

CRISTIANO DE ASSUMPÇÃO SANTOS

IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO PERMEÁVEL EM
ÁREAS URBANAS NA RECUPERAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
ABRIL-2016

CRISTIANO DE ASSUMPÇÃO SANTOS

IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO PERMEÁVEL EM
ÁREAS URBANAS NA RECUPERAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo

COORIENTADOR: Prof. Dr. Jonathan Dieter

CASCADEL

PARANÁ – BRASIL

ABRIL-2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

S237i

Santos, Cristiano de Assumpção.

Impacto da utilização de pavimentação permeável em áreas urbanas na recuperação de bacias hidrográficas / Cristiano de Assumpção Santos. – Cascavel, 2016.
52 f.

Orientador: Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo
Coorientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Cascavel, 2016.

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura.

1. Hidrologia. 2. Infiltração. 3. Piso de concreto permeável.
I. Frigo, Elisandro Pires. II. Dieter, Jonathan. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

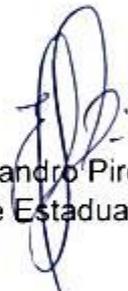
CDD 21 ed. : 551.48
CIP-NBR 12899

CRISTIANO DE ASSUMPÇÃO SANTOS

**“IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO PERMEÁVEL EM
ÁREAS URBANAS NA RECUPERAÇÃO DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Helton José Alves
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Jiam Pires Frigo
Universidade Federal da Integração Latino-Americana/Foz do
Iguaçu

Cascavel, 07 de abril de 2016.

*À minha esposa, Alessandra
e às minhas filhas, Larissa e Elisa,
por terem permanecido ao meu
lado durante este desafio.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para continuar mesmo quando enfermo, e pela lucidez ao escrever este projeto.

À minha esposa e minhas filhas, por estarem ao meu lado durante esta jornada e em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo e Prof. Dr. Jonathan Dieter, pelo auxílio, apoio, ensinamentos e paciência.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação *Strictu Senso* de Engenharia em Energia na Agricultura, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos laboratoriais, Caroline Thaís Eckert, Anderson Eduardo Grzesiuck, Lucas Dierings dos Santos, Bruno Cosmos, Paulo José Ferreira e Eduardo Fritz Berkembrock, assim como a Leonardo Contini e Evandro Castro pela ajuda imensurável na montagem e coleta de dados durante os experimentos.

À Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação, em especial a Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt e Keren Paula da Silva, pela paciência, amizade e atenção.

Sinceramente, obrigado!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo da bacia hidrográfica	04
Figura 2: Exemplos de passeio público conforme Código de Obras de Cascavel	12
Figura 3: Exemplos de aplicação de alguns tipos de revestimentos permeáveis.....	14
Figura 4: Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto com juntas alargadas	14
Figura 5: Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto permeável.....	15
Figura 6: (A) Pavimento com revestimento constituído por placas de concreto permeável e (B) pavimento de concreto permeável moldado no local	15
Figura 7: Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total	16
Figura 8: Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração parcial	17
Figura 9: Exemplo de sistema de pavimento permeável sem infiltração	17
Figura 10: Simulador e chuva InfiAsper/UFMS móvel.....	18
Figura 11: Caixa coletora sem tratamento na superfície	22
Figura 12: Distribuição de parcelas no local do experimento	22
Figura 13: Montagem caixa coletora “A”, passeio público de concreto impermeável.....	23
Figura 14: Montagem caixa coletora “B”, passeio público de peças de concreto com juntas alargadas	24
Figura 15: Montagem caixa coletora “C”, passeio público de peças de concreto permeável.....	25
Figura 16: Lisímetro “D” com cobertura em grama e lisímetro “E” com solo descoberto.....	25
Figura 17: Tensiômetro modelo MPM-160-B.....	26
Figura 18: Simulador de precipitação InfiAsper/UFMS.....	27
Figura 19: escoamento superficial para precipitações de 45 mm.h ⁻¹	31
Figura 20: Percentual de infiltração para precipitações de 45 mm.h ⁻¹	34
Figura 21: escoamento superficial para precipitações de 60 mm.h ⁻¹	36
Figura 22: Percentual de infiltração para precipitações de 60 mm.h ⁻¹	39
Figura 23: escoamento superficial para precipitações de 90 mm.h ⁻¹	43
Figura 24: Percentual de infiltração para precipitações de 90 mm.h ⁻¹	44

Figura 25: Comparativo de taxas de infiltração no solo.....	44
Figura 26: Comparativo de escoamento superficial médio.....	45
Figura 27: Comparativo de escoamento superficial médio, lisímetros “B”, “C” e “D”	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Causa e efeito da urbanização sobre as inundações urbanas	09
Tabela 2: Alteração dos parâmetros climáticos devido à urbanização	10
Tabela 3: Índices de umidade no solo para precipitação de 45 mm.h ⁻¹	30
Tabela 4: Escoamento superficial para precipitação de 45 mm.h ⁻¹	31
Tabela 5: Tempos de simulação para precipitação de 45 mm.h ⁻¹	33
Tabela 6: Taxas de infiltração no solo para precipitação de 45 mm.h ⁻¹	34
Tabela 7: Índices de umidade no solo para precipitação de 60 mm.h ⁻¹	35
Tabela 8: Escoamento superficial para precipitação de 60 mm.h ⁻¹	36
Tabela 9: Tempos de simulação para precipitação de 60 mm.h ⁻¹	38
Tabela 10: Taxas de infiltração no solo para precipitação de 60 mm.h ⁻¹	38
Tabela 11: Índices de umidade no solo para precipitação de 90 mm.h ⁻¹	40
Tabela 12: Tempos de simulação para precipitação de 90 mm.h ⁻¹	40
Tabela 13: Escoamento superficial para precipitação de 90 mm.h ⁻¹	42
Tabela 14: Taxas de infiltração no solo para precipitação de 90 mm.h ⁻¹	43

SANTOS, Cristiano de Assumpção. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, abril de 2016. **Impacto da Utilização de Pavimentação Permeável em Áreas Urbanas na Recuperação de Bacias Hidrográficas**. Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo, Prof. Dr. Jonathan Dieter.

RESUMO

A urbanização e a ocupação desordenada das cidades criaram diversos problemas ambientais, que vão desde enchentes até alterações climáticas nos grandes centros urbanos. Entre as causas destas ocorrências está, principalmente, a impermeabilização dos solos nas cidades, que ocorre pela interferência e necessidade do homem em utilizar mais espaço. Quanto mais impermeabilizada a superfície das regiões urbanas, maior o escoamento superficial, e este, por sua vez, devido às políticas públicas adotadas e à falta de planejamento, são transferidos para bacias adjacentes, trazendo problemas a estas, como enchentes e assoreamentos dos rios. As superfícies impermeabilizadas acabam proporcionando uma menor recarga das bacias hidrográficas, transferindo para outras bacias a quantidade de água que deveria ser reposta naquela região, desta forma prejudicam a recuperação das bacias onde ocorrem as percolações. O presente estudo faz um comparativo entre duas tecnologias existentes no mercado comercialmente conhecidos como “paver” e o “piso drenante”, e apontará qual destas pode auxiliar na recuperação das bacias hidrográficas e, conseqüentemente, reduzir os problemas causados pelo escoamento superficial nas regiões urbanas. Para chegar ao resultado foram simuladas precipitações utilizando um infiltrômetro de aspensão em intensidades correspondentes à 45 mm.h^{-1} , 60 mm.h^{-1} e 90 mm.h^{-1} , e ocorreram em lisímetros onde as coberturas correspondem as características de passeios públicos utilizando as tecnologias a serem analisadas como cobertura de solo. Este experimento apontou que as peças de concreto permeável (piso drenante) e as peças de concreto com juntas alargadas (paver) têm taxa de percolação assemelhada a cobertura de grama e desta forma podem ser utilizadas como tecnologias para infiltração de água no solo auxiliando na recuperação das bacias hidrográficas das zonas urbanas.

PALAVRAS-CHAVE: hidrologia, Infiltração, escoamento superficial, piso de concreto permeável, infiltrômetro de aspensão.

SANTOS, Cristiano de Assumpção. State University of West Paraná, April 2016. **Use of Impact Permeable Paving in Urban Areas in Recuperação Watershed**. Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo, Prof. Dr. Jonathan Dieter.

ABSTRACT

Urbanization and the disorderly occupation of cities have created many environmental problems, ranging from floods to climate change in large urban centers. Among the causes of these occurrences is mainly soil sealing in cities, that occurs by interference and man's need to use more space. The more waterproofed the surface of urban areas, higher runoff, and this, in turn, due to the adopted public politics and the lack of planning, are transferred to adjacent watersheds, causing, these problems such as floods and silting of rivers. The impermeabilized surfaces end up affording a smaller charge of watersheds, transferring to other river basins the amount of water that it should be restored in the region, that way impair the recovery of the basins where the percolations occur. This study is a comparison between two existing technologies in commercially known market as "paver" and "draining floor", and point which of these can help in the recovery of watersheds and, consequently, reduce the problems caused by surface runoff in urban areas. To reach the result precipitations were simulated using a sprinkler infiltrometer in intensities corresponding to $45\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, $60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ and $90\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, and occurred in lysimeters where the coverages match the public walks characteristics using the technologies to be analyzed as ground cover. This experiment showed that the permeable concrete parts (draining floor) and concrete parts gaskets extended (paver) has percolation rate likened to grass cover and thus can be used as technologies for water infiltration into the soil aiding in the recovery of watersheds in urban areas.

KEYWORDS: hydrology, infiltration, surface runoff, permeable concrete floors, infiltrometer sprinkler.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	03
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	04
2.1 Recursos Hídricos	04
2.1.1 Hidrologia	04
2.1.2 Bacia Hidrográfica	05
2.1.3 Características Fisiográficas	05
2.1.4 Infiltração.....	06
2.1.5 Escoamento Superficial.....	07
2.1.6 Drenagem de Águas Subterrâneas	07
2.1.7 Drenagem Urbana.....	08
2.2 Impactos da Urbanização.....	09
2.3 Passeios Públicos	11
2.4 Pavimentos Permeáveis.....	13
2.5 Simulação de Chuva	18
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
3.1 Localização e Caracterização da Área Experimental	21
3.2 Montagem do Experimento	21
3.3 Tensiômetro	26
3.4 Simulação da Intensidade da Precipitação.....	27
3.5 Coleta de Dados	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Simulação de chuva $45\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	30
4.2 Simulação de chuva $60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	35
4.3 Simulação de chuva $90\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	39
4.4 Comparativos das Taxas de Infiltração	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS.....	48
ANEXO	52

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos tempos e o crescimento da população humana, passou-se a ocupar parcelas cada vez maiores de solo, até então não utilizados. Com estes crescimentos, e devido às necessidades das civilizações em produção de alimentos e bens, aconteceram também avanços tecnológicos que transformaram os vilarejos em grandes centros.

Este uso desenfreado do solo ocasionou mudanças em sua estrutura, alterações nos cursos d'água, derrubadas de matas e florestas, modificando a sua paisagem natural para uma rural e urbana. A ação do homem acabou por moldar o meio ambiente e esta modificação da natureza proporcionou grandes avanços para as civilizações, porém, tem perturbado o equilíbrio natural dos ecossistemas.

A urbanização sem planejamento também expõe o solo a uma diversidade de problemas, um deles, é a impermeabilização do solo, que impede a infiltração da água das chuvas e causa a minimização da recarga de água nos solos, reduzindo a disponibilidade de água nos períodos de baixa precipitação.

A impermeabilização dos solos causa prejuízos não apenas para as cidades, mas também para todo seu entorno. Os microclimas urbanos influenciam os climas nas regiões agrícolas próximas as cidades. A redução da área de percolação nas áreas urbanas proporciona também o aumento do escoamento superficial, ou por meio de condutos, fazendo que as águas que deveriam percolar em determinada área seja carregada para jusante das bacias ou ainda para outras bacias. Estes fatos podem assorear rios, causar enchentes, gerar ilhas de calor que aumentam o consumo de energia, entre outros fatores.

Em busca de soluções para este desequilíbrio, órgãos públicos têm adotado soluções que, na maioria das vezes, são fundadas na utilização do princípio da drenagem das águas das precipitações de forma rápida para jusante. Este conceito de sistema apenas transfere a inundação de um ponto ao outro, resolvendo assim parte do problema.

Os pavimentos permeáveis, também conhecidos como paver e piso drenante, compõem parte das tecnologias que têm sido aplicadas no intuito de promover a infiltração da água, retardando o tempo de escoamento superficial ou então, tentando devolver ao solo a capacidade de infiltração anterior à urbanização.

Buscando tornar mais relevante os resultados obtidos com as tecnologias de

percolação, optou-se em verificar a capacidade de infiltração em situações normais encontradas nos passeios públicos das cidades. Estas situações de calçamento contemplam passeios público com solo sem cobertura, com cobertura em grama e com cobertura impermeável em concreto.

Assim, a contribuição do estudo é investigar e diagnosticar se o paver ou o piso drenante como tecnologias de pavimentação permeável, se utilizadas como cobertura em passeios públicos como medidas de percolação e mitigadoras de escoamento superficial, têm melhor impacto na recuperação das bacias hidrográficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Recursos Hídricos

2.1.1 Hidrologia

A Hidrologia é uma ciência interdisciplinar que nos últimos anos tem se desenvolvido significativamente, face ao aumento do uso da água e em função dos crescentes problemas decorrentes da ação antrópica nas bacias hidrográficas e dos impactos sobre o meio ambiente.

O *U.S. Federal Council of Service and Technology*, citada por Vilella e Mattos (1975), define hidrologia como a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, as suas propriedades físicas e químicas e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas.

A hidrologia, como ciência, pode ser subdividida em diferentes áreas de conhecimento associadas. Estão entre elas a hidrometeorologia (que estuda a água na atmosfera), a limnologia (que está direcionada para o acompanhamento dos lagos e reservatórios), e a hidrogeologia (que estuda as águas na crosta terrestre), entre outras. Quando se trata de Engenharia de Recursos Hídricos a hidrologia também é conhecida como Engenharia Hidrológica. De acordo com Tucci (1995):

“a hidrologia pode ser entendida como a área do conhecimento que estuda o comportamento físico da ocorrência e o aproveitamento da água na bacia hidrográfica, quantificando os recursos hídricos no tempo e no espaço e avaliando o impacto da modificação da bacia hidrográfica sobre o comportamento dos processos hidrológicos”.

Diante deste novo olhar, a hidrologia acaba por se subdividir novamente, ficando representada nas especialidades de hidrometeorologia, geomorfologia de bacias hidrográficas, escoamento superficial, interceptação, infiltração e escoamento em meio não saturado, escoamento em meio saturado e evaporação e evapotranspiração.

Entre as áreas de estudo e conhecimento de hidrologia apresentadas deverão ser utilizadas para embasamento desta pesquisa a geomorfologia de bacias hidrográficas, o escoamento superficial, a infiltração e escoamento em meios saturados e não saturados e a evapotranspiração e evaporação das águas.

2.1.2 Bacia Hidrográfica

De acordo com Naghettini (2000), bacias hidrográficas são unidades fisiográficas, limitadas por divisores topográficos, que armazenam as precipitações agindo como reservatórios de água e sedimentos, escoando-os por meio de seção fluvial única.

Villela e Mattos (1975) descrevem bacia hidrográfica como uma área onde a precipitação é coletada e conduzida para seu sistema de drenagem natural. Cada bacia hidrográfica é delimitada pelas linhas das cristas nas elevações que circundam a seção do curso da água em estudo (PORTO, 2003).

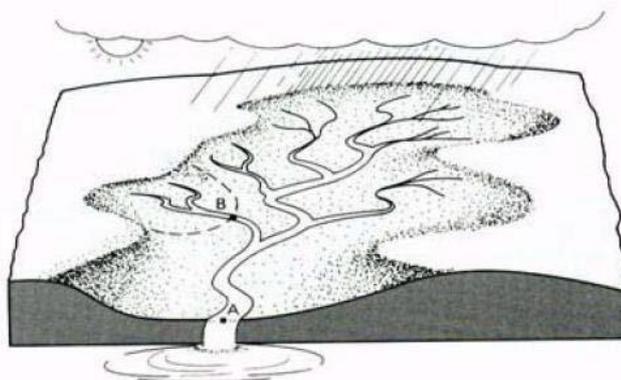


Figura 1. Modelo da bacia hidrográfica.
Fonte: Porto, 2003

Ainda segundo Tucci (2004), uma “bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório”. Os autores citados concordam que bacia é uma determinada área onde ocorre a captação da precipitação. Desta maneira faz-se necessário entender as características físicas destas áreas, possibilitando assim, melhor conhecimento sobre as mesmas.

2.1.3 Características fisiográficas

Garcez e Alvarez (1988) citam que as características topográficas, geológicas, geomorfológicas, pedológicas e térmicas, bem como os tipos de coberturas da bacia, desempenham papel fundamental no comportamento hidrológico. Os mesmos autores ainda frisam que devido à tendência acentuada de ocupação do solo pelo homem, com a finalidade de aproveitar os materiais

disponíveis, faz com que a cobertura natural das bacias se modifique com o tempo, alterando assim as características da própria bacia hidrográfica.

Para Tucci (2004), dados fisiográficos de uma bacia hidrográfica são todos aqueles que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite, sendo, basicamente, áreas, comprimentos, declividades e coberturas de solos medidos diretamente ou expressos por índices. As medidas e índices mais utilizados são: área da bacia, índices de drenagem e índices de declividade.

2.1.4 Infiltração

De acordo com Pinto, et al (1976), entende-se como infiltração o fenômeno de penetração da água em camadas de solo próximas à superfície, onde a água move-se para baixo através de vazios, sob a ação da gravidade. O mesmo autor salienta que a água faz seu movimento de descida até encontrar uma camada-suporte que a retém, denominando-se água no solo.

Segundo Garcez e Alvarez (1988), as águas provenientes das precipitações, que ficam retidas no terreno ou venham a escoar superficialmente, podem infiltrar no solo por efeito da gravidade ou capilaridade. Os autores salientam que a infiltração é um fenômeno que ocorre em função das características geológicas do solo, do relevo e dos obstáculos oferecidos ao escoamento superficial.

Tucci afirma que a “infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo” (2004). Conforme a água infiltra pela superfície as camadas superiores do solo tendem a umedecer, este fenômeno ocorre de cima para baixo alterando gradativamente o perfil de umidade. O mesmo autor ainda comenta que a infiltração é decorrente de precipitações naturais não capazes de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar apenas as camadas próximas as superfícies.

A capacidade de infiltração está diretamente ligada à porosidade, o tamanho das partículas e o estado de fissuração das rochas. Uma pequena camada superficial na ordem de um centímetro tem grande influência na capacidade de infiltração (PINTO, et al, 1976).

Tucci (2004) descreve, também, que de acordo com a lei de Darcy a condutividade hidráulica varia com o teor de umidade do solo e varia de acordo com o tipo de material que compõe o solo. Chow (1959) apud Tucci (2004) classifica os

modelos de escoamento em hidrológicos e hidráulicos.

2.1.5 Escoamento Superficial

Os escoamentos são geralmente definidos como superficiais que representam o fluxo da água sobre a superfície do solo e seus múltiplos canais (TUCCI, 2004).

Segundo Garcez e Alvarez (1988), escoamento superficial é uma das fases do ciclo hidrológico, que por efeito da gravidade, se desloca na superfície da terra. Os mesmos autores afirmam que há uma ligação direta entre o escoamento superficial e as precipitações, desta forma torna-se fundamental a análise da correlação entre estes fenômenos.

Sendo o escoamento superficial o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da terra, este deve considerar o movimento das águas a partir da menor porção de precipitação que cai sobre o solo saturado, ou sobre uma superfície impermeável, e escoam sobre estas, podendo formar as enxurradas, córregos, ribeirões, rios e lagos (PINTO, et al, 1976).

Tucci (1995) comenta que o aumento do escoamento superficial é um dos principais impactos que a urbanização pode causar sobre o ciclo hidrológico. Seguido pela redução da evapotranspiração, do escoamento subterrâneo e o rebaixamento do lençol freático, entre outros fatores.

Scarati Martins (2006) comenta que o volume do escoamento superficial é determinado principalmente pela quantidade de água precipitada, seguida pelas características de infiltração do solo, umidade do solo, tipo de cobertura vegetal, permeabilidade da superfície e retenção superficial.

2.1.6 Drenagem de águas subterrâneas

O processo de drenagem pode ser definido como sendo a remoção da água do meio poroso, seguida pela substituição de ar, que ocorre, geralmente, devido à pressão atmosférica. O mesmo autor ainda explica que o deslocamento de água pelo ar ocorre devido à pressão de água no poro tornar-se menor que a pressão do ar no mesmo. Desta forma a pressão do ar é mais alta em quantidade suficiente que

a pressão da água, permitindo assim que parte da água se desloque (TUCCI, 2004).

Tucci (2004), afirma, também, que a porosidade é a medida do volume de vazios de um meio poroso. Estes vazios estão interconectados uns com os outros, proporcionando o processo de transporte e armazenamento da água.

2.1.7 Drenagem Urbana

O termo drenagem urbana é entendido como um conjunto de medidas que tem por objetivo minimizar os riscos e diminuir os prejuízos causados com as inundações, e ainda, possibilitar o desenvolvimento urbano sustentável (TUCCI, 2004).

Tucci (2004) ainda descreve que soluções eficazes para drenagem urbana estão diretamente ligadas aos seguintes fatores:

- existência de uma política para o setor que defina objetivos a serem alcançados e os meios para atingi-los;
- existência de uma política para ocupação do solo urbano devidamente articulada com a política de drenagem urbana, principalmente no que se refere à ocupação de várzeas de inundação;
- processos de planejamento que contemplem medidas de curto, médio e longo prazos em toda a bacia, e integre as medidas de drenagem de águas pluviais no complexo maior do ambiente urbano;
- existência de entidade eficiente que domine as tecnologias necessárias, implante obras e medidas, desenvolva as atividades de comunicação social e etc;
- domínio da tecnologia adequada para planejamento, projeto, construção e operação das obras; e
- organização de campanhas de educação e esclarecimento da opinião pública.

Com a implantação das medidas citadas anteriormente, torna-se possível iniciar um ciclo de mudança dentro do ambiente urbano. Porém, Tucci (2004) afirma que tais medidas, apesar de serem de suma importância, necessitam de alterações estruturais que são onerosas ao poder público.

A questão da drenagem urbana é tratada por Baptista e Nascimento (2005) através de dois sistemas de intervenção hidráulica: o tradicional ou clássico, com base higienista, e o técnico alternativo, com base em medidas compensatórias de drenagem e controle na origem.

Para Virgiliis (2009) o modelo higienista para drenagem de águas pluviais recomenda sua rápida evacuação das áreas urbanas por meio da utilização de condutos subterrâneos, funcionando por gravidade. Estes sistemas são constituídos

principalmente de dispositivos de microdrenagem que efetuam o transporte das águas superficiais nas ruas (sarjetas), sua captação (bocas de lobo) e o deságue até sistemas de macrodrenagem constituídos de canais abertos ou galerias.

Já o sistema de drenagem alternativo ou compensatório, busca tratar o problema de outra forma. Este conceito se utiliza de novas tecnologias para neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos. Esta compensação acontece pelo controle do excesso de água oriunda da impermeabilização evitando sua transferência de forma rápida para jusante, reduzindo assim o impacto na área urbana (VIRGILIIS, 2009).

Baptista e Nascimento (2005) comentam que o modelo alternativo do sistema de drenagem pode ser mais eficiente se forem utilizadas medidas estruturais como a utilização de bacias ou reservatórios de detenção ou bacias de amortecimento de cheias, construção de estruturas para armazenamento temporário, a utilização de pavimentos porosos ou permeáveis, destinados ao armazenamento temporário e/ou infiltração, em áreas de estacionamento e no sistema viário, e etc.

Segundo Tucci (2002) a solução mais adequada para o problema da transferência das áreas de inundações de montante para jusante das bacias hidrográficas é, em princípio, a interferência da ação pública por meio de regulamentação e de planejamento, sendo um instrumento importante o denominado Plano Diretor de Drenagem Urbana.

2.2 Impactos da Urbanização

Desde surgimento das civilizações, o homem tem interferido na natureza com a intenção de garantir sua subsistência e segurança. Esta interferência ocasionou diversos impactos ambientais, e estes trouxeram alterações no meio ambiente em maior ou menor escala de gravidade (HOLTZ, 2011).

A urbanização desordenada traz a tona uma diversidade de problemas. Andreoli, et al.(2003), afirmam que estes problemas são decorrentes de planejamento inadequado, inexistência de planejamento ou omissão do poder público.

De acordo com Bispo e Levino (2011), devido à urbanização haverá uma alteração do regime de produção nas bacias hidrográficas urbanas, a

impermeabilização do solo impede a infiltração da água, acentuando os problemas da erosão urbana e aumentando os picos de cheia. Além do mais, a minimização da recarga nos solos, reduz a disponibilidade de água nos períodos de baixa precipitação.

Se não bastasse, as superfícies impermeáveis têm relação direta com a alteração na qualidade das águas. Poluentes, sedimentos e produtos químicos que ficam depositados sobre estas superfícies acabam transportados para os corpos d'águas pelas chuvas. Esteves (2006) cita que outros problemas, como erosão e assoreamento de rios, também podem ser causados pela impermeabilização das superfícies, que gera maiores volumes e velocidades se comparados ao escoamento em superfícies naturais.

O adensamento da zona urbana é o fator que mais interfere na drenagem urbana, esta interferência modifica o escoamento superficial de forma drástica. Em certas ocasiões, chega-se a verificar o aumento dos picos de cheias em até seis vezes mais, se comparado com o pico da mesma bacia em condições naturais (TUCCI, 2004). A Tabela 1 demonstra, com maior clareza, as relações de causa e efeito da urbanização.

Tabela 1. Causa e efeito da urbanização sobre as inundações urbanas

CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de drenagem	Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água; Entupimento de bueiros e galerias.
Redes de esgoto deficiente	Degradação da qualidade da água; Moléstias de veiculação hídrica; Inundações consequências mais sérias.
Desmatamento e Desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais e galerias.
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos; Maiores picos; Maiores custos de utilidade pública.

Fonte: TUCCI, (2004)

Pela Tabela 1, pode-se notar que as inundações urbanas têm, em suas causas principais, a impermeabilização do solo, a falta de redes de drenagem, o lixo não recolhido ou deixado à beira dos rios, a falta de planejamento no projeto e execução de redes de esgotos, o desmatamento desordenado e a ocupação nas margens dos rios. Estas (ditas) falhas ocasionam maiores picos e vazões,

degradação da qualidade das águas, entupimentos de bueiros e maiores prejuízos, tornando desta forma, cada vez mais necessário o estudo do assunto.

Além dos aspectos hidrológicos, diversos fatores que advêm do crescimento urbano acelerado e desorganizado, afetam diretamente a drenagem urbana dificultando inclusive as possíveis soluções. Estão entre estas causas, à proliferação de loteamentos sem condições técnicas, ocupação de áreas impróprias, proliferações de favelas, invasões, ocupações extensas e adensadas que dificultam a construção de canalizações e eliminam as áreas de armazenamento (TUCCI, 2004).

Nessa mesma linha, as cidades, e as atividades dela decorrentes, promovem alterações nos balanços energético, térmico e hídrico, que por sua vez, trazem como consequência modificações importantes nas propriedades físicas e químicas da atmosfera, propiciando assim, a criação de microclimas distintos das áreas não urbanizadas (MONTEIRO; MENDONÇA, 2003).

A ocupação desordenada das áreas urbanas acaba, também, por causar alterações climáticas em suas bacias hidrográficas. Estas alterações podem ser verificadas na Tabela 2 que confronta os parâmetros climáticos das áreas de bacias urbanas com bacias hidrográficas rurais.

Tabela 2. Alteração dos parâmetros climáticos devido à urbanização

Elemento	Variação em relação à área rural	
Precipitações totais	5 a 10%	Maior
Temperatura do ar	0,5 a 1,0°C	Maior
Umidade relativa	2 a 8%	Maior
Nebulosidade	100%	Maior

Fonte: LANDBERG, (1970), citado por TUCCI, (2004)

Pode-se notar, conforme demonstrado na Tabela 2, que o clima nas áreas urbanas é, em todos os aspectos, maior que nas áreas rurais, chegando ao caso do aumento da nebulosidade a 100% maior que nas zonas rurais. A temperatura do ar tem a tendência de aumentar quanto maior a área impermeabilizada, criando assim o que Tucci (2004) chama de ilha de calor.

Diante do exposto, torna-se difícil desvincular as variações climáticas nas áreas urbanizadas e o surgimento de microclimas em cidades mais adensadas, da ampliação de forma desordenada das cidades. Estes microclimas que surgem nas áreas urbanizadas acabam por afetar, da mesma forma ou em menor escala, as

áreas agrícolas em seu entorno.

De acordo com Tucci (2004) a impermeabilização do solo é um dos principais problemas enfrentados pelas cidades, uma das formas de amenizar esta impermeabilização é a utilização de tecnologias que permitam que as águas das precipitações infiltrem onde estas ocorrem, permitindo assim a recarga das bacias hidrográficas.

Para possibilitar esta infiltração nas áreas urbanizadas é necessário encontrar formas que possibilitem a infiltração das águas para o subterrâneo. Algumas medidas já vêm sendo utilizadas, como a implantação de áreas arborizadas em centros urbanos, a utilização de asfalto poroso ou permeável e também a tecnologia de concreto permeável. Esta última pode ser utilizada em áreas de estacionamentos, áreas externas das edificações e da mesma forma nos passeios públicos onde hoje é mais usual a utilização de concreto tradicional.

Como este projeto busca uma maneira de mitigar a impermeabilização dos solos, será por intermédio dos passeios públicos que se continuará esta jornada, visto que a utilização do pavimento de concreto permeável tem se tornado comum na cobertura dos passeios públicos e demais áreas das edificações.

2.3 Passeios públicos

Antes de iniciar a pesquisa sobre os pavimentos permeáveis de concreto, faz-se necessário entender as normas que determinam as construções e instalações dos passeios públicos. Para tanto, foi necessário buscar materiais que proporcionassem apoio ao dimensionamento das parcelas de simulação destes passeios.

Dos materiais utilizados como referência para a elaboração do projeto destaca-se a NBR 9050 (2004) que, em seu parágrafo 6.10, denomina passeio público a área de circulação externa. Esta área, segundo a mesma norma, deve ter piso antiderrapante e inclinação transversal de no máximo 3% considerando a linha de cota de profundidade da calçada.

Como já mencionado nos tópicos anteriores, muitas cidades têm buscado o planejamento a fim de evitar dificuldades com inundações, alagamentos, e outras situações da espécie, elaborando normas próprias para sua urbanização. Cascavel,

acima demonstrado na Figura 2, pela possibilidade de posterior ampliação da pesquisa e implantação da mesma em experimento utilizando os passeios públicos do Município citado como base.

2.4 Pavimentos Permeáveis

Uma das soluções para os sistemas de drenagem urbana é a adoção do controle do escoamento superficial. Sudersha (2002) sugere que se pode dividir as técnicas de drenagem em dois grupos, que seguem dois princípios básicos:

- 1) A infiltração da água no solo, quando possível, para reduzir o escoamento superficial à jusante (dispositivos de infiltração);
- 2) O armazenamento provisório da água pluvial, para controlar o escoamento superficial e limitar a poluição a jusante (dispositivos de retenção e detenção).

Segundo Tucci e Davis (1995) os planos de infiltração, valas de infiltração, bacias de percolação, entradas permeáveis na rede de drenagem, trincheiras ou valas permeáveis, meio-fio permeável e os pavimentos permeáveis, são dispositivos que têm sido aplicados para proporcionar a infiltração das águas, promovendo o retardo no tempo do escoamento superficial e tentando devolver ao solo sua capacidade de infiltração anterior a urbanização.

Araújo et al (2000) apresenta como solução para a questão da impermeabilização do solo urbano a utilização de pavimentos permeáveis. Estes pavimentos têm superfície perfurada ou porosa, que permitem a infiltração de uma parte das águas que escoam superficialmente para uma camada de reserva localizada abaixo do terreno. O mesmo autor classifica os pavimentos permeáveis como sendo: pavimento de asfalto poroso, de concreto poroso e de blocos de concreto perfurados preenchido com areia ou grama.

Segundo Urbonas e Stahre (1993) apud Acioli (2005), o termo pavimento permeável descreve basicamente três tipos de superfícies pavimentadas projetadas para minimizar o escoamento superficial. Os mesmos autores classificam os tipos de superfícies conforme mostra a Figura 3 como sendo, “A” asfalto poroso, “B” concreto poroso e “C” blocos de concreto vazado.

No revestimento de peças de concreto com áreas vazadas a lixiviação deve

ocorrer pelas áreas vazadas e também pelas juntas de dilatação das mesmas conforme e Figura 3 (C).



Figura 3. Exemplos de aplicação de alguns tipos de revestimentos permeáveis.
Fonte: ASCIOLI, (2005)

Segundo a NBR 16416 (2015) os pavimentos permeáveis de concreto podem ser construídos com as seguintes tipologias: revestimentos em peças de concreto com juntas alargadas, revestimento em peças de concreto com áreas vazadas, revestimento de peças de concreto permeável, revestimento em placas de concreto permeável e revestimento de pavimento de concreto permeável.

Ainda, a mesma norma descreve que o revestimento de peças de concreto permeável com juntas alargadas consiste na utilização de peças de concreto maciço montadas de forma que a água percole por entre as juntas de dilatação das mesmas conforme demonstrado na Figura 4.



Figura 4. Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto com juntas alargadas.
Fonte: NBR 16416, 2015.

No tipo de pavimento que utiliza peças de concreto permeável a percolação das águas deve ocorrer pelas próprias peças e juntas de dilatação conforme a Figura 5 que apresenta as peças de concreto permeável. Neste modelo de peças não há necessidade de utilizar juntas alargadas, pois toda a estrutura da peça é porosa permitindo que a água percole pelo seu interior.

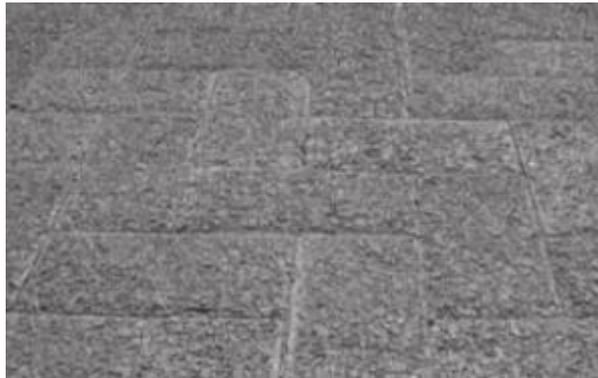


Figura 5. Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto permeável.
Fonte: NBR 16416, 2015.

Também de acordo com a NBR 16416 (2015), no pavimento com placas de concreto permeável a percolação das águas ocorre pelo concreto das placas, que, de acordo com a NBR 9781 (2013), para ser considerada placa, a peça deve ter dimensão lateral superior a 250 mm e não apresentar intertravamento entre placas. A Figura 6 (A) apresenta este tipo de pavimento. Como último tipo de pavimento, tem-se o pavimento de concreto permeável, que consiste em piso revestido com concreto permeável moldado no próprio local da instalação, onde deve ocorrer a percolação da água pelo concreto, conforme a Figura 6 (B).

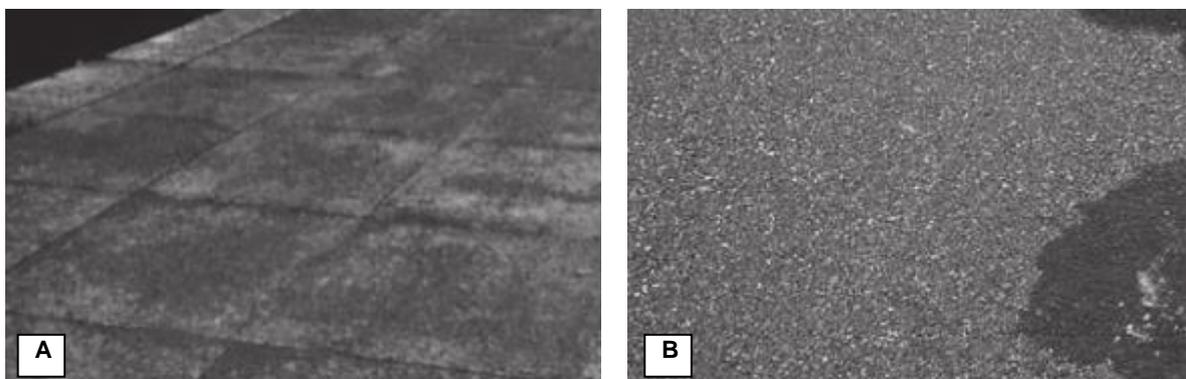


Figura 6. (A) Pavimento com revestimento constituído por placas de concreto permeável e (B) pavimento de concreto permeável moldado no local.
Fonte: NBR 16416, 2015.

Raimbault et al. (2002) afirmam que os pavimentos permeáveis são conhecidos como estruturas reservatórios, e que esta denominação refere-se às funções realizadas pela matriz porosa das quais são constituídos os pisos. A função mecânica está associada ao termo estrutura que permite suportar a carga dos veículos em tráfego, e a função hidráulica assegura que, pela porosidade dos materiais, as águas serão temporariamente retidas, e em seguida drenadas, se possível, por infiltração para o solo.

Segundo a NBR 16416 (2015) o pavimento permeável possui três diferentes aplicações, e estas estão relacionadas à infiltração de água precipitada. Desta forma de acordo com a referida norma, os tipos de utilização classificam-se em sistema de infiltração total, parcial e sem infiltração no solo.

No primeiro (sistema de infiltração total), toda água precipitada alcança o subleito e se infiltra, conforme a Figura 7.

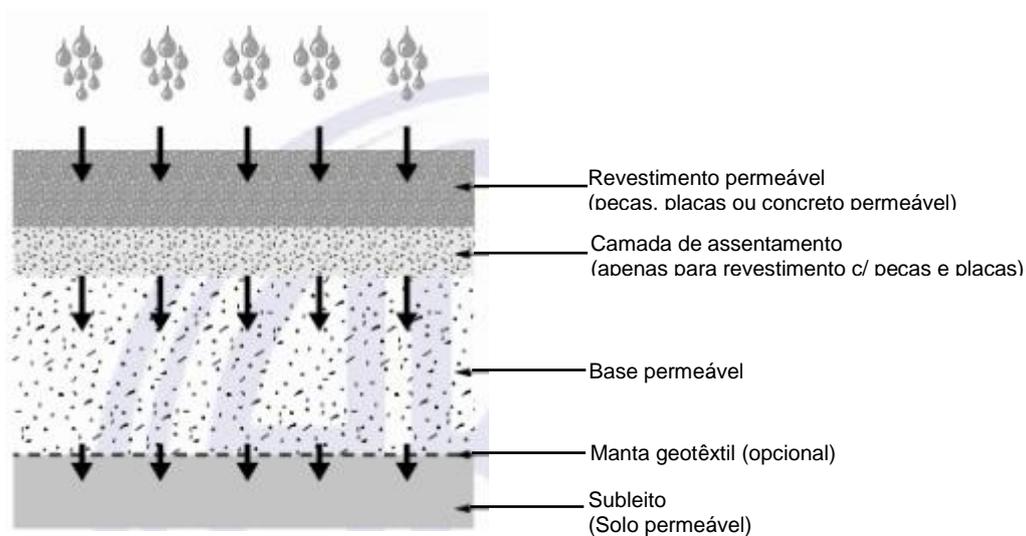


Figura 7. Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total.
Fonte: NBR 16416, 2015.

As águas das precipitações alcançam a superfície do piso onde, em contato com o pavimento permeável, infiltram passando pela camada de assentamento do piso, construída utilizando areia com granulometria conforme especificado na NBR 16416 (2015). O próximo passo da água que está no processo de infiltração é vencer a base permeável que, segundo a mesma norma, deve ser montada utilizando material pétreo e devem ter granulometria aberta.

No segundo tipo de sistema (infiltração parcial), parte da água da precipitação alcança o subleito e infiltra, porém outra parte fica armazenada temporariamente até ser completamente removida pelo dreno, conforme Figura 8.

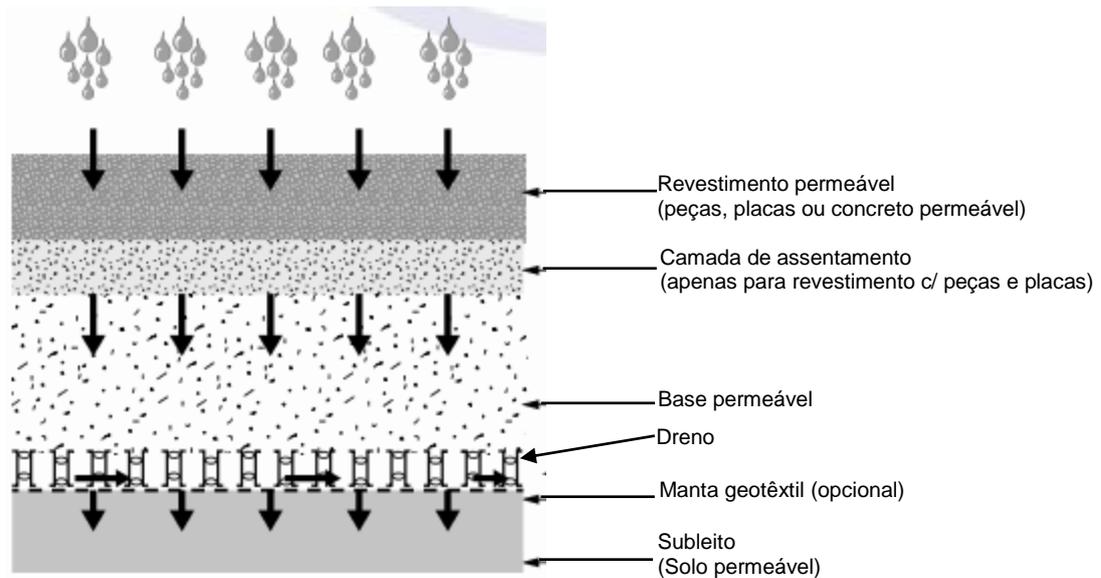


Figura 8. Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração parcial.
Fonte: NBR 16416, 2015.

E no último modelo de sistema (sem infiltração no solo), a água da precipitação fica armazenada até ser removida pelo dreno, sem que ocorra a infiltração para o subleito, conforme Figura 9.

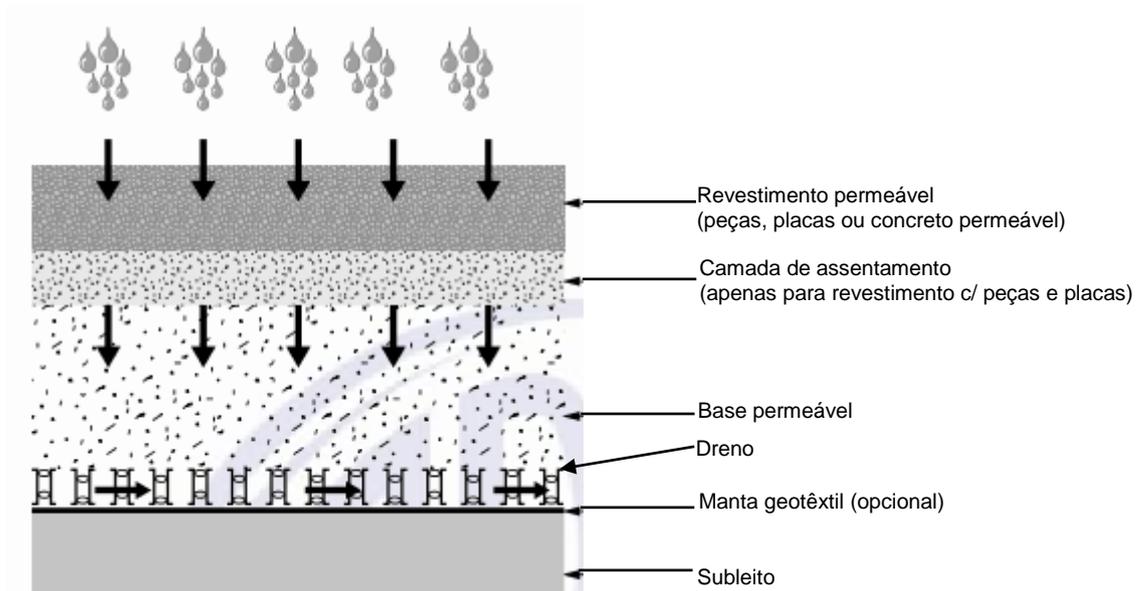


Figura 9. Exemplo de sistema de pavimento permeável sem infiltração.
Fonte: NBR 16416, 2015.

Desta forma, a NBR 16416 (2015) indica que o tipo de revestimento a ser utilizado e o sistema de infiltração adotado deve ser dependente das características do solo ou de condicionantes do projeto.

Por esta razão, o estudo e o uso do pavimento permeável para controle de

enchente e recuperação de bacias hidrográficas em zonas urbanas, torna-se um tema essencial a ser discutido quando do assunto expansão de áreas urbanas, manejo de reservas naturais e geração de energia.

2.5 Simulação de Chuva

O estudo sobre o efeito das chuvas em diversos tipos de superfícies de solo é de difícil aplicação, pois não há como se ter controle sobre a duração, intensidade, distribuição e tipos de chuvas. Como alternativa, se apresenta a utilização de simuladores de chuvas que permitem controlar as características das mesmas, que tem como principal vantagem, o fato de poder ser utilizados a qualquer momento (SOUZA, 2004).

O simulador de chuvas utilizado neste projeto de pesquisa, o InfiAsper/UFMS que opera a uma pressão de 32,7 kPa, tem a capacidade de gerar precipitações com intensidades variáveis sobre uma parcela de 0,70 m² de solo. Foi projetado por Alves Sobrinho (1997) e aperfeiçoado por Nascimento (2005) apud Dieter (2009).



Figura 10. Simulador e chuva InfiAsper/UFMS móvel.
Fonte: Dieter, 2009.

Segundo Brandão *et al* (2006) apud Dieter (2009), o simulador de chuva aplica a água sobre a superfície a ser analisada por aspersão com uma intensidade de aplicação superior à capacidade de infiltração do solo, e esta intensidade é

superior durante um curto intervalo de tempo, que ocorre logo após o início da precipitação.

Dieter (2009) ainda menciona o estudo realizado por Meyer (1994) apud Brandão et al (2006), onde descreve que um simulador de precipitação deve atender aos requisitos abaixo:

- i. Distribuição do tamanho de gotas similar à das chuvas naturais, que em média apresentam diâmetros variando entre 1 e 3 mm;
- ii. Velocidade de impacto das gotas próxima à das chuvas naturais, que em média apresentam valores que variam de 6 a 7 m s⁻¹ para gotas com aproximadamente 2 mm de diâmetro;
- iii. Energia cinética das precipitações simuladas próxima a das precipitações naturais;
- iv. Intensidade de precipitação na faixa de interesse de estudos hidrológicos, geralmente compreendidas entre 12 e 120 mm h⁻¹;
- v. Área de aplicação da chuva de tamanho suficiente para representar os tratamentos e condições a serem avaliadas;
- vi. Intensidade de precipitação e características das gotas uniformes na área de aplicação da chuva simulada;
- vii. Gotas da chuva simulada devem atingir a parcela em estudo de forma contínua;
- viii. O ângulo de impacto da maior parte das gotas não deve diferir expressivamente da direção vertical;
- ix. Possibilidade de repetição da aplicação de uma mesma chuva simulada;
- x. Manutenção satisfatória das características da chuva quando usado em condições comuns de campo, tais como altas temperaturas e ventos moderados; e
- xi. Portabilidade para movimentação de uma área de pesquisa para outra.

Simuladores de chuva têm sido utilizados para determinar características de infiltração e escoamento superficial dos tipos de solos estudados, segundo afirma Alves Sobrinho (1997). O mesmo é dito por Nascimento (2005), que afirma que a utilização de chuva simulada para estudos de infiltração de água e escoamento superficial tem aumentado.

Durante a pesquisa sobre a simulação de precipitações, foram encontrados vários trabalhos de pesquisas diretamente ligados à infiltração de água em solo cultivado sob diferentes sistemas de manejo e rotação de culturas. Alves Sobrinho et al. (2003), utilizam um infiltrômetro de aspersão calibrado para aplicar uma intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹, neste experimento estimaram a intensidade de precipitação para as áreas de plantio direto nas diversas cadeias de sucessões de soja. Os valores encontrados por Alves Sobrinho et al. (2003), com as taxas de infiltração, estiveram entre, 14,50 e 45,1 mm h⁻¹.

Silva (2003), trabalhando em condições semelhantes e no mesmo local,

encontrou nas áreas de plantio convencional com 25,7 mm h⁻¹ e 13,9 mm h⁻¹, enquanto que nas áreas de plantio direto obteve 28,7 mm h⁻¹ e 27,2 mm h⁻¹, evidenciando maiores valores de taxa de infiltração estável nas áreas de plantio direto.

Panachuki et al. (2006) desenvolveram trabalho em Dourados, MS, com o objetivo de se avaliar as perdas de solo e de água em pastagens e em plantio direto, utilizando um simulador de chuva portátil, sob o efeito de quatro intensidades de precipitação (40, 60, 80 e 100 mm h⁻¹).

Assim, com base nos experimentos desses autores, e para possibilitar uma posterior discussão dos resultados encontrados, este projeto de pesquisa tomará como base o efeito de três intensidades de precipitação (45, 60 e 90 mm h⁻¹) sobre os lisímetros que simulam modelos de passeios públicos.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Universidade Federal do Paraná – UFPR - Campus de Palotina - PR, localizada a 24°20'42.77" S e 53°51'35.95" O, no Oeste do Estado do Paraná, no período entre agosto de 2015 e janeiro de 2016.

De acordo com as classificações de Köppen e Geiger (2015), o clima da cidade de Palotina é classificado como Cfa, com clima temperado quente, com inexistência de estação seca definida e com verão quente. A cidade de Palotina está a uma altitude de 305 metros acima do nível do mar.

Segundo a Embrapa (2006), o solo da área é classificado como um Latossolo Vermelho Distroférico Típico com textura muito argilosa, apresentando uma curva granulométrica bem graduada, ou seja, larga faixa de tamanhos de grãos, com predominância de partículas finas, com as frações: 60% de argila, 19% de silte e 21% de areia.

3.2 Montagem do experimento

Para o experimento, foram montadas cinco parcelas, cada uma com um tipo diferente de pavimentação sobre o solo.

Com o intuito de aproximar o experimento da realidade dos passeios públicos, adotou-se a metodologia de construção com base no Código de Obras do Município de Cascavel, segundo sua Lei nº 2.582 (1996), os passeios terão declividade transversal de 2% (dois por cento), o que atende também a NBR 9050 (2004) que determina a calçada deve ter inclinação transversal de no máximo 3% considerando a linha de cota de profundidade da calçada.

As caixas coletoras de cada parcela, ou lisímetros, têm dimensão de 0,70 m de largura, 1,00 m de comprimento e profundidade de 0,70 m. Na face frontal da caixa tem uma calha coletora para água proveniente do escoamento superficial, e um tubo na parte inferior para o escoamento subterrâneo. Na Figura 11 é possível observar o item 1 indicando a calha de escoamento superficial e o item 2 apresentando a saída do escoamento subterrâneo.



Figura 11. Caixa coletora sem tratamento na superfície.
Fonte: Própria

Como já mencionado, o experimento foi dividido em cinco parcelas com a intenção de comparar o resultado da infiltração das precipitações nos diversos tipos diferentes de cobertura. A distribuição espacial das parcelas experimentais esta ilustrada na Figura 12.

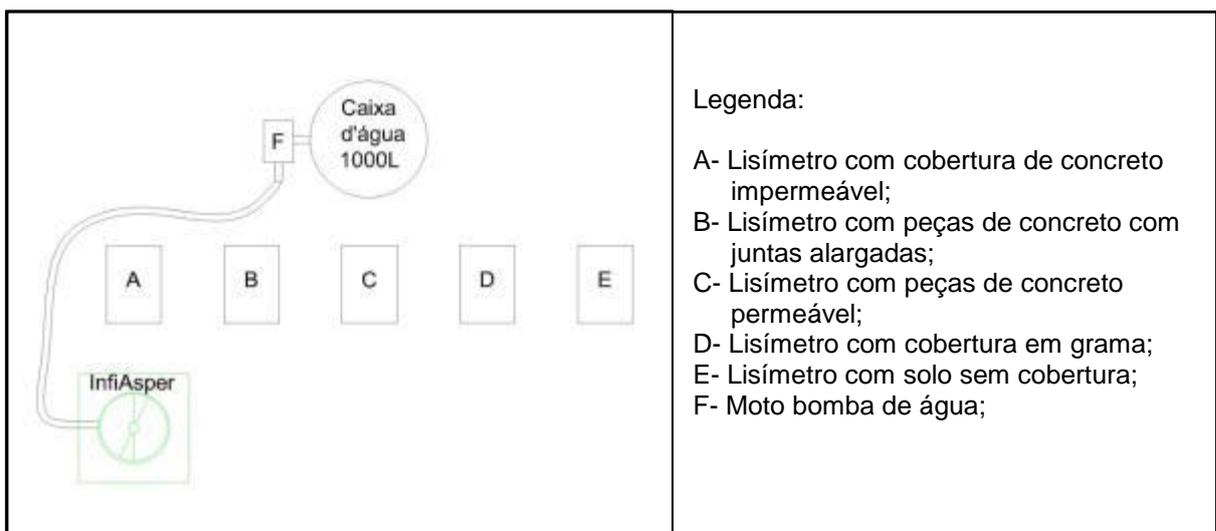


Figura 12. Distribuição de parcelas no local do experimento.

Fonte: Própria.

A Figura 13 identifica a coletora de precipitação cuja cobertura do solo representa os passeios públicos com construção simples utilizando placas de

concreto impermeáveis que são fabricadas no local da instalação. A caixa coletora “A” teve sua construção utilizando como cobertura de solo um piso de concreto maciço com a intenção de verificar o escoamento superficial das precipitações ali simuladas.



Figura 13. Montagem caixa coletora “A”, passeio público de concreto impermeável.
Fonte: Própria.

Em sua sub-base manteve-se o latossolo vermelho distroférico, com uma camada acima de três centímetros de brita número 1 e uma massa de concreto para simulação do passeio público conforme apresenta a Figura 13. Como não faz parte deste estudo a resistência dos pavimentos utilizados, produziu-se uma massa de concreto simples com traço de sete baldes de dez litros de areia para um balde de dez litros de cimento (7:1). A massa de concreto foi despejada sobre a superfície que se desejava impermeabilizar e plainada para que a superfície mantivesse um acabamento liso e o mais próximo possível das calçadas usuais.

Na Figura 14, observa-se o lisímetro “B”, cuja cobertura do solo representa passeios públicos revestidos com peças de concreto pré-fabricadas com juntas alargadas. Esta caixa coletora teve sua estrutura montada respeitando a NBR 16416 (2015) para sistema de pavimento permeável com infiltração total e conforme esquema demonstrado na Figura 7.

No subleito do pavimento manteve-se o latossolo vermelho distroférico. A base permeável foi montada com uma camada de cinco centímetros de pedrisco com granulometria de 12,5 mm conforme indicado na NBR 16416 (2015).

Acima desta, foi construída a camada de assentamento constituída de três centímetros de areia com granulometria de 1,16 mm conforme a mesma norma antes citada. Como última camada, montou-se as peças de concreto com juntas

alargadas pré-fabricadas dentro dos padrões da NBR 9781 (2013), que refere que as peças de concreto devem ter largura mínima de 97 mm e espessura não inferior a 60 mm.

No experimento foram utilizadas peças no padrão de mercado, com dimensões de 100 mm de largura e 200 mm de comprimento, atendendo plenamente a NBR 9781 (2013), norma esta que determina a especificação e os métodos de ensaios para fabricação de peças de concreto para pavimentação. Após a instalação das peças, foi feito o rejuntamento com areia na mesma especificação da base de assentamento. A Figura 14 demonstra a montagem da caixa coletora “B”.

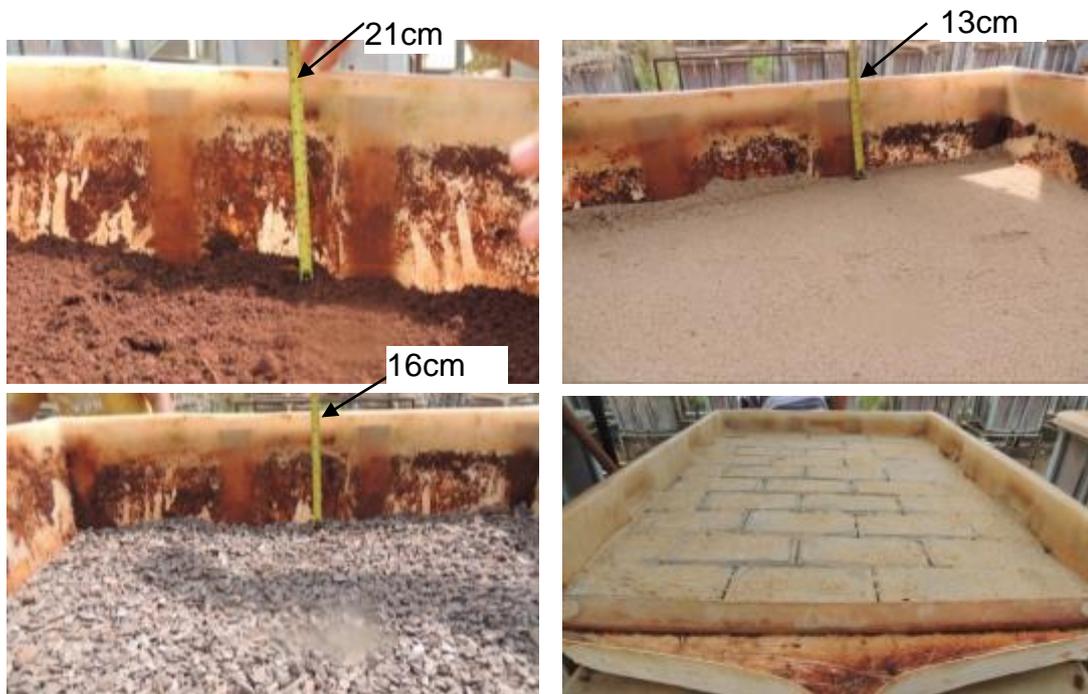


Figura 14. Montagem caixa coletora “B”, passeio público de peças de concreto com juntas alargadas.

Fonte: Própria.

Na caixa coletora “C” a cobertura do solo deve representar passeios públicos revestidos com peças de concreto permeável pré-fabricadas. A Figura 15 demonstra como foi executada a montagem da caixa coletora “C”.

Para esta parcela manteve-se o subleito com latossolo vermelho distroférico, utilizou-se a mesma estrutura de materiais utilizados na base permeável e na camada de assentamento para atendimento da norma NBR 16416 (2015) e as mesmas espessuras de camadas. Na base permeável a matéria prima foi pedrisco com granulometria de 12,5 mm e na camada de assentamento, areia com granulometria de 1,16 mm.

A última camada do lisímetro “C” representado na Figura 15, foi revestida com peças de concreto permeável pré-fabricadas de padrão comercial em atendimento a NBR 9781 (2013), tendo suas dimensões gerais de 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 60mm de espessura.



Figura 15. Montagem caixa coletora “C”, passeio público de peças de concreto permeável.

Fonte: Própria.

A Figura 16 apresenta as caixas de coletas “D” e “E”, a caixa “D” comporta piso com superfície coberta com grama e a caixa “E” representa um passeio público onde não há revestimento.



Figura 16. Lisímetro “D” com cobertura em grama e Lisímetro “E” com solo descoberto.

Fonte: Própria.

Desta maneira, foi possível comparar o desejado pelos órgãos públicos com a realidade de algumas áreas na cidade onde alguns contribuintes não constroem suas calçadas dentro das normas especificadas.

Aproveitou-se estas duas últimas parcelas para comparar o comportamento do escoamento nas parcelas que utilizam concreto, permeável ou não, com a grama e o solo descoberto, buscando desta forma determinar quais as tecnologias mais apropriadas para construção de passeios públicos que venham a contribuir com a recuperação das bacias hidrográficas.

3.3 Tensiômetro

A verificação de estado de umidade do solo foi realizada utilizando um tensiômetro digital, do fabricante ICT, modelo MPM-160-B, equipamento este que faz parte do quadro de equipamentos da UFPR – Campus Palotina, cedido para que fosse possível efetuar as leituras das umidades de cada parcela antes dos ensaios neste experimento. A Figura 17 é uma fotografia do aparelho citado acima e seus componentes.



Figura 17. Tensiômetro modelo MPM-160-B.
Fonte: Própria.

Faria e Costa (1987) explicam que o tensiômetro é um aparelho que auxilia na medição do teor de umidade no solo e da tensão de água. A leitura do aparelho indica de forma direta a tensão da água e o teor de água no solo.

Para tornar possível a verificação das umidades dos solos nas parcelas com coberturas em concreto ou peças de concreto, foi realizado um furo de 50 mm de diâmetro nas faces de cada cobertura e por meio deste furo foi realizada as verificações de umidades.

3.4 Simulação da intensidade da precipitação

O simulador de chuvas utilizado neste projeto de pesquisa, faz parte do quadro de equipamentos da UFPR – Campus Palotina e foi cedido para este experimento. Tem capacidade de gerar precipitações com intensidades variáveis sobre uma parcela de 0,70 m² de solo, e opera a uma pressão de 32,7 kPa (InfiAsper/UFMS). O equipamento utilizado é o da Figura 18:

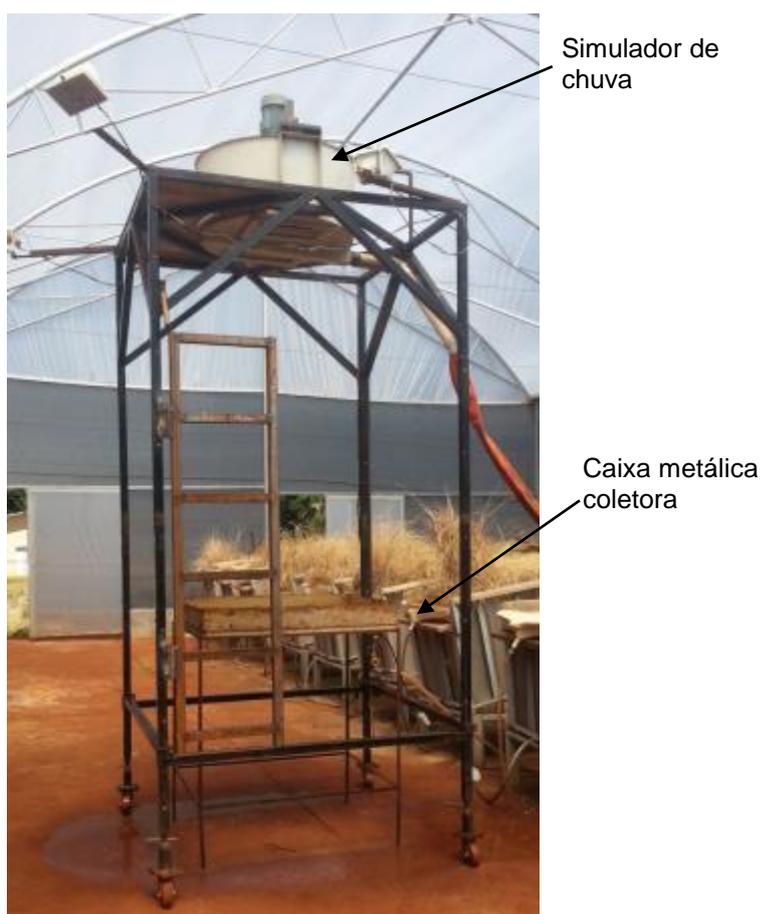


Figura 18. Simulador de precipitação InfiAsper/UFMS.
Fonte: Própria.

Para a determinação da capacidade de percolação de cada um dos tipos dos revestimentos deste projeto, ficou determinada a simulação de três intensidades

de chuva. Dispondo o projeto de cinco tipos diferentes de revestimento, foram realizadas quinze simulações de chuvas no total. As intensidades utilizadas nas simulações foram de 45 mm, 60 mm e 90 mm h⁻¹.

Antes de cada aplicação de chuva simulada, foi feita a calibração do equipamento para garantir que a intensidade de precipitação ficasse próxima das desejadas, isso é 45, 60 e 90 mm h⁻¹, operando com 32 kPa de pressão de serviço .

A calibração do equipamento antes de cada simulação consistiu de cinco testes, com duração de cinco minutos cada, em que o volume precipitado foi coletado em uma bandeja metálica de tamanho 0,70 m², equivalente à caixa da parcela experimental, conforme a Figura 18. Assim foi possível identificar a intensidade de precipitação aplicada pelo simulador.

Após cada aplicação foi realizada a coleta da quantidade de chuva precipitada e os dados referentes à calibração do equipamento foram lançados na Equação 1, conforme metodologia desenvolvida por Alves Sobrinho (1997).

Os cálculos de intensidade de precipitação a Equação 1, abaixo:

$$Ip \text{ (mm.h}^{-1}\text{)} = \frac{V(L)}{A(m^2) * \frac{t(min)}{60}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Ip = intensidade de água precipitada em mm.h⁻¹;

V = volume de água coletada na caixa metálica em litros;

A = área de coleta em metros quadrados; e

t = tempo de duração da coleta em minutos.

3.5 Coleta de Dados

Após a calibração do simulador de chuva, para cada amostra foram realizadas as coletas de dados de cada parcela do experimento segundo a metodologia citada por Alves Sobrinho (1997).

Antes do início de cada simulação de chuva foi verificada a umidade dos solos de todas as parcelas, a fim de garantir, por meio de pré-molhamento, uma aproximação da saturação de todos os pavimentos a serem analisados. Após cada pré-molhamento, foram efetuadas novas leituras de umidade para verificar a aproximação das saturações dos pavimentos.

Efetuada estas leituras, iniciaram-se os procedimentos conforme a metodologia proposta por Alves Sobrinho (1997) e reaplicadas por Dieter (2009), onde o processo consiste em efetuar o acionamento do simulador de chuva indicando o início do teste e aguardar o início do escoamento superficial.

Segundo a metodologia empregada por Dieter (2009), após o início do escoamento superficial, a cada período de três minutos foram feitas coletas para amostragem do escoamento superficial, com a quantidade total de 24 (vinte e quatro) amostras por experimento coletadas, totalizando o tempo de 72 minutos de escoamento superficial para cada parcela. Após a 24^a (vigésima quarta) coleta, com o tempo de 72 minutos após o início do escoamento superficial o simulador de chuva é desligado, e se aguarda o fim do escoamento superficial, que determina o término do experimento de cada parcela.

Depois do final de cada experimento, foram realizadas releituras das umidades dos solos de todos os lisímetros. Para melhor entendimento dos dados de escoamento superficial, cada amostra teve seus resultados separados utilizando-se as médias de três etapas de escoamento, cada etapa consiste na soma dos volumes de 8 (oito) coletas com duração de 3 (três) minutos. Os dados referentes aos experimentos foram tabulados para proporcionar a compreensão dos resultados alcançados com o projeto e são apresentados a seguir.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com as amostragens do experimento estão divididos por intensidade de chuvas, conforme o texto abaixo. A primeira a ser analisada é a precipitação de 45 mm.h^{-1} , seguida pela análise da simulação das chuvas de 60 mm.h^{-1} e 90 mm.h^{-1} , ocorrendo para os cinco tipos de pavimentos estudados.

A sequência de análises se deu em forma cronológica, iniciando com a verificação da umidade do solo nos lisímetros, seguido pelo processo de precipitação simulada, onde é feita a coleta de dados do escoamento superficial, e posterior verificação de umidade do solo após a simulação de precipitação, a última etapa foi a análise da taxa de infiltração da chuva precipitada.

4.1 Simulação de chuva 45 mm.h^{-1}

Como mencionado, iniciou-se o procedimento com a coleta de dados das umidades dos solos a serem utilizados nas simulações. A Tabela 6 demonstra a umidade dos solos antes do pré-molhamento, após o pré-molhamento e após o término do experimento. É possível verificar na Tabela 6 que todos os solos antes do pré-molhamento tinham umidades abaixo de 30%, e para aproximar os resultados a valores uniformes efetuou-se o pré-molhamento, nivelando a umidade em torno de 40%, permitindo uma melhor uniformidade nos dados dos resultados do experimento.

Tabela 3. Índices de umidade no solo para precipitação de 45 mm.h^{-1}

Intensidade desejada para precipitação simulada					45 mm.h^{-1}
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável	Peças de concreto c/ juntas alargadas	Peças de concreto permeável	Gramma	Solo sem cobertura
Umidades (%)					
Antes pré-molhamento	6%	31%	24%	29%	16%
Após pré-molhamento	11%	42%	41%	39%	37%
Após fim da simulação	38%	46%	45%	49%	48%

Seguindo com o processo de coleta de dados, os resultados obtidos com as amostragens do experimento iniciou-se com o ato de ligar a bomba de água e aguardar o início do escoamento superficial. Para demonstrar o escoamento superficial para as simulações de 45 mm.h^{-1} os dados foram tabulados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Escoamento superficial para precipitação de 45 mm.h^{-1}

Intensidade desejada para precipitação simulada					45 mm.h^{-1}
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável	Peças de concreto com juntas alargadas	Peças de concreto permeável	Gramma	Solo sem cobertura
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Médias em (ml)					
0 a 24 min.	3950	67	19	0	95
24 a 48 min.	4860	56	21	0	540
48 a 72 min.	4780	54	20	0	910
Escoamento pós precipitação	120	4	2	0	80
Escoamento Total	13710	181	62	0	1625

A Tabela 3 apresenta números que demonstram, para a mesma intensidade de precipitação, que a quantidade de chuva que escoam superficialmente está diretamente ligada ao tipo da pavimentação do passeio público.

Como demonstra a Figura 19, para a intensidade 45 mm.h^{-1} de precipitação, o lisímetro com pavimento de concreto teve o maior volume de água escoado, 13,71 litros, seguido pelo lisímetro com solo sem cobertura, com um escoamento superficial próximo de 1,62 litros.

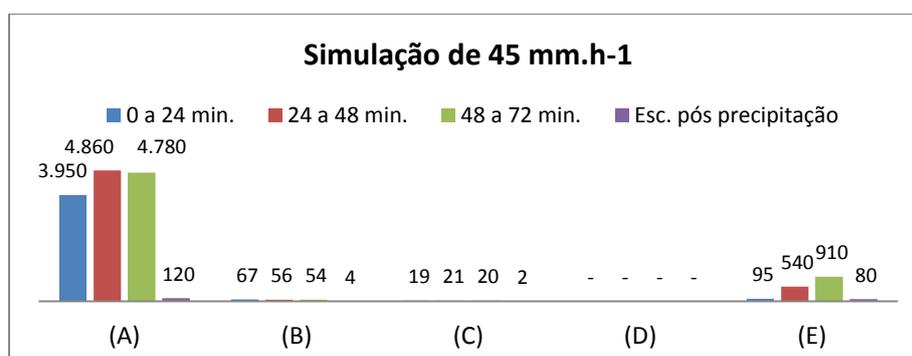


Figura 19. Escoamento superficial para precipitações de 45 mm.h^{-1} .
Fonte: Própria.

Fica demonstrado, na Tabela 3 e Figura 19, que os pavimentos que utilizaram tecnologia de percolação obtiveram bom resultado, se comparados ao pavimento de concreto impermeável e até mesmo com o pavimento de solo sem cobertura.

Com os dados obtidos no experimento, o resultado da amostra com pavimento em peças de concreto permeável, o lisímetro “C”, obteve um resultado que se aproxima de 30% (trinta) do escoamento sobre o lisímetro “B”, onde a cobertura foi executada em peças de concreto com juntas alargadas.

Ainda a Figura 19 demonstra que no lisímetro “D” com cobertura de grama não ocorreu escoamento superficial para esta intensidade de chuva de 45 mm.h⁻¹. Para este lisímetro, o experimento foi realizado e durante 87 minutos ocorreu precipitação nesta amostra, sem que houvesse escoamento superficial, conforme mostra a Tabela 4.

Com a utilização da Equação 1, citada anteriormente, pode-se estimar a quantidade total de precipitação na área do experimento, com a intensidade utilizada, acumulando o valor aproximado de 38,85 litros de chuva durante o período de 74 minutos, na área de 0,70m², com o pavimento de concreto impermeável. Substituindo os valores na equação teremos os seguintes resultados para precipitação de 45 mm.h⁻¹:

1) Lisímetro “A”

$$45 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 45 * \left(0,70 * \frac{74}{60}\right) \rightarrow V = 38,85 \text{ litros}$$

2) Lisímetro “B”

$$45 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 45 * \left(0,70 * \frac{78}{60}\right) \rightarrow V = 40,95 \text{ litros}$$

3) Lisímetro “C”

$$45 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 45 * \left(0,70 * \frac{94}{60}\right) \rightarrow V = 49,35 \text{ litros}$$

4) Lisímetro “D”

$$45 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 45 * \left(0,70 * \frac{87}{60}\right) \rightarrow V = 45,68 \text{ litros}$$

5) Lisímetro “E”

$$45 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 45 * \left(0,70 * \frac{87}{60}\right) \rightarrow V = 45,68 \text{ litros}$$

Esses valores estão melhores descritos na Tabela 5:

Tabela 5. Tempos de simulação para precipitação de 45 mm.h⁻¹

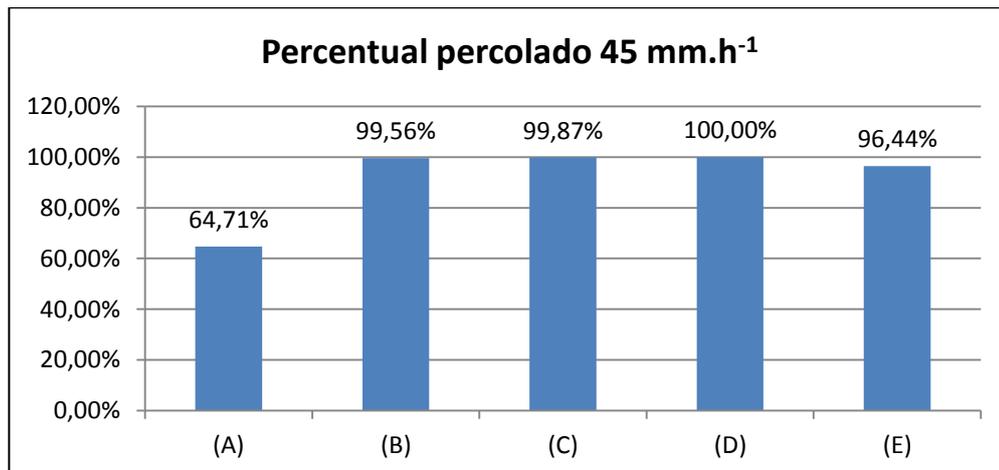
Tipos de coberturas de solo	Intensidade desejada para precipitação simulada				45 mm.h ⁻¹
	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto c/ juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Início teste (min)	-	-	-	-	-
Início escoamento (min)	2	6	22	-	15
Tempo de teste (min)	72	72	72	87	72
Tempo fim escoamento (min)	3	3	2	-	9
Tempo total (min)	77	81	96	87	96
Chuva Precipitada (l)	38,85	40,95	49,35	45,68	45,68

Comparando estes dados com os da Tabela 3, para pavimento com cobertura de concreto impermeável, onde ocorreu um escoamento superficial de 13,71 litros, pode-se afirmar que aproximadamente 64,71% do volume precipitado tende a infiltrar no solo, o que se justificar devido a trincas, rachaduras, falhas ou, até mesmo, a água pode ter sido absorvida pela placa de concreto, ou mesmo pelo traço utilizado na construção do piso.

Tabela 6. Taxas de infiltração no solo para precipitação de 45 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					45 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Percentual percolado	64,71%	99,56%	99,87%	100,00%	96,44%

Comparando com os demais pisos, de acordo com a Tabela 5, pode-se verificar que o lisímetro “C” com peças de concreto permeável, e o lisímetro “B” com peças de concreto com juntas alargadas, possuem uma taxa de infiltração muito próxima a da grama, montada sobre o lisímetro “D”, assim como demonstrado no gráfico da Figura 20:

Figura 20. Percentual de infiltração para precipitações de 45mm.h⁻¹.

Fonte: Própria.

Em síntese, pode-se afirmar que não existem diferenças significativas entre os pisos dos lisímetros “B” e “C”, a cobertura com peças de concreto com juntas alargadas e as peças de concreto permeável se comparados com a grama, no que tange à taxa de impermeabilização.

Porém, estes três últimos pisos citados, dos lisímetros “B”, “C” e “D”, contemplam considerável diferença com o revestimento de concreto impermeável utilizado no lisímetro “A”, demonstrando, desta forma, uma tendência à necessidade

de utilização destas tecnologias para mitigação de escoamento superficial quando se trata de precipitações de 45 mm.h^{-1} .

4.2 Simulação de chuva 60 mm.h^{-1}

Como primeira análise, tem-se a Tabela 7, que demonstra o índice de umidade dos solos nos lisímetros. O mesmo procedimento que fora utilizado para a simulação de 45 mm.h^{-1} foi repetido nesta nova simulação. Os solos continham umidade abaixo de 20%, e esta, por meio de pré-molhamento, foi corrigida para atingir os níveis de umidade média de 40%, permitindo uma comparação da capacidade de absorção entre os solos de cada lisímetros estudados, bem como a reação de cada tipo de cobertura para as intensidades diferentes de precipitação.

Tabela 7. Índices de umidade no solo para precipitação de 60 mm.h^{-1}

Intensidade desejada para precipitação simulada					60 mm.h-1
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Umidades (%)					
Antes pré-molhamento	10%	16%	17%	12%	20%
Após pré-molhamento	18%	39%	43%	39%	38%
Após fim da simulação	32%	46%	48%	48%	49%

A Tabela 8 traz resultados obtidos com as amostragens do experimento com simulação de chuva a 60 mm.h^{-1} e demonstram que o pavimento de concreto impermeável, nesta ocasião, obteve um alto volume de água escoado superficialmente, aproximadamente 15 litros. Porém a cobertura em concreto impermeável foi superada no escoamento superficial pelo lisímetro com solo sem cobertura, onde o mesmo apresentou escoamento superficial de aproximadamente 22 litros.

Tabela 8. Escoamento superficial para precipitação de 60 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					60 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Médias (em ml)					
0 a 24 min.	4350	88	36	0	6330
24 a 48 min.	5390	71	29	0	7830
48 a 72 min.	5310	62	31	0	7640
Escoamento pós precipitação	120	5	4	0	105
Escoamento Total	15170	226	100	0,00	21905

O escoamento no solo descoberto maior que no concreto ocorreu devido ao fato da maior intensidade da precipitação fazer com que este encontre, mais rapidamente, seu ponto de saturação, pelo que, a água que deveria percolar, escoou superficialmente. A Figura 21 demonstra estes dados de forma gráfica buscando facilitar o entendimento.

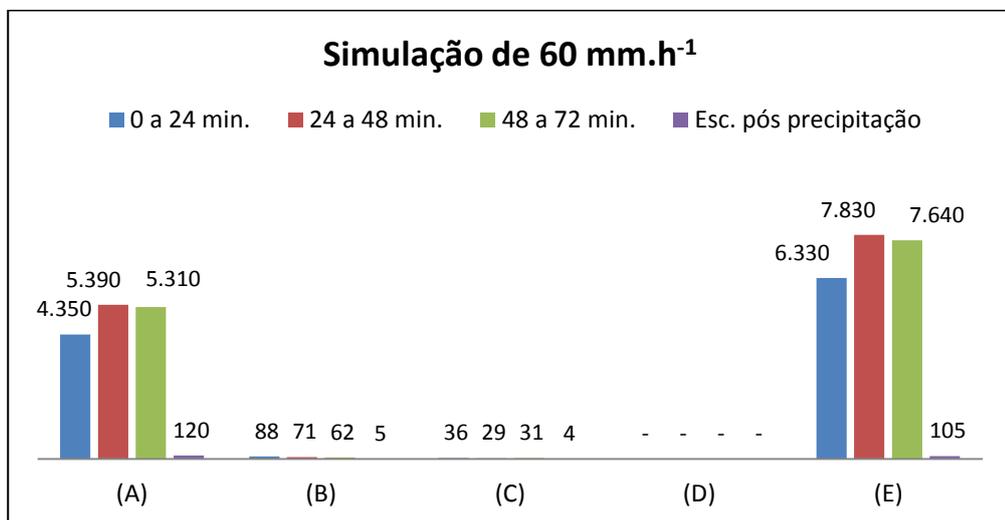


Figura 21. Escoamento superficial para precipitações de 60 mm.h⁻¹
Fonte: Própria.

Ainda, analisando os dados da Figura 21 e a Tabela 8, e buscando justificativa para a ocorrência entre o solo descoberto e o piso com concreto impermeável, percebe-se que no lisímetro com concreto, o solo abaixo da cobertura não estava saturado devido a cobertura não permitir uma passagem rápida da água

para a base de assentamento. Assim, este, por meio das trincas e rachaduras, absorveu a água que percolou e diminuiu o volume de água escoando superficialmente.

Da mesma forma como procedido na precipitação de 45 mm.h^{-1} , utilizou-se a Equação 1, para estimar a quantidade total de precipitação na área do experimento. Assim, os dados apresentados para uma precipitação com a intensidade utilizada de 60 mm.h^{-1} teve, como acumulado de precipitação em $0,70 \text{ m}^2$, o valor aproximado de 54,5 litros em média de chuva precipitada durante um período de 81 minutos entre os pavimentos.

Assim como no processo para verificação da precipitação de 45 mm.h^{-1} , ao substituir os valores na equação, tem-se os seguintes resultados para precipitação de 60 mm.h^{-1} :

1) Lisímetro "A"

$$60 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 60 * \left(0,70 * \frac{74}{60}\right) \rightarrow V = 51,80 \text{ litros}$$

2) Lisímetro "B"

$$60 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 60 * \left(0,70 * \frac{75}{60}\right) \rightarrow V = 52,50 \text{ litros}$$

3) Lisímetro "C"

$$60 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 60 * \left(0,70 * \frac{76}{60}\right) \rightarrow V = 53,20 \text{ litros}$$

4) Lisímetro "D"

$$60 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 60 * \left(0,70 * \frac{87}{60}\right) \rightarrow V = 60,90 \text{ litros}$$

5) Lisímetro “E”

$$60 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 60 * \left(0,70 * \frac{77}{60}\right) \rightarrow V = 53,90 \text{ litros}$$

Os valores acima estão, também, descritos na Tabela 9:

Tabela 9. Tempos de simulação para precipitação de 60 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					60 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Início teste (min)	-	-	-	-	-
Início escoamento (min)	2,00	3,00	4,00	-	5,00
Tempo de teste (min)	72,00	72,00	72,00	87,00	72,00
Tempo fim escoamento (min)	5,00	3,00	2,00	-	4,00
Tempo total (min)	79,00	78,00	78,00	87,00	81,00
Chuva Precipitada (l)	51,80	52,50	53,20	60,90	53,90

Como já mencionado, o maior escoamento superficial nesta fase do experimento, deu-se no solo descoberto. Com um escoamento superficial de 21,91 litros para um volume de chuva de 53,9 litros de acordo com a Tabela 9. Isso representa 59,36% de infiltração para o solo conforme demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10. Taxas de infiltração no solo para precipitação de 60 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					60 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Percentual percolado	70,71%	99,57%	99,81%	100,00%	59,36%

Comparando todos os dados da Tabela 10 que representa a intensidade de 60 mm.h⁻¹ com a Tabela 5, para chuvas de 45mm.h⁻¹, não ocorreram grandes alterações nos perfis de escoamento nos lisímetros de grama, peças de concreto

com juntas alargadas e peças de concreto permeável, com exceção do lisímetro com solo descoberto, onde a taxa de infiltração reduziu de forma drástica.

Com os dados da Tabela 10 e o gráfico apresentado na Figura 22, verifica-se uma mudança no cenário para o escoamento no lisímetro com solo sem cobertura. Este lisímetro apresentou uma taxa de infiltração de 96,44% para uma chuva de 45 mm.h⁻¹, já na precipitação de 60 mm.h⁻¹ o mesmo lisímetro apresentou uma queda para uma taxa de infiltração de 59,36%.

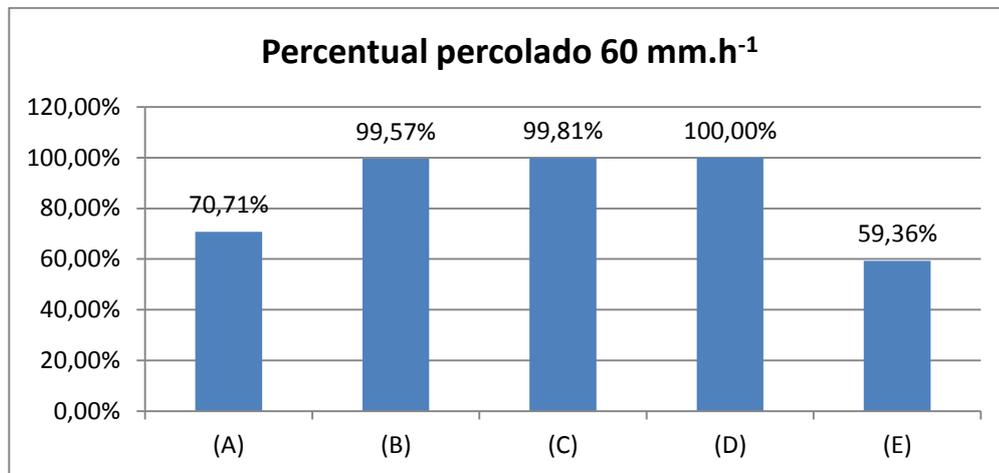


Figura 22. Percentual de infiltração para precipitações de 60 mm.h⁻¹.
Fonte: Própria.

Uma queda 37% na taxa de infiltração, considerando que de acordo com os dados das Tabelas 6 e 7 as umidades dos solos antes do início do experimento eram 37 e 38%, sendo assim muito próximas. Para os demais tipos de cobertura não ocorreram grandes modificações quando comparadas as Tabelas 5 e 9.

Segundo Prevedello (1996), a redução na taxa de infiltração com o tempo é fortemente controlada por fatores que operam na superfície do solo, tais como selamento superficial, devido ao impacto das gotas de chuva, fenômenos de expansão e contração do solo. Com esta afirmação, busca-se justificar a redução da taxa de infiltração no solo descoberto ocorrida no lisímetro “E”.

4.3 Simulação de chuva 90 mm.h⁻¹

Os primeiros dados a serem considerados neste, serão os referente a umidade dos solos contidos nos lisímetros e tabulados na Tabela 11. Para coleta

destes dados, foi utilizado o mesmo procedimento que anteriormente nas precipitações de 45 e 60 mm.h⁻¹. De acordo com a Tabela 11 é possível notar antes ao pré-molhamento todos os lisímetros tinham umidade abaixo de 20%, que após o pré-molhamento foram corrigidas para uma faixa entre 38 e 42% de umidade, com exceção a cobertura de concreto no lisímetro “A” onde a taxa de umidade ficou em 18%.

Tabela 11. Índices de umidade no solo para precipitação de 90 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					90 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Umidades (%)					
Antes pré-molhamento	10%	16%	17%	12%	20%
Após pré-molhamento	18%	39%	42%	39%	38%
Após fim da simulação	32%	46%	48%	45%	49%

Seguindo as metodologias anteriores, têm-se, na Tabela 12, os dados dos períodos de precipitação e volumes de chuvas precipitadas. Observa-se 81,69 litros de precipitação média em um tempo médio, aproximado, de 80 minutos. É possível notar, também, o lisímetro com cobertura de grama foi onde ocorreu o maior volume precipitado seguido pelo lisímetro com cobertura de solo descoberto.

Tabela 12. Tempos de simulação para precipitação de 90 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					90 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Início teste (min)	-	-	-	-	-
Início escoamento (min)	2	3	4	-	5
Tempo de teste (min)	72	72	72	87	72
Tempo fim escoamento (min)	5	3	2	-	4
Tempo total (min)	79	78	78	87	81
Chuva Precipitada (L)	77,70	78,75	79,80	91,35	80,35

Da mesma forma como no processo para verificação da quantidade de chuva precipitada de 45 e 60 mm.h⁻¹, ao substituir os valores na Equação 1, tem-se os seguintes resultados para precipitação de 90 mm.h⁻¹:

1) Lisímetro "A"

$$90 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 90 * \left(0,70 * \frac{74}{60}\right) \rightarrow V = 77,70 \text{ litros}$$

2) Lisímetro "B"

$$90 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 90 * \left(0,70 * \frac{75}{60}\right) \rightarrow V = 78,75 \text{ litros}$$

3) Lisímetro "C"

$$90 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 90 * \left(0,70 * \frac{76}{60}\right) \rightarrow V = 79,80 \text{ litros}$$

4) Lisímetro "D"

$$90 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 90 * \left(0,70 * \frac{87}{60}\right) \rightarrow V = 91,35 \text{ litros}$$

5) Lisímetro "E"

$$90 = \frac{V}{0,70 * \frac{77}{60}} \rightarrow V = 90 * \left(0,70 * \frac{77}{60}\right) \rightarrow V = 80,35 \text{ litros}$$

Os valores encontrados nas equações acima foram utilizados para completar os dados referentes a quantidades de chuva precipitada na Tabela 12.

Observando os dados da Tabela 13 é possível notar que, com a precipitação de 90 mm.h⁻¹ de intensidade, o escoamento superficial na caixa coletora com solo descoberto manteve o volume escoado maior que a caixa coletora com cobertura de

concreto impermeável, esta ocorrência se explica da mesma forma das precipitações de 60 mm.h^{-1} : pela base de assentamento do concreto estar menos úmida esta tende a absorver mais água que o solo descoberto. Outra possibilidade a ser levada em consideração é que o traço da construção do concreto em 7:1 (sete medidas de areia para uma medida de cimento) não foi a mais adequada, permitindo assim a absorção de parte do volume escoado pelo concreto.

Ainda observando este experimento, pode-se notar que a grama continua mantendo-se sem escoamento superficial para esta intensidade de chuva. Com relação aos lisímetros com pavimento de concreto com juntas dilatadas e o de peças de concreto permeável é possível observar o seu alto poder de absorção mesmo com uma intensidade de precipitação de 90 mm.h^{-1} .

Tabela 13. Escoamento superficial para precipitação de 90 mm.h^{-1}

Tipos de coberturas de solo	Intensidade desejada para precipitação simulada				90 mm.h^{-1}
	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Médias (em ml)					
0 a 24 min.	4187	90	24	0	6880
24 a 48 min.	12110	89	26	0	12550
48 a 72 min.	13270	93	26	0	18690
Escoamento pós precipitação (280	4	2	0	410
Escoamento Total	29850	280	80	0	38530

A Figura 23 representa de forma gráfica as informações contidas na Tabela 13. Neste gráfico da Figura 23 é possível notar que há nos lisímetros “B”, “C” e “D” uma uniformidade de quantidade escoada nos três períodos de vinte e quatro minutos e esta uniformidade não se mantém nos lisímetros “A” e “E”.

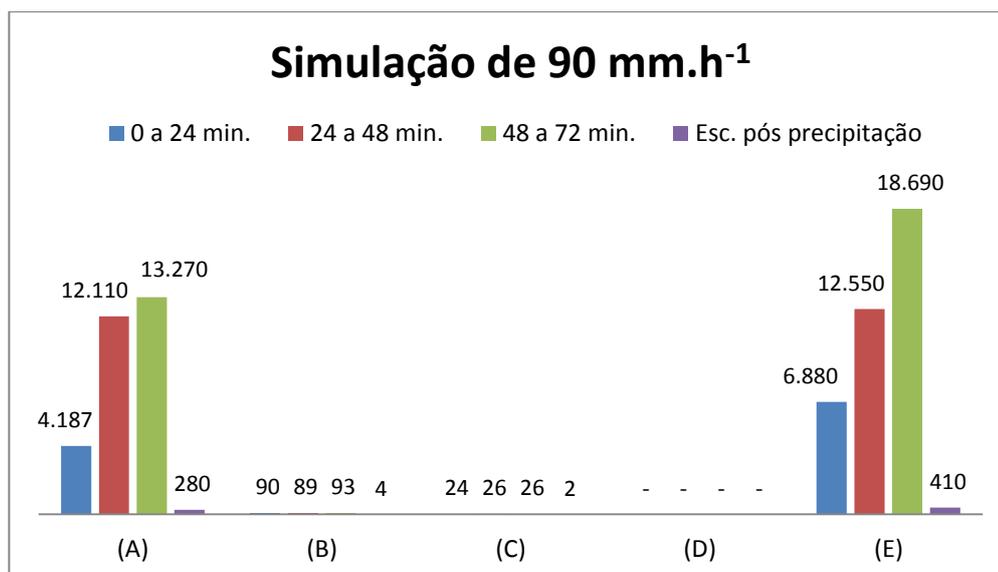


Figura 23. Escoamento superficial para precipitações de 90 mm.h⁻¹.
Fonte: Própria.

Analisando os dados da Tabela 14 é possível notar que, nesta nova simulação de precipitação com intensidade de 90 mm.h⁻¹, o padrão de taxa de infiltração manteve-se estável, ocorrendo apenas pequenas variações.

Tabela 14 – Taxas de infiltração no solo para precipitação de 90 mm.h⁻¹

Intensidade desejada para precipitação simulada					90 mm.h ⁻¹
Tipos de coberturas de solo	Concreto impermeável (A)	Peças de concreto com juntas alargadas (B)	Peças de concreto permeável (C)	Gramma (D)	Solo sem cobertura (E)
Percentual percolado	61,59%	99,65%	99,90%	100,00%	52,34%

Na Figura 24 esta demonstrado de forma gráfica os dados da Tabela 14, com estes dados pode-se notar que há diferença nas taxas de infiltração dos lisímetros “A” e “E” estão em torno de 9%. Porém fica fácil identificar a diferença entre as coberturas e o solo descoberto que chegam perto de 50% da capacidade de infiltração.

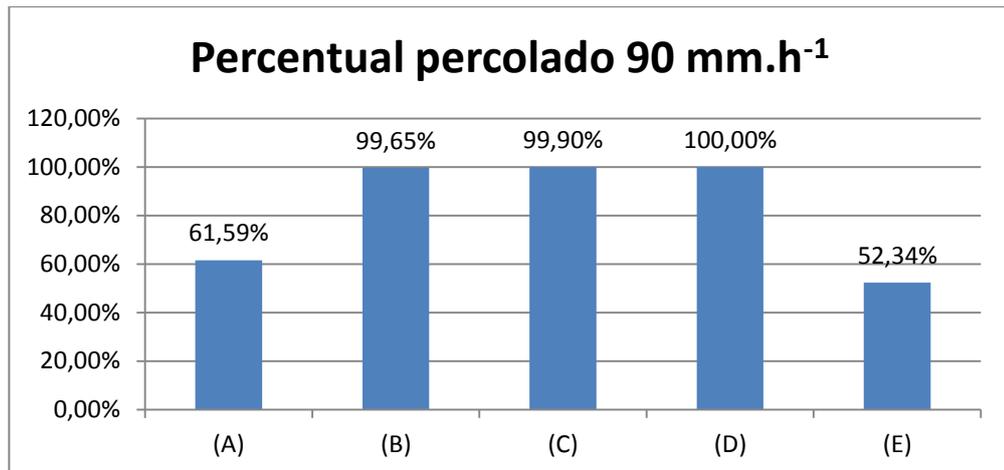


Figura 24. Percentual de infiltração para precipitações de 90 mm.h⁻¹.
Fonte: Própria.

Se forem comparadas as Tabelas 9 e 13, é possível também observar que houve uma redução na taxa de infiltração em, aproximadamente, 10% para o lisímetro com solo descoberto. Confirmando que quanto maior a intensidade da precipitação, mais rápido ocorrerá a saturação do solo e, conseqüentemente, maior será o volume de água escoado superficialmente.

4.4 Comparativos das Taxas de infiltração

Buscando verificar a reação de cada tipo de pavimentação utilizado na construção dos passeios públicos, pode-se observar o gráfico da Figura 25 onde estão demonstradas as três intensidades de precipitações simuladas sobre cada pavimento estudado neste projeto.

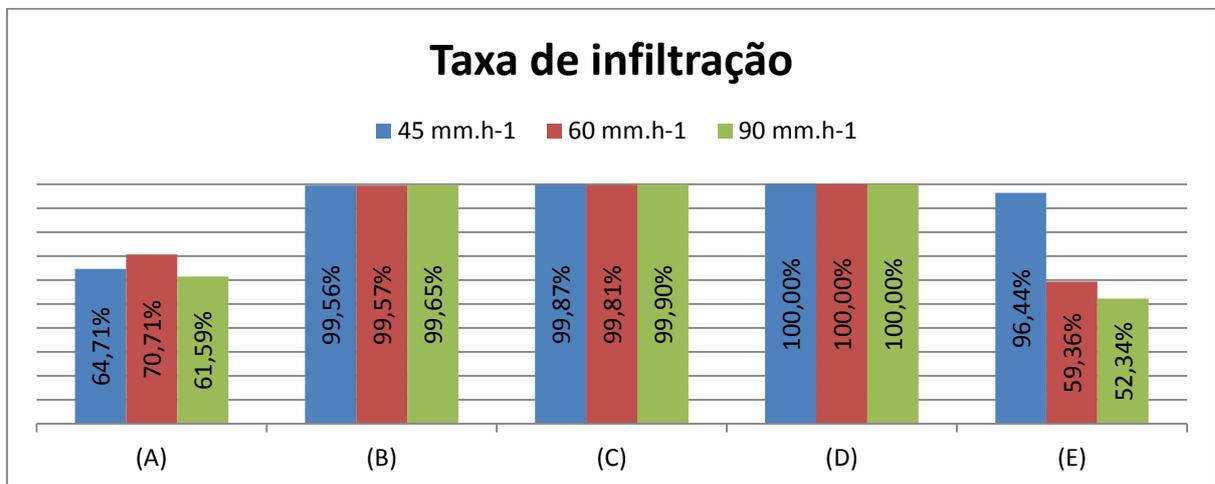


Figura 25. Comparativo de taxas de infiltração no solo.
Fonte: Própria.

Fica demonstrado que os lisímetros que utilizaram como cobertura pavimento de concreto com juntas dilatadas e pavimento de peças de concreto permeável apresentam resultados de infiltração muito próximos da caixa coletora que utilizou grama em sua cobertura. Estas duas caixas apresentaram taxa de percolação das precipitações superior a 99%, em todos os experimentos.

Interessante notar que o lisímetro que utilizou cobertura em concreto impermeável obteve também uma pequena taxa de percolação. Este pode ter ocorrido, conforme já descrito anteriormente, devido a pequenas fissuras e rachaduras em sua face e também pelo traço utilizado em sua construção. Existe também o fato do concreto em dias com temperatura elevada estar com sua face muito aquecida, e este aquecimento proporcionar uma evaporação de parte da água precipitada.

Já o lisímetro com solo sem cobertura, para a precipitação de 45 mm.h^{-1} ocorreu percolação de 96,44%, porém, quando a intensidade das precipitações foi aumentada para 60 mm.h^{-1} e 90 mm.h^{-1} a infiltração no solo diminuiu para 52,34% no caso da última intensidade. Esta ocorrência demonstra que quanto maior a intensidade da precipitação, mais cedo o solo fica saturado, ou seja, a intensidade da chuva é maior que a velocidade de infiltração do solo, ocorrendo o aumento do escoamento superficial.

O gráfico da Figura 26 indica as médias encontradas com as coletas dos escoamentos superficiais em mililitros de cada lisímetro nas três intensidades de precipitação.

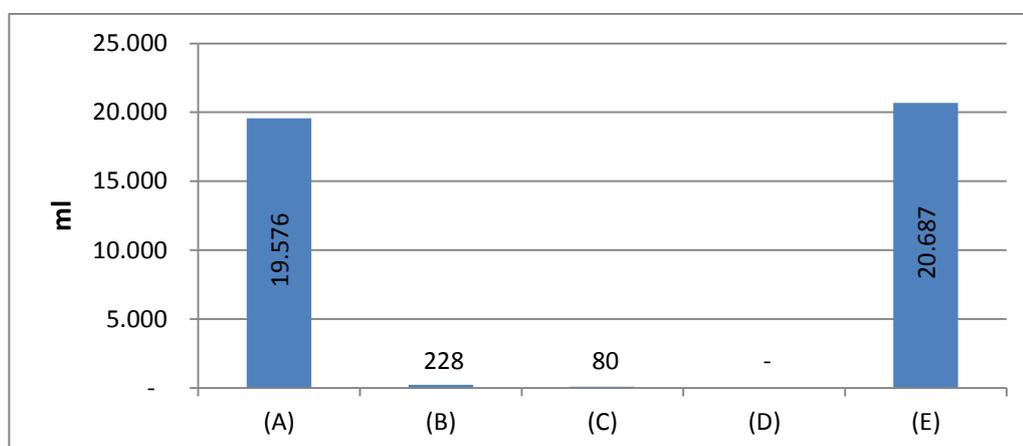


Figura 26. Comparativo de escoamento superficial médio.
Fonte: Própria.

É de fácil percepção que os lisímetros “A” e “E”, o primeiro com cobertura em concreto e o segundo sem cobertura de solo, estão disforme dos demais lisímetros onde foram instaladas tecnologias para percolação ou utilizado grama em sua cobertura. Para melhor verificar estes lisímetros onde as infiltrações de água no solo ocorrerão com mais intensidade formulou-se a Figura 27 com o gráfico abaixo:

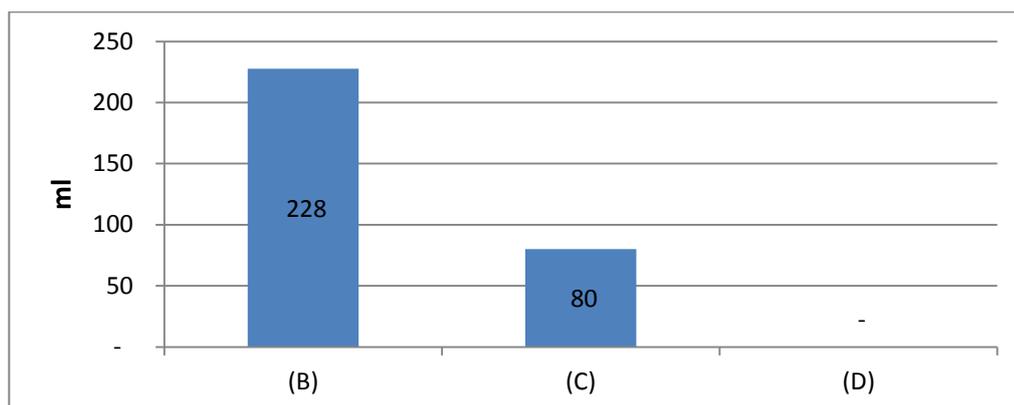


Figura 27. Comparativo de escoamento superficial médio, lisímetros “B”, “C” e “D”.
Fonte: Própria.

Como mencionado, o gráfico da Figura 27 indica as médias encontradas com as coletas dos escoamentos superficiais em mililitros, dos lisímetros com cobertura em peças de concreto com juntas alargadas, lisímetro “B”, com peças de concreto permeável, lisímetro “C” e o lisímetro “D” com grama em sua superfície. Estas médias foram coletadas nas três intensidades de precipitação deste projeto de pesquisa.

Com a apresentação deste gráfico torna-se claro que as três formas de aplicação de cobertura apresentam excelente taxa de infiltração se comparado com o solo descoberto.

Comparando diretamente os dados de escoamento coletados no lisímetro “B” e “C” pode-se observar que o segundo obteve uma média de escoamento superficial de aproximadamente um terço do primeiro, demonstrando uma melhor eficiência. Porém, analisando o total de água precipitada e a taxa de infiltração total esta diferença cai para aproximadamente 0,25% pontos percentuais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pavimentos permeáveis, hoje, possuem diversas formas de construção conforme a NBR 16416 (2015). O modelo escolhido para esta pesquisa seguiu o recomendado pela NBR 16416 (2015), denominado “peças de concreto permeável”. Como apresentado na Figura 20 este modelo de pavimento tem uma taxa de infiltração muito elevada, chegando próxima à taxa de percolação da grama.

Quando feita a comparação entre o pavimento com peças de concreto permeável com o pavimento construído com concreto impermeável, é possível notar que a utilização do piso permeável em calçadas públicas torna possível o retorno para as bacias de um volume considerável da água precipitada.

Um fato interessante neste estudo foi a baixa taxa de percolação que o solo descoberto apresentou, sendo menor para altas intensidades de precipitações que o próprio concreto impermeável. Sendo assim, para regiões onde existe histórico de precipitações com alta intensidade, não é recomendada a utilização do solo descoberto, devido ao alto escoamento superficial e facilidade no carreamento de resíduos que podem obstruir as redes de coletas pluviais.

A NBR 16416 (2015) apresenta, também, outro modelo de pavimentação permeável que foi analisada neste projeto: o pavimento de concreto com juntas alargadas. Este modelo utiliza o tipo de piso que tem nome comercial de “Paver”, conforme os dados apresentados no projeto. Neste modelo, se instalado conforme a orientação da mesma norma, se obtém também uma taxa de percolação superior a 99%, podendo assim ser indicado para a utilização de pavimentação, assim como o piso em peças de concreto permeável. Ambos tornam possível que a água das chuvas retorne para as bacias hidrográficas por meio de infiltração no solo, auxiliando assim na recuperação das bacias hidrográficas nas regiões urbanas e evitando prejuízos para as bacias rurais.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 16416:2015: **Pavimentos permeáveis de concreto: Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 9050:2004: **Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 9781:2013: **Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

ACIOLI, L.A. (2005). **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** Dissertação (Mestrado). 162p. – Instituto de pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

ALVES SOBRINHO, T. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil.** 1997, 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

ALVES SOBRINHO, T. et al. **Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional.** Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb., Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S.; DALARMI, O. **A crise da água e os mananciais de abastecimento.** (2003) Mananciais de Abastecimento: Planejamento e Gestão. Estudo de caso do Altíssimo Iguaçu. Curitiba: SANEPAR Finep.

ARAUJO, P.R.; TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A. (2000). **A avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial.** RBRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos , Volume 5,n.3, Jul/Set 2000, 21-29.

BAPTISTA, M.: NASCIMENTO, N.: BARRAUD, SYLVIE, **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana,** Porto Alegre: ABRH, (2005).

BISPO, T. C.; LEVINO, N. de A. (2011). **Impactos Ambientais decorrentes do uso e ocupação desordenada do solo: Um estudo da região da periferia de Maceió/AL.** In Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte/MG, Out.2011

Código de Obras de Cascavel (1996)

<http://www.cascavel.pr.gov.br/secretarias/seplan/subpagina.php?id=930>

DIETER, J. **Poluição difusa por fósforo devido a aplicação de água residuária na suinocultura sob condições de chuva simulada.** 2009, 51p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Cascavel, Paraná, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2006, 306 p.

ESTEVES, R. L. **Quantificação das Superfícies Impermeáveis em Áreas Urbanas por Meio de Sensoriamento Remoto.** 2006, 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade, Brasília, 2006.

FARIA, R. T. de; COSTA, A. C. S. da. **Tensiômetro: construção, instalação e utilização: um aparelho simples para se determinar quando irrigar.** Londrina: IAPAR, 1987. 24 p. ilustr. (IAPAR, Circular, 56).

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. – **Hidrologia** – 2.a ed. – São Paulo – Blucher, 1988.

HOLTZ, F. da C. **Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental.** 2011, 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Porto Alegre, BRRS, Rio Grande do Sul, 2011.

JACKSON, Kenneth. Crabgrass frontier. **The suburbanization of the United States.** Oxford: Press, 1985.

KÖPPEN e GEIGER. Climate-data.org. **Classificações climáticas.** 2015. Disponível em: <http://pt.climate-data.org/location/43679/>. Acesso em: 07/08/2015.

MONTEIRO, Carlos Augusto de F.; MENDONÇA, Francisco. **Clima Urbano.** São Paulo: Contexto, 2003.

MUMFORD, Lewis. **A cidade na história: suas origens, desenvolvimento e perspectivas.** 2ª Ed, Tradução Neil R. da Silva. São Paulo: Martins Fontes, 1982.

NAGHETTINI, M.C. **Projeto Rio de Janeiro – Estudo de chuvas intensas no estado do Rio de Janeiro;** Relatório Técnico; 140p. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais; Belo Horizonte, CPRM. 2000.

NASCIMENTO, J. M. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão: INFIASPER/UFMS – Fases III e IV.** 2005, 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2005.

OJIMA, Ricardo. **A produção e o consumo do espaço nas aglomerações urbanas brasileiras: desafios para uma urbanização sustentável.** XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP. Caxambú-MG – Brasil, de 18-22 de Setembro de 2006.

PANACHUKI, E. et al. **Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária.** Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb., Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 261-268, 2006.

Perfil do município de Cascavel

http://www.cascavel.pr.gov.br/arquivos/21072009_6_1usodosolo_urbano.doc

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica.** São Paulo. Ed. Blucher, 1976.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica.** 2ª ed. São Carlos: Edição EESC/USP, 2003.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Ed. SAEAFS. Curitiba, 1996.

RAIMBAULT, G.; ANDRIEU, H.; BERTHIER, E.; JOANNIS, C.; LEGRET, M. 2002. **Infiltration des eaux pluviales à travers les surfaces urbaines – Des revêtements imperméables aux structures-réservoirs In: Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées.** 238-Maio-Junho 2002 pp 39-50.

REIS FILHO, N. G. **Notas sobre a urbanização dispersa e novas formas de tecido urbano.** São Paulo: Via das Artes, 2006.

RIBEIRO, E. L.; SILVEIRA, J. A. R. **Cidade expandida: O fenômeno do sprawl urbano e a dinâmica de segregação sócio espacial.** AU. Arquitetura e Urbanismo, v. 24, p. 74-78, 2009.

SCARATI MARTINS, J. R. **Programa de Capacitação em Drenagem Urbana e manejo Sustentável de Águas Pluviais – Gestão de Drenagem Urbana e Inovações Tecnológicas em Micro Drenagem – Apostila de Curso Volume II,** (2006). FCTH - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA

SILVA, C.G. **Perdas de solo e de água e características de infiltração em sistemas de plantio direto e convencional.** 2003. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.

Sistemas viários de Cascavel

http://www.cascavel.pr.gov.br/arquivos/21072009_7_1sistemaviario.doc

SOUZA, M. D. de. **Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais.** Jaguariúna: EMBRAPA, 2004

SUDERSHA: Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (2002). **Manual de drenagem urbana – Região metropolitana de Curitiba/PR.**

TUCCI, C. E. M. 2002. **Gerenciamento da Drenagem Urbana.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 7 n. 1 Jan/Mar. Pg 5-27.

TUCCI, C.E.M., org. (2004). **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Ed. da Universidade - UFRGS / Ed. da Universidade de São Paulo – EDUSP /

Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH.

TUCCI,G.C. e DAVIS,J.L. (1995). **Controle do Impacto da urbanização**. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO,R,L.; BARROS,M.T.(organizadores). Drenagem Urbana. ABRH . Editora da Universidade. UFRGS. Porto Alegre, 1995.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. (1975). **Hidrologia Aplicada**. Ed. McGraw-Hill.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de Projeto e Execucao de Pavimentos Permeaveis Visando Retencao e Amortecimento de Picos de Cheias**. 2009. 191p. Dissertacao (Mestrado em Engenharia), Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 2009.

ANEXO

PLANILHA DE CAMPO		DATA:				
LISIMETRO		i(%)				
		4	9	14	19	24
	Ip calibrada (mm.h-1)	Ip desejada (mm.h ⁻¹)				
		45	60	75	90	105
DADOS COLETADOS						
TEMPO (h:min)						
INICIO DO TESTE	INICIO DO ESCOAM.	FIM DO TESTE		FIM DO ESCOAM.		
UMIDADE (%)	Escoamento superficial		Tempo da bomba ligada (min)			
Antes do pré molhamento	Momento coleta					
	3					
Antes do início do teste	6					
	9					
Final do teste	12					
	15					
	18					
Média das umidades	21					
	24					
	Total (A)	0	TOTAIS ESCOADOS			
	27		Total (A)	0		
	30		Total (B)	0		
	33		Total (C)	0		
	36		TOTAL ESC.	0		
	39		TOTAL LIXIVIADO			
	42		TOTAL			
	45		Ip APLICADA (L)			
	48		Vol. Aplicado			
	Total (B)	0				
	51					
	54					
	57					
	60					
	63					
	66					
	69					
	72					
	Total (C)	0				
	Volume escoado após desligar a bomba					