

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

CAROLINA CASSIANO WELZEL

**USO DO SOFTWARE SWMM PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA
DE DISPOSITIVOS LID NAS VAZÕES DE ÁGUAS PLUVIAIS
GERADAS NO ESTACIONAMENTO DA UTFPR ECOVILLE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2021

CAROLINA CASSIANO WELZEL

**USO DO SOFTWARE SWMM PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA
DE DISPOSITIVOS LID NAS VAZÕES DE ÁGUAS PLUVIAIS
GERADAS NO ESTACIONAMENTO DA UTFPR ECOVILLE**

**Usage of SWMM software on the evaluation of LID device's influence on
rainwater flow rate generated inside UTFPR's parking lot**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Flávio Bentes Freire.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CAROLINA CASSIANO WELZEL

**USO DO SOFTWARE SWMM PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE
DISPOSITIVOS LID NAS VAZÕES DE ÁGUAS PLUVIAIS GERADAS NO
ESTACIONAMENTO DA UTFPR ECOVILLE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 9/dezembro/2021

Orientador – Flávio Bentes Freire
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professora Celimar Azambuja Teixeira
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professor Fernando Oliveira de Andrade
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, ao meu parceiro Vitor, e às queridas amigas Karine, Natália e Manoela e por toda a compreensão, paciência e suporte ao longo do processo. A presença de vocês foi essencial para me motivar até o final desta etapa.

Gostaria de agradecer ao professor Flávio Bentes Freire, por todo o apoio, cuidado e orientação ao longo da trajetória deste trabalho, e às professoras Clarice Lemos e Celimar Teixeira pela cordialidade e auxílio prestado no seu desenvolvimento.

Agradeço à professora Yasmin Bhattacharya e à acadêmica Eliza Fabro por me ajudarem a encontrar a inspiração para elaboração das fases iniciais desta pesquisa, pela companhia e por me incentivarem a perseverar mesmo frente aos desafios enfrentados.

Por fim, agradeço à UTFPR e ao Departamento Acadêmico de Construção Civil por me proporcionarem os conhecimentos, materiais, ambientes e oportunidades únicos ao longo de minha trajetória acadêmica, sem os quais a realização deste trabalho não seria possível.

RESUMO

A impermeabilização descontrolada dos grandes centros urbanos acarreta sérios problemas sociais e de infraestrutura, como enchentes, alagamento e propagação de doenças. Visando mitigar os efeitos dessa situação, vem crescendo a preferência por coberturas de superfícies que permitam a infiltração das águas pluviais, seja para retardamento de vazões ou para reutilização do volume escoado. Os pavimentos permeáveis são uma alternativa de relativo baixo custo e fácil implementação que atingem esse objetivo, e se fazem necessários estudos para melhor compreensão de seu comportamento sob variadas circunstâncias ambientais. Este trabalho tem como objetivo quantificar os valores de escoamento, infiltração e vazão gerados por uma precipitação simulada sobre um estacionamento da UTFPR, e analisar de que forma a adoção de pavimentos permeáveis do tipo concreto poroso (BCP), concreto asfáltico poroso (CPA), combinados com trincheiras de infiltração, podem impactar nestes parâmetros. Para tal, optou-se por modelar a área de estudo e dispositivos LID (*Low Impact Development*) nela aplicados no software Storm Water Management Model - SWMM, avaliando ainda a efetividade do uso deste tipo de ferramenta em estudos de microdrenagem. Os resultados obtidos pelas simulações indicaram que a todos os cenários de aplicação dos dispositivos atingiram o objetivo de reduzir os valores escoamento superficial e aumentar da infiltração do solo na região. A combinação do pavimento permeável tipo CPA com o uso de trincheira de infiltração apresentou o melhor desempenho, reduzindo o escoamento em até 20% quando comparado às condições atuais de cobertura do terreno. O SWMM se provou um software relevante para o tipo de análise conduzida, apesar da grande quantidade de parâmetros experimentais necessários para a modelagem de cada cenário.

Palavras-chave: Pavimentos permeáveis. Trincheiras de infiltração. SWMM. Concreto poroso. Infiltração. Escoamento superficial.

ABSTRACT

The uncontrolled impermeabilization of big urban centers causes serious social and infrastructural problems, such as inundations, flooding, and the spread of diseases. Aiming to mitigate the effects of this situation, the preference for surface coverings that allow infiltration of rainwater has been growing, whether to delay overflows or to reuse the overflowed rainwater. Permeable pavements are a relatively low-cost and easy-to-implement alternative that achieves this goal, and studies are needed to better understand its behavior under various environmental circumstances. This work seeks to quantify the values of runoff, infiltration and flow generated by a simulated precipitation over a UTFPR parking lot and aims to analyze how the adoption of permeable pavements, such as porous concrete (BCP) and porous asphaltic concrete (CPA), combined with infiltration trenches, can impact these parameters. To this end, the study area and the LID (Low Impact Development) devices applied to it were modeled in the Storm Water Management Model - SWMM software, while also evaluating the effectiveness of using this type of tool in microdrainage studies. The results obtained by simulations indicated that all scenarios of device's application reached the objective of reducing surface runoff values and increasing soil infiltration on the study region. The combination of CPA-type permeable pavement with the use of an infiltration trench provided the best performance, reducing runoff by up to 20% when compared to current ground cover conditions. SWMM was proved as a relevant software for the analysis conducted, despite the large number of experimental parameters needed for modeling each scenario.

Keywords: Permeable pavements. Infiltration trenches. SWMM. Porous concrete. Flow rate. Infiltration. Surface runoff.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Municípios que sofreram inundações ou enchentes nos últimos cinco anos (2010).....	17
Figura 2 - Visão conceitual do fenômeno do escoamento no SWMM.	22
Figura 3 - Trecho de projeto de drenagem pluvial e modelagem do projeto modelagem no SWMM	23
Figura 4 - Componentes e processos de um modelo de estrutura de pavimento permeável.....	26
Figura 5 - Composição de pavimento permeável experimentada por Castro (2011).....	27
Figura 6 - Amostra de concreto poroso	28
Figura 7 - Amostra de blocos intertravados de concreto	29
Figura 8 - Exemplo de trincheira de infiltração.....	30
Figura 9 – Em destaque, a área de estudo aproximada: loteamento do estacionamento da UTFPR – Ecoville	33
Figura 10 - Levantamento topográfico da região de estudo.....	33
Figura 11 - Croqui da divisão de sub-bacias produzido no SWMM.	35
Figura 12 - Editor de série temporal de precipitação do SWMM (valores exemplo)	37
Figura 13 - Configuração do direcionamento dos escoamentos gerados na simulação frente à aplicação de dispositivos LID.....	41
Figura 14 - Representação esquemática de trincheira de infiltração.	42
Figura 15 - Editor de parâmetros para condutos e nós no SWMM	44
Figura 16 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com BCP	50
Figura 17 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com CPA	50
Figura 18 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com BCP associado à trincheira de infiltração.....	51
Figura 19 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com CPA associado à trincheira de infiltração.....	51
Figura 20 - Gráfico de vazão por tempo do cenário de condições atuais	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2 OBJETIVOS	15
2.1. GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. ENCHENTES NO BRASIL	16
3.2. PANORAMA DA DRENAGEM URBANA BRASILEIRA.....	19
3.3. SWMM E PRÁTICAS DE AMORTECIMENTO DE VAZÕES.....	21
3.4. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	24
3.5. TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO.....	30
4 METODOLOGIA.....	32
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	32
4.2. ÁREA DE ESTUDO.....	32
4.3. HIPÓTESE DE MODELAGEM.....	33
4.4. PARÂMETROS DO SWMM.....	34
4.4.1. Sub-bacias	35
4.4.2. Pluviômetros.....	37
4.4.3. Controles LID.....	39
4.4.4. Conduitos, Nós e Exutórios.....	43
5 RESULTADOS	45
5.1. PARÂMETROS DAS SUB-BACIAS.....	45
5.2. CÁLCULOS DE PARÂMETROS DOS PLUVIÔMETROS.	46
5.3. CÁLCULOS DE PARÂMETROS DOS CONTROLES LID	47
5.4. RELATÓRIOS DE SIMULAÇÃO.....	49
6 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A expansão do desenvolvimento urbano enfrenta muitos desafios, entre eles a busca por meios de mitigar as consequências da redução das áreas permeáveis dentro do espaço urbanizado. A cobertura inconsequente do solo natural, observada na maioria das cidades urbanizadas, gera, entre outros efeitos, um fortalecimento do escoamento superficial das chuvas, contribuindo assim para a formação de enchentes e resultando em danos ao patrimônio público e privado. Além disso, áreas densamente urbanizadas tendem a sofrer com a redução da percolação da água precipitada no solo, bem como a piora de sua qualidade, influenciando as condições climáticas e ambientais da região.

Segundo Tucci (2005), os dois problemas principais enfrentados atualmente pela drenagem das águas pluviais são a contaminação do escoamento pluvial por esgoto não coletado no sistema sanitário e a construção excessiva de canais e condutos, que apenas transfere as inundações de um local a outro dentro da cidade, a custos insustentáveis para os municípios.

Neste cenário, é essencial a implantação de tecnologias mitigadoras dos impactos citados, as quais, além de atender as necessidades do desenvolvimento urbano, devem levar em consideração as condições topográficas e geológicas existentes, avaliando quais tipos de benefícios e desafios a implantação destas soluções pode vir a gerar.

Uma das possíveis propostas de baixo impacto estrutural para atenuação dos efeitos da impermeabilização das superfícies é a implementação de pavimentos permeáveis em áreas descobertas. Dentre as diversas vantagens da sua aplicação, pode-se ressaltar a redução do escoamento superficial previsto com relação à superfície impermeável; redução dos condutos da drenagem pluvial; e redução de custos do sistema de drenagem pluvial e da lâmina de água de estacionamentos e passeios (TUCCI, 2005). Estudos apontam amortecimento de vazão de escoamento em até 87% através da aplicação dessa técnica (PINTO, 2011), reforçando sua eficiência. Além disso, quando associados ao dispositivo trincheira de infiltração, os pavimentos se tornam um sistema de drenagem ainda mais eficaz (CIRIA, 2007).

Dessa forma, se faz relevante a produção de estudos que busquem entender os resultados da aplicação dessas técnicas sob variadas situações. Para tal, é possível utilizar simulações computacionais, a fim de validar as hipóteses levantadas

para diferentes cenários com uma constante comum. No contexto da modelagem hidrológica, o Storm Water Management Model (SWMM), é um programa computacional que pode analisar o impacto do escoamento superficial e avaliar a efetividade de estratégias de mitigação (EPA, 2010), sendo uma ferramenta útil para os estudos citados.

Este trabalho busca contribuir para um maior entendimento dos efeitos da aplicação de técnicas de baixo impacto (ou LIDs – Low Impact Development Techniques) no comportamento das vazões resultantes de eventos de chuva. Para tanto, objetiva-se dimensionar e modelar o sistema de drenagem pluvial de um estacionamento na cidade de Curitiba – PR, na sede Ecoville da UTFPR, sob cinco diferentes cenários, comparando os resultados obtidos e analisando quais das alternativas atendem de maneira mais satisfatória as condições atuais da região.

2 OBJETIVOS

2.1. GERAL

Avaliar a influência do material do pavimento permeável e do uso de trincheiras de infiltração nas vazões de águas pluviais geradas, tendo como área de estudo o estacionamento da UTFPR sede Ecoville.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar as características dos pavimentos a serem considerados (concreto poroso e concreto asfáltico poroso), bem como da trincheira de infiltração, e avaliar quais tipos atendem às necessidades da área de estudo;
- Levantar os parâmetros e procedimentos necessários para os cálculos de dimensionamento dos materiais, bem como projetos e informações sobre as condições atuais do local de interesse;
- Utilizar o software SWMM no levantamento das vazões de escoamento de águas pluviais;
- Definir os parâmetros necessários para a modelagem no SWMM, buscando manter a fidelidade da simulação às condições reais do local de estudo;
- Quantificar o impacto dos diferentes tipos de dispositivos selecionados em termos de vazão e escoamento superficial;
- Avaliar as limitações do software SWMM para estudos comparativos de microdrenagem;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ENCHENTES NO BRASIL

Tratando-se de uma região tropical, o Brasil está sujeito à frequentes e irregulares períodos de chuva intensa. Este fator, associado à intensificação processo de urbanização desde a década de 70, e consequente aumento da população e de superfícies impermeáveis, contribui para elevados valores de escoamento superficial (BERTONI; TUCCI; 2003), bem como torna os sistemas de drenagem obsoletos e subdimensionados para a atual vazão demandada em casos de chuvas intensas.

Ribeiro (2010) associa o processo de urbanização que ocorreu no Brasil à expropriação da terra no campo, levando massas de trabalhadores rurais a buscarem moradia nas cidades. Sem encontrar nelas alternativas acessíveis, esta população ocupa áreas urbanas consideradas inadequadas, frequentemente expostas a situações de risco, como escorregamentos de vertentes e alagamentos. Na maior parte das grandes metrópoles, o crescimento das áreas urbanizadas processou-se de forma acelerada, e somente em algumas a drenagem urbana foi considerada fator preponderante no planejamento da sua expansão (CANHOLI, 2015).

Esta metodologia de expansão gerou diversas consequências, dentre elas: a deficiência em medidas de prevenção e mitigação dos efeitos de enchentes, as quais exigem alto grau de planejamento e estudo técnico para agirem de maneira efetiva; a obsolescência dos sistemas de drenagem, que não acompanham a evolução urbana e se tornam cada vez menos eficazes no comporte à vazão das chuvas mais intensas quando estas ocorrem.

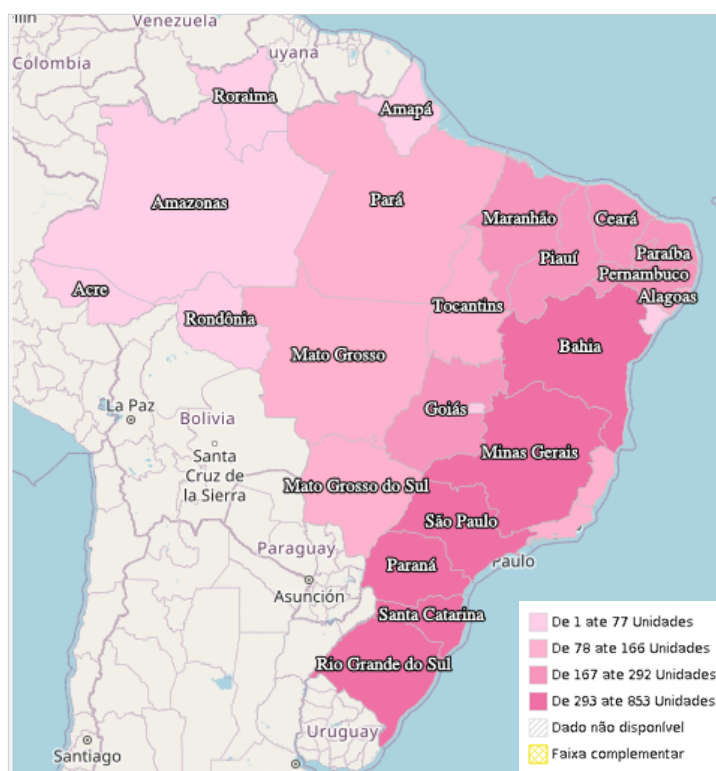
A ocupação desordenada das superfícies urbanas é um problema complexo e crescente. Até 2010, cerca de 8.2 milhões de pessoas viviam em áreas sob risco de enchentes e/ou deslizamentos de terra no Brasil, e o cenário persiste a cada ano (IBGE; CEMADEN, 2018). A Tabela 1 traz a discriminação dessa parcela da população por região do país.

Entre 2008 e 2012 enchentes atingiram cerca de 1543 municípios (27,7% das cidades brasileiras), resultando em 1,4 milhões de pessoas desabrigadas ou deslocadas (IBGE, 2013). O infográfico apresentado na Figura 1 traz o número de municípios que sofreram com inundações ou enchentes nos últimos anos.

Tabela 1 – População em Área de Risco por Região em 2010

Grandes Regiões	População Total	População Total dos Municípios Monitorados	População em Risco nos Municípios Monitorados
Norte	15 864 454	8 776 309	340 204
Nordeste	353 081 950	25 961 835	2 952 628
Centro-Oeste	14 058 094	2 328 701	7 626
Sudeste	80 364 410	43 646 750	4 266 301
Sul	26 386 891	11 704 649	703 368

Fonte: Adaptado de IBGE; CEMADEN; (2018).

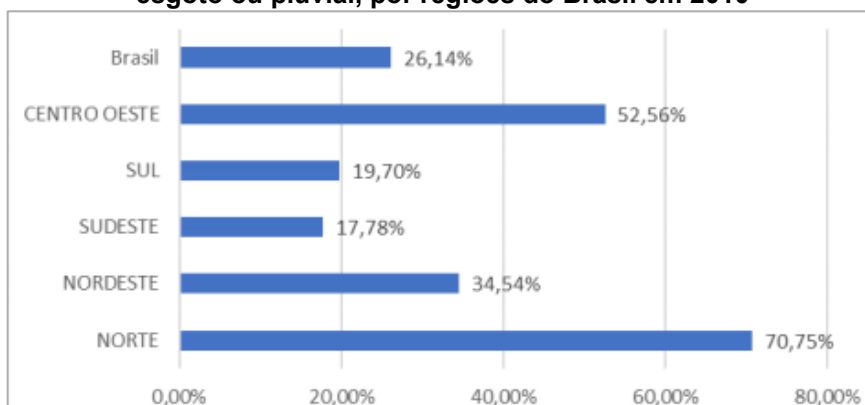
Figura 1 - Municípios que sofreram inundações ou enchentes nos últimos cinco anos (2010)

Fonte: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, IBGE (2010)

Apesar de a regulamentação estabelecida pelo poder público exigir a utilização de sistemas separadores absolutos para drenagem, ou seja, aqueles em que as águas de esgoto e pluviais escoam em galerias separadas, ainda é possível encontrar em diversas cidades brasileiras ligações clandestinas que recebem contribuição de esgoto cloacal domiciliar além das águas pluviais. Isto agrega aos alagamentos uma complicação adicional: a questão de saúde pública.

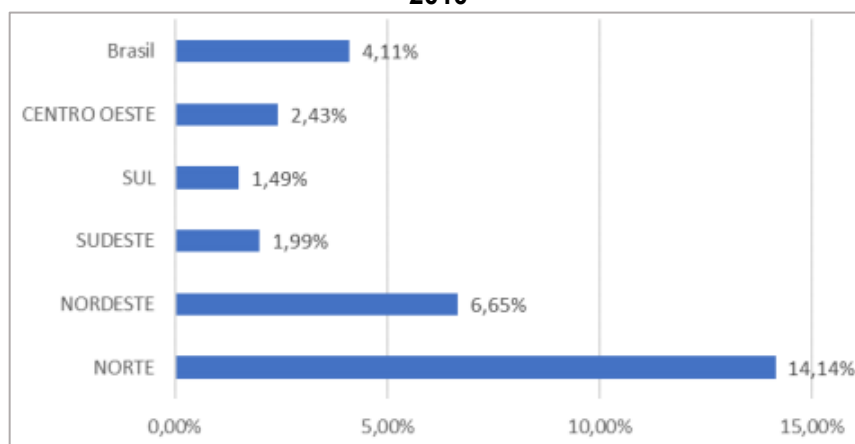
Os últimos censos de população em áreas de risco no Brasil, mostrados no Gráfico 1 e 2, destacam os percentuais de população em risco sem esgotamento sanitário e coleta de lixo, fatores que são diretamente relacionados à proliferação de doenças, e tem consequências agravadas pela ocorrência de enchentes.

Gráfico 1 - Percentual de população em risco sem esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial, por regiões do Brasil em 2010



Fonte: IBGE; CEMADEN; 2018.

Gráfico 2 - Percentual de população em risco sem coleta de lixo, por regiões do Brasil, em 2010



Fonte: IBGE; CEMNADEN; 2018.

O último censo realizado no Brasil em 2010 aponta que mais da metade da população em risco do Centro-oeste brasileiro não possuía acesso à saneamento. No Nordeste do país, esse valor era de cerca de 34%, correspondendo a mais de 1 milhão pessoas. Esta região também possuía um alto percentual de população em risco sem coleta de lixo, tornando-a uma área de atenção para as consequências das enchentes, especialmente por apresentar perfil climático propenso a chuvas extremas (SOUZA *et. al.*, 2016). Ainda que não haja informações censitárias da última década, os noticiários recentes confirmam que pouco foi feito para sanar tal situação.

Além das enchentes e questões sanitárias, outros problemas associados com o manejo das águas pluviais em ambientes urbanos são citados por Tucci (2005) como o aumento em até 7 vezes da vazão máxima; aumento da produção de sedimentos devido à desproteção das superfícies e à produção de resíduos sólidos; deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, devido a lavagem das ruas, transporte de material sólido e às ligações indevidas ao esgoto, bem como contaminação de aquíferos;

As tecnologias atualmente adotadas no Brasil para a prevenção e mitigação dos efeitos de desastres pluviais possuem foco prioritariamente paliativo. Para Tucci (2005), o atendimento ao problema das enchentes sempre após a sua ocorrência, sem um foco preventivo, se dá aos seguintes fatores:

- Falta de conhecimento sobre controle de enchentes por parte dos planejadores urbanos;
- Desorganização, a níveis federal e estadual, sobre gerenciamento de enchentes;
- Pouca informação técnica sobre o assunto a nível de graduação na Engenharia;
- O desgaste político para o administrador público, resultante do controle não-estrutural (zoneamento), já que a população está sempre esperando uma obra hidráulica;
- Falta de educação da população sobre controle de enchentes;
- Não existe interesse na prevenção em alguns países considerando que quando a mesma ocorre é declarada calamidade pública pelo Estado e o município pode receber recursos a fundo perdido. Para o gasto destes valores não é necessário concorrência pública.

3.2. PANORAMA DA DRENAGEM URBANA BRASILEIRA

O aumento da impermeabilização, e o conseqüente aumento nos aportes de volumes e vazões no sistema público de drenagem, são responsáveis, em grande parte, pelo aumento da frequência das inundações e pela alteração do ciclo de vida dos dispositivos de drenagem (CANHOLI, 2013).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (PNSB), a eficiência dos sistemas de drenagem de águas pluviais no que tange à diminuição de

impactos resultantes de processos erosivos e assoreamento de corpos receptores – consequentemente, prevenindo desastres com enchentes e inundações – está diretamente relacionada com a existência dos dispositivos de controle de vazão. Estes permitem a atenuação da energia das águas e o carreamento de sedimentos e outros detritos para os corpos receptores, hídricos ou não, onde há a disposição final dos efluentes da drenagem pluvial (IBGE, 2011).

Tais dispositivos fazem parte do grupo de medidas de controle de escoamento, as quais podem ser divididas em medidas **estruturais** e **não estruturais** (TUCCI, 2005). As medidas **não estruturais**, atuando em conjunto com as estruturais ou sem elas, objetivam minimizar significativamente os prejuízos causados por enchentes a um custo de implementação inferior, por meio de ações realizadas pela aliança entre população e poder público: educação ambiental; capacitação de recursos humanos; mapeamento das Zonas de Risco de Inundação; seguro de enchente; sistema de alerta; ações da Defesa Civil. As medidas **estruturais** (dentre as quais pode-se citar: controle da cobertura vegetal e erosão do solo, construção de reservatórios, piscinões e barragens) modificam o sistema fluvial, evitando prejuízos decorrentes das enchentes. Normalmente envolvem obras de maior porte, alto custo e de grande impacto socioambiental, e podem ser *extensivas*, agindo sobre a bacia hidrográfica e alterando as relações entre precipitação e vazão, ou *intensivas*, agindo sobre os rios e focadas no controle do escoamento.

Ainda se tratando da classificação de medidas de controle do escoamento, também é possível classificá-las de acordo com sua ação na bacia hidrográfica, em:

- Distribuída ou na fonte: é o tipo de controle que atua sobre o lote, praças e passeios;
- Na microdrenagem: é o controle que age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos;
- Na macrodrenagem: é o controle sobre os principais riachos urbanos;

Inojosa (2011) ressalta que alguns dos grandes desafios do manejo de águas pluviais no Brasil é a promoção do diálogo entre áreas com propostas e interesses distintos (obras, meio ambiente, habitação e saúde), bem como a comunicação clara com a população, para que esta possa ter uma compreensão crítica da situação e se posicionar de modo a requerer e apoiar medidas que não sejam meramente paliativas. Além destas medidas, que se enquadram no grupo das não estruturais, a viabilização de novas tecnologias que visem mitigar os impactos das enchentes, como, por

exemplo, a utilização de pavimentações permeáveis é outro desafio a ser superado no campo das medidas estruturais.

Os problemas dos sistemas atuais de drenagens envolvem também a concepção e execução dos projetos de drenagem. Ainda é amplamente difundida entre projetistas a elaboração de planos com foco em dispor a água gerada o mais longe o mais rápido possível, aumentando a capacidade condutora do sistema, apesar de esta ser uma abordagem com custos elevados que apenas transfere o ponto de alagamento e que acarreta na necessidade de projetos futuros ainda mais custosos (CRUZ; SOUZA; TUCCI; 2007).

Constatada a gravidade dos efeitos das enchentes no Brasil, bem como demonstrada a reincidência da situação, fica explícita a necessidade de ações que visem o melhor entendimento dos problemas enfrentados pela gestão de drenagem urbana, bem como a proposição e acompanhamento da aplicação de soluções tecnológicas de mitigação dos efeitos das enchentes.

3.3. SWMM E PRÁTICAS DE AMORTECIMENTO DE VAZÕES

A contenção de águas drenadas em áreas urbanas, principalmente em zonas onde os sistemas de drenagem se mostram próximos à saturação, pode auxiliar na redução dos picos de cheia, quer pela reservação de volumes, como pelo retardamento da transferência destes para os corpos receptores (CANHOLI, 2013). Sendo assim, se fazem relevantes estudos que complementem o conhecimento do comportamento das vazões de chuva frente à utilização de diferentes tipos de coberturas do terreno, bem como seu impacto no dimensionamento dos sistemas de drenagem.

Uma das alternativas para avaliar parâmetros relacionados à projetos de drenagem urbana é através de softwares de simulação. Segundo o U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2010), o *Storm Water Management Model - SWMM* (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - SWMM) é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas, podendo ser utilizado para simulações de eventos únicos de chuva, e também para simulações contínuas de longo prazo.

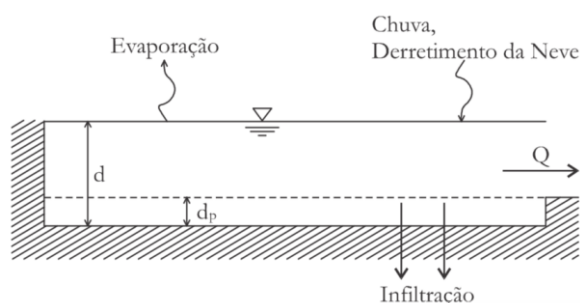
Neste programa, os parâmetros que medem o escoamento superficial de uma área são relacionados a um conjunto de sub-bacias hidrográficas, que recebem as

precipitações e geram escoamentos. Tais fluxos podem ser direcionados a um sistema de tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação, através dos quais o SWMM pode medir a evolução, dentro de intervalos de tempo, da quantidade e qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, bem como a vazão, a altura de escoamento e a qualidade da água em cada tubulação e canal.

Para representar geograficamente uma determinada região de interesse, este software utiliza sub-bacias, descritas como unidades hidrológicas cujos elementos topográficos e de drenagem direcionam o escoamento superficial para um único ponto de descarga (TASSINARI, 2014). Ao modelar a área de estudo, o usuário deve discretizar a quantidade de sub-bacias necessárias para a melhor representação do terreno, bem como as características hidrológicas de cada parcela, seus canais de conexão e pontos exutórios. Tais pontos podem ser tanto nós (bocas de lobo, poços de visita, entre outros), representando uma conexão final da drenagem da área ao sistema público existente, por exemplo, como outra sub-bacia que receberá a carga hidráulica da anterior.

O processo de escoamento superficial é interpretado pelo SWMM conforme o exibido na Figura 2. De acordo com o manual do programa (EPA, 2010), cada sub-bacia é tratada como um reservatório não linear. As contribuições são provenientes dos diferentes tipos de precipitação (chuva, neve) e de qualquer outra sub-bacia situada a montante. Existem diversos fluxos de saída como a infiltração, a evaporação e o escoamento superficial. A capacidade deste “reservatório” é o valor máximo do armazenamento em depressões, que é o valor máximo armazenável à superfície por alagamento, encharcamento e interceptação.

Figura 2 - Visão conceitual do fenômeno do escoamento no SWMM.



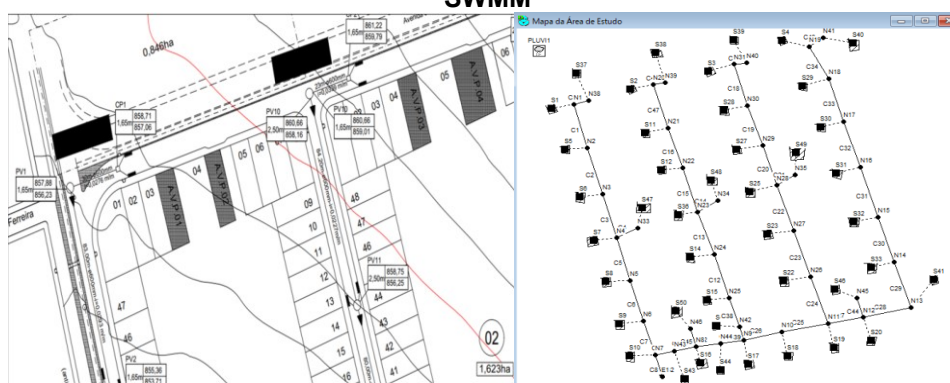
Fonte: EPA (2010).

O escoamento superficial por unidade de área “Q” ocorre somente quando a profundidade da água neste “reservatório” excede o valor máximo do armazenamento

em depressões “dp”. Neste caso, “Q” é calculado pela equação de Manning. A lâmina de água no reservatório “d” (em pés ou metros) na sub-bacia é recalculada de forma contínua, no tempo t (em segundos) mediante a resolução numérica do balanço hídrico na sub-bacia.

A Figura 3 ilustra a modelagem realizada por Adriano (2021), que utilizou o SWMM para análise e verificação da possibilidade de ocorrência de alagamentos por conta da ineficiência do sistema de drenagem executado em um novo loteamento.

Figura 3 - Trecho de projeto de drenagem pluvial e modelagem do projeto modelagem no SWMM



Fonte: Adriano (2021) (Adaptado)

Dentro de cada sub-bacia, deve ser definida a porcentagem de área permeável e impermeável, e é possível incluir os chamados controles LIDs (*Low Impact Development*), que se referem a dispositivos cuja implementação tem como objetivo amortecer o escoamento superficial por meio de processos artificiais, combinados ou não, de retenção e infiltração.

Muitas terminologias foram criadas para se referir a esse tipo de tecnologia, e houve, nas últimas décadas, um rápido crescimento no uso de termos como LIDs (Department of Environmental Resources, 1999), sistemas de drenagem urbana sustentável (*Sustainable Urban Drainage Systems - SUDS*) (CIRIA, 2000), projeto urbano sensível à água (*Water Sensitive Urban Design - WSUD*) (Whelans et al., 1994; Wong, 2007), melhores práticas de gestão (*Best Management Practices - BMPs*) (Schueler, 1987), técnicas alternativas (Azzout et al., 1994), entre outros. Amplamente mencionadas na literatura no campo de estudos hidrológicos, e inclusive se estendendo para outras disciplinas como arquitetura, planejamento, economia, ecologia e ciências sociais (Fletcher, 2014), cada terminologia emergiu em épocas distintas, e apesar de englobarem as especificidades do seu período, todos buscam

essencialmente promover soluções tecnológicas para os desafios enfrentados na gestão da drenagem urbana. Este estudo se concentrará na nomenclatura utilizada pelo EPA para se referir a tais dispositivos.

No SWMM, os controles LID são uma propriedade que pode ser atribuída a uma sub-bacia e estão disponíveis em cinco diferentes formas:

- **Bacias de Filtração:** São depressões artificiais que contêm vegetação plantada em um solo preparado especificamente para remover sedimentos e agentes poluentes de um determinado escoamento superficial. Sob o solo, instala-se uma vala de drenagem com cascalhos. Elas possuem também a função de armazenar, infiltrar e evapotranspirar a água proveniente diretamente da chuva ou do escoamento superficial. Jardins e canteiros de rua, assim como tetos vegetados, são exemplos de bacias de filtração.
- **Trincheiras de Infiltração:** São valas escavadas e jusante de uma área impermeável preenchidas com pedras e cascalhos. Elas permitem o armazenamento, e posterior infiltração no solo, da água da chuva escoada, proporcionando um amortecimento da onda de cheia.
- **Pavimentos Permeáveis:** São superfícies que foram escavadas, preenchidas com cascalhos e posteriormente pavimentadas com concreto poroso, asfalto poroso ou elementos vazados. Normalmente toda chuva atravessa imediatamente o pavimento permeável, infiltra-se através do leito de cascalhos e percola no colo natural à taxa de infiltração do respectivo solo. Os elementos vazados são elementos de pedra ou de concreto impermeável, dispostos sobre uma camada de areia, no meio dos quais há espaços preenchidos com areia ou cascalhos para permitir a infiltração. A água da chuva é capturada pelo elemento vazado, conduzida para o leito de areia e posteriormente infiltrada no solo.
- **Cisternas:** Coletam a água da chuva escoada do teto das casas ou dos edifícios, permitindo a sua posterior utilização.
- **Vales de Infiltração sem Drenos:** São canais ou depressões com as paredes laterais inclinadas, recobertas por grama ou vegetação, que têm a função de armazenar ou retardar o escoamento da água da chuva proporcionando um tempo maior para a sua infiltração no solo.

Se tratando de medidas estruturais, cada uma dessas tecnologias tem suas particularidades, e a eficiência de sua implantação varia muito em função da

localização, características físicas, qualidade de manutenção em longo prazo, precisão do projeto, disponibilidade de recursos, entre outros fatores. No entanto, a maioria deles possui sistemas bastante simples e idealizados para serem de fácil implementação, assim focando na redução de custos e na popularização de novas soluções ambientalmente benéficas para um mercado consolidado e conservador.

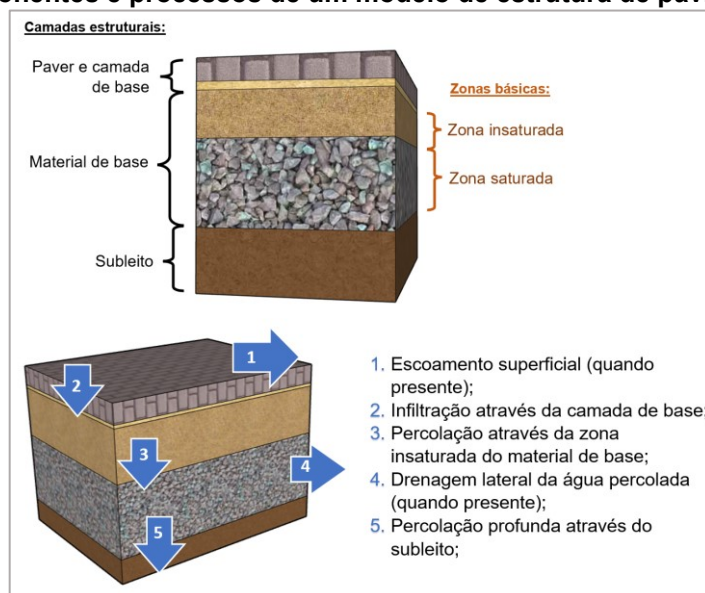
A bibliografia suporta a eficácia de muitos dos sistemas contemplados no SWMM. Estudos como os de Kolokosta (2013) demonstram que telhados verdes podem contribuir consideravelmente para o aprimoramento do ambiente urbano, e ao mesmo tempo diminuir a demanda de energia. As análises de Brattebo (2003) ao longo de 5 anos fornecem uma indicação clara do valor de sistemas com pavimentos permeáveis e sua adequação a longo prazo para grandes áreas construídas. Os experimentos de Flores (2015) na aplicação de trincheiras de infiltração e filtros de caixa de árvore se mostraram promissores na redução do escoamento superficial.

3.4. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Faria e Coelho (2017) mencionam entre os benefícios da utilização de pavimentos permeáveis, além dos ganhos hidrológicos, ganhos na circulação viária, com melhoria da segurança e conforto, reduzindo a formação de poças de água e melhoria da aderência, com redução da aquaplanagem, além da redução do ruído de circulação. Os pavimentos porosos que permitem a infiltração, geram ganhos ambientais como a recarga do lençol freático. Além disso, o uso de pavimentos permeáveis também representa ganhos financeiros, como por exemplo na redução das dimensões do sistema de drenagem.

James (2001) descreve a estrutura dos sistemas de pavimentos permeáveis em quatro componentes distintos: a) o paver e a camada de base; b) a zona insaturada do material base; c) a zona saturada do material de base e d) o subleito. Esses componentes são considerados homogêneos, no que tange à modelagem de processos hidrológicos. O movimento da água através do pavimento poroso a instalação é controlada por cinco processos, conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Componentes e processos de um modelo de estrutura de pavimento permeável

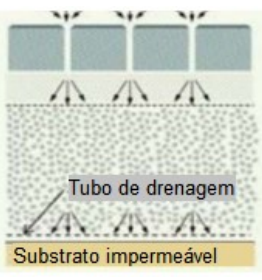


Fonte: Adaptado de James (2001).

De acordo com Schueler (1987), o pavimento permeável pode ser categorizado em três grupos distintos. Esses dependem basicamente da capacidade de armazenamento da camada granular implementada sob os pavimentos (determinada pela porosidade dos seus componentes) e nos níveis de infiltração em solos adjacentes (PINTO, 2011). O Quadro 1 traz as especificações resumidas de cada categoria estrutural.

Quadro 1 – Categorização dos Pavimentos Permeáveis de acordo com Schueler

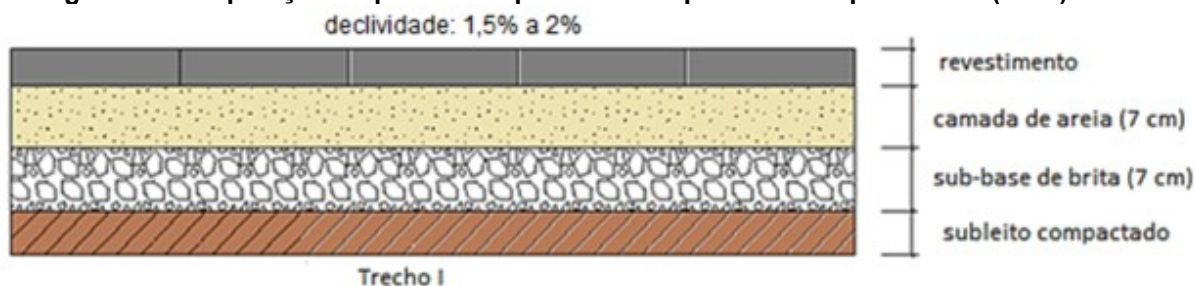
<p>Sistema de infiltração total</p>		<p>Água da chuva infiltra totalmente no solo. A camada granular deve ser dimensionada para absorver volumes inferiores ou iguais aos da chuva de projeto, e deve ter capacidade de controle da qualidade da água, do pico de cheia e do volume de chuva.</p>
<p>Sistema de infiltração parcial</p>		<p>Água da chuva é parcialmente infiltrada no solo, e também coletada através de um sistema de drenagem auxiliar, o qual apresenta melhor eficiência em eventos de chuva com tempo de retorno menores. Deve ser implementado em casos em que a capacidade de infiltração do substrato não é suficiente para suportar todo o evento de chuva. Este sistema de drenagem deve ser dimensionado para uma chuva com período de retorno de 2 anos, desta forma, qualquer chuva de intensidade inferior a este período infiltrará no solo antes de se dirigir ao sistema de drenagem.</p>

<p>Sistema de infiltração para controle de qualidade da água</p>		<p>Este sistema não é dimensionado para suportar todo o volume da precipitação, mas sim a parcela da chuva inicial que é responsável pela maior aglutinação de poluentes. Requer menor capacidade de armazenamento, e, portanto, possui menor custo de implementação. A chuva excedente não é tratada e deve ser direcionada ao sistema de drenagem convencional.</p>
---	---	---

Fonte: Adaptado de Schueler (1987).

Castro (2011) afirma que a composição ilustrada da Figura 5, construída com base em recomendações da literatura, é uma estrutura mais reforçada para usos mais rigorosos como trânsito de veículos leves e estacionamentos. Trata-se de um sistema de infiltração total, com duas camadas de solo entre o pavimento e o subleito.

Figura 5 - Composição de pavimento permeável experimentada por Castro (2011)



Fonte: Neto (2013)

Alguns tipos de materiais que constituem os pavimentos permeáveis são abordados por Virgiliis (2009), sendo três deles:

- Concreto poroso (BCP) – Apresenta uma diferença muito sutil quando comparado à mistura convencional de cimento Portland, na medida em que os agregados devem apresentar gradação uniforme. Sua aplicação é mais apropriada para tráfego leve e quando acabado possibilita grande permeabilidade, entretanto, pode ocorrer colmatção e, portanto, necessita de manutenção periódica (VIRGILIIS, 2009). A Figura 5 traz uma amostra de concreto poroso utilizada nos estudos de Alessi (2006).

Figura 6 - Amostra de concreto poroso



Fonte: Alessi (2006).

- Concreto asfáltico poroso (CPA) – Também conhecido como asfalto poroso, é constituído por uma mistura de ligante betuminoso e agregados de tamanho uniforme (VIRGILIIS, 2009). Esse tipo de revestimento é similar ao pavimento asfáltico convencional, porém com permeabilidade maior. Entretanto, também é suscetível a colmatção pelo ligante que pode infiltrar pela superfície por meio dos poros e acumular-se na estrutura, além desse fator com o passar do tempo, assim como o concreto poroso, pode também ser colmatado por meio de impurezas que atingem o pavimento, como solo, folhas e sujeira em geral, portanto necessita de manutenção frequente.
- Blocos intertravados de concreto – Esse tipo de revestimento pode ser aplicado para tráfego leve, médio e pesado, resguardando, entretanto, diferenças no tocante a espessura e resistência à compressão dos blocos, ou seja, quanto maior a carga de tráfego esperada, maior a espessura do bloco e maior deve ser sua resistência. Esse tipo necessita de travamento lateral para que as peças não sofram tensões e não se soltem. Devem ser assentados sobre colchão de areia que permitirá ao conjunto maior permeabilidade e porosidade. Esse tipo de revestimento apresenta custo relativamente baixo e, portanto, bom custo versus benefício (VIRGILIIS, 2009). A Figura 6 traz uma amostra de blocos intertravados de concreto utilizada nos estudos de Alessi (2006).

Figura 7 - Amostra de blocos intertravados de concreto



Fonte: Alessi (2006).

Se tratando dos benefícios da implementação de pavimentos permeáveis, estudos de quantificação dos impactos da adoção dessa solução em termos de coeficiente de escoamento e de infiltração indicam amortecimento de vazão afluente entre 28% e 87% em revestimentos do tipo BCP (concreto poroso) e de 56% a 85% para revestimentos tipo CPA (concreto asfáltico poroso) (PINTO, 2011).

Castro (2011) obteve resultados promissores no controle e redução do escoamento superficial em ensaios com pavers, placas de concreto poroso e blocos de concreto vazados tipo “concregrama”. Quando retardados e prolongados os tempos críticos do hidrograma de escoamento superficial, as placas de concreto poroso apresentaram os melhores tempos de embebição (7,2 a 30,4 minutos) em comparação aos demais tipos de revestimento.

Guedes (2015) simulou os mesmos materiais, porém variando a espessura da camada de armazenamento, e atingiu percentuais de redução de escoamento superficial superiores a 50% quando comparados com o revestimento tipo paver, além de retardado desse escoamento em média de 17 minutos e apresentando armazenamento temporário das águas pluviais.

As simulações de Neto (2013) em quadras de um bairro de Goiânia demonstraram que apesar de eficazes, os pavimentos permeáveis devem ser utilizados de forma combinada com outras tecnologias, como trincheiras de infiltração ou bacias de retenção, para que sua aplicação seja viável e garanta a diminuição dos volumes escoados.

Nabeshima et. al. (2011) identificaram através de entrevistas com órgãos públicos que a falta de mão de obra especializada na instalação de blocos de concreto

intertravados, bem como a falta de investimento em tecnologia para mecanização deste sistema, são alguns dos motivos que contribuem para a falta de popularidade da adoção destes dispositivos.

Pinto (2011) realizou estudos com amostras de BCP e CPA, fornecendo através dos resultados experimentais alguns valores usados como base para a simulação desses dispositivos no SWMM.

3.5. TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

Trincheiras de infiltração são escavações rasas alocadas à jusante do fluxo de escoamento de uma determinada área, preenchidas com camadas de materiais filtrantes como britas ou mantas, e que permitem que a água seja temporariamente armazenada e absorvida pelo solo, tanto pelo fundo da vala quanto por suas laterais, conforme exemplificado na Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de trincheira de infiltração.



Fonte: Gambaro (2012).

Elas têm como função principal amortecer a velocidade do escoamento superficial, evitando assim a sobrecarga do sistema de drenagem. Entretanto, podem também ser utilizadas para promover a drenagem em locais onde o solo subjacente é de baixa permeabilidade, ou como material retentor onde as águas subterrâneas estão sujeitas a contaminação. Além disso, é possível compor o sistema em conjunto com drenos de captação e condução da água armazenada para posterior reutilização ou descarte.

Apesar da versatilidade deste dispositivo, Ciria (2007) ressalta que as trincheiras de infiltração são muito sensíveis a entupimento, requerendo algum tipo de pré-tratamento da água para barragem de sedimentos, como uma faixa de grama, valas ou bacias de retenção. Além disso, são mais eficientes no combate dos efeitos de chuvas extremas quando projetadas para atuarem em conjunto com outros dispositivos LID, como pavimentos permeáveis, por exemplo.

Recomenda-se a instalação destas trincheiras locais com fluxos não intermitentes, como beiras de rodovias e ruas, e onde a declividade seja inferior a 2%, uma vez que elevadas velocidades de escoamento a tornam inefetiva.

4 METODOLOGIA

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Abordando o tema de drenagem urbana, com foco nas opções de controle de enchentes, e após o levantamento dos métodos utilizados em diferentes bibliografias para análises de vazão (locais, materiais e programas utilizados), a metodologia a ser adotada neste trabalho pode ser dividida nas seguintes etapas:

- a. Levantamento da área de estudo e suas informações topográficas;
- b. Levantamento dos parâmetros do SWMM;
- c. Seleção dos tipos de dispositivos a serem simulados;
- d. Pré-dimensionamento dos dispositivos;
- e. Seleção dos valores dos parâmetros conforme manuais e literatura;
- f. Modelagem das diferentes hipóteses;
- g. Geração de relatórios da simulação para avaliação dos resultados obtidos, relacionando estes com os referenciais teóricos que suportem as suposições elaboradas para as hipóteses;

4.2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada é exibida na Figura 9. Trata-se do estacionamento do campus Ecoville da UTFPR, em Curitiba/PR. A região foi selecionada por se tratar de uma área de fácil acesso na região, e com potencial para futura implementação das soluções avaliadas neste estudo, caso os resultados obtidos sejam promissores.

A medição das dimensões da região foi feita usando a ferramenta “Medidor de Distância” do aplicativo Google Earth.

As cotas do terreno foram obtidas através de um levantamento virtual que combinou o uso das ferramentas Google Earth Pro, GPS Visualizer e QGis 3.16, e o qual forneceu o perfil topográfico ilustrado na Figura 10.

Figura 9 – Em destaque, a área de estudo aproximada: loteamento do estacionamento da UTFPR – Ecoville



Fonte: Adaptado de: Google Maps

Figura 10 - Levantamento topográfico da região de estudo.



Fonte: Clarice Lemos¹

4.3. HIPÓTESES DE MODELAGEM

Baseando-se nos valores de permeabilidade do solo e demais características físicas fornecidos pela literatura para cada tipo de cobertura superficial, buscou-se simular diferentes valores dos mesmos parâmetros, e, a partir dos resultados obtidos, identificar a combinação de materiais de melhor desempenho na área estudada. Para isso, foram elaborados cinco cenários de simulação distintos, conforme exposto no Quadro 2.

¹ Levantamento fornecido por cortesia da professora Clarice Farian de Lemos (UTFPR). Altitudes do terreno obtidas através das ferramentas Google Earth Pro e GPS Visualizer (https://www.gpsvisualizer.com/convert?output_elevation). Desenhos realizados no Software Livre QGIS 3.16, com o contorno do estacionamento criado em arquivo shapfile e as curvas de nível geradas pela ferramenta de interpolação TIN. Já para os traçados dos perfis foi utilizado o plugin Profile Tool.

Quadro 2 – Cenários simulados

Cenário	Cobertura simulada
A	Concreto poroso (BCP)
B	Concreto asfáltico poroso (CPA)
C	BCP + Trincheira de infiltração
D	CPA + Trincheira de infiltração
E	Solo de areia batida com pedriscos (condição atual)

Fonte: Autora.

Os cenários A e B consideram a aplicação de pavimentos permeáveis de diferentes materiais (concreto poroso e concreto asfáltico poroso, respectivamente). Estes materiais foram experimentados nos estudos de Pinto (2011), os quais forneceram parâmetros suficientemente satisfatórios para as simulações planejadas. Os cenários C e D representam a combinação da aplicação de uma trincheira de infiltração com as condições descritas A e B. Em E, busca-se representar a área de estudo nas condições atuais.

Os principais resultados avaliados foram os valores de escoamento superficial (runoff) e vazão resultante para cada um dos cenários.

4.4. PARÂMETROS DO SWMM

Conforme discutido no item 3.3, o SWMM é um software capaz de simular precipitações em áreas de tamanhos variados, desde bacias inteiras, até bacias menores, como bairros. A precisão da simulação será influenciada principalmente pela quantidade de sub-bacias e quão precisas e detalhadas são suas características, fato válido para os demais parâmetros, descritos nos itens a seguir conforme instruído pelo Manual do Usuário do SWMM (EPA, 2010).

De forma resumida, o roteiro de configuração de uma simulação no SWMM se inicia determinando as características padrão das sub-bacias, condutos, nós e suas nomenclaturas de identificação. Em seguida, deve ser inserida uma série temporal de precipitação, e associá-la a um pluviômetro. Deve-se então desenhar a representação das sub-bacias, junções e condutos, atribuindo a cada sub-bacia um pluviômetro e seu nó de saída, bem como identificar o exutório final do sistema. A partir daí, parte-se para a etapa de entrada de dados específicos de cada elemento do sistema representado, como dimensões da sub-bacia, rugosidade das superfícies, inserção de dispositivos LID, entre outros descritos neste capítulo.

Modelada toda a região de estudo e seu sistema de drenagem, a simulação é iniciada e gera então um relatório contendo, entre outras informações: um resumo das características selecionadas para os componentes do sistema; indicações de nós e condutos instáveis; além da quantificação do escoamento superficial e das vazões geradas.

4.4.1. Sub-bacias

Entre os dados de entrada relativos às sub-bacias necessários para os cálculos de vazão, as proporções de áreas permeável e impermeável do terreno são de extrema importância. Uma vez que o SWMM não se trata de um software de dimensionamento de sistemas, e, portanto, não trabalha com um sistema de medidas automático, é necessário inserir os dados de dimensão de todos os elementos para que estes sejam considerados nos cálculos de vazão. As dimensões requisitadas serão obtidas através da ferramenta “medir distância” do aplicativo Google Earth.

Por conta da distribuição topográfica do terreno, optou-se por dividir as sub-bacias deste estudo em seis áreas. A1, A2 e A3 representam as porções relativamente planas, referentes à locais de estacionamento e tráfego de veículos. V1, V2 e V3 representam áreas de alta declividade (barrancos), acessos de pedestres e áreas de vegetação. Tais classificações estão ilustradas no croqui exibido na Figura 11, onde cada sub-bacia é representada por um pequeno quadrado preto e tem seu entorno delimitado pelas linhas verdes e amarelas.

Figura 11 - Croqui da divisão de sub-bacias produzido no SWMM.



Fonte: Adaptado de Google Maps.

Partindo de A1, os escoamentos resultantes de cada sub-bacia são direcionados à bacia diretamente inferior, e então somados e direcionados à próxima sub-bacia, consecutivamente, até atingirem V3, onde são então encaminhados à saída, representada pelo triângulo preto.

As declividades máximas de cada sub-bacia foram obtidas analisando o perfil topográfico do terreno, e dividindo-se a variação da altitude de cada sub-bacia pelo seu comprimento.

Além das características geométricas e topográficas do terreno, é necessário indicar qual método de infiltração será utilizado para calcular a parcela da precipitação que é percolada nas áreas permeáveis. O método do número de curva CN do Soil Conservation Service (1972) categoriza para diferentes tipos de solos um valor de CN, variável de 0 a 100, conforme sua permeabilidade, cobertura vegetal, textura de superfície e umidade antecedente do solo, bem como considerando a diversidade de grupos hidrológicos de solos (DNIT, 2005).

Para a determinação do CN do terreno, utiliza-se os valores tabelados pelo SCS para condição de umidade antecedente II (média), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Número de curva (CN) para diferentes condições do complexo hidrológico.

Solo - Cobertura Vegetal					
Para Condição de Umidade Antecedente II (Média) $E I_s = 0,2s$					
Cobertura Vegetal	Condição de Retenção Superficial	Grupo Hidrológico do Solo			
		A	B	C	D
Terreno não Cultivado com Pouca Vegetação	Pobre	77	86	91	94
Terreno Cultivado	Pobre	72	81	88	91
	Boa	51	67	76	80
Pasto	Pobre	68	79	86	89
	Boa	39	61	74	80
Mata ou Bosque	Pobre	45	66	77	83
	Boa	25	55	70	77
Área Urbana	Pobre	74	80	87	90
	Boa	70	76	83	86

Fonte: DNIT (2005).

Após definidas as características gerais das sub-bacias, é preciso configurar, dentro de cada uma delas, se há ou não a presença de dispositivos LID, bem como determinar como estes estão distribuídos dentro da região selecionada. Para isso, é preciso definir a largura de cada unidade de dispositivo, a área total que ele ocupa, a quantidade de unidades de dispositivo a serem utilizadas, os percentuais de áreas permeável e impermeável por ele tratadas e o direcionamento do fluxo por ele coletado. Tais configurações são definidas de acordo com as necessidades de projeto.

4.4.2. Pluviômetros

Os dados de entrada necessários referentes a precipitação são configurados pelos pluviômetros no programa. Neles, deve-se inserir, além dos rótulos de identificação, uma série temporal de um evento de chuva e seus respectivos valores de precipitação, conforme exibido na Figura 12. Tal distribuição temporal resulta num histograma.

Figura 12 - Editor de série temporal de precipitação do SWMM (valores exemplo).

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
	0	0
	1	12.7
	2	25.4
	3	19.05
	4	12.7
	5	6.35
	6	0

Fonte: Autora.

A metodologia de determinação da precipitação de projeto seguiu as orientações do Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, 2005) e no Manual de Drenagem Urbana de Curitiba (IPPUC; COBRAPE; 2018).

Inicialmente deve-se definir a intensidade da chuva de projeto (em mm/h ou em m³/s) e duração do evento de chuva a ser analisado. Tratando-se de um estudo

de drenagem, o interesse principal é de garantir que o sistema proposto tenha capacidade suficiente para suportar chuvas convectivas, caracterizadas por serem intensas e de curta duração.

A fim de atender à exigência do SWMM de uma série temporal de precipitação para realizar a simulação, é necessário distribuir a precipitação máxima registrada em intervalos de tempo. Para tal fez-se uso do Método dos Blocos Alternados, no qual a intensidade máxima de precipitação é distribuída ao longo do tempo com base na duração da chuva, no valor do tempo de concentração da bacia, no tempo de retorno e na equação IDF para a localidade desejada.

A intensidade média da precipitação para o local foi calculada utilizando a equação IDF de Fendrich para a região de Curitiba, relativa ao posto do Prado Velho (1989), exibida pela Equação 1, onde a intensidade da precipitação i é dada em mm/h, o tempo de retorno T em anos e a duração da precipitação t é dada em minutos.

$$i = \frac{3221,07 \cdot T^{0,258}}{(t + 26)^{1,01}} \quad (1)$$

Para realizar a distribuição pelo método dos blocos alternados, calcula-se a intensidade média considerando a duração da precipitação t igual ao valor do tempo de concentração da bacia t_c , que é dado, em minutos, pela Fórmula de Kirpich (Equação 2), publicada no “California Culverts Practice”, e originalmente desenvolvida para bacias menores que 0,8 km² (DNIT, 2005).

$$t_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{\Delta h}\right)^{0,385} \quad (2)$$

Na Equação 2, L representa o comprimento do talvegue da bacia e Δh o desnível total do terreno. Neste projeto, o desnível do terreno de cada sub-bacia e seus respectivos comprimentos horizontais foram obtidos através do levantamento topográfico apresentado em 4.2.

Em seguida, utiliza-se repetidamente a Equação 1 para calcular a intensidade em cada intervalo de tempo, variando-se o valor de t e correspondendo-o a cada intervalo até atingir-se a duração total desejada. Essas intensidades são então transformadas em alturas de chuva e representam os valores acumulados até o último intervalo. Os incrementos entre um valor acumulado e outro são calculados e rearranjados, de forma que o maior valor se localize no centro da duração total da chuva, e os demais sejam dispostos em ordem decrescente, sempre um à direita e

um à esquerda do bloco central, alternadamente (BEMFICA, GOLDENFUM, SILVEIRA, 2000).

Na distribuição temporal das precipitações, Vergüts (2016) recomenda que, para hietogramas com duração total de 2 horas, sejam adotados intervalos de 5 a 10 minutos e, acima de 2 horas, intervalos entre 10 e 20 minutos. Já o Manual de Drenagem de Curitiba (2018) recomenda intervalos inferiores a um quinto do valor do tempo de concentração.

Nos projetos de drenagem geralmente necessita-se de obter as intensidades de chuva de curta duração, normalmente menor que um dia (BACK, 2014), e de grande intensidade (chuva convectiva). Buscando representar esse tipo de situação, foi projetada a distribuição para uma precipitação de 3,5 horas de duração com tempo de retorno de 100 anos e intervalos de 30 minutos.

4.4.3. Controles LID

Buscando avaliar materiais de fácil acesso no mercado e referenciados na literatura, os dois diferentes tipos de pavimentos a serem simulados serão o concreto poroso (BCP) e concreto asfáltico poroso (CPA). As propriedades físicas destes materiais relevantes para a modelagem no SWMM serão obtidas considerando-se estudos experimentais encontrados na bibliografia, especialmente nos trabalhos de Pinto (2011) e Castro (2011).

Quanto à trincheira de infiltração, será modelada uma trincheira a ser instalada ao longo da sub-bacia V3, por se tratar da área de menor cota topográfica e, portanto, propícia para receber os escoamentos vindos das sub-bacias superiores.

Foi realizado um pré-dimensionamento dos pavimentos permeáveis e da trincheira de infiltração a serem inseridos no modelo, para o qual utilizou-se a metodologia de dimensionamento sugerida por Silveira e Goldenfum (2007), bem como orientada pelo Manual de Drenagem do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba (2018), descritas nos itens a seguir.

a) Pavimentos Permeáveis

A aplicação de pavimentos permeáveis foi idealizada ao longo de toda a área de circulação de veículos das sub-bacias A1, A2 e A3, reservando-se uma margem

de vegetação ao seu redor. Os itens mandatórios a serem preenchidos para caracterização do dispositivo dentro do SWMM são os de superfície, do material do pavimento e da camada de armazenamento (subleito) – sendo estes últimos obtidos pelo pré-dimensionamento do sistema. Nesta fase, foca-se principalmente na definição da espessura da camada de armazenamento, normalmente preenchida com brita.

Inicialmente deve ser calculado o volume de acumulação **V** (em mm) sobre a área em planta do dispositivo, dada pela Equação 3, já configurada com os valores característicos para a região de Curitiba. Nesta expressão, **T** é o tempo de retorno, em anos; **q_{s,1}** é a vazão de saída constante do dispositivo, fixada pela administração municipal da Região Metropolitana de Curitiba no valor de 27 l/(s.ha) para pavimentos porosos que não infiltram e direcionam à uma rede pluvial; **β₁** é o coeficiente adimensional que relaciona a porção de área ocupada pelo próprio pavimento **A_p** (em m²) com a área de contribuição exógena **A** (em m²) ponderada pelo coeficiente de escoamento **C**, de modo que **β₁** pode ser descrito conforme a Equação 4.

$$V = (7,11 \cdot \sqrt{\beta} \cdot T^{0,129} - 0,64 \cdot \sqrt{q_{s,1}})^2 \quad (3)$$

$$\beta_1 = \frac{A_p + (C \cdot A)}{A_p} \quad (4)$$

O Manual de Drenagem de Curitiba (2018) traz valores recomendados para o coeficiente de escoamento **C**, exibidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de Coeficiente de Escoamento (C) para algumas superfícies.

Tipo de superfície	Valor Recomendado
Concreto, asfalto e telhado	0,95
Paralelepípedo	0,70
Blockets	0,78
Concreto e asfalto poroso	0,03
Solo compactado	0,66
Metas, parques e campos de esporte	0,10
Gramma solo arenoso	0,10
Gramma solo argiloso	0,20

Fonte: Adaptado do Manual de Drenagem do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba (2018).

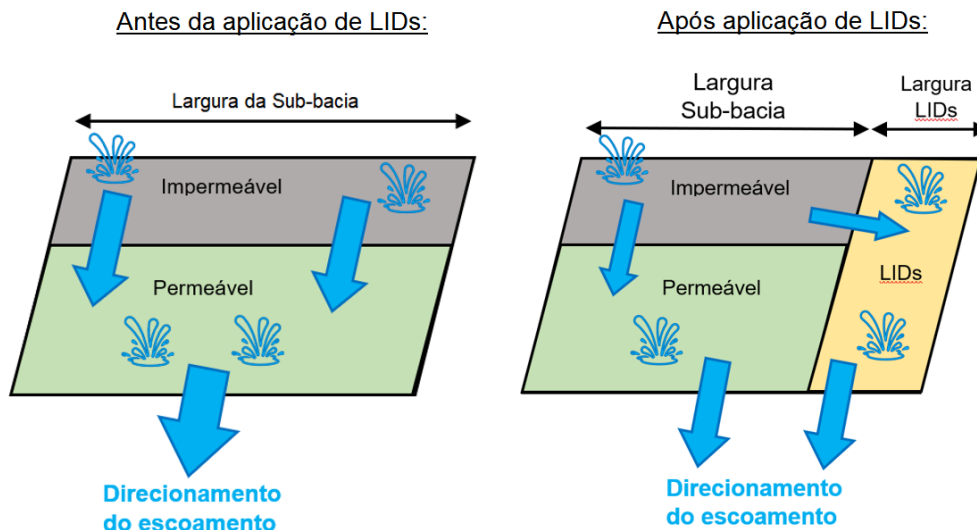
Em posse do volume de acumulação V (em mm), calcula-se a espessura H_1 da camada porosa do pavimento (em cm) através da Equação 5, onde η representa a porosidade do material estruturante da camada de armazenamento.

$$H_1 = \frac{V}{10 \cdot \eta} \quad (5)$$

Além das opções descritas, é possível ainda configurar no modelo uma camada de solo entre o pavimento e o subleito, assim como um dreno para canalização da água percolada pelas camadas superiores, conforme demonstrado no Quadro 1, entretanto, estas funcionalidades não serão consideradas neste estudo.

Para inserir os controles LID nas sub-bacias, é necessário considerar um ajuste nas propriedades relativas ao porcentual de áreas impermeáveis e à largura do escoamento, para compensar a área total da sub-bacia que, após a inserção dos dispositivos, está ocupada por eles. A Figura 13 ilustra o exemplo do tipo de adaptação a ser feita nas proporções de áreas permeáveis.

Figura 13 - Configuração do direcionamento dos escoamentos gerados na simulação frente à aplicação de dispositivos LID.



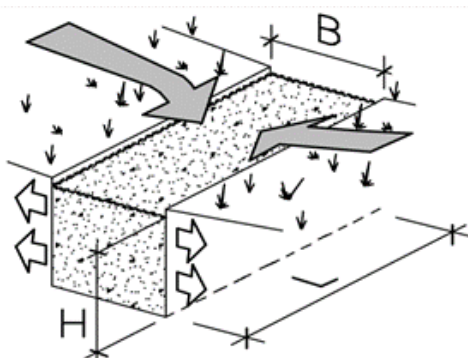
Fonte: Adaptado de EPA (2010).

Tais ajustes devem ser feitos dentro dos editores de propriedades das sub-bacias, onde também é possível configurar mais detalhadamente como os pavimentos irão ocupar a área, se haverá alguma porcentagem de saturação inicial, entre outros fatores, conforme anteriormente exposto na seção de parâmetros das sub-bacias.

b) Trincheiras de Infiltração

A trincheira de infiltração foi dimensionada para ser instalada ao longo da sub-bacia V3, que é a sub-bacia de menor altitude do estacionamento, e, portanto, mais propensa a receber os escoamentos vindos das sub-bacias superiores. O esquema ilustrado na Figura 14 demonstra as variáveis geométricas envolvidas no dimensionamento.

Figura 14 - Representação esquemática de trincheira de infiltração.



Fonte: SILVEIRA, GOLDENGUM (2007).

As dimensões de comprimento **L** e largura **B** (ambos em metros) da trincheira são inicialmente definidas conforme a necessidade arquitetônica, portanto, assim como no caso dos pavimentos permeáveis, cabe ao dimensionamento determinar a profundidade H_2 da trincheira que atenda às dimensões escolhidas.

A profundidade H_2 (em mm) é definida pela Equação 6, em que η corresponde à porosidade do material de enchimento da trincheira e k_1 e k_2 são descritos pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$H_2 = \left[\frac{k_1(k_2 - \sqrt{\eta})}{\eta - k_2^2} \right]^2 \quad (6)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} T^{b/2} \quad (7)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{q_{s,2}} \quad (8)$$

Pode-se descrever γ como a razão entre área de percolação e volume do dispositivo, dada na Equação 9 em mm^{-1} ; β_2 é a grandeza adimensional que relaciona o coeficiente de escoamento **C**, a área contribuinte **A** e a área do dispositivo, conforme

a Equação 10; e $q_{s,2}$ é a vazão de saída constante em mm/h, a qual pode ser obtida pelo produto da condutividade hidráulica saturada do solo K_{sat} (mm/h) por um coeficiente redutor devido à colmatação α (Equação 11).

$$\gamma = \frac{2.L}{L.B} = \frac{2}{B} \quad (9)$$

$$\beta 2 = \frac{C.A}{B.L} \quad (10)$$

$$q_{s,2} = \alpha.K_{sat} \quad (11)$$

O solo que recebe a trincheira deve ser natural (não compactado ou aterrado) e deve ter sua condutividade hidráulica saturada K_{sat} determinada através de ensaios de infiltração. A literatura recomenda valores da ordem de 15 a 60 mm/h, com α entre 0,1 e 0,5 (IPPUC, 2018). Os estudos de Liebl e Gibson (2016) em amostras de solo do estacionamento da UTFPR Ecoville constataram valor de K_{sat} para amostras indeformadas de 10,33 mm/h, o qual será adotado para os cálculos deste trabalho, bem como o valor de 0,5 para α , considerando um cenário pessimista de alta taxa de colmatação do solo.

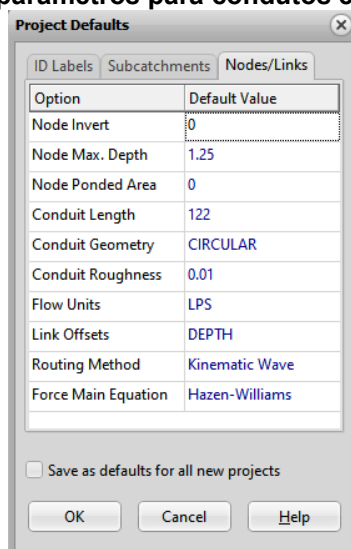
A trincheira idealizada para este projeto possui um terço da largura da sub-bacia V3 e tem mesmo comprimento. Essas dimensões foram selecionadas considerando que o dispositivo será instalado no meio da região, deixando assim espaço lateral para a instalação duas faixas de grama em ambos os lados da trincheira, as quais exercerão papel de barragem contra resíduos que possam vir a acelerar o processo de colmatação do dispositivo, conforme as recomendações de Ciria (2007).

4.4.4. Conduitos, Nós e Exutórios

As configurações-padrão dos condutores podem ser observadas na Figura 15. Dentro de cada elemento, é possível aumentar o grau de personalização, assim como para as sub-bacias. Neste estudo o escoamento gerado pelo armazenamento dos sistemas será considerado livre, sem o uso de nenhuma tubulação. Portanto, será configurada apenas uma saída genérica a fim de direcionar estas vazões e quantificar

o volume total precipitado resultante após a passagem da água pelos dispositivos propostos.

Figura 15 - Editor de parâmetros para condutos e nós no SWMM



Fonte: Autora.

5 RESULTADOS

Os parâmetros para cada parcela da simulação foram levantados seguindo a metodologia de cálculo abordada no capítulo 4 e buscando-se complementação na bibliografia. Os resultados obtidos são descritos a seguir.

5.1. PARÂMETROS DAS SUB-BACIAS

Através das medições virtuais realizadas com a ferramenta Google Maps, obteve-se, para cada sub-bacia, sua respectiva área, largura, declividades e porcentagem de superfície atendida por dispositivo LID. Além destas propriedades, para a determinação do valor de CN, seguiu-se a classificação indicada pelo Manual de Hidrologia Básica (DNIT, 2005) na Tabela 3, e foi identificado que a cobertura vegetal do terreno se enquadra como “Área urbana – pobre”, uma vez que o terreno se encontra em área densamente ocupada, com 50% a 75% de superfícies impermeáveis. O grupo hidrológico característico da região é o C, por tratar-se de um solo argiloso e arenoso. A lista completa de parâmetros levantados para cada sub-bacia está disposta na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores utilizados nos parâmetros das sub-bacias.

Hydrology > Subcatchments >							
Propriedade	Unidade	A1	V1	A2	V2	A3	V3
Rain Gage	-	PLUV1					
Outlet	-	V1	A2	V2	A3	V3	OUT1
Area	ha	0,231	0,052	0,129	0,054	0,065	0,058
Width	m	32	5	13	5	9	5
% Slope	%	1,93%	3,17%	2,70%	1,90%	2,72%	0,70%
% Imperv	%	0	2	0	0	0	0
N-imperv	-	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
N-perv	-	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,15
Dstore-Imperv	mm	0	0	0	0	0	0
Dstore-Perv	mm	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
%Zero-Imperv	%	100	100	100	100	100	100
Subarea routing	-	OUTLET					
Percent routed	%	100	100	100	100	100	100
Infiltration data >		CURVE NUMBER					
Curve number	-	87	87	87	87	87	87
Drying time	days	2	2	2	2	2	2
Groundwater		NO					
Snow packs		NO					
LID Controls		Variáveis conforme o cenário					

Fonte: Autora.

Para as informações que envolvem a disposição dos controles LID dentro das sub-bacias, foram utilizadas as configurações expostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Configurações de distribuição de dispositivos dentro das sub-bacias.

Tipo de configuração	Sub-bacia					
	A1	V1	A2	V2	A3	V3
LID Type	Permeable Pavement					Infiltration Trench
LID occupies full sub	não	não	não	não	não	não
Area of each unit (sq m)	2063,4	25	1290	25	478,4	175
Number of units	1	2	1	2	1	1
% of sub occupied	89,3	9,615	100	9,259	82,5	30,2
Surface width per unit (m)	110	5,5	108	5	106	105
% initially saturated	0	0	0	0	0	0
% of impervious area treated	0	0	0	0	0	0
% of pervious area treated	100	0	100	0	0	0
Return all outflow to pervious area	não	não	não	não	não	não

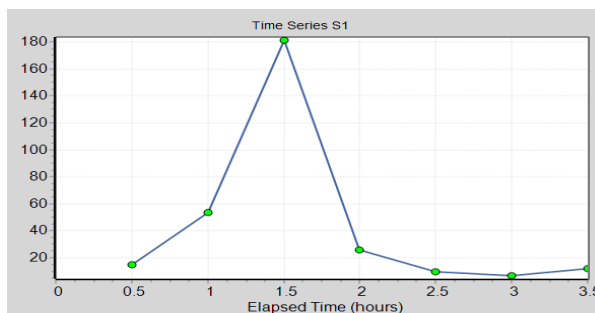
Fonte: Autora.

5.2. CÁLCULOS DE PARÂMETROS DOS PLUVIÔMETROS

Para determinar-se o tempo de concentração médio do terreno, foram calculados os tempos de concentração de cada sub-bacia através da Equação 2, e em seguida feita uma média ponderada dos valores obtidos. Usou-se como fator de ponderação a proporção da área de cada sub-bacia para a área do terreno total, fornecendo assim um tempo de concentração médio de 1,53 min.

Adotando o valor de t igual à t_c , a intensidade de precipitação média foi então obtida para a cidade de Curitiba através da Equação 1, resultando no valor de 371,36 mm/h. Distribuindo-se esta precipitação pela metodologia dos blocos alternados para a duração de 3,5 horas, e adotando-se intervalos de tempo 30 minutos, foi gerado o hietograma ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Hietograma da chuva de projeto



Fonte: Autora.

5.3. CÁLCULO DE PARÂMETROS DOS CONTROLES LID

Para o dimensionamento dos pavimentos permeáveis, foram virtualmente medidas as áreas contribuintes e do pavimento, e, tratando-se de um terreno já em utilização para tráfego de veículos, adotou-se o valor de C recomendado pela Tabela 3 para solos compactados. Dessa forma, utilizando o levantamento de áreas disposto na Tabela 6, obteve-se os valores de β_1 em 1,079 e do volume de acumulação V em 129,53 mm, através das Equações 4 e 3, respectivamente.

Considerando-se para a camada de armazenamento dos pavimentos permeáveis a utilização de brita 1, de porosidade igual a 0,38 (SILVEIRA; GOLDENGUN; 2007), obteve-se a espessura H_1 para os pavimentos BCP e CPA em 37,1 cm através da Equação 5. Os valores obtidos de espessura da camada de reservatório, bem como a relação dos demais parâmetros dos pavimentos a serem inseridos na simulação podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores utilizados nos parâmetros dos pavimentos permeáveis BCP e CPA.

Hydrology > LID Controls				
Propriedade	Unidade	Valores		Referência
LID Type	-	Permeable Pavement		
> Surface		BCP	CPA	
Berm Height	mm	0	0	
Vegetation volume fraction	-	0	0	
Surface Roughness (n manning)	-	0,013	0,013	Manual SWMM (2010)
Surface slope	%	0	0	
> Pavement		BCP	CPA	
Thickness	mm	50	50	
Void Ratio	-	0,36	0,36	PINTO (2011)
Impervious surface fraction	-	0	0	
Permeability	mm/hr	3312	5760	PINTO (2011)
Clogging factor	-	0	0	
Regeneration Interval	days	0	0	
Regeneration Fraction	-	0	0	
> Soil		BCP	CPA	
Thickness	mm	70	70	CASTRO (2011)
Porosity	-	0,437	0,47	CASTRO (2011)
Field capacity	-	0,062	0,062	
Wilting point	-	0,024	0,024	
Conductivity (Ko)	mm/hr	4,74	4,74	
Conductivity slope	-	45	45	

Suction head	mm	1,93	1,93	
> Storage		BCP	CPA	
Thickness H_1	mm	37,1	37,1	
Void Ratio	-	0,17	0,49	NETO (2013); e CASTRO (2011)
Seepage Rate	mm/hr	10,33	10,33	LIEBL, GIBSON (2016)
Clogging factor	-	0	0	
> Drain (não utilizado - valores zerados)				

Fonte: Autora.

Para o dimensionamento das trincheiras, utilizando os valores sugeridos pela literatura, obteve-se um $q_{s,2}$ de 5,165 mm/h através da Equação 11. O dispositivo simulado possui comprimento igual à da sub-bacia V3, e largura de 1,67 m (um terço da largura da sub-bacia), resultando numa superfície de 175 m². O coeficiente de escoamento adotado para o tipo de superfície da região V3 foi o correspondente ao de “solo compactado”, fornecendo, pela Eq. 10, β_2 de 21,561. Dessa forma, considerando os parâmetros da curva IDF para a região de Curitiba, substituindo-se os valores na Eq. 7 obteve-se um k_1 de 61,63. Com um gama de 1,2/mm (Eq. 9), k_2 resultou em 1,64 (Eq. 8). Assim, considerando a porosidade da brita em 0,38 (SILVEIRA, GOLDENGUN; 2007), através da Equação 6 obteve-se a profundidade da trincheira de infiltração idealizada em 74,67 cm.

Os demais parâmetros utilizados para a configuração da trincheira de infiltração e suas respectivas referências bibliográficas podem ser consultados na Tabela 7. Valores não referenciados foram obtidos por medição ou pelos cálculos de dimensionamento.

Tabela 7 - Valores utilizados nos parâmetros da trincheira de infiltração.

Hydrology > LID Controls > TRIN1			
Propriedade	Unidade	Valores	Referência
> Surface			
Berm Height	mm	0	
Vegetation volume fraction		0	
Surface Roughness (n manning)		0,024	McCuen, R. et al. (1996)
Surface slope	%	0	
> Storage			
Thickness H_2	mm	74,67	
Void Ratio		0,612903	
Seepage Rate	mm/hr	10,33	LIEBL, GIBSON (2016)
Clogging factor		0	
> Drain (não utilizado - valores zerados)			

Fonte: Autora.

5.4. RELATÓRIOS DE SIMULAÇÃO

Depois de levantados todos os parâmetros, modelados os sistemas e simuladas as precipitações, o SWMM forneceu um relatório detalhado do comportamento de cada simulação, do qual destacou-se os principais resultados exibidos na Tabela 8. Todas as quantidades são expressas em altura (mm) sobre a área superficial unitária.

Tabela 8 - Resumo dos resultados de infiltração, escoamento superficial, armazenamento e erro de continuidade de cada simulação.

Indicador	CENÁRIO A	CENÁRIO B	CENÁRIO C	CENÁRIO D	CENÁRIO E
Perda por infiltração (mm)	32,412	32,027	33,376	31,384	21,835
Escoamento superficial (mm)	105,847	106,339	105,09	102,946	128,86
Armazenamento final (mm)	25,497	25,854	25,338	29,908	2,046
Erro de continuidade (%)	-7,088	-7,391	-7,119	-7,403	-0,654

Fonte: Autora.

De maneira geral, os cenários simulados considerando a aplicação de pavimentos permeáveis do tipo BCP e CPA, e de uma trincheira de infiltração ao longo da parte mais baixa do terreno apresentaram desempenho de controle de escoamento e armazenamento da precipitação superior àquele obtido pela simulação sem a utilização de tais ferramentas.

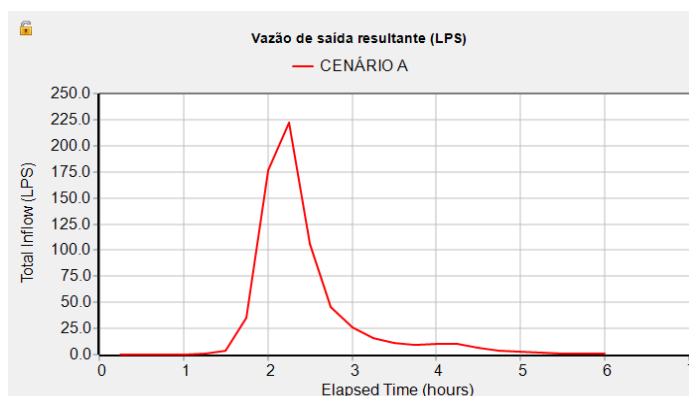
Analisando as perdas por infiltração do terreno, observa-se que todos os cenários simulados com dispositivos LID promoveram maior infiltração da água no solo do que as condições de cobertura atuais. O cenário C (pavimento BCP + Trincheira de infiltração) foi o que apresentou melhor desempenho neste indicador, aumentando em cerca de 52,9% os valores de infiltração total quando comparado aos resultados sem a aplicação de nenhum dispositivo.

No quesito redução do escoamento superficial, todas as simulações que contaram com algum tipo de alteração da cobertura atual apresentaram melhora no escoamento superficial do terreno, com reduções variando entre 17% e 20%. O cenário D (pavimento CPA + Trincheira de infiltração) apresentou o melhor desempenho entre as quatro combinações de dispositivos, sendo também a situação de maior capacidade de armazenamento.

Os erros de continuidade representam a diferença percentual entre duas somas: a do armazenamento inicial com a vazão total de entrada; e a do armazenamento final com a vazão de saída para todo o sistema de drenagem. Simulações com intervalos de tempo muito longos, ou condutos muito curtos, comumente apresentam valores excessivos deste tipo de erro. Para que os resultados da análise do SWMM sejam considerados válidos, o manual do programa sugere limites da ordem de 10%, portanto, os valores apresentados pelas simulações realizadas neste estudo são considerados válidos para interpretação.

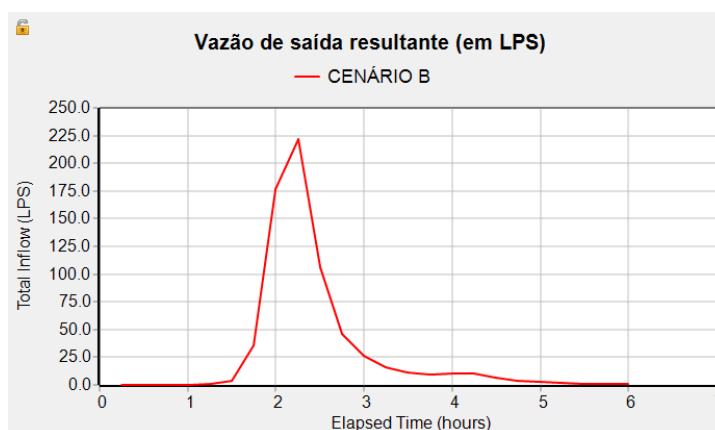
Ainda que os valores absolutos de escoamento superficial tenham atingido resultados promissores, houve pouca variação nos resultados de vazão de saída da área de estudo. Os gráficos das Figuras 16 a 20 apresentam o comportamento da vazão ao longo do tempo em cada cenário. Neles, eixo horizontal representa o tempo de precipitação decorrido, em horas, e o eixo vertical traduz os valores de vazão total em litros por segundo.

Figura 16 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com BCP



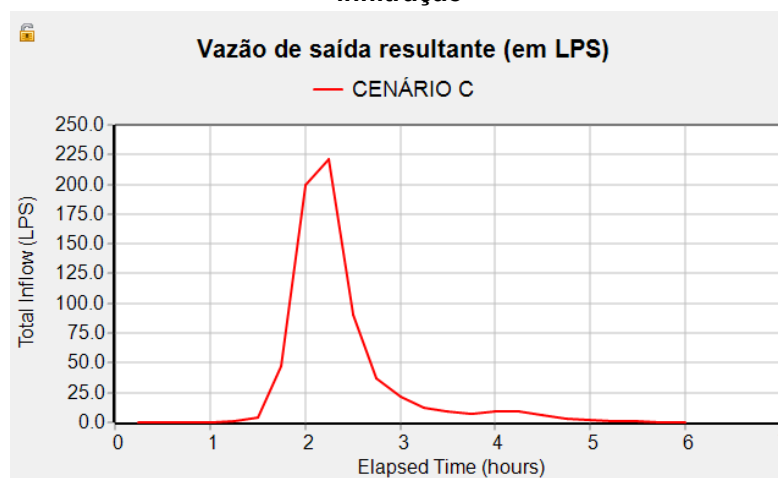
Fonte: Autora.

Figura 17 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com CPA



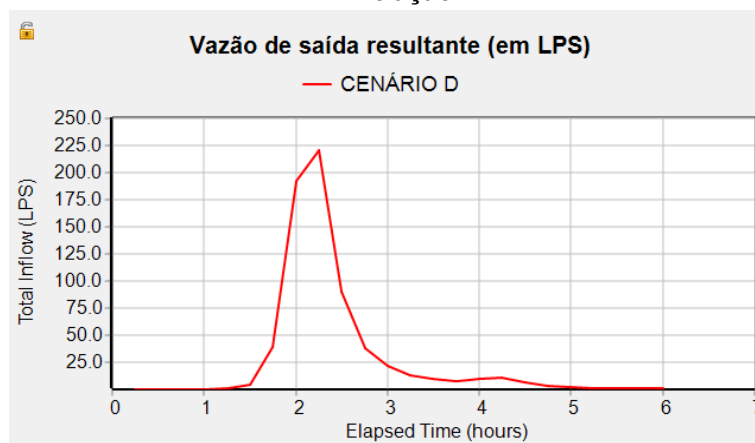
Fonte: Autora.

Figura 18 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com BCP associado à trincheira de infiltração



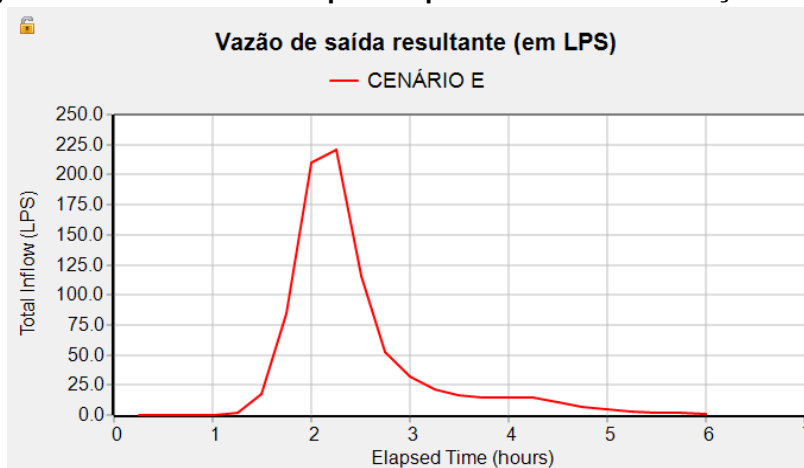
Fonte: Autora.

Figura 19 - Gráfico de vazão por tempo do cenário com CPA associado à trincheira de infiltração



Fonte: Autora.

Figura 20 - Gráfico de vazão por tempo do cenário de condições atuais



Fonte: Autora.

Observa-se que o comportamento geral da curva de vazão x tempo e seu valor de pico foram quase idênticos em todos os cenários simulados. Nos casos com aplicação apenas de pavimentos permeáveis, pode-se constatar singelo retardo no alcance da vazão de pico da simulação, visível na marca de tempo de duas horas. O valor máximo de vazão de pico para todos os eventos foi de aproximadamente 220 litros por segundo.

A fim de fornecer um valor de referência para avaliar o quanto os resultados da previsão do SWMM diferem daqueles fornecidos pelos métodos usuais de cálculo para bacias desta dimensão, a vazão foi calculada para a área de estudo utilizado o Método Racional, o qual é regido pela fórmula da Equação 12, onde C é o coeficiente de escoamento, I é a intensidade da precipitação em mm/hr e A é a área da bacia em km².

$$Q = 0,27 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (12)$$

Considerando as sub-bacias A1, A2 e A3 como “solo compactado”, e V1, V2 e V3 como “grama solo argiloso”, conforme a Tabela 3, obteve-se a vazão pelo método racional de 281,12 litros por segundo. Tratando-se de um método simplificado para bacias pequenas aqui utilizado apenas fins de verificação, o resultado obtido é coerente com o valor de vazão apresentado pelo SWMM, corroborando assim para a validade das informações trazidas pelas simulações.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo determinou as quantidades de escoamento superficial, armazenamento, infiltração e vazão geradas por uma chuva convectiva no estacionamento da UTFPR, simulando em ambiente virtual um evento deste tipo de precipitação ocorrendo sobre as condições atuais do terreno, além de sobre quatro outras propostas de cobertura superficial com utilização dispositivos LID para amortecimento de vazões.

Os pavimentos do tipo BCP (concreto poroso) e CPA (concreto asfáltico poroso) tiveram suas características físicas levantadas, bem como o dispositivo trincheira de infiltração e, através da coleta de informações sobre o terreno e suas características geográficas e topográficas, foi possível a realização do pré-dimensionamento de cada controle LID especificamente para atender a área de estudo. Todos os dispositivos simulados apresentaram resultados satisfatórios como instrumentos auxiliares na drenagem da região, quando comparados às condições atuais do terreno.

Os resultados das simulações realizadas no software SWMM foram avaliados de acordo com três indicadores de desempenho: perda por infiltração; escoamento superficial; e armazenamento final. Além disso, observou-se o comportamento das vazões de cada cenário, constatando-se entre eles pouca variação dos resultados obtidos.

O pavimento permeável do tipo CPA associado à trincheira apresentou redução de escoamento superficial de 20% e aumentou em quase quinze vezes a capacidade hidráulica de armazenamento do solo em comparação ao terreno de solo arenoso-argiloso compactado com pouca cobertura vegetal, resultando, entre as hipóteses simuladas, o melhor desempenho para ambos os indicadores. Dessa forma, quando se analisa o desempenho dos sistemas com enfoque em armazenamento ou em escoamento superficial, a composição do CPA + trincheira (cenário D) é a mais indicada.

Quando avaliados os cenários em termos de perda por infiltração, a aplicação do BCP associado à trincheira apresentou o melhor desempenho. Entretanto, entre as duas hipóteses de aplicação o BCP (cenários A e C), nota-se que houve quase nenhuma mudança no resultado de escoamento superficial e, no quesito capacidade de armazenamento, o cenário A apresentou desempenho levemente superior. Dessa

forma, se a intenção da aplicação for para melhoramento do escoamento superficial ou armazenamento, o uso do pavimento BCP associado à trincheira de infiltração não é recomendado, uma vez que os resultados indicam que apenas a aplicação do pavimento é suficiente para atingir os mesmos resultados.

A utilização do software SWMM forneceu para cada cenário proposto valores de vazão, infiltração e escoamento das águas pluviais conforme esperado. Apesar de se tratar de uma ferramenta que permite muitas análises úteis, para garantir a acurácia dos resultados é essencial a correta configuração de todos os parâmetros a serem inseridos no modelo. Esses parâmetros por vezes possuem valores genéricos tabelados na literatura, porém muitos deles se tratam de valores obtidos por experimentação dos objetos em laboratório, o que torna o programa uma ferramenta de uso complexo e dispendioso quando esses dados não são de fácil acesso.

É importante ressaltar que o software SWMM é recomendado para análises de bacias grandes, complexas e de muitos hectares, normalmente se tratando de situações de macrodrenagem. Ainda que o estudo trate da análise uma bacia de dimensões inferiores, os resultados atenderam às expectativas iniciais, e com valores coerentes com as referências da literatura, sendo assim válidas as análises realizadas sobre eles.

Em estudos de drenagem, uma compreensão global das dinâmicas naturais entre a área de interesse e os fatores externos é essencial para obter análises assertivas que contribuam para a tomada de decisão. Neste estudo, o foco foi dado na análise do comportamento hidráulico da cobertura estacionamento individualmente, para tal assumindo que o entorno do terreno já é plenamente atendido pelo sistema de drenagem existente, e assim desconsiderando qualquer contribuição de vazão além da própria precipitação recebida sobre a região. É possível refinar e enriquecer os resultados obtidos nesta análise preliminar ao considerar-se, por exemplo, as contribuições reais das áreas de entorno nas vazões de saída, a influência de diferentes situações de climáticas, as particularidades e limitações do sistema atual de drenagem, entre outros fatores relevantes.

Foram aqui propostas algumas alternativas para tratamento da cobertura superficial do estacionamento da UTFPR Ecoville, buscando levantar e discutir estratégias de mitigação de cheias em escala de microdrenagem, avaliar possíveis ferramentas de análise destas estratégias e assim contribuir para a melhoria da

infraestrutura do local e demais regiões que enfrentem as mesmas ameaças. Algumas sugestões para estudos futuros com os mesmos objetivos podem contemplar:

- Avaliação da contribuição de vazões advinda da região de entorno no desempenho dos dispositivos;
- Avaliação da aplicação dos dispositivos sugeridos em área superior, sob mesmas condições, comparando a eficiência da metodologia com a amostra realizada neste estudo;
- Levantamento da rede de drenagem existente e avaliação do impacto da aplicação das medidas aqui sugeridas nas vazões e escoamentos recebidos;
- Experimentação dos materiais citados sob as mesmas e diferentes condições climáticas, analisando se seu desempenho é condizente com o proposto pela literatura;

REFERÊNCIAS

ADRIANO, A.D.; **Análise da drenagem urbana no loteamento Ecopark em Uberlândia-MG com uso do software SWMM**. 2021. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

ALESSI, F.; KOKOT, P.; GOMES, J. **Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso**. Da Vinci, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 139-156, 2006.

AZZOUT, Yolande; CRES, François-Noël; BARRAUD, Sylvie. **Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien**. Tec et doc, 1994.

BEMFICA, D. C. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 4, 2000.

Brattebo B. O., Booth D. B. (2003). **Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems**. Water Research, vol.37, 2003. p. 4311-4552.

CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

CASTRO, T. Q. **Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION. **Sustainable urban drainage systems - design manual for Scotland and Northern Ireland**. CIRIA C521.2000.

CRUZ, M. A. S; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. EM. **Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos–ABRH, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. Rio de Janeiro, 2005.

FARIA, T. N.; COELHO, L. M. G. **Análise da permeabilidade de quatro tipos de pavimentos permeáveis**. In: 29ª Feira Nacional de Saneamento e Meio Ambiente – FENASAN, 2017. Disponível em <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento36/TrabalhosCompletoPDF/IX-096.pdf>. Acesso em 22 ago. 2021.

FLETCHER, Tim D. et al. **SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage**. Urban water journal, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

FLORES, P. E.D. **Evaluation on the Hydrologic Effects after Applying an Infiltration Trench and a Tree Box Filter as Low Impact Development (LID) Techniques**. Journal of Korean Society on Water Environment, Volume 31, Issue 1, 2015. p.12-18.

GAMBARO, Matteo; TARTAGLIA, Andrea; VALENTI, Eleonora. THE DESIGN IN THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF STORMWATER: THE CASE STUDY OF THE PROVINCE OF VARESE (ITALY). In: 1° International Conference on Urban Sustainability and Resilience. University College London, 2012. p. 1-14.

IBGE (2013). Pesquisa de Informações Básicas Municipais - MUNIC. **Perfil dos municípios brasileiros: 2013**. Rio de Janeiro, 2013, p. 106-111.

IBGE; CEMADEN (2018). **População em áreas de risco no Brasil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso: 30 de julho de 2021.

IPH. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. Departamento de Esgotos Pluviais da PMPA. 2005.

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba; COBRAPE Cia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. **Manual de Drenagem**. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba, v. 4, 2018. 152 p.

JAMES, Rob; JAMES, William; VON LANGSDORFF, Harald. **Stormwater management model for environmental design of permeable pavement**. Journal of Water Management Modeling, 2001.

Kolokotsa D., Santamouris M., Zerefos S.C. (2013). **Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions**. Solar energy, Vol. 95, September, 2013. 430p.

LIEBL, Thiago Daniel; GIBSON, Valquíria Rates. **Mapeamento do solo da sede Ecoville da UTFPR com relação à concentração de radônio ²²²Rn**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MARTIN, P. et al. **Sustainable urban drainage systems: design manual for Scotland and Northern Ireland**. C521. CIRIA, London, UK, 2000.

MCCUEN, R. H.; JOHNSON, P. A.; RAGAN, R. M. **Highway hydrology: Hydraulic design series No. 2**. 1996.

NABESHIMA, C. K. Y.; ORSOLIN, K.; SANTOS, R. K. X. **Análise Comparativa Entre Sistemas de Pavimentação Urbana Baseados em Concreto Asfáltico e Blocos de Concreto Intertravados (Pavers)**. 2011. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia de Produção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

NETO, H. M. P. **Calibração e aplicação de um modelo SWMM/LID para pavimentos permeáveis**. 2013. 79 p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás.

PINTO, L.L.C.A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.

Rezende, S.C. (org.); Andrade Neto, C. O.; Campos, H. K. T.; Castro, J. E.; Cordeiro, B.; Galvão, E. A.; Galvão, A. K. A.; Gorsdorf, L. F.; Inojosa, R. M.; Montenegro, M. H.; Moraes, A. C. R. ; Moura, R. M. G. R.; Paim, J. S.; Peixoto, J. B.; Souza, C.; Teixeira, J. B.; Wartchow, D., (autores). **Cadernos temáticos para o panorama do saneamento básico no Brasil**. Brasília: Ministério das Cidades/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2011.

RIBEIRO, Wagner Costa. **Riscos e vulnerabilidade urbana no Brasil**. Scripta Nova, v. 14, p. 65, 2010.

EPA, L. A. **Storm water management model User's manual Version 5.0**. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 2010. 285 p.

SOUZA, F. A. S; VIEIRA, V. R; SILVA, V. P. R; MELO, V. S; GUEDES, R. W. S. *et al.* **Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, n. 02, p. 430-439, 2016.

SCHUELLER, T. 1987. **Controlling Urban Runoff** : A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs.

SCS, 1975. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington: U.S. Dept. Agr. (Technical Release, 55).

SCS, 1986. Hydrology nº 4 – Time of concentration. NENTC Chester – Pennsylvania U.S. Dept. Agr. (Technical Note).

SETZER, J.; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal, nas condições do estado de São Paulo**. Boletim Técnico DAEE, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 81-104, 1979.

TASSINARI, L. C. S. **Dimensionamento de sistemas de drenagem pluvial utilizando métodos de baixo impacto**. 2014. 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, 2003.

VERGÜTZ, L. A. A. **Análise da implantação de reservatórios de retenção na bacia São Pedro e modelagem hidrodinâmica da Avenida Governador Rondon Pacheco**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

VIRGILIIS, A.L.C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 185 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WHELANS, C.; MAUNSELL, Halpern Glick; THOMPSON, P. **Planning and management guidelines for water sensitive urban (residential) design**. Department of Planning and Urban Development of Western Australia, Perth, Australia, 1994.

WONG, Tony HF. **Water sensitive urban design-the journey thus far**. Australasian Journal of Water Resources, v. 10, n. 3, p. 213-222, 2006.

WOODS-BALLARD, Bridget et al. **The SUDS manual**. London: Ciria, 2007.