efetiva. Nessa metodologia, a precipitação efetiva é a quantidade de água da chuva que não infiltra, evapora ou fica retida, ou seja, que efetivamente se transforma em escoamento superficial (BUTLER; DAVIES, 2004). A equação 2 representa a intensidade de chuva efetiva e é dada por:

$$i_e = C \cdot i_n \quad (2)$$

onde:

i_e = intensidade de chuva efetiva (mm/h);

i_n = intensidade de chuva precipitada (mm/h);

C = coeficiente de escoamento ou *runoff*; (adimensional).

O coeficiente de *runoff* pode ser definido como as perdas da precipitação real devido à infiltração, retenção e evaporação. Depende primariamente do uso, ocupação e tipo do solo, tipo da vegetação e inclinação da superfície (BUTLER; DAVIES, 2004). A tabela 1 mostra alguns valores comuns desse coeficiente:

Tabela 1 – Típicos valores do coeficiente de *runoff* em áreas urbanas

Área	Coeficiente de <i>Runoff</i>	Tipo da superfície	Coeficiente de <i>Runoff</i>
Área central	0,70-0,95	Asfalto e concreto	0,70-0,95
Área Residencial	0,30-0,70	Telhados	0,75-0,95
Parques e jardins	0,05-0,30	Gramado	0,05-0,35

Fonte: Adaptado de Butler e Davies (2004, p.229).

A metodologia da chuva efetiva leva ao método racional para o cálculo da vazão de um escoamento superficial (PAZ, 2004) que é dado pela equação 3:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (3)$$

Onde:

Q = vazão escoada;

i = intensidade de chuva precipitada;

C = coeficiente de escoamento ou *runoff*;

A = área de captação da chuva.

Da equação 3, pode ser visto que quanto maior o valor do coeficiente de *runoff*, maior o escoamento superficial. Já, ao analisar a tabela 1, verifica-se que em áreas impermeabilizadas, onde esse coeficiente é próximo de 1,00, praticamente toda água precipitada acaba escoando (BUTLER; DAVIES, 2004).

De forma adicional, para a avaliação e estudo do escoamento superficial, é utilizado o hidrograma que, segundo Paz (2004), consiste de um gráfico da evolução da vazão ao longo do tempo em uma dada seção transversal específica. A figura 7 representa um hidrograma típico.

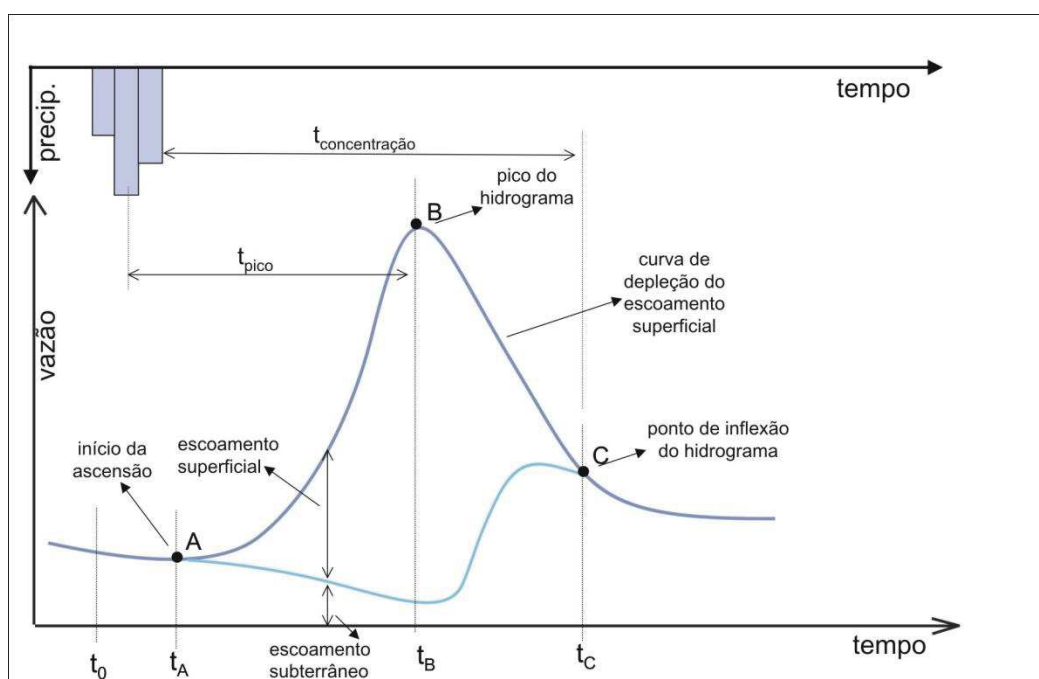


Figura 7 – Hidrograma típico resultante da ocorrência de uma precipitação
 Fonte: Paz (2004, p.49)

Como resposta à precipitação ocorrida, a vazão começa a subir a partir do instante de tempo correspondente ao ponto A, alcançando o pico (ponto de máxima vazão) em B e depois decrescendo. O ponto C é o instante de tempo em que não há mais escoamento superficial para essa seção. O tempo de pico é o tempo decorrido desde o centro de massa da precipitação até o hidrograma atingir seu valor máximo (PAZ, 2004).

Como dito anteriormente, áreas impermeabilizadas geram maior escoamento. Áreas urbanas tendem a ter praticamente toda a sua área coberta por superfícies impermeáveis (telhados, ruas, etc.) fazendo com que quase todo o total precipitado escoe superficialmente. Já em uma área rural, uma parcela grande da precipitação infiltra no solo ou é interceptada pela vegetação. Dessa forma, o hidrograma apresenta um pico mais acentuado e que ocorre mais rápido na área urbanizada do que em uma área rural. (PAZ, 2004). Isso é claramente visualizado em um hidrograma, como na figura 8.

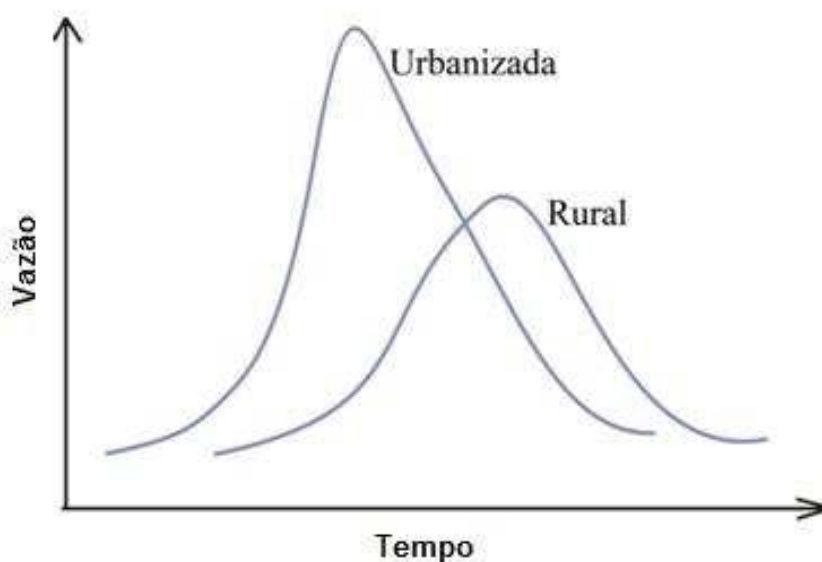


Figura 8 – Comparação esquemática entre os hidrogramas de uma bacia rural e posteriormente urbanizada
Fonte: Adaptado de Paz (2004, p.52)

2.4 DRENAGEM URBANA

Drenagem urbana pode ser definida como o sistema de infraestrutura de uma cidade para realizar a coleta, o transporte e o lançamento final das águas superficiais com o objetivo de evitar prejuízos e riscos causados pelos alagamentos (PINTO; PINHEIRO, 2006).

As inundações podem ocorrer devido a fenômenos naturais, como acontece nos períodos de cheia dos rios. Mas, também, ocorrem devido à urbanização, daí chamado alagamento. As construções de edificações e obras de infraestrutura viária resultam em maiores áreas impermeáveis e, como consequência, há a diminuição da infiltração e o incremento do escoamento superficial (PINTO; PINHEIRO, 2006).

O sistema de drenagem urbana convencional é dividido em dois subsistemas característicos: a microdrenagem e a macrodrenagem.

Miguez, Veról e Rezende (2016) definem a microdrenagem como um sistema de condutos destinado a receber e conduzir as águas das chuvas vindas de edificações, lotes, ruas, praças, etc. Fazem parte desse sistema os pavimentos, sarjetas, bocas de lobo, galerias de águas pluviais e canais de pequenas dimensões. Já a macrodrenagem, segundo os mesmos autores, corresponde à rede de maior dimensão, que recebem as águas já concentradas da microdrenagem. São constituintes da macrodrenagem as galerias de grande porte e os corpos receptores, como canais e rios canalizados.

A causa dos alagamentos está diretamente relacionada às falhas na micro e macrodrenagem. Elas acontecem devido a erros executivos e de projeto, falta de manutenção, ou ainda, devido à obsolescência em decorrência do acelerado crescimento urbano e elevada impermeabilização do solo natural, fazendo com que a rede não comporte o aumento do escoamento gerado. Portanto, um sistema de drenagem urbana eficiente é primordial para se evitar alagamentos (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

2.4.1 Drenagem urbana sustentável

O sistema tradicional procura o rápido escoamento da água através de canais e condutos enterrados para evitar o alagamento em um determinado local. Entretanto, essa abordagem não é uma amortização do problema, mas sim, uma transferência do mesmo para jusante. Junto a isso, a problemática da qualidade da água tem se tornado importante devido aos poluentes das áreas urbanas que são levados aos rios por esse sistema convencional. Portanto, métodos alternativos de drenagem urbana estão cada vez mais presentes nas discussões técnicas e científicas (CIRIA, 2000).

Um sistema de drenagem urbana eficiente e ambientalmente correto é a chamada drenagem urbana sustentável. Busca-se não ampliar a cheia causada pelo processo de urbanização procurando soluções que tentem contrabalançar essas modificações (CHRISTOFIDIS, 2010).

Para a delimitação das soluções mais adequadas, Christofidis (2010) cita sete princípios para a drenagem sustentável, dentre os quais se destaca a prioridade dos mecanismos naturais de escoamento como a infiltração.

Baseado nesses princípios, algumas técnicas de drenagem sustentável foram desenvolvidas. Elas são divididas em medidas estruturais e não estruturais.

2.4.1.1 Medidas não estruturais

As medidas não estruturais podem ser vistas como medidas preventivas, onde há a elaboração de normas e leis para uma convivência mais harmônica com o ambiente (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Como medidas não estruturais para a drenagem urbana têm-se a elaboração de planos diretores de uso e ocupação do solo, programas de prevenção e educação da população. Essas medidas tendem a ter custos baixos de instalação comparados às medidas estruturais, mas com bons resultados (CHRISTOFIDIS, 2010).

Como exemplos da elaboração dessas medidas há duas grandes cidades brasileiras: São Paulo e Porto Alegre.

São Paulo é uma cidade que tem convivido com problemas de alagamentos devido a diversos fatores que incluem a grande impermeabilização do solo. De maneira a remediar e amenizar esse problema, a prefeitura sancionou a lei 12.526 de janeiro de 2007, estabelecendo normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais. Entre as medidas tomadas, destaca-se que, no caso de estacionamentos, 30% da área total ocupada deve ser revestida com pavimento permeável ou reservado como área naturalmente permeável, ou seja, deve-se priorizar a infiltração da água (SÃO PAULO, 2007).

Porto Alegre é outra grande cidade que tem enfrentando problemas de alagamentos quando há chuvas intensas e, como São Paulo, criou leis para estimular a infiltração e a detenção de águas pluviais. O decreto 18.611 de abril de 2014 estabelece, entre outras medidas, que todo terreno acima de 600m² deve ter reservatório de detenção de águas pluviais. Entretanto, a utilização de dispositivos de infiltração permite a redução do volume de reservação necessário. Destaca-se, entre esses dispositivos, a aplicação de pavimentos permeáveis (PORTO ALEGRE, 2014).

2.4.1.2 Medidas estruturais

As medidas estruturais são aquelas que envolvem a construção de uma nova infraestrutura ou a modificação de uma já existente (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Christofidis (2010) cita várias medidas estruturais com conceito sustentável que estão sendo adotadas. Entre elas pode-se destacar a ideia de pavimento permeável que promove a infiltração e a retenção de água.

2.5 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Pavimentos permeáveis são aqueles revestidos com materiais que permitem que a água superficial adentre as camadas subjacentes, onde ela pode infiltrar no solo, ficar retida momentaneamente e ser transportada através de sistemas auxiliares de drenagem. São utilizados, geralmente, em áreas de estacionamentos e em calçadas, onde o tráfego é leve (CIRIA, 2000).

2.5.1 O pavimento permeável ideal

O material da superfície pode ser uma variedade de tipos de blocos intertravados ou vazados, ou uma camada de asfalto ou concreto poroso. Os materiais porosos são aqueles que permitem que a água penetre através dos poros do próprio material. Já no caso de blocos intertravados, por eles serem impermeáveis, a água infiltra pelos espaços permeáveis que há entre dois blocos adjacentes. Por fim, os blocos vazados são aqueles que têm seus centros preenchidos com grama ou cascalho (BUTLER; DAVIES, 2004).

Tão importante quanto o material da superfície do pavimento, é a camada de assentamento onde o material estará assentado. A NBR 15953/2011, Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução, no item 5.4, estabelece que “a camada de se assentamento deve ser constituída de materiais pétreos granulares”. Essa camada, juntamente com a base e sub-base, é que servirão como local de retenção das águas pluviais, impedindo seu escoamento superficial (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

Portanto, o adequado dimensionamento de todas as camadas de um pavimento permeável é essencial para que o mesmo sirva a seu propósito de drenagem. Segundo Marchioni e Silva (2010), o revestimento deve permitir a passagem rápida da água que, então, ficará armazenada por um período nas camadas de assentamento, base e sub-base. Essas devem, portanto, possuir um índice de vazios adequados para que sirvam de reservatórios.

Caso a camada de subleito seja composta por um solo muito pouco permeável, impedindo a infiltração adequada da água, pode ser necessária a utilização de tubos de drenagem para evitar que a água permaneça muito tempo na estrutura do pavimento. Entretanto, mesmo nesses casos, 30% dessa água pode ser perdida por evaporação (CIRIA, 2000).

Um pavimento permeável bem dimensionado e executado pode apresentar desempenho superior até mesmo a áreas livres de pavimentação, como demonstra o estudo realizado por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000). Eles simularam uma chuva em diferentes tipos de superfícies e registraram o escoamento superficial. A tabela 2 mostra os coeficientes de escoamento (*runoff*) obtidos.

Tabela 2 – Coeficientes de escoamentos pelas superfícies

Revestimento	Chuva Total (mm)	Escoamento total (mm)	Coeficiente de escoamento
Solo compactado	18,66	12,32	0,66
Paralelepípedos	18,33	10,99	0,60
Bloco de concreto	19,33	15,00	0,78
Concreto	18,33	17,45	0,95
Blocos vazados	18,33	0,50	0,03
Concreto permeável	20,00	0,01	0,0005

Fonte: Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).

Como pode ser visto, o coeficiente de escoamento para o concreto permeável e bloco vazado é muito inferior ao do solo compactado. Ao se comparar esses valores com os da tabela 1, apresentada na seção 2.1.3, pode-se verificar que o coeficiente para esses materiais é, inclusive, inferior a gramados.

Como explanado anteriormente, como medida não estrutural de drenagem, prefeituras têm aplicado limites para as taxas máximas de ocupação e impermeabilização dos terrenos. As leis municipais estabelecem os números da fração do terreno que não deve ser impermeabilizado (geralmente entre 15 e 30%, segundo Marchioni e Silva (2010)), mas não especificam o que seria essa área permeável. Usualmente, adotam-se jardins e gramados para respeitar-se essa porcentagem. Entretanto, nem sempre é possível atender facilmente esse requisito e é aí que pavimentos permeáveis adequados podem entrar.

Porém, para que isso se torne uma realidade, além do adequado dimensionamento e execução, há a necessidade de manutenção periódica.

Com o decorrer do tempo, materiais finos entram nos poros permeáveis, tanto do concreto e asfalto poroso, como nos poros dos materiais de rejuntamento de blocos intertravados, impedindo a passagem da água e diminuindo a capacidade de infiltração das superfícies, um processo conhecido como colmatação. (BUTLER; DAVIES, 2004).

Estudos realizados por Castro et al. (2013) e Jabur et al. (2015) em um estacionamento com pavimento permeável construído no ano de 2003, mostram que a redução da infiltração ao longo do tempo é bem significativa.

Os valores do coeficiente de escoamento encontrados por Castro et al. (2013) demonstram um aumento de 455% em relação ao primeiro ano de uso do pavimento. Jabur et al (2015) atribui esse aumento do escoamento a redução da capacidade de infiltração devido à falta de manutenção.

Como solução a esse problema, é necessária a manutenção regular da superfície através de varredura a vácuo. Em situações onde essa solução não é eficaz, é necessária a troca do material de rejuntamento (no caso dos blocos intertravados) e do material de assentamento. (CIRIA, 2000).

2.5.2A situação atual dos pavimentos permeáveis no Brasil

A utilização de pavimentos permeáveis tem aumentado significativamente no Brasil, principalmente os de blocos intertravados de concreto, popularmente conhecidos como *pavers*. Uma explicação para isso se dá pelo preço acessível, facilidade de execução e pela potencial condição de drenagem já exposto nesse trabalho (REVISTA PRISMA, 2011).

Todavia, no que tange exclusivamente a drenagem, verifica-se que não é dada a devida importância a execução e a escolha correta dos materiais para a camada de assentamento desses pavimentos.

O pavimento executado, especialmente na região oeste e sudoeste do Paraná, é diferente do descrito pela literatura. Ele apresenta apenas uma camada de assentamento diretamente sobre o subleito, não havendo camada de base ou sub-

base que proporcionaria a retenção de água. Além do mais, a camada de assentamento, geralmente, possui granulometria inferior a recomendada, já que se costuma usar areia e pó de pedra, ao passo que a NBR 15953/2011 estabelece que essa deva ser constituída de materiais pétreos granulares (MARTINS, 2014).

Martins (2014) mediu a permeabilidade de diversos pavimentos intertravados de concreto com execuções e materiais similares aos dos citados acima em diferentes locais do município de Pato Branco/PR. Na conclusão de seu trabalho constatou que os valores de permeabilidade ficaram entre $1,248 \times 10^{-5}$ (m/s) e $8,796 \times 10^{-6}$ (m/s), o que coloca os pavimentos nas faixas de permeabilidade entre média e baixa, conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Valores típicos de taxa de infiltração de solos

Tipo de solo	Coefficiente de permeabilidade (m/s)	Grau de permeabilidade
Brita	$>10^{-3}$	Alta
Areia Media e Areia Grossa	10^{-3} a 10^{-5}	Media
Areia Fina e Areia argilosa	10^{-5} a 10^{-7}	Baixa
Siltes	10^{-7} a 10^{-9}	Muito Baixa
Argila	$<10^{-9}$	Praticamente Impermeável

Fonte: Adaptado de Marchioni e Silva (2010).

Segundo Marchioni e Silva (2010), para se considerar um pavimento como permeável, os valores devem ser superiores a 10^{-5} m/s, ou seja, alguns estão abaixo do aceitável.

Outro fator, comumente ignorado na região e no país, é a manutenção dos pavimentos permeáveis. Como conclui Jabur et al. (2015) “o controle na fonte tem uma fragilidade ainda não solucionada no âmbito da gestão da drenagem urbana no Brasil, que é verificar ao longo do tempo se os dispositivos estão de fato controlando a geração de escoamento pluvial conforme o que foi estipulado em projeto”. Portanto, não basta um pavimento bem projetado, seguindo todas as diretrizes de

execução e controle tecnológico do material, se não houver a manutenção periódica do mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO CLIMÁTICA DA REGIÃO DO EXPERIMENTO

Na cidade de Toledo/PR, o clima é quente e temperado. Existe uma pluviosidade significativa ao longo do ano. A média anual é de 1483 mm, sendo o mês mais seco, agosto, com 72 mm de média. Outubro é o mês com maior precipitação média, apresentando 181 mm. A figura 9 mostra a média mensal de precipitação e de temperatura. (CLIMATE-DATA.ORG, 2017).

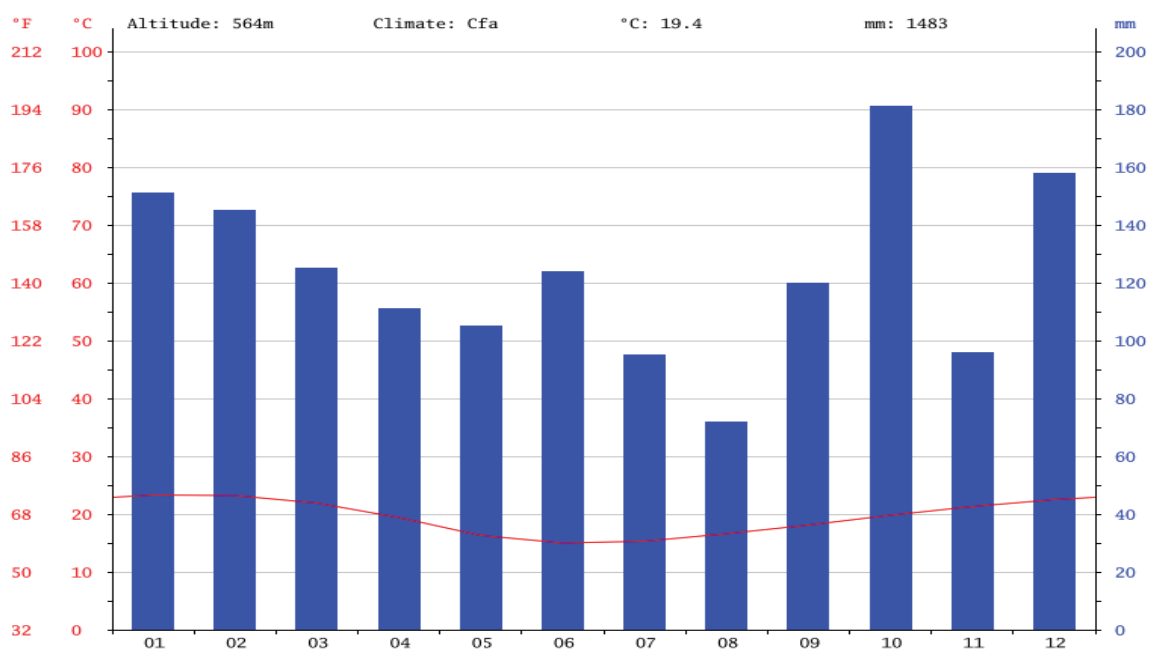


Figura 9 – Médias mensais de precipitação da cidade de Toledo – Pr.
Fonte: CLIMATE-DATA.ORG (2017)

3.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O fluxograma a seguir (figura 10) resume as etapas desta pesquisa.

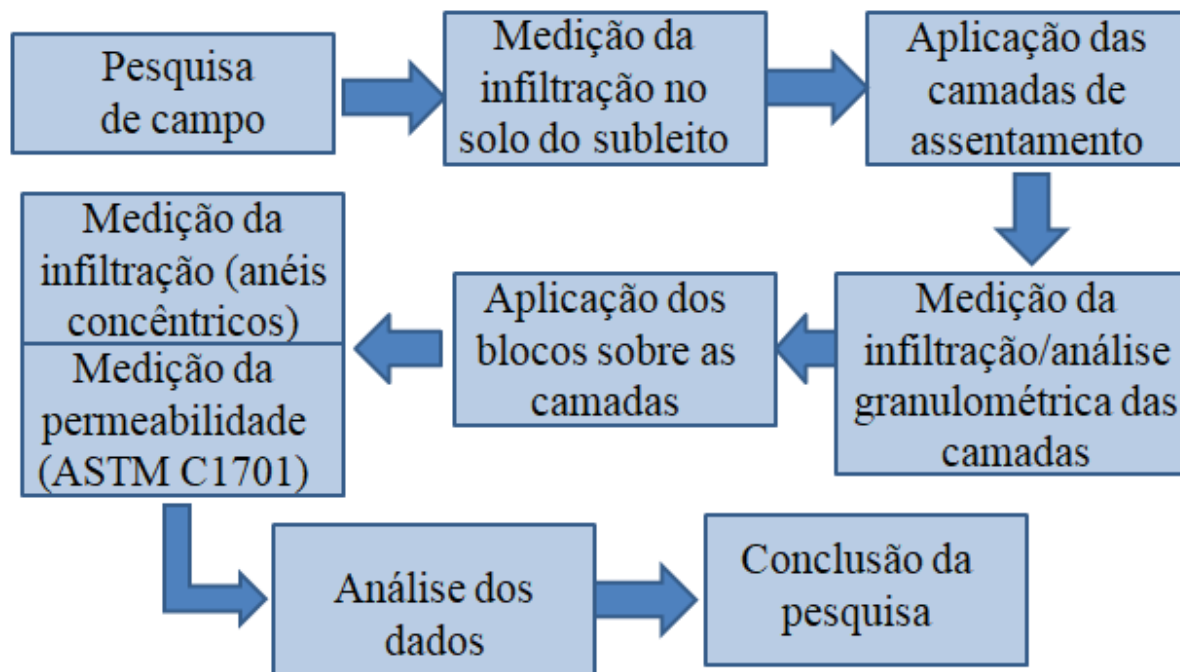


Figura 10 – Fluxograma da pesquisa.
Fonte: Autor (2007)

Na cidade de Toledo/PR (latitude: 24,7119° Sul, longitude: 53,7315° Oeste), foi executada uma calçada de blocos intertravados de concreto com dimensões de 5 x 10 cm, em local plano, utilizando diferentes materiais na camada de assentamento e rejuntamento. Essa calçada possui cerca de 3 m² e cada metro quadrado tem sua base e rejunte constituído por um tipo de material. Os materiais e a forma de execução foram determinados após pesquisa na cidade de Toledo-PR para saber-se o que é mais comumente feito na confecção desse tipo de pavimento. Os materiais mais frequentemente usados são: pó de pedra, areia média e pedrisco com areia média. Cada camada de assentamento foi executada com 5 cm de espessura e, para evitar que se misturassem, foram utilizados tijolos entre elas. A figura 11 esquematiza o que foi dito.

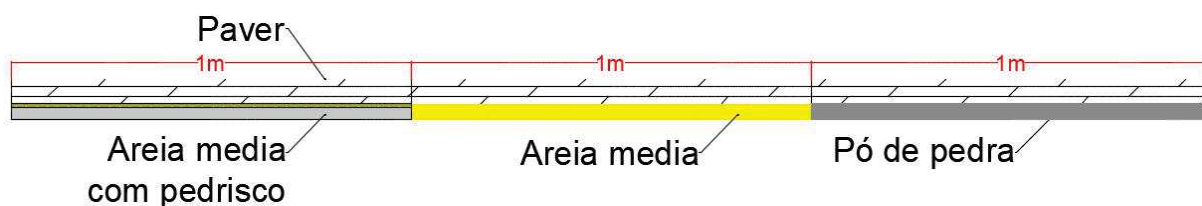


Figura 11 – Representação do pavimento
Fonte: Autor (2017)

Foi separada, ainda, uma porção dos materiais utilizados para posterior análise granulométrica conforme a NBR 7217/1987 - Agregados - Determinação da composição granulométrica, pois a granulometria pode influenciar diretamente na capacidade de infiltração do material.

3.3 COLETA DE DADOS

Como não há normatização no Brasil para o ensaio de infiltração em pavimentos, a coleta de dados foi feita de acordo com duas metodologias, como usada por Jabur et al. (2015): Norma americana *ASTM C1701, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete* (método de ensaio *in situ* para determinação de coeficientes de permeabilidade em concreto permeável) e do Infiltrômetro de Anéis Concêntricos.

3.3.1 Infiltrômetro de Anéis Concêntricos

Bean et al. (2004) utilizaram para a medição da taxa de infiltração de água em pavimentos permeáveis como base a norma americana D 3385, *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer*, com algumas alterações nos métodos e materiais para operar mais eficientemente nos

pavimentos permeáveis. Jabur et al. (2015) adaptaram essa metodologia para obter dados que reproduzissem mais fidedignamente o modelo de Horton.

Portanto, para essa pesquisa, foi utilizada a metodologia descrita por Jabur et al (2015).

O método do infiltrômetro dos anéis concêntricos consiste de dois anéis fixados na superfície concentricamente e preenchidos com água até a mesma altura. A água que infiltra na superfície pertencente ao anel externo tende a escoar tanto na direção vertical quanto na horizontal, enquanto a água do cilindro interno escoar apenas verticalmente. Portanto, a razão da existência do cilindro externo é prover a quantidade de água necessária ao umedecimento lateral, escoamento esse devido aos efeitos de capilaridade na camada de assentamento, atenuando o efeito da dispersão da água no tubo interno (PAZ, 2004).

3.3.1.1 Procedimento

Os materiais utilizados foram:

- Anel cilíndrico com diâmetro de 30 cm e altura de 15 cm;
- Anel cilíndrico com diâmetro de 15 cm e altura de 15 cm;
- Massa para calafetar;
- Balde;
- Água;
- Cronômetro;
- Régua.

O ensaio primeiramente foi realizado nos materiais da camada de assentamento e no solo, antes da colocação dos blocos intertravados. Posteriormente, foi feito no pavimento já executado.

O anel de diâmetro menor, juntamente com a régua, foi instalado na superfície (cravado cerca de 5 cm dentro do material quando o ensaio for realizado nos materiais de assentamento e no solo ou selado com auxílio da massa para calafetar quando praticado no pavimento permeável). Então, foi despejada água até a altura de 5 cm para testar se não há vazamentos laterais. Não havendo, foi

instalado o anel de diâmetro maior externamente ao de menor, de maneira que ficassem concêntricos, como mostrado na figura 12.



Figura 12 – Infiltrômetro de anéis concêntricos
Fonte: Autor (2017)

Após a instalação, primeiramente o anel externo foi preenchido com água até a altura de 10 cm, seguido do anel interno. Quando atingida a marca de 10 cm medidos pela régua no anel interno, interrompeu-se o preenchimento de água e o tempo começou a ser cronometrado.

Inicialmente, foram realizadas leituras da variação da carga hidráulica a cada cinco minutos. Entretanto, dependendo do decréscimo da taxa de infiltração no pavimento devido à saturação do material da camada de assentamento, esse intervalo de tempo foi maior com o decorrer do ensaio. Após cada leitura, adicionou-se água nos dois anéis até a marca de 10 cm novamente.

O ensaio foi encerrado, ou seja, considerou-se que o material atingiu a taxa de infiltração estável no momento em que a altura da lâmina infiltrada for

aproximadamente a mesma nas últimas três medições e o tempo decorrido de ensaio tenha sido superior a 45 minutos.

3.3.1.2 Análise e período de coleta dos dados

Os resultados dos ensaios foram plotados em gráficos de dispersão e esses dados foram ajustados ao modelo de infiltração de Horton através do método dos mínimos quadrados.

Após, comparou-se os modelos de Horton do solo e de cada material de assentamento e os modelos de Horton de seus respectivos pavimentos executados acima.

Os ensaios realizados no pavimento foram feitos logo após a sua execução e após 12 meses, para análise da diminuição de sua capacidade de infiltração ao longo do tempo.

3.3.2 Norma Americana ASTM C1701

A norma americana tem como objetivo a determinação do coeficiente de permeabilidade de pavimentos permeáveis através da introdução de uma dada massa de água em um anel cilíndrico temporariamente selado na superfície do pavimento durante um intervalo de tempo conhecido.

3.3.2.1 Procedimento

Os materiais utilizados foram:

- Anel cilíndrico com diâmetro interno de 29 cm e altura de 15 cm com duas linhas marcadas na altura de 5 e 10 mm;
- Cronômetro;

- Balança;
- Massa para calafetar;
- Balde;
- Água.

Primeiramente, o anel cilíndrico foi temporariamente selado na superfície do pavimento com auxílio da massa para calafetar para que não haja perda de água lateralmente, como mostra a figura 13.



Figura 13 – Instalação do anel cilíndrico
Fonte: Autor (2017)

Após a instalação do aparato, a superfície foi pré-molhada. Para isso, foi previamente pesada a quantidade de 3,6 kg de água na balança. Essa quantidade de água foi, então, despejada no anel de forma que a altura da lâmina de água fique entre as duas linhas marcadas. O tempo começou a ser cronometrado quando a água tocou a superfície e cessou quando toda a água foi infiltrada. Se o tempo da pré-molhagem for inferior a 30 segundos, deve-se usar a quantidade de 18 kg de água para o teste. Se for superior, usa-se 3,6 kg.

Por fim, após esse processo inicial, o teste começa fazendo-se o mesmo procedimento descrito para a pré-molhagem.

3.3.2.2 Análise e período da coleta de dados

Para a determinação do coeficiente de infiltração, a ASTM C1701 estabelece a equação (4) a seguir:

$$I = \frac{K \cdot M}{(D^2 \cdot t)} \quad (4)$$

onde:

I = coeficiente de Infiltração (mm/h);

M = Massa de água infiltrada (kg);

D = Diâmetro interno do anel (mm);

t = Intervalo de tempo entre a adição da água e sua total infiltração na superfície;

K = constante = 4.583.666.000 (mm³.s/kg.h).

Esse coeficiente foi obtido individualmente de acordo com o material da camada de assentamento. Portanto, houveram 3 coeficientes de infiltração que foram comparados entre si.

Além da comparação entre os diferentes materiais, houve a medição ao longo do tempo, ou seja, foram feitos ensaios logo após a execução do pavimento e a cada 3 meses, totalizando 5 medições no período de 12 meses, a fim de se verificar a diminuição desse coeficiente ao longo do tempo devido a colmatção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE ASSENTAMENTO

Através do ensaio de análise granulométrica, conforme a NBR 7217/1987, pôde-se caracterizar os materiais de assentamento quanto ao tamanho dos grãos. Observa-se na figura 14 a curva granulométrica dos três materiais utilizados e a tabela 4 resume os dados de módulo de finura e quantidade de material disposto no fundo da série de peneiras.

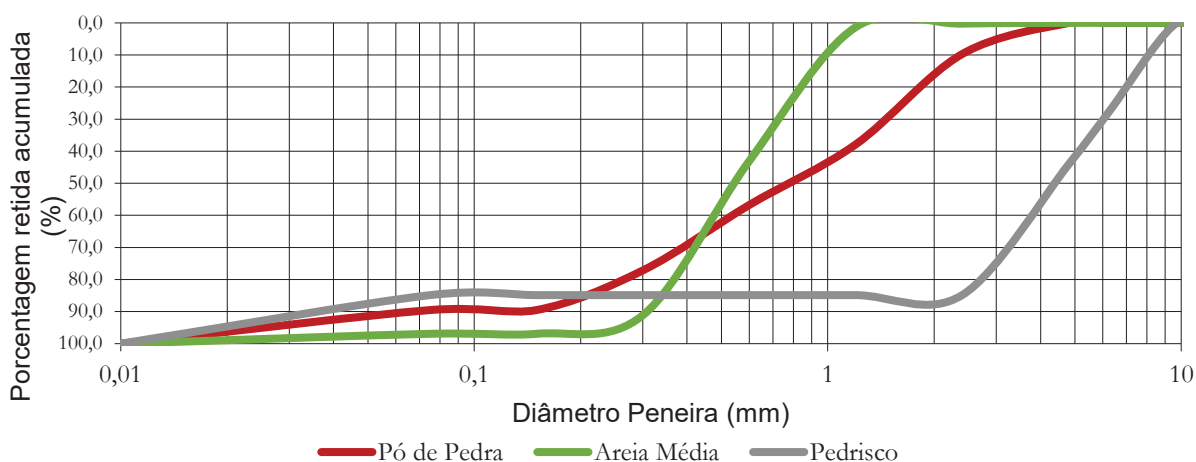


Figura 14 – Faixas granulométricas dos materiais da camada de assentamento
Fonte: Autor (2018)

Tabela 4 – Dados do ensaio de granulometria			
Material	Pó de pedra	Areia média	Pedrisco
Massa retida no fundo (%)	10,48%	3%	15,10%
Módulo de finura	2,71	2,33	4,69

Fonte: Autor (2018)

O valor do cálculo do módulo de finura corrobora com as curvas granulométricas, determinando a areia média como sendo o material mais fino,

seguido do pó de pedra e, por último, do pedrisco. Outro fato importante que cabe destacar é a maior uniformidade dos grãos de areia quando comparados aos do pó de pedra. Enquanto o pó de pedra tem uma curva granulométrica mais alongada, a curva da areia é mais restrita a uma menor variação de diâmetros. Destaca-se, também, a porcentagem de massa retida no fundo das peneiras, a qual demonstra que o pó de pedra e pedrisco possuem maior quantidade de materiais finos que a areia.

Para a caracterização da taxa de infiltração dos materiais, utilizou-se o ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos. Primeiramente, o ensaio foi realizado no solo onde a calçada seria confeccionada. Posteriormente, os materiais foram colocados sobre o solo e realizou-se o ensaio em cada material separadamente. As figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam os resultados dos ensaios para o solo, areia média, pó de pedra e pedrisco com areia média, respectivamente, bem como os modelos de Horton que melhor se adequaram aos dados do ensaio de acordo com o método dos mínimos quadrados.

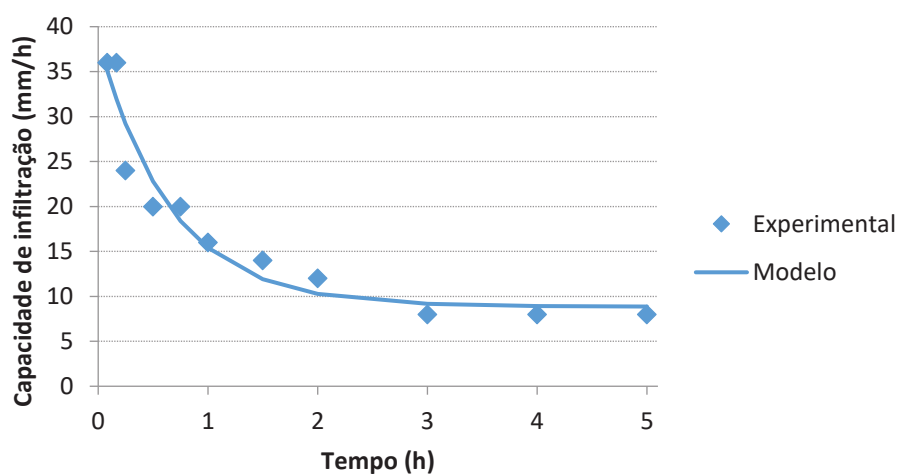


Figura 15 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para o solo
Fonte: Autor (2018)

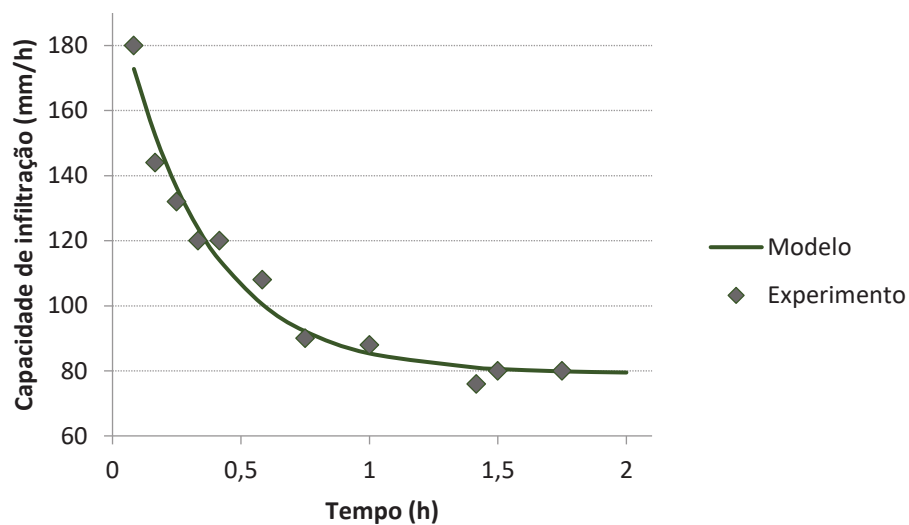


Figura 16 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para a areia média
 Fonte: Autor (2018)

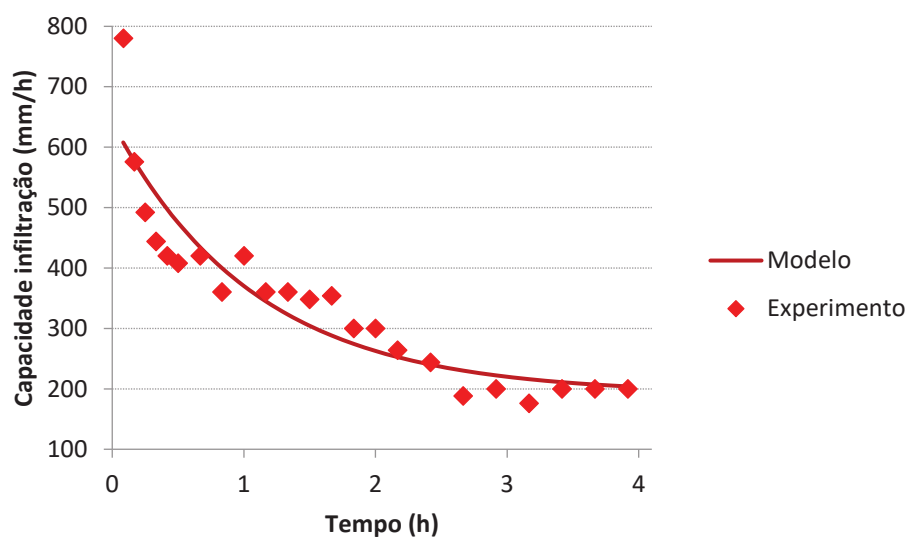


Figura 17 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para o pó de pedra
 Fonte: Autor (2018)

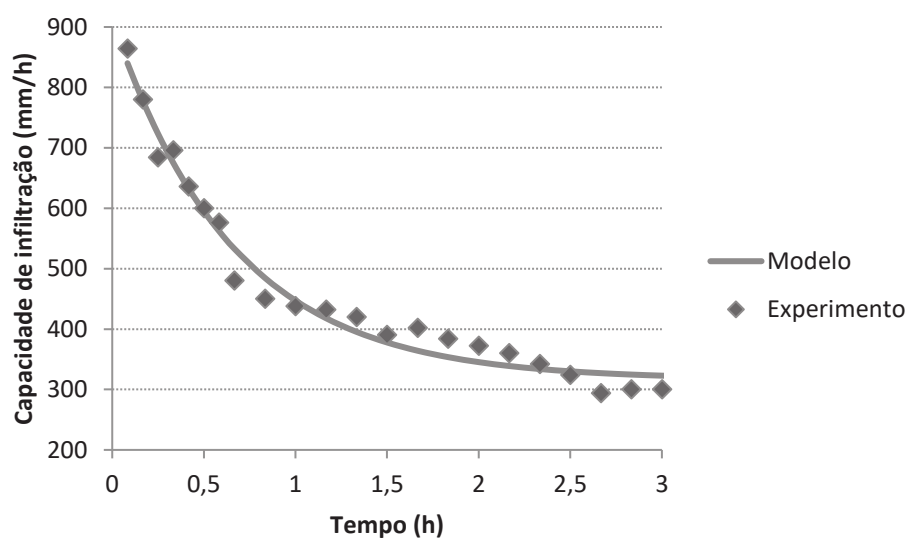


Figura 18 – Dados observados do ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos e modelo de Horton para areia média com pedrisco

Fonte: Autor (2018)

A tabela 5 resume os parâmetros f_c (capacidade de infiltração em condição de saturação), f_o (capacidade de infiltração em condição de solo seco) e k da equação de Horton obtidos para cada modelo.

Tabela 5 – Parâmetros da equação de Horton dos materiais

Material	Pavimento novo		
	f_o (mm/h)	f_c (mm/h)	k (h^{-1})
Solo	38,60	8,85	1,51
Pó de Pedra	641,07	191,85	0,92
Areia Média	199,04	79,16	2,96
Pedrisco com areia média	910,39	316,57	1,51

Fonte: Autor (2018)

Para efeito de comparação, a figura 19 agrupa os modelos obtidos para cada material.

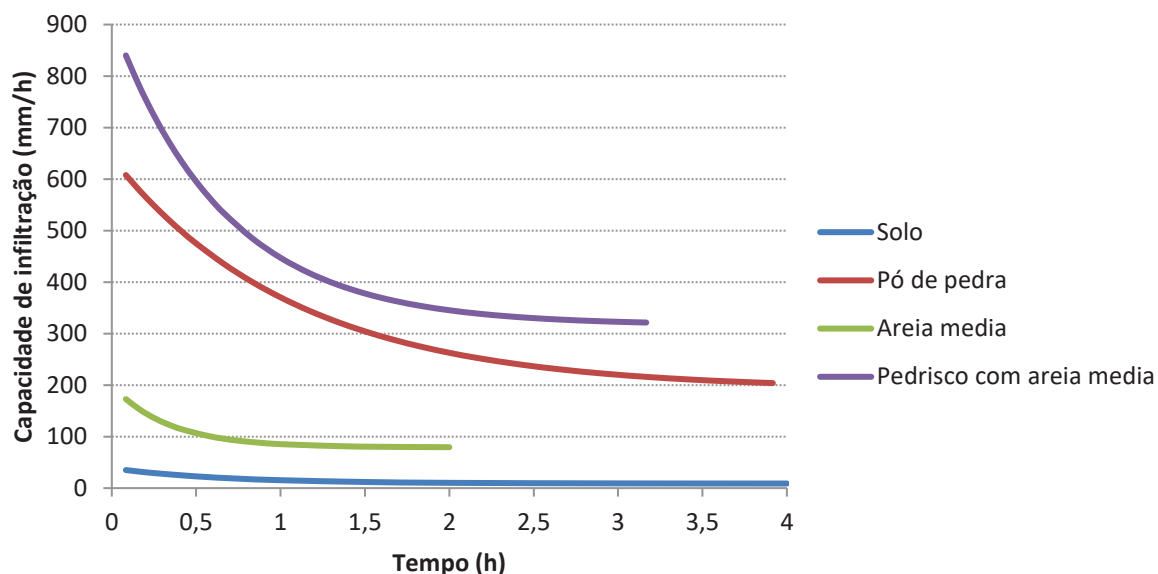


Figura 19 – Modelos de Horton para cada material de assentamento
Fonte: Autor (2018)

Em uma análise conjunta das figuras 13 e 18 e da tabela 5, nota-se que, como esperado, os materiais com granulometrias superiores possuem capacidade de infiltração mais elevadas devido ao maior número de vazios. Por essa razão, o pedrisco com areia média possui capacidade de infiltração inicial e em condição de saturação maior que os demais materiais. Da mesma forma, o solo, por ser argiloso, é o material com menor quantidade de vazios e, portanto, aquele que tem a menor capacidade de infiltração inicial e em condição saturada.

4.2 INFILTRÔMETRO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS

Foram realizados ensaios no pavimento de acordo com o material de assentamento logo depois da execução do mesmo e após 12 meses de uso. Após a coleta de dados, estimou-se o modelo de Horton para o pavimento de acordo com o material de assentamento através do método dos mínimos quadrados no tempo inicial (pavimento novo) e após 12 meses.

As figuras 20, 21 e 22 apresentam os resultados dos ensaios para a parte do pavimento com camadas de assentamento constituídas de areia média, pó de pedra e pedrisco com areia média, respectivamente, nos tempos iniciais e após 12 meses de uso do pavimento, bem como os modelos de Horton que melhor se adequaram aos dados do ensaio de acordo com o método dos mínimos quadrados.

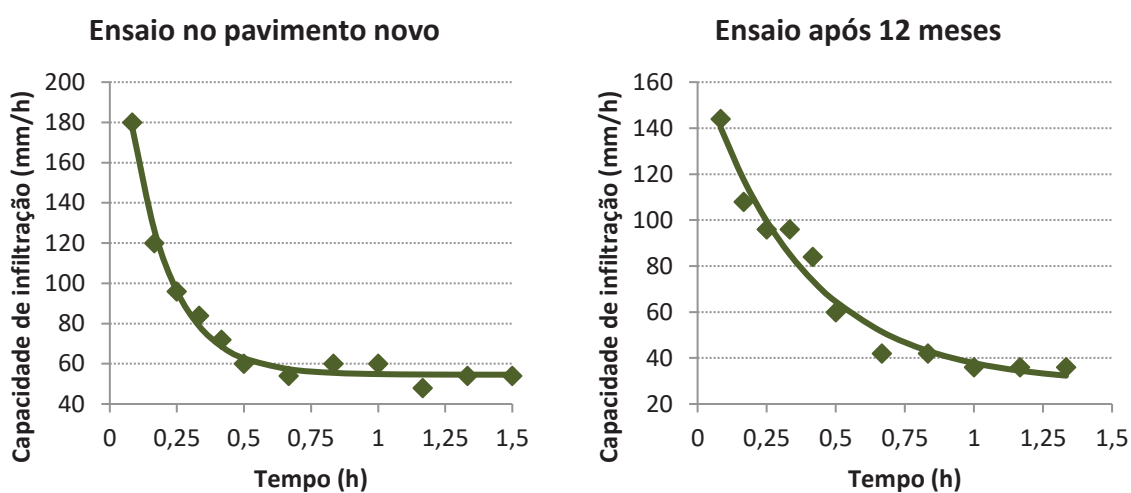


Figura 20 – Resultados do ensaio dos anéis concêntricos na parte do pavimento constituído de areia média na camada de assentamento
Fonte: Autor (2018)

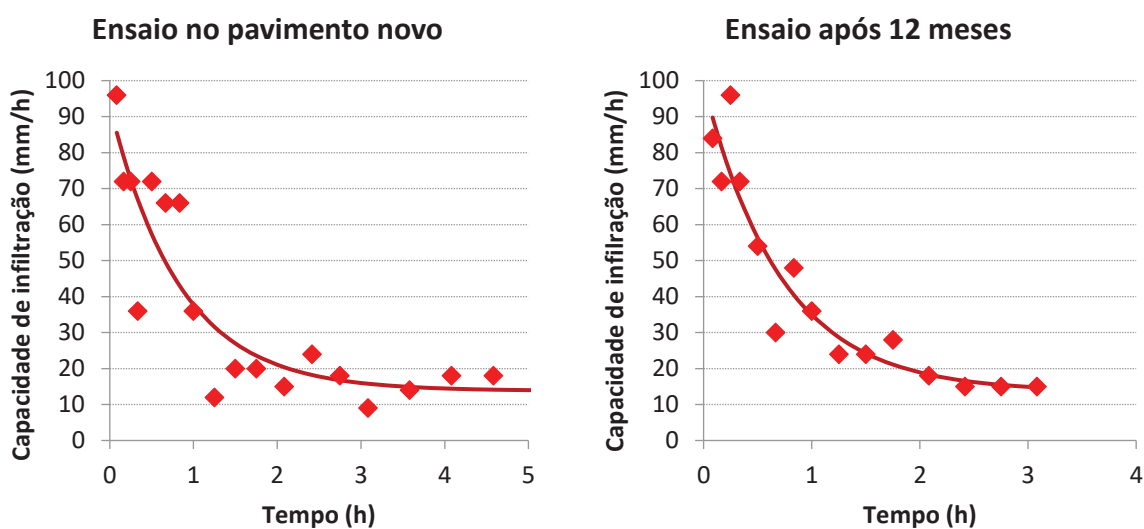


Figura 21 – Resultados do ensaio dos anéis concêntricos na parte do pavimento constituído de pó de pedra na camada de assentamento
Fonte: Autor (2018)

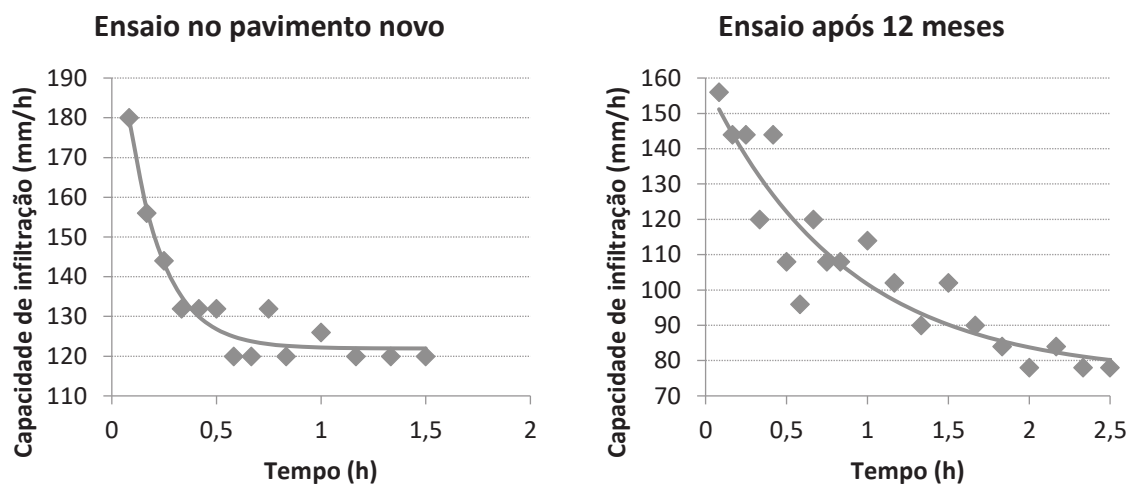


Figura 22 – Resultados do ensaio dos anéis concêntricos na parte do pavimento constituído de pedrisco com areia média na camada de assentamento

Fonte: Autor (2018)

A tabela 6 resume os parâmetros f_c , f_o e k da equação de Horton obtidos para cada modelo do pavimento.

Tabela 6 – Parâmetros da equação de Horton do pavimento

Material da Camada de assentamento	Pavimento novo			Após 12 meses		
	f_o (mm/h)	f_c (mm/h)	k (h^{-1})	f_o (mm/h)	f_c (mm/h)	k (h^{-1})
Pó de Pedra	93,04	13,79	1,20	99,09	13,56	1,39
Areia Média	266,37	54,57	6,51	168,64	28,60	2,72
Pedrisco com areia média	216,09	121,93	5,92	158,84	75,60	1,16

Fonte: Autor (2018)

Para efeito de comparação, a figura 23 agrupa os modelos obtidos para cada material no pavimento novo (denotado por “1”) e após 12 meses (denotado por “2”).

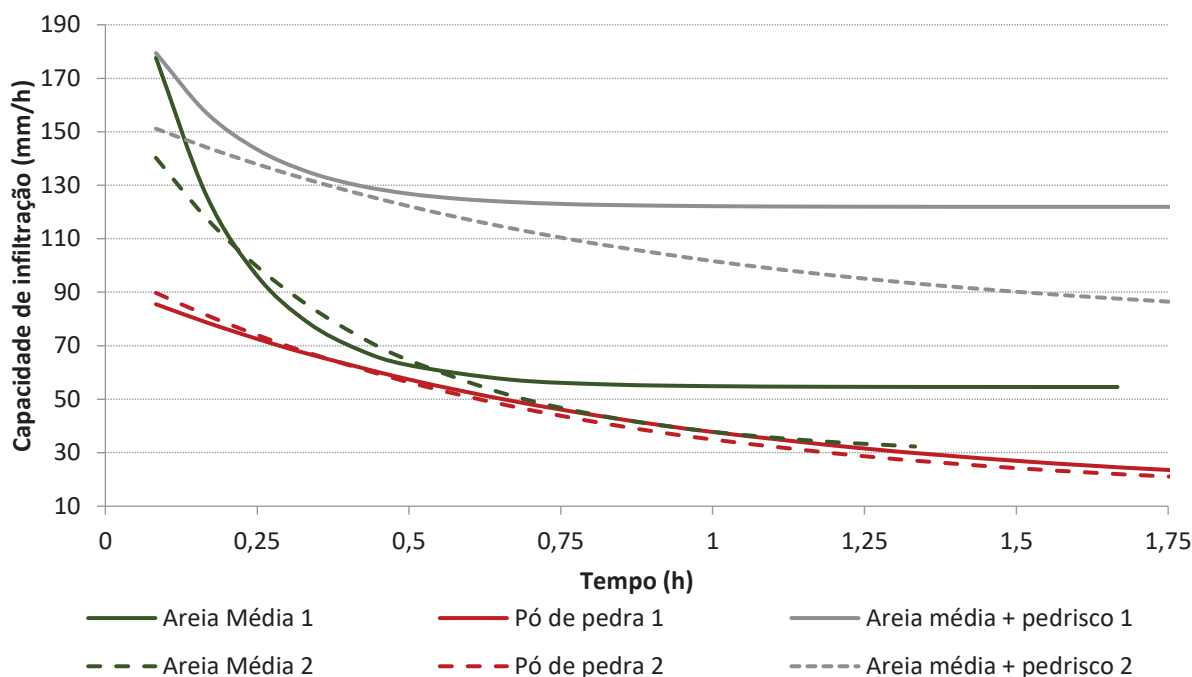


Figura 23 – Comparativo dos modelos de Horton do pavimento
Fonte: Autor (2018)

Como esperado, por possuir maior granulometria, a parte do pavimento com a camada de assentamento constituída de pedrisco com areia média possui as maiores capacidades de infiltração na condição de solo saturado, tanto no pavimento novo, quanto após 12 meses de uso.

Entretanto, nota-se que a capacidade de infiltração na parte do pavimento constituída de areia média é maior se comparada a parte com pó de pedra, embora a areia seja mais fina. Isso ocorre porque o pó de pedra possui uma curva granulométrica com amplitude de grãos maior do que a areia, como pode ser visto na figura 13. Portanto, segundo Londero et al. (2017), existem frações pequenas em quantidade suficiente para preencher os espaços entre as partículas maiores, diminuindo o volume de vazios e aumentando, assim, a densidade de empacotamento. Logo, a carga devido ao peso dos blocos intertravados aplicada sobre o pó de pedra levou ao empacotamento das partículas de forma mais eficiente que na areia, diminuindo assim a capacidade de infiltração do pavimento.

Ao se comparar os modelos de Horton do pavimento novo e depois de 12 meses de uso, separados por material de assentamento (figura 23 e tabela 6),

verifica-se a diminuição da capacidade de infiltração da parte do pavimento com areia média e pedrisco e da parte com apenas areia média. Esse comportamento era esperado e deve-se, segundo Butler e Davies (2004), a entrada de materiais finos nos poros permeáveis dos materiais de rejuntamento, impedindo a passagem de água e diminuindo a capacidade de infiltração. Já a capacidade de infiltração da parte com pó de pedra se manteve praticamente constante. Como discutido anteriormente, o pó de pedra sofreu grande compactação logo após a aplicação dos blocos intertravados, diminuindo consideravelmente a sua quantidade de vazios, ou seja, mesmo o pavimento sendo novo, o número de vazios era pequeno para permitir a passagem de água e ao longo de 12 meses essa incapacidade praticamente se manteve.

Devido à falta de outros trabalhos que consideram os diferentes materiais na camada de assentamento para realizar ensaios de infiltração, os modelos de Horton oriundos da coleta de dados do ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos dessa pesquisa foram comparados com os obtidos por Jabur et al. (2015). Os ensaios realizados pelos autores foram em um pavimento de blocos vazados e outro de asfalto poroso construído em 2004 e resultaram nos parâmetros f_c , f_o e k apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros da equação de Horton do experimento de Jabur et al.

Pavimento	f_o (mm/h)	f_c (mm/h)	k (h^{-1})
Blocos Vazados	687,52	138,68	2,02
Asfalto poroso	208,31	71,88	1,83

Fonte: Jabur et al. (2015)

Ao comparar-se os resultados obtidos por esses autores (tabela 7) com os resultados obtido no presente trabalho depois de 12 meses de uso (tabela 6), verifica-se que o pavimento constituído de blocos vazados, mesmo 10 anos mais velho, possui capacidades de infiltração bem maiores do que o pavimento de blocos intertravados de concreto do atual estudo. Já a comparação com o pavimento de asfalto poroso leva a resultados similares aos obtidos para a parte com areia média e pedrisco do presente trabalho.

Embora os materiais da superfície dos pavimentos comparados sejam diferentes, o fato do pavimento estudado por Jabur et al. (2015) ter sido executado de acordo com a NBR 15953/11 pode ter sido determinante para que esse pavimento tenha capacidades de infiltração maiores no caso do bloco vazado, ou similares no caso do asfalto poroso, ao do presente estudo, mesmo com o pavimento do estudo dos autores sendo bem mais velho.

4.3 ASTM C1701

Foram realizados 5 ensaios ao longo de 12 meses para cada tipo de material da camada de assentamento, utilizando-se a norma americana ASTM C1701. A tabela 8 resume a taxa de infiltração do pavimento de acordo com o material ao longo desses 12 meses.

Tabela 8 – Taxa de infiltração

Data do ensaio	Taxa de Infiltração (m/s)		
	Pó de Pedra	Areia Média	Areia Média com Pedrisco
set/17	$4,05 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$
dez/17	$4,09 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$
mar/18	$4,01 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$
jun/18	$3,98 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$
set/18	$4,00 \cdot 10^{-6}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Autor (2018)

O ensaio da norma ASTM C1701 levou a conclusões similares ao do teste do infiltrômetro dos anéis concêntricos. Na parte do pavimento onde a camada de assentamento era composta por areia média e pedrisco, houve a maior taxa de infiltração, enquanto no local onde a camada era composta por pó de pedra, a taxa de infiltração foi a menor.

Nota-se também, nesse ensaio, uma gradual diminuição da taxa de infiltração na parte do pavimento confeccionado com areia média e pedrisco e na

parte que há somente areia média, enquanto no local com pó de pedra, a taxa de infiltração manteve-se praticamente constante.

A parte do pavimento na qual a camada de assentamento era de areia média e pedrisco houve uma redução da taxa de infiltração em 12 meses de 8,72%. Já onde havia apenas areia média, a redução foi de 7,10%.

Outra comparação importante está relacionada aos coeficientes de permeabilidade e graus de permeabilidade segundo Marchioni e Silva (2010) apresentados na tabela 3. De acordo com os mesmos autores, para se considerar um pavimento como poroso, os valores da taxa de infiltração devem ser superiores a 10^{-5} . Portanto, as tabelas 4 e 5 comparam os resultados de taxa de infiltração iniciais e finais (após 12 meses de uso), obtidos no presente trabalho, com os coeficientes de permeabilidade apresentados por Marchioni e Silva e define-se o grau de permeabilidade.

Tabela 9 – Graus de permeabilidade do pavimento estudado (inicial)

Material da camada de assentamento do pavimento	Taxa de infiltração inicial (m/s)	Grau de permeabilidade segundo Marchioni e Silva
Areia média e Pedrisco	$2,21 \cdot 10^{-5}$	Média
Areia Média	$1,99 \cdot 10^{-5}$	Média
Pó de Pedra	$4,05 \cdot 10^{-6}$	Baixa

Fonte: Autor (2018)

Tabela 10 – Graus de permeabilidade do pavimento estudado após 12 meses

Material da camada de assentamento do pavimento	Taxa de infiltração final (m/s)	Grau de permeabilidade segundo Marchioni e Silva
Areia média e Pedrisco	$2,01 \cdot 10^{-5}$	Média
Areia Média	$1,70 \cdot 10^{-5}$	Média
Pó de Pedra	$4,00 \cdot 10^{-6}$	Baixa

Fonte: Autor (2018)

Percebe-se que, tanto a parte do pavimento com a camada de assentamento constituída de areia média e pedrisco como a que possui só areia média, possuem graus de permeabilidade médios, tanto inicialmente como após 12 meses, podendo assim ser considerados como pavimentos permeáveis de acordo com a classificação de Marchioni e Silva (2010). Já o pó de pedra possuiu um grau de permeabilidade baixa, inviabilizando-o como pavimento poroso de acordo com a mesma classificação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a preocupação crescente em relação a drenagem urbana sustentável e dada a popularização dos pavimentos permeáveis, avaliar o desempenho desses pavimentos é de suma importância para o efetivo controle de alagamentos, sobretudo nos pavimentos que são realmente executados na prática, o qual foi o objetivo principal desse trabalho.

A hipótese inicial era de que materiais com granulometria superior na camada de assentamento de pavimentos permeáveis possibilitariam um maior número de vazios e, conseqüentemente, maior capacidade de infiltração. Ao verificar-se a infiltração somente nos materiais, como feito no ensaio de anéis concêntricos, isso de fato condiz com a hipótese levantada. Entretanto, após a execução do pavimento, com a colocação dos blocos intertravados sobre as camadas de assentamento, verificou-se que a parte com areia média possui maiores taxas de infiltração que a com pó de pedra, embora o resultado do ensaio granulométrico mostrasse que o pó de pedra possui maior granulometria que a areia média. O que explica esse comportamento é a diferente capacidade de compactação dos materiais quando submetido a uma carga, no caso o peso dos blocos. Por possuir grãos com diâmetros mais uniformes que o pó de pedra, a areia média sofre menor compactação. Já no pó de pedra, como a abrangência do tamanho dos grãos é maior, os menores conseguem preencher os espaços vazios deixado pelos maiores com maior facilidade. Dessa forma, o material sofre uma compactação maior se comparado a areia média, reduzindo consideravelmente o número de vazios inicial e, portanto, diminuindo sua capacidade de infiltração.

Tratando-se especificamente da análise da permeabilidade do pavimento de blocos intertravados desse estudo, verifica-se que ele pode ser considerado um pavimento com permeabilidade considerada média de acordo com a classificação de Marchioni e Silva (2010) desde que na sua camada de assentamento possua o pedrisco com areia média ou areia média. Já a parte do pavimento com pó de pedra, teve a sua permeabilidade considerada baixa.

Com relação à redução da taxa de infiltração ao longo do tempo, nota-se que após 12 meses houve uma diminuição dessa taxa, principalmente na parte do pavimento com a camada de assentamento constituída de pedrisco com areia média e na parte em que havia somente areia média. Todavia, essa diminuição não foi o

suficiente para desconsiderá-los como pavimentos permeáveis, embora uma análise num período de tempo maior e com uma quantidade maior de amostras seja interessante para avaliar melhor essa condição ao longo do tempo.

Para futuras pesquisas, sugere-se a comparação da infiltração ao longo do tempo em um pavimento de blocos intertravados de concreto executado de acordo com a NBR 15953/11 e um executado de acordo com o presente estudo, pois como visto na comparação com o trabalho de Jabur et al. (2015), onde o pavimento do estudo dos autores foi executado conforme a norma, a capacidade infiltração se manteve razoável mesmo após 10 anos de uso do pavimento. Recomenda-se também, além da análise granulométrica dos materiais da camada de assentamento, ensaios de compactação desses materiais, pois como foi visto, só a granulometria não indica a permeabilidade do material quando submetido a uma força de compressão.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701**, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. 2009.

ARAÚJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos E. M.; GOLDENFUM, Joel A.. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15953** Pavimento Intertravado com Peças de Concreto - Execução. 2011.

_____. **NBR 7217** Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1987.

BEAN, E. Z. et al. Study on the infiltration rate of permeable pavements. **ResearchGate**, jun. 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/252536731_Study_on_the_Infiltration_Rate_of_Permeable_Pavements>. Acesso em: 15 ago. 2017.

BUTLER, David; DAVIES, John W.. **Urban drainage**. 2 ed. Londres: Spon Press, 2004. 543 p.

CASTRO, A. S. et al. Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 263-273, jan./mar. 2013.

CHRISTOFIDIS, Hugo do Vale. **Drenagem Urbana Sustentável: Análise do uso do Retrofit**. 2010. 163 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima: Toledo**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/31828/>>. Acesso em: 06 out. 2017.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para Engenharia e ciências ambientais**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION. **CIRIA C522** Sustainable urban drainage systems design manual for England and Wales. 2000.

JABUR, A. S. et al. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 937-945, out./dez. 2015.

LONDERO, C. et al. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 365, p. 22-33, mar. 2017.

MARCHIONI, Mariana; SILVA, Cláudio Oliveira. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2010.

MARTINS, Ronaldo Miotto. **Análise da capacidade de infiltração do pavimento intertravado de concreto**. 2014. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MIGUÉZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. **Drenagem urbana: Do projeto tradicional à sustentabilidade**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MORETTI, Ricardo De Souza. **Normas urbanísticas para habitação de interesse social: Recomendações para elaboração**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1997. 160 p.

O GLOBO. **Até 2050, dois terços da população mundial viverão em cidades, afirma ONU**. Disponível em:

<<https://oglobo.globo.com/sociedade/ate-2050-dois-tercos-da-populacao-mundial-viverao-em-cidades-afirma-onu-13208935>>. Acesso em: 11 out. 2017.

PAZ, Adriano Rolim da. **Hidrologia Aplicada**. Porto Alegre: Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2004.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PINTO, Luiza Helena; PINHEIRO, Sérgio Avelino. **Orientações básicas para drenagem urbana**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio ambiente, 2006.

PORTO ALEGRE. Decreto nº 18.611, de 09 de abril de 2014. Regulamenta o controle da drenagem urbana. **Prefeitura Municipal de Porto Alegre**. Porto Alegre, RS, 09 abr. 2014.

Disponível em: <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/cgi-bin/nph-brs?s1=000033997.DOCN.&l=20&u=/netahtml/sirel/simples.html&p=1&r=1&f=G&d=atos&SECT1=TEXT>>. Acesso em: 06 out. 2017.

PORTO, Rubem La Laina; FILHO, Kamel Zahed. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [20--].

Disponível em: <http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=6535>. Acesso em: 01 out. 2017.

REVISTA PRISMA - **Pavimento intertravado: uma solução universal**. Disponível em:

<<http://www.revistaprisma.com.br/novosite/noticia.asp?cod=107>>. Acesso em: 01 out. 2017.

SÃO PAULO. Lei nº 12.526, de 02 de janeiro de 2007. Estabelece normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais. **Assembléia Legislativa do estado de São Paulo**, São Paulo, SP, 02 jan. 2007.

Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2007/lei-12526-02.01.2007.html>>. Acesso em: 06 out. 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **The water cycle**. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em: 20 set. 2017.

APÊNDICE A – TABELAS COM DADOS COLETADOS EM CAMPO DO ENSAIO DE INFILTRÔMETRO DE ANÉIS CONCÊNTRICOS

Solo

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Variação do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5	0,08	0,08	3,00	36,00	35,07
10	0,17	0,08	3,00	36,00	31,96
15	0,25	0,08	2,00	24,00	29,22
30	0,50	0,25	5,00	20,00	22,80
45	0,75	0,25	5,00	20,00	18,40
60	1,00	0,25	4,00	16,00	15,39
90	1,50	0,50	7,00	14,00	11,92
120	2,00	0,50	6,00	12,00	10,29
180	3,00	1,00	8,00	8,00	9,17
240	4,00	1,00	8,00	8,00	8,92
300	5,00	1,00	8,00	8,00	8,87

Areia média

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Variação do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	15,00	180,00	172,80
10,00	0,17	0,08	12,00	144,00	152,31
15,00	0,25	0,08	11,00	132,00	136,30
20,00	0,33	0,08	10,00	120,00	123,79
25,00	0,42	0,08	10,00	120,00	114,02
35,00	0,58	0,17	18,00	108,00	100,43
45,00	0,75	0,17	15,00	90,00	92,14
60,00	1,00	0,25	22,00	88,00	85,35
85,00	1,42	0,25	19,00	76,00	80,96
90,00	1,50	0,25	20,00	80,00	80,57
105,00	1,75	0,25	20,00	80,00	79,83
120,00	2,00	0,25	20,00	80,00	79,48

Pó de pedra

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Variação do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	65,00	780,00	607,81
10,00	0,17	0,08	48,00	576,00	577,01
15,00	0,25	0,08	41,00	492,00	548,49
20,00	0,33	0,08	37,00	444,00	522,08
25,00	0,42	0,08	35,00	420,00	497,63
30,00	0,50	0,08	34,00	408,00	474,99
40,00	0,67	0,17	70,00	420,00	434,62
50,00	0,83	0,17	60,00	360,00	400,00
60,00	1,00	0,17	70,00	420,00	370,32
70,00	1,17	0,17	60,00	360,00	344,87
80,00	1,33	0,17	60,00	360,00	323,05
90,00	1,50	0,17	58,00	348,00	304,34
100,00	1,67	0,17	59,00	354,00	288,30
110,00	1,83	0,17	50,00	300,00	274,54
120,00	2,00	0,17	50,00	300,00	262,75
130,00	2,17	0,17	44,00	264,00	252,64
145,00	2,42	0,25	61,00	244,00	240,11
160,00	2,67	0,25	47,00	188,00	230,17
175,00	2,92	0,25	50,00	200,00	222,27
190,00	3,17	0,25	44,00	176,00	216,00
205,00	3,42	0,25	50,00	200,00	211,02
220,00	3,67	0,25	50,00	200,00	207,07
235,00	3,92	0,25	50,00	200,00	203,93

Pedrisco com areia média

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Varição do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	72,00	864,00	839,99
10,00	0,17	0,08	65,00	780,00	777,94
15,00	0,25	0,08	57,00	684,00	723,24
20,00	0,33	0,08	58,00	696,00	675,03
25,00	0,42	0,08	53,00	636,00	632,53
30,00	0,50	0,08	50,00	600,00	595,07
35,00	0,58	0,08	48,00	576,00	562,06
40,00	0,67	0,08	40,00	480,00	532,95
50,00	0,83	0,17	75,00	450,00	484,69
60,00	1,00	0,17	73,00	438,00	447,19
70,00	1,17	0,17	72,00	432,00	418,05
80,00	1,33	0,17	70,00	420,00	395,42
90,00	1,50	0,17	65,00	390,00	377,83
100,00	1,67	0,17	67,00	402,00	364,17
110,00	1,83	0,17	64,00	384,00	353,55
120,00	2,00	0,17	62,00	372,00	345,30
130,00	2,17	0,17	60,00	360,00	338,89
140,00	2,33	0,17	57,00	342,00	333,92
150,00	2,50	0,17	54,00	324,00	330,05
160,00	2,67	0,17	49,00	294,00	327,04
170,00	2,83	0,17	50,00	300,00	324,71
180,00	3,00	0,17	50,00	300,00	322,89
190,00	3,17	0,17	50,00	300,00	321,48

Ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos inicial na parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de pó de pedra

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Variação do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	8,00	96,00	85,52
10,00	0,17	0,08	6,00	72,00	78,72
15,00	0,25	0,08	6,00	72,00	72,56
20,00	0,33	0,08	3,00	36,00	66,98
30,00	0,50	0,17	12,00	72,00	57,37
40,00	0,67	0,17	11,00	66,00	49,50
50,00	0,83	0,17	11,00	66,00	43,05
60,00	1,00	0,17	6,00	36,00	37,76
75,00	1,25	0,17	2,00	12,00	31,57
90,00	1,50	0,25	5,00	20,00	26,97
105,00	1,75	0,25	5,00	20,00	23,57
125,00	2,08	0,33	5,00	15,00	20,35
145,00	2,42	0,33	8,00	24,00	18,20
165,00	2,75	0,33	6,00	18,00	16,75
185,00	3,08	0,33	3,00	9,00	15,78
215,00	3,58	0,50	7,00	14,00	14,88
245,00	4,08	0,50	9,00	18,00	14,39
275,00	4,58	0,50	9,00	18,00	14,12
305,00	5,08	0,50	9,00	18,00	13,97

Ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos após 12 meses na parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de pó de pedra

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Varição do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	7,00	84,00	89,76
10,00	0,17	0,08	6,00	72,00	81,44
15,00	0,25	0,08	8,00	96,00	74,03
20,00	0,33	0,08	6,00	72,00	67,43
30,00	0,50	0,17	9,00	54,00	56,31
40,00	0,67	0,17	5,00	30,00	47,49
50,00	0,83	0,17	8,00	48,00	40,49
60,00	1,00	0,17	6,00	36,00	34,93
75,00	1,25	0,17	4,00	24,00	28,67
90,00	1,50	0,25	6,00	24,00	24,25
105,00	1,75	0,25	7,00	28,00	21,12
125,00	2,08	0,33	6,00	18,00	18,32
145,00	2,42	0,33	5,00	15,00	16,56
165,00	2,75	0,33	5,00	15,00	15,45
185,00	3,08	0,33	5,00	15,00	14,75

Ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos inicial na parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de areia média

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Varição do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	15,00	180,00	177,64
10,00	0,17	0,08	10,00	120,00	126,08
15,00	0,25	0,08	8,00	96,00	96,12
20,00	0,33	0,08	7,00	84,00	78,71
25,00	0,42	0,08	6,00	72,00	68,60
30,00	0,50	0,08	5,00	60,00	62,72
40,00	0,67	0,17	9,00	54,00	57,32
50,00	0,83	0,17	10,00	60,00	55,50
60,00	1,00	0,17	10,00	60,00	54,88
70,00	1,17	0,17	8,00	48,00	54,67
80,00	1,33	0,17	9,00	54,00	54,60
90,00	1,50	0,17	9,00	54,00	54,58
100,00	1,67	0,17	9,00	54,00	54,57

Ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos após 12 meses na parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de areia média

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Varição do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	12,00	144,00	140,24
10,00	0,17	0,08	9,00	108,00	117,60
15,00	0,25	0,08	8,00	96,00	99,55
20,00	0,33	0,08	8,00	96,00	85,17
25,00	0,42	0,08	7,00	84,00	73,69
30,00	0,50	0,08	5,00	60,00	64,55
40,00	0,67	0,17	7,00	42,00	51,45
50,00	0,83	0,17	7,00	42,00	43,12
60,00	1,00	0,17	6,00	36,00	37,83
70,00	1,17	0,17	6,00	36,00	34,46
80,00	1,33	0,17	6,00	36,00	32,33

Ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos inicial na parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de pedrisco com areia média

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Varição do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	15,00	180,00	179,42
10,00	0,17	0,08	13,00	156,00	157,04
15,00	0,25	0,08	12,00	144,00	143,37
20,00	0,33	0,08	11,00	132,00	135,02
25,00	0,42	0,08	11,00	132,00	129,92
30,00	0,50	0,08	11,00	132,00	126,81
35,00	0,58	0,08	10,00	120,00	124,91
40,00	0,67	0,08	10,00	120,00	123,75
45,00	0,75	0,08	11,00	132,00	123,04
50,00	0,83	0,08	10,00	120,00	122,61
60,00	1,00	0,17	21,00	126,00	122,18
70,00	1,17	0,17	20,00	120,00	122,02
80,00	1,33	0,17	20,00	120,00	121,96
90,00	1,50	0,17	20,00	120,00	121,94

Ensaio do infiltrômetro dos anéis concêntricos após 12 meses na parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de pedrisco com areia média

Tempo de simulação (min)	Tempo de simulação (h)	Varição do tempo (h)	Total Infiltrado por medição (mm)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de Infiltração Modelo Horton (mm/h)
5,00	0,08	0,08	13,00	156,00	151,16
10,00	0,17	0,08	12,00	144,00	144,19
15,00	0,25	0,08	12,00	144,00	137,86
20,00	0,33	0,08	10,00	120,00	132,12
25,00	0,42	0,08	12,00	144,00	126,91
30,00	0,50	0,08	9,00	108,00	122,17
35,00	0,58	0,08	8,00	96,00	117,88
40,00	0,67	0,08	10,00	120,00	113,98
45,00	0,75	0,08	9,00	108,00	110,44
50,00	0,83	0,08	9,00	108,00	107,22
60,00	1,00	0,17	19,00	114,00	101,66
70,00	1,17	0,17	17,00	102,00	97,07
80,00	1,33	0,17	15,00	90,00	93,29
90,00	1,50	0,17	17,00	102,00	90,18
100,00	1,67	0,17	15,00	90,00	87,62
110,00	1,83	0,17	14,00	84,00	85,50
120,00	2,00	0,17	13,00	78,00	83,76
130,00	2,17	0,17	14,00	84,00	82,32
140,00	2,33	0,17	13,00	78,00	81,14
150,00	2,50	0,17	13,00	78,00	80,17
160,00	2,67	0,17	13,00	78,00	79,36

APÊNDICE B – TABELAS COM DADOS COLETADOS EM CAMPO DO ENSAIO DA NORMA AMERICANA ASTM C1701

Parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de pó de pedra.

Data	02/09/2017	02/12/2017	10/03/2018	09/06/2018	07/09/2018
Tempo total p/ Infiltração (s)	13444	13340	13598	13679	13630
Massa da água infiltrada (kg)	3,60	3,6	3,60	3,6	3,60
Diametro interno do anel (mm)	290	290	290	290	290
Taxa de Infiltração (mm/h)	14,59	14,71	14,43	14,34	14,40
Taxa de Infiltração (m/s)	4,05E-06	4,09E-06	4,01E-06	3,98E-06	4,00E-06

Parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de areia média.

Data	03/09/2017	03/12/2017	11/03/2018	10/06/2018	08/09/2018
Tempo total p/ Infiltração (s)	2736	2780	2852	2894	2945
Massa da água infiltrada (kg)	3,6	3,6	3,60	3,6	3,60
Diametro interno do anel (mm)	290	290	290	290	290
Taxa de Infiltração	71,71	70,58	68,80	67,80	66,62
Taxa de Infiltração (m/s)	1,99E-05	1,96E-05	1,91E-05	1,88E-05	1,85E-05

Parte do pavimento cuja camada de assentamento é constituída de pedrisco com areia média.

Data	03/09/2017	03/12/2017	11/03/2018	10/06/2018	08/09/2018
Tempo total p/ Infiltração (s)	2469	2528	2590	2698	2705
Massa da água infiltrada (kg)	3,6	3,6	3,60	3,6	3,60
Diametro interno do anel (mm)	290	290	290	290	290
Taxa de Infiltração	79,47	77,61	75,76	72,72	72,54
Taxa de Infiltração (m/s)	2,21E-05	2,16E-05	2,10E-05	2,02E-05	2,01E-05