



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

GIRLEIANE SANTOS DE SÁ

**EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS
URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI**

TERESINA

2024

GIRLEIANE SANTOS DE SÁ

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS
URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

Trabalho apresentado como exigência para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul.

Orientador(a): Prof. Dr Mauro César de Brito
Sousa.

TERESINA
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Sá, Girleiane Santos de

S111e Eficiência hidrológica de pavimentos permeáveis em áreas urbanas: estudo aplicado em Teresina - PI / Girleiane Santos de Sá. - 2024.
51 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa

1. Engenharia civil. 2. Pavimentos permeáveis. 3. Escoamento superficial.
4. SWMM. 5. Gestão urbana de águas pluviais. I. Título.

CDD - 624

Elaborado por Isabel dos Santos Lima CRB 3/1060

GIRLEIANE SANTOS DE SÁ

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS: ESTUDO DE
CASO NA CIDADE DE TERESINA-PI

Trabalho apresentado como exigência para
aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de
Curso do Curso de Bacharelado em Engenharia
Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul.

Aprovada em: 12/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Soares Freire
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Israel Costa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Sempre acreditei que tudo tem seu tempo, e a minha jornada até aqui só reforça essa certeza. Tive a sorte de estar cercada por pessoas incríveis, e sei que, com o apoio de cada uma delas, posso ir ainda mais longe. Minha gratidão é eterna!

Primeiramente, agradeço a Deus, a quem dedico toda honra e glória. Sem Sua bênção, nada disso teria sido possível. À minha mãe, Genilza, sou profundamente grata por cada sacrifício e todo o esforço dedicados para que eu chegasse até aqui. Seu amor e apoio foram fundamentais, e palavras não são suficientes para expressar o quanto te agradeço por tudo. Obrigada por sonhar esse sonho comigo.

Aos meus irmãos, Ana Júlia, Ana Laura e Moysés, meu muito obrigada por me inspirarem, mesmo sem perceber, a ser alguém melhor e a buscar ser um exemplo para vocês. Aos meus avós, Genésio e Maria do Amparo, agradeço pelo carinho e apoio, mesmo à distância.

Ao Angelo Miguel, meu parceiro, obrigada pelo companheirismo e pelo carinho. Aos meus amigos Lucas e Raquel, sou grata por estarem ao meu lado, mesmo quando eu não conseguia estar tão presente. Aos meus colegas de turma, Marcos Vinicius, André e Igor, obrigada pelas risadas, pelos desafios e pelos momentos inesquecíveis que vivemos juntos. E a todos que dividiram essa jornada comigo, meu sincero agradecimento pela parceria e apoio.

Um agradecimento especial ao meu orientador e amigo, Mauro César, por cada ensinamento, conselho e pelo apoio. Aos professores que contribuíram para a minha formação, minha mais profunda gratidão.

Por fim, a todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado nessa caminhada, o meu muito obrigada. Sem o incentivo e o carinho de cada um de vocês, esse momento não seria possível.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

A rápida urbanização das cidades tem gerado uma série de desafios, especialmente no que se refere à gestão eficiente do escoamento das águas pluviais. A pavimentação convencional, que torna o solo impermeável, contribui significativamente para problemas como alagamentos, inundações e danos a infraestruturas urbanas. Esses eventos extremos não apenas resultam em grandes prejuízos econômicos, mas também afetam profundamente a qualidade de vida dos habitantes e o funcionamento regular das cidades. O estudo aborda a eficácia dos pavimentos permeáveis como uma alternativa sustentável para mitigar esses problemas, focando na cidade de Teresina-PI. O estudo foi conduzido utilizando o software SWMM (Storm Water Management Model) para modelar e simular o comportamento hidrológico de um loteamento, comparando cenários com e sem a aplicação de pavimentos permeáveis. Os resultados indicam que a implementação de pavimentos permeáveis pode reduzir significativamente o volume total de escoamento em cerca de 24,00%, diminuir a vazão de pico em aproximadamente 57,00% e aumentar o tempo de resposta do sistema de drenagem em até 7 minutos, o que significa que a água leva mais tempo para atingir o pico de escoamento. Esses pavimentos também favorecem a infiltração de água no solo, promovendo a recarga de aquíferos subterrâneos. O estudo destaca a importância dos pavimentos permeáveis como uma solução sustentável e eficaz para mitigar problemas de alagamento em áreas urbanas, contribuindo para uma gestão mais eficiente das águas pluviais em Teresina.

Palavras-chave: pavimentos permeáveis; escoamento superficial; SWMM; gestão urbana de águas pluviais.

ABSTRACT

The rapid urbanization of cities has created a series of challenges, especially regarding the efficient management of stormwater runoff. Conventional paving, which makes the soil impermeable, significantly contributes to problems such as flooding, inundation, and damage to urban infrastructure. These extreme events not only result in significant economic losses but also profoundly affect the quality of life of residents and the regular functioning of cities. The study addresses the effectiveness of permeable pavements as a sustainable alternative to mitigate these issues, focusing on the city of Teresina-PI.

The study was conducted using the SWMM (Storm Water Management Model) software to model and simulate the hydrological behavior of a subdivision, comparing scenarios with and without the application of permeable pavements. The results indicate that the implementation of permeable pavements can significantly reduce the total runoff volume by about 24.00%, decrease the peak flow by approximately 57.00%, and increase the drainage system's response time by up to 7 minutes, meaning that the water takes longer to reach the peak runoff. These pavements also promote water infiltration into the soil, enhancing the recharge of underground aquifers. The study highlights the importance of permeable pavements as a sustainable and effective solution to mitigate flooding problems in urban areas, contributing to more efficient stormwater management in Teresina.

Keywords: permeable pavements; surface runoff; SWMM; urban stormwater management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Modelo de pavimento permeável com total infiltração.	20
Figura 2	Modelo de pavimento com infiltração parcial.....	21
Figura 3	Modelo de pavimento permeável sem infiltração.....	22
Figura 4	Mapa de localização do terreno	26
Figura 5	Mapa de Disposição do Loteamento.....	27
Figura 6	Mapa de curva de nível do loteamento	29
Figura 7	Classes Hidrológicas do Solo – NRCS	32
Figura 8	Hietograma para TR de 2 anos	35
Figura 9	Hietograma para TR de 5 anos	35
Figura 10	Hietograma para TR de 10 anos	36
Figura 11	Delimitação das áreas de aplicação de pavimento permeável	36
Figura 12	Escoamento superficial considerando os cenários sem aplicação das LID's.....	38
Figura 13	Escoamento superficial considerando os cenários simulados para o TR de 02 anos.....	40
Figura 14	Escoamento superficial considerando os cenários simulados para o TR de 05 anos.....	41
Figura 15	Escoamento superficial considerando os cenários simulados para o TR de 10 anos.....	41
Figura 16	Infiltração considerando os cenários simulados para o TR de 02 anos.....	43
Figura 17	Infiltração considerando os cenários simulados para o TR de 05 anos.....	43
Figura 18	Infiltração considerando os cenários simulados para o TR de 10 anos.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Divisão das áreas do loteamento.	28
Tabela 2	Coeficientes de Manning (n) para diferentes superfícies.	30
Tabela 3	Coeficientes de armazenamento em Depressões.	31
Tabela 4	Grupos hidrológicos de solo.	32
Tabela 5	Média Ponderada dos Valores de CN (Curve Number) por Classe de Uso do Solo no Loteamento.	34
Tabela 6	Parâmetros de entrada do loteamento.	34
Tabela 7	Dados de cada camada utilizada na simulação do pavimento permeável.	38
Tabela 8	Vazão de Pico e Volume Escoado Final para Diferentes Períodos de Retorno (TR) sem Pavimentos Permeáveis.	40
Tabela 9	Vazão de Pico e Volume Escoado Final para Diferentes Períodos de Retorno (TR) com Pavimentos Permeáveis.	43
Tabela 10	Reduções de parâmetros após implementação das LID's.	43
Tabela 11	Resumo do cenário modelado com e sem a aplicação do pavimento permeável.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMP	Best Management Practices
EPA	Environmental Protection Agency
LID	Low Impact Development
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento Básico
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model
PDDrU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
TR	Tempo de Retorno ou Tempo de Recorrência
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
CN	Curve-Number
SCS	Soil Conservation Service
NRCS	National Resources Conservation Service

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
L/s	Litros por segundo
m ²	Metro quadrado
Min	minutos
tc	Tempo de Concentração
i	Intensidade de precipitação
t	Tempo de duração
S	Declividade da bacia
Aimp	Área impermeável
L	Comprimento do talvegue
n	coeficiente de rugosidade Manning

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	GERAL.....	16
1.1.2	ESPECÍFICOS.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	DRENAGEM URBANA	16
2.2	LOW IMPACT DEVELOPMENT (LID).....	17
2.3	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	19
2.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL - SWMM.....	23
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	25
3.1.1	LARGURA SUPERFICIAL.....	29
3.1.2	DECLIVIDADE MÉDIA.....	29
3.1.3	COEFICIENTE DE MANNING.	30
3.1.4	COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO EM DEPRESSÕES.....	31
3.1.5	COEFICIENTE CN (CURVE NUMBER).....	32
3.2	DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	34
3.3	MODELAGEM DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	ANÁLISE COMPARATIVA DOS HIDROGRAMAS ENTRE OS CENÁRIOS COM E SEM APLICAÇÃO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	39
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA DA INFILTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO ENTRE OS CENÁRIOS COM E SEM APLICAÇÃO DOS	43

	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47

1 INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada das cidades tem resultado em diversos desafios relacionados à gestão adequada do escoamento das águas pluviais. A impermeabilização do solo, causada pela construção de pavimentos convencionais, é um dos principais fatores que agravam problemas significativos, tais como enchentes, inundações e danos às estruturas construídas. Esses eventos extremos não apenas causam perdas econômicas consideráveis, mas também têm impactos severos na qualidade de vida da população e no funcionamento das cidades. Além disso, as condições inadequadas das vias afetadas pela chuva podem afetar diretamente a mobilidade urbana e o cotidiano das pessoas, resultando em transtornos como a impossibilidade de trafegar em determinadas áreas.

No contexto brasileiro, é importante destacar que a abordagem da drenagem urbana, por muito tempo, foi influenciada pela visão higienista predominante nas políticas públicas de saneamento. Nessa perspectiva, a principal preocupação era afastar as águas pluviais das áreas urbanas o mais rápido possível, visando minimizar os riscos de doenças e promover uma suposta "limpeza" do ambiente. Essa abordagem priorizava a construção de sistemas de drenagem que direcionavam as águas pluviais para rios e córregos, sem considerar os impactos ambientais e a qualidade do escoamento.

No entanto, apesar de ser uma das parcelas do saneamento básico, a drenagem urbana recebeu historicamente menos atenção e investimentos em comparação com outras áreas, como o abastecimento de água e o tratamento de esgoto. Essa falta de priorização reflete-se na infraestrutura inadequada para lidar com o escoamento das águas pluviais nas cidades brasileiras, resultando em problemas recorrentes de enchentes, inundações e impactos socioeconômicos negativos. Esses problemas são agravados pela falta de soluções sustentáveis, que poderiam evitar ou mitigar os danos causados pelas enchentes e inundações.

Nesse contexto, a busca por soluções sustentáveis de gerenciamento do escoamento urbano tem se tornado uma prioridade. Surgiram, então, tecnologias que consideram não apenas a quantidade, mas também a qualidade do escoamento, além de aspectos paisagísticos, valor recreativo e proteção ecológica de bacias hidrográficas. Essas soluções de drenagem, amplamente utilizadas em todo o mundo, são chamadas de "Soluções de Desenvolvimento de Baixo Impacto" ou Low Impact

Development (LID) (Tominaga, 2013).

Um exemplo dessas LID's são os pavimentos permeáveis, que têm se destacado como uma alternativa promissora para mitigar os impactos negativos do escoamento superficial. Esses pavimentos permitem a infiltração da água da chuva no solo, reduzindo o volume de escoamento e prevenindo enchentes e inundações. Ao permitir a infiltração da água da chuva no solo, os pavimentos permeáveis surgem como uma solução sustentável e eficaz para mitigar os efeitos negativos do escoamento superficial. Além disso, como alagamentos causam perdas financeiras significativas, o uso de pavimentos permeáveis é muito benéfico para a economia, evitando gastos excessivos em reparos de infraestrutura e recuperação pós-desastre.

No entanto, embora os pavimentos permeáveis sejam uma prática crescente e ofereçam benefícios comprovados, sua aplicação eficiente e adaptada a contextos específicos ainda demanda investigação científica e conhecimento aprofundado. É necessário compreender como esses pavimentos se comportam em diferentes condições climáticas, tipos de solo e níveis de impermeabilização urbana, além de analisar a viabilidade econômica e a durabilidade dessas estruturas em longo prazo.

No tocante à cidade de Teresina-PI, o "Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina" traz como resolução para a amenização do escoamento das águas pluviais soluções que desconsideram o uso de medidas de baixo impacto, como os pavimentos permeáveis. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo principal modelar pavimentos permeáveis em um loteamento localizado na cidade de Teresina-PI, utilizando o software SWMM (Storm Water Management Model). Através da modelagem hidrológica com o SWMM, será possível analisar o comportamento do escoamento e avaliar a eficácia dessa solução na redução dos volumes de escoamento.

A aplicação de pavimentos permeáveis na cidade de Teresina-PI, além de garantir uma gestão mais eficiente do escoamento urbano, tem um potencial significativo para reduzir danos econômicos, proteger edificações e melhorar a qualidade de vida dos moradores. Com este estudo, espera-se preencher a lacuna de conhecimento existente, fornecer informações valiosas para a tomada de decisões com base científica e promover a adoção de práticas de LID de maneira sustentável e eficaz.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial e na mitigação de problemas relacionados a alagamentos, em um loteamento localizado em Teresina – PI.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- Realizar a modelagem hidrológica da área de estudo utilizando o software SWMM;
- Realizar a modelagem hidrológica da área de estudo utilizando o software SWMM, fazendo a aplicação dos pavimentos permeáveis;
- Comparar os resultados da modelagem hidrológica entre cenários com pavimentos permeáveis e cenários sem a utilização dessa tecnologia, analisando a redução do volume de escoamento superficial e a mitigação de problemas de alagamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DRENAGEM URBANA

Para Jabôr (2020), o sistema de drenagem urbana é composto por dispositivos que tem como propósito captar e conduzir a água em excesso para um local adequado, para preservar a segurança da população e garantir um melhor funcionamento do meio ambiente. Tucci (2001) segue a mesma linha, conceituando a drenagem urbana como um conjunto de medidas que tem por objetivo minimizar os riscos que as populações estão sujeitas e diminuir os prejuízos causados por inundações, possibilitando o desenvolvimento urbano de forma harmônica e sustentável.

Ademais, a drenagem e o manejo de águas pluviais urbanas são o conglomerado de atividades voltadas à infraestrutura e às instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, ao transporte e à detenção ou de retenção das águas da chuva, buscando a redução no volume das vazões das cheias (Tucci, 2016).

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento Básico (SNIS, 2020), é esperado que as águas pluviais escoem superficialmente por

caminhos naturais e alcancem as bacias hidrográficas. No entanto, o ambiente urbano modifica essa dinâmica natural de drenagem, interferindo no ciclo hidrológico e exigindo intervenções para minimizar os impactos dos eventos climáticos. Essas intervenções são realizadas por meio de medidas de controle, que incluem tanto ações estruturais, como intervenções físicas, quanto ações estruturantes, que englobam diretrizes, normas legais, fiscalização e educação.

Nos últimos anos, ocorreram mudanças significativas no pensamento e abordagem em relação à drenagem urbana em todo o mundo. Essas mudanças têm sido especialmente evidentes em países desenvolvidos, onde novas concepções têm emergido, com o princípio de reproduzir as condições de escoamento observadas na bacia antes da urbanização. O objetivo é reduzir o volume de escoamento superficial e aumentar a parcela de infiltração no solo (Chahar, Grailot, Gaur, 2012; Hamel, Daly, Fletcher, 2013). Esta inovação no gerenciamento das águas pluviais, chamada de drenagem urbana sustentável, envolve novos conceitos de planejamento com o uso de tecnologias modernas em drenagem urbana (Kirby, 2005).

2.2 LOW IMPACT DEVELOPMENT – LID

A abordagem atual para os desafios da drenagem urbana visa encontrar soluções que integrem princípios hidrológicos com a conservação ambiental. Nesse contexto, as técnicas de controle na fonte têm se destacado como alternativas inovadoras em comparação aos sistemas tradicionais. Essas técnicas têm como base a retenção e a infiltração das águas pluviais, contribuindo para a sustentabilidade do sistema de drenagem.

A terminologia utilizada para descrever os princípios e práticas de drenagem urbana abrange uma série de conceitos, incluindo as melhores práticas de manejo (BMP - Best Management Practices), o desenvolvimento de baixo impacto (LID - Low Impact Development), os sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS - Sustainable Urban Drainage Systems) e o design urbano sensível à água (Water Sensitive Urban Design) (Fletcher *et al.*, 2015). Esses termos refletem as abordagens inovadoras e integradas adotadas para promover um gerenciamento mais eficiente e sustentável das águas pluviais nas áreas urbanas.

O termo LID, utilizado principalmente na América do Norte e na Nova Zelândia, tem como objetivo reproduzir uma hidrologia natural, buscando volumes de

escoamento próximos aos níveis pré-desenvolvimento. Para isso, as técnicas LID utilizam características locais e medidas de controle integradas, como infiltração, evapotranspiração, retenção e detenção (Fletcher *et al.*, 2015). Essas técnicas englobam dispositivos de tratamento de águas pluviais em menor escala, como sistemas de biorretenção, jardins de chuva, cisternas, pavimentos permeáveis, asfaltos porosos e telhados verdes, localizados próximos à origem do escoamento.

A eficiência das soluções LID na diminuição de escoamento superficial é demonstrada em diversos estudos. Guo *et al.* (2019) concluíram que, sob eventos de chuva simulados e monitorados (com um período de retorno de um, dois e cinco anos) em uma bacia hidrográfica, a aplicação de LID reduziu o escoamento superficial em toda a área, com índices de redução variando de 20,7% a 63,2%. Para eventos de chuva com período de retorno e intensidade menor, o desempenho dos LID se apresentou superior.

Sá, G. S *et al.* (2023) avaliaram, os impactos de infraestruturas de LID sobre o escoamento superficial na Sub-Bacia PE11, localizada na cidade de Teresina- PI, usando os tempos de retornos de 5 e 10 anos, e encontraram reduções de até 16% no pico de vazão do escoamento superficial da água da chuva.

Outro estudo, também realizado na cidade de Teresina- PI, foi feito por Barbosa, I. S. S *et al* (2022) através da ferramenta computacional SWMM, onde percebeu-se o atraso e a redução do pico de vazão e do volume total escoado na sub-bacia PD12 ao se adotar medidas de controle da fonte. Fazendo a aplicação de telhados verdes, o estudo mostrou que houve reduções no pico de vazão de até 24,09% e 22,82% respectivamente. Enquanto o volume escoado no exutório da sub-bacia foi reduzido em até 5,09% e 4,41% respectivamente.

A implantação de técnicas LID pode melhorar o tratamento da qualidade da água, facilitar a recarga de água subterrânea, e reduzir a erosão do solo e o transporte de sedimentos e de poluentes. Entre os benefícios adicionais do uso de LIDs são: a melhoria estética das vias verdes e parques em ambientes urbanos e a redução da necessidade de instalação e manutenção de novas infraestruturas de drenagem convencional (Clar *et al.*,2004).

Qin, Li e Fu (2013) concluíram, por meio de simulações com o SWMM, que a implantação de técnicas LIDs, como jardins de chuva, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, barris de chuva, e telhados verdes, foi eficaz para aliviar o impacto das inundações em uma bacia hidrográfica em urbanização na China. Isso é

corroborado na revisão feita por Eckart, Mcphee e Bolisetti (2017), os quais também relatam que as práticas LID possuem resultados mais significativos quando associadas ao gerenciamento tradicional de águas pluviais. Porém, apesar de eficazes, mesmo nos cenários mais benéficos o desempenho hidrológico das áreas urbanizadas com LID não é equivalente ao nível de pré-desenvolvimento (Kong *et al.*, 2017).

Há uma concordância na literatura de que técnicas combinadas de LID apresentam desempenho melhor do que as práticas únicas, em termos de redução do escoamento superficial (Huang; Wang; Zhang, 2017; Qin; Li; Fu, 2013; Zahmatkesh *et al.*, 2015). Apesar disso, alguns tópicos merecem atenção durante o projeto de implementação de LID. Por exemplo, Palla e Gnecco (2015) preconizam que é necessária uma área mínima de conversão do uso da terra, correspondente à redução da área impermeável efetiva de 5%, para obter benefícios hidrológicos perceptíveis.

Nas práticas de LID, que visam imitar as condições hidrológicas naturais, a capacidade de infiltração da água no solo é um aspecto fundamental. Ao permitir que a água da chuva penetre diretamente no solo, é possível reduzir significativamente o escoamento superficial, o que ajuda a prevenir alagamentos e a sobrecarga dos sistemas de drenagem. O pavimento permeável, como solução que será explorada a seguir, se baseia justamente nesse princípio. Ao criar uma superfície que facilita a infiltração, ele permite que a água seja absorvida pelas camadas inferiores do solo, contribuindo para a recarga do lençol freático e minimizando a erosão e o transporte de sedimentos. Assim, essa técnica não apenas reduz o impacto das chuvas intensas, mas também promove uma gestão mais equilibrada e sustentável das águas pluviais no ambiente urbano.

2.3 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

A ABNT NBR 16416:2015 caracteriza o pavimento permeável como aquele que suporta as solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, simultaneamente, cuja estrutura permite a infiltração e/ou armazenamento temporário de água, reduzindo o escoamento superficial, sem comprometer a integridade da estrutura. A mesma norma também define a estrutura permeável como a combinação das camadas de sub-base permeável, base permeável, camada de assentamento

permeável (quando aplicável) e revestimento permeável, projetada para permitir a infiltração da água, distribuir os esforços no subleito e suportar o peso do tráfego.

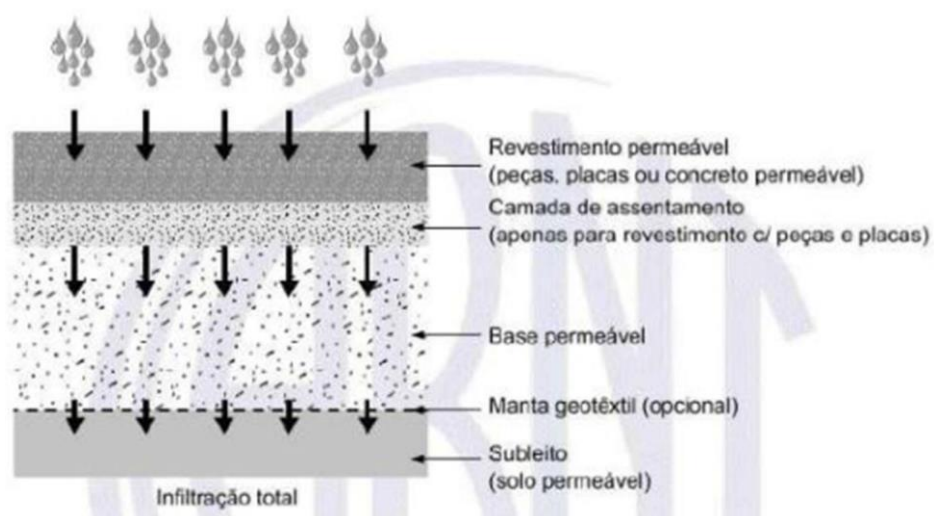
Os pavimentos permeáveis têm por objetivo melhorar a qualidade da água, incentivar a infiltração e fornecer armazenamento da água, reduzindo o escoamento superficial das águas pluviais (Mullaney; Lucke, 2014). Tal sistema é comumente utilizado em calçadas residenciais e de acesso, acostamentos, estacionamentos, praças e parques.

De acordo com Tucci e Bertoni (2003, p. 102), a infiltração é o processo pelo qual o fluxo de água passa da superfície para o interior do solo. A capacidade de infiltração é influenciada pelas propriedades do solo e pelo nível de umidade da camada superficial do solo.

Nesse contexto, a ABNT (2015) estabelece três distintos sistemas de infiltração para pavimentos permeáveis: um onde a água da chuva é totalmente infiltrada no solo, outro onde a infiltração ocorre parcialmente, e um terceiro onde a água é apenas drenada.

Como ilustrado na Figura 01, o volume de água da chuva atinge completamente o subleito, infiltrando-se nas camadas inferiores do solo. Hammes (2017 apud ASCE, 2013) acrescenta que esse tipo de pavimento é recomendado para áreas onde o solo do subleito apresenta alta permeabilidade e o nível do lençol freático é suficientemente baixo.

Figura 01 - Modelo de pavimento permeável com total infiltração.

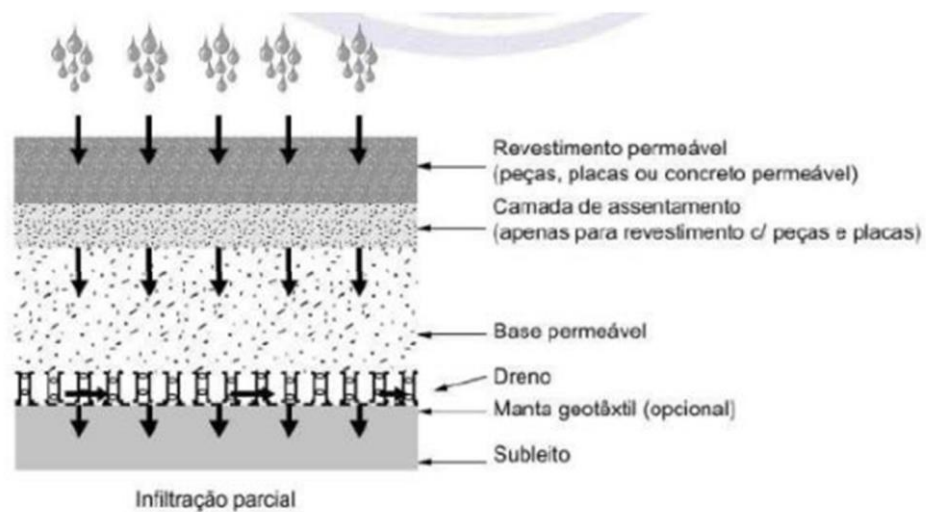


Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

Em áreas onde o subleito possui baixa permeabilidade, e a vazão a ser drenada é maior do que a capacidade de infiltrar todo o volume de água em tempo adequado, recomenda-se o modelo de infiltração parcial (Hammes, 2017 apud ASCE, 2013).

Nesse sistema de infiltração, conforme ilustrado na Figura 02, uma parte da água da chuva atinge o subleito e se infiltra, enquanto a outra parte é desviada pelo dreno, sendo encaminhada para locais apropriados.

Figura 02 - Modelo de pavimento com infiltração parcial



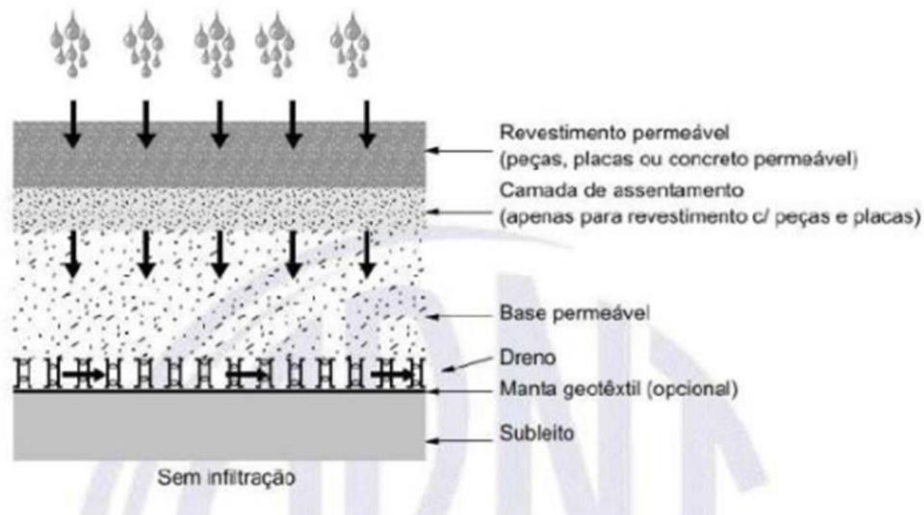
Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

É importante destacar que a principal diferença entre este sistema de infiltração e o sistema de infiltração total é a presença de drenos, que auxiliam na drenagem da água. Esses drenos ajudam a evitar o acúmulo de água na superfície, minimizando o escoamento superficial e reduzindo o risco de erosão ou acúmulo excessivo de água que poderia comprometer a estrutura do pavimento. Além disso, essa solução é especialmente útil em áreas onde o solo possui baixa capacidade de infiltração, garantindo um escoamento eficiente sem sobrecarregar o subleito.

Por fim, no sistema de pavimento sem infiltração, a água da chuva não penetra no subleito, ficando temporariamente armazenada na camada permeável e posteriormente sendo removida pelos drenos, como ilustrado na Figura 03. Esse modelo é geralmente aplicado em situações em que o solo apresenta uma permeabilidade extremamente baixa, ou em áreas onde existe o risco de contaminação das águas subterrâneas. Além disso, é uma solução eficaz em locais onde a proteção do lençol freático é prioritária, garantindo que a água seja

adequadamente gerenciada e direcionada para áreas seguras sem comprometer a qualidade das águas subterrâneas.

Figura 03 - Modelo de pavimento permeável sem infiltração.



Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

Desse modo, cabe analisar cada tipo de situação e assim escolher o melhor sistema a ser utilizado. Além disso, vale realçar também que em cada local a ser implantado o pavimento, há um tipo de revestimento mais adequado.

A maioria dos estudos, no território brasileiro, que avaliam a eficiência de pavimentos permeáveis ainda são experimentais, analisando principalmente a capacidade de retenção do escoamento superficial. Os estudos demonstram que o desempenho dos pavimentos permeáveis está diretamente ligado a qualidade do projeto, a construção, a profundidade e a capacidade de armazenamento, a configuração do pavimento, as características dos materiais utilizados e uma manutenção periódica (Scholz; Grabowiecki, 2007).

Segundo EPA (1999a) e Baptista *et al.* (2005), as principais vantagens no uso de pavimentos permeáveis são:

- tratamento da água do escoamento superficial, através da remoção de poluentes;
- menor necessidade de construção de canais de drenagem e meios-fios;
- aumento do conforto e segurança das vias públicas devido à maior resistência a derrapagem;
- aumento da recarga de reservas subterrâneas de água.

Contudo, Baptista *et al.* (2005) citam alguns inconvenientes em relação ao uso de pavimentos que utilizam o princípio da infiltração, sendo eles:

- colmatagem do pavimento,
- poluição do lençol freático,
- aumento dos custos de operação e manutenção.

Apesar de no Brasil não se ter conhecimento de estudos experimentais que avaliam o impacto qualitativo dos pavimentos permeáveis no escoamento superficial urbano. Na literatura internacional, alguns autores tais como Brattebo e Booth (2003), Collins (2007) e Pagotto *et al.* (2000) têm encontrado resultados positivos para utilização de pavimentos permeáveis no que diz respeito ao controle do escoamento superficial e à melhoria da qualidade da água.

Existe a possibilidade de que os resultados positivos encontrados pelos autores mencionados em relação à qualidade da água resultante da infiltração no pavimento se apliquem às condições brasileiras. No entanto, é importante destacar que o bom desempenho dessas estruturas não pode ser simplesmente transferido para outras regiões. A maioria dos estudos é conduzida na Europa e nos Estados Unidos, onde as condições climáticas, de solo e de precipitação são muito diferentes das do Brasil. Portanto, é necessário realizar pesquisas específicas sobre o impacto desse tipo de técnica em nosso país, especialmente em relação à qualidade da água.

2.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL - SWMM

A contenção de águas drenadas em áreas urbanas, principalmente em zonas onde os sistemas de drenagem se mostram próximos à saturação, pode auxiliar dos picos de cheia, quer pela reservação de volumes, como pelo retardamento da transferência destes para os corpos receptores (Canholi, 2013). Sendo assim, tornam-se 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.

O modelo hidrológico é uma ferramenta desenvolvida pela ciência para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e pode ser definido como “uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo” (Maidment, 1993). Os modelos e softwares atuais permitem a simulação do desempenho dos pavimentos permeáveis,

proporcionando ao usuário uma maior compreensão das respostas hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água, oferecendo aprimoramentos ao seu design, operação e manutenção (Kuruppu; Rahman; Rahman, 2019). Além disso, permitem a avaliação de cenários hipotéticos sem o alto custo de testes físicos (Kipkie; James, 2000).

O SWMM, um dos softwares utilizados na modelagem computacional, é utilizado internacionalmente desde 1971. Trata-se de um modelo dinâmico de simulação de chuva-vazão, usado para evento único ou simulação contínua da quantidade e qualidade do escoamento superficial de áreas urbanizadas (Rossman, 2015). Desta forma, o software permite ao usuário o planejamento e a avaliação dos efeitos de gerenciamento de águas pluviais, tanto para sistemas convencionais de drenagem quanto para técnicas sustentáveis.

Na sua versão 5.1, um editor LID foi adicionado ao programa, fornecendo uma plataforma de modelagem para as práticas de controle de desenvolvimento de baixo impacto, fornecendo respostas hidrológicas do armazenamento, infiltração e evaporação. O editor LID do SWMM possibilita a modelagem de oito tipos de controles LID: células de biorretenção, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, micro reservatórios de detenção, valas de infiltração e telhados desconectados (Rossman, 2015)

Alguns estudos utilizaram o software SWMM para simular pavimentos permeáveis. Jung, Han e Jo (2016) realizaram simulações visando determinar o projeto ideal para cada local de estudo, considerando diferentes tipos de revestimento, materiais para a camada de armazenamento, tamanho e custo. Além de identificar os modelos mais adequados, a análise demonstrou que várias unidades de pavimentos permeáveis distribuídas são mais eficazes na redução do escoamento superficial do que o uso de um único pavimento permeável em uma grande área. Esses resultados corroboram o princípio fundamental da abordagem de LID, que enfatiza a eficiência do gerenciamento descentralizado de água em relação ao gerenciamento centralizado.

Moreira (2016) comparou, por meio do modelo SWMM, os volumes de escoamento gerados na Cidade Universitária da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), considerando dois cenários: um utilizando técnicas convencionais de drenagem e outro idealizado com técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID). Foram aplicadas técnicas como pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, células de biorretenção e cisternas, distribuídas em uma área de 5,6 km²,

dividida em 19 sub-bacias diferentes.

As simulações incluíram cenários de chuvas com duração de 2 e 24 horas. Os pavimentos permeáveis, usados em estacionamentos, apresentaram sua menor eficiência durante a chuva de 24 horas, mas ainda assim reduziram em 77,7% o volume de escoamento. As trincheiras de infiltração, instaladas ao longo das vias, demonstraram alta eficácia, drenando 100% do volume de escoamento na chuva de 2 horas e 60% na chuva de 24 horas. Já as células de biorretenção e as cisternas não mostraram resultados significativos nos cenários simulados.

Esses resultados destacam a importância de avaliar a eficiência de diferentes técnicas LID em variados contextos e condições climáticas. A seguir, a metodologia utilizada nesta pesquisa será descrita, seguindo o processo de modelagem proposto por Kourtins *et al.* (2018), que orienta a simulação de águas pluviais em bacias com diferentes práticas de LID.

3 METODOLOGIA

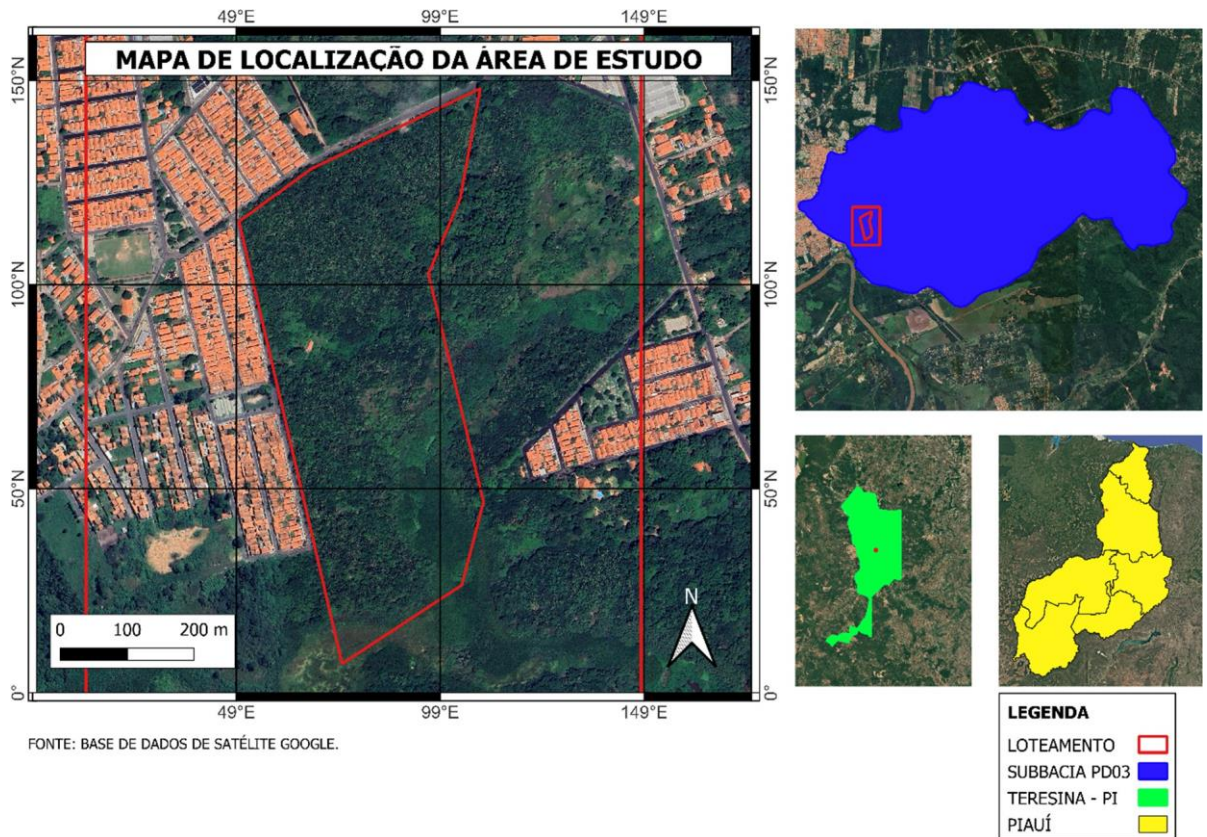
Para fins de pesquisa, será aplicado o processo de modelagem descrito por Kourtins *et al.* (2018). Esse processo envolve a seleção do modelo para simulação das águas pluviais, a definição das características fisiográficas da bacia, a caracterização das práticas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) a serem modeladas e a elaboração de cenários que considerem o uso ou não de pavimentos permeáveis.

Primeiramente, as características geográficas e as condições meteorológicas locais da área de estudo são definidas para delinear o cenário original. Em seguida, as práticas de LID a serem modeladas são caracterizadas de acordo com os parâmetros estabelecidos. Finalmente, será realizado um estudo comparativo entre o cenário original e o cenário simulado com LID, analisando os hidrogramas gerados para identificar a eficiência da solução modelada.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para esta pesquisa se trata de um loteamento, localizado no bairro São Sebastião, na zona leste de Teresina, capital do estado do Piauí, e está situado na sub-bacia PD 03, conforme ilustrado na Figura 04.

Figura 04 – Mapa de localização do terreno.



Fonte: Autora (2024)

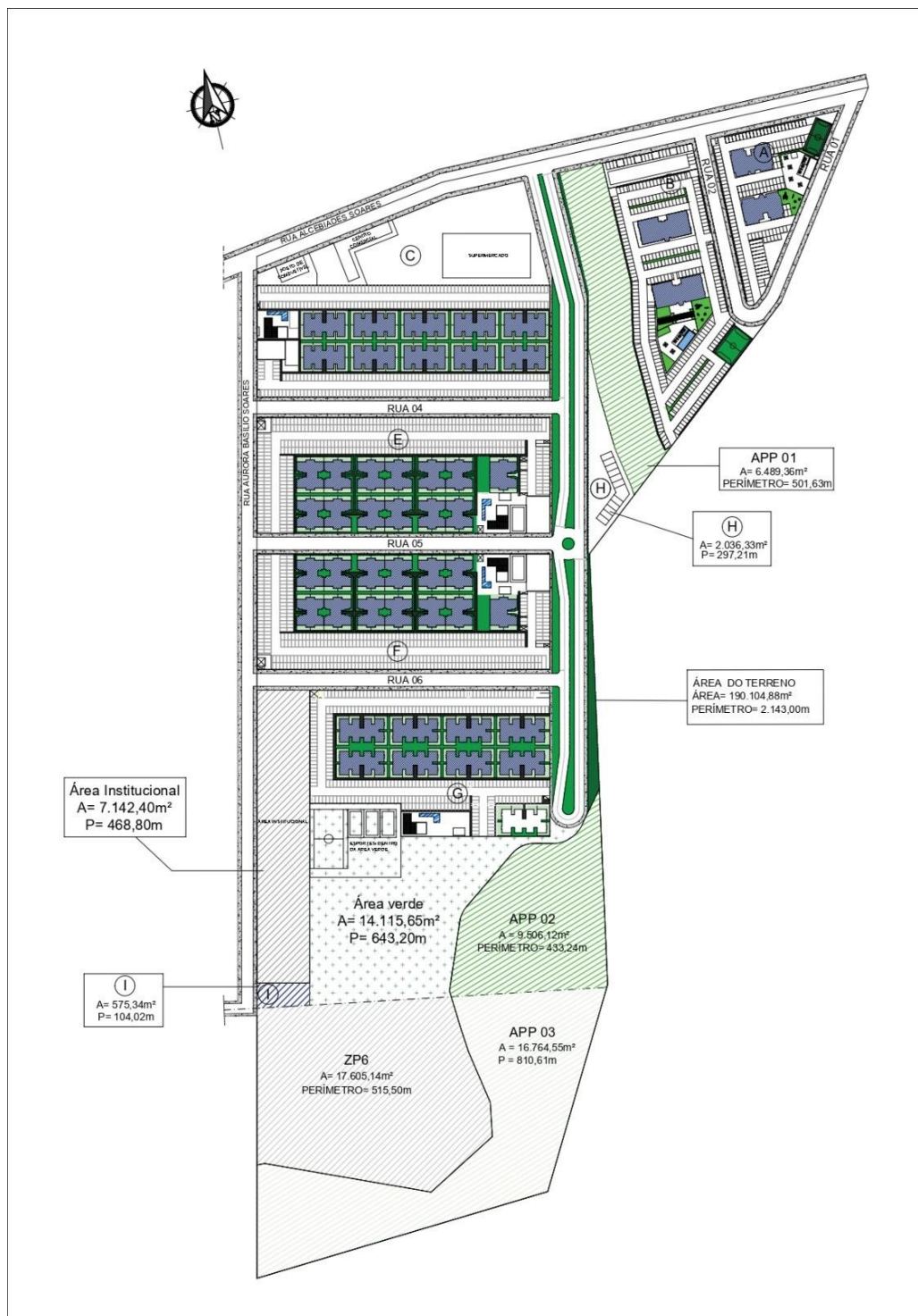
Esta região se destaca por suas características urbanas e hidrológicas, que a tornam um exemplo representativo dos desafios enfrentados em ambientes urbanos no que diz respeito à gestão das águas pluviais. A escolha desta área está diretamente relacionada à sua vulnerabilidade a problemas de drenagem, como alagamentos e escoamento superficial excessivo, que são agravados pela alta densidade de impermeabilização do solo.

Além disso, o loteamento possui uma variedade de infraestruturas urbanas, incluindo estacionamentos, vias pavimentadas e áreas verdes, que oferecem um cenário ideal para a aplicação e análise das técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID). A análise dessa área permitirá avaliar a eficácia dos pavimentos permeáveis na mitigação dos efeitos adversos das chuvas intensas.

A área total do terreno é de 190.104,88 m², sendo distribuída entre área destinada a lotes, vias de circulação interna, áreas verdes, área institucional, área de proteção permanente (APP) e área de infraestrutura, conforme apresentado na Tabela

1 e na Figura 05.

Figura 05 – Mapa de Disposição do Loteamento.



Fonte: Autora (2024)

Tabela 01- Divisão das áreas do loteamento.

DESCRIÇÃO	ÁREA TOTAL (M²)	PORCENTAGEM (%)
Área de preservação permanente (app)	50.365,17	26,49
Área verde	31.565,71	16,61
Vias de circulação (ruas e avenidas)	27.970,78	14,71
Área de quadras	80.203,22	42,19
Área total do terreno	190.104,88	100,00

Fonte: Autora (2024)

A partir dos dados apresentados foram definidas as porcentagens de áreas permeáveis e impermeáveis, sendo elas 43,10% e 56,90% respectivamente. Além disso, foram definidos os parâmetros de largura superficial, declividade média e coeficientes de Manning para escoamento superficial (Vide Tabela 02), tanto para áreas impermeáveis quanto para áreas permeáveis, armazenamento em depressões (Vide Tabela 03) para cada uma das classes e o Curve Number (CN) (Vide Tabela 04).

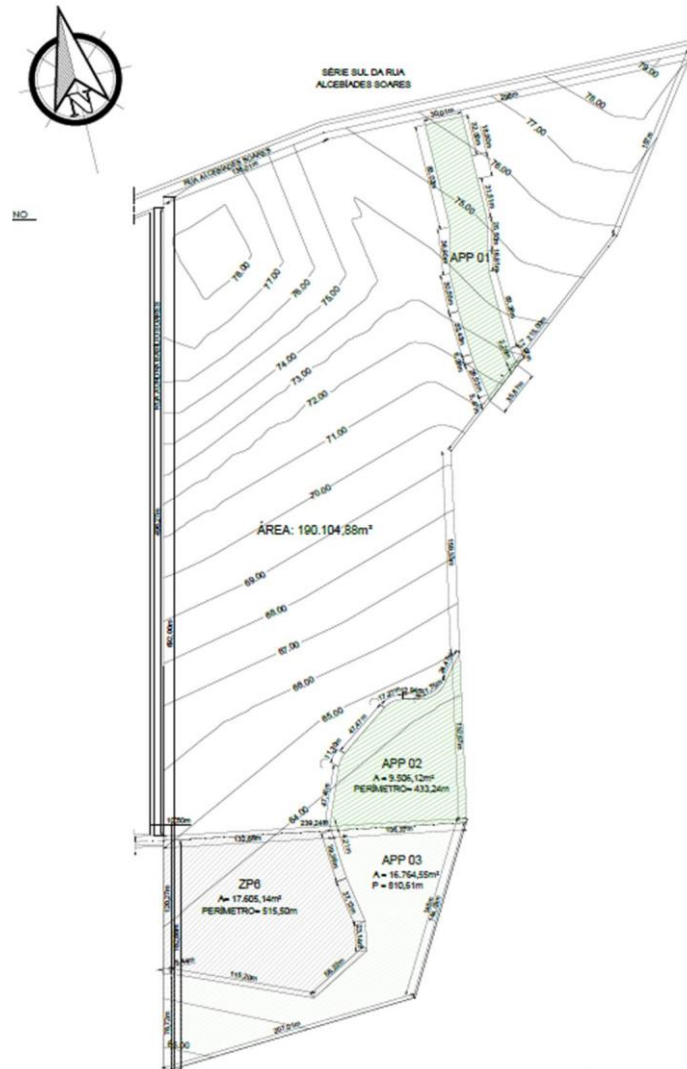
3.1.1 Largura superficial

Para o cálculo da largura superficial, utilizou-se o método descrito por Rossman (2010). Nesse método, a área total do loteamento é dividida pelo comprimento médio máximo do fluxo superficial, que representa a maior distância percorrida pelo fluxo entre o ponto de saída e o ponto de drenagem mais distante do loteamento, neste caso, o exutório do loteamento. A média foi determinada considerando os diversos percursos possíveis do fluxo dentro da área de estudo. Como resultado, obteve-se uma largura superficial de 2.138,59 m.

3.1.2 Declividade média

O cálculo da declividade da microbacia do loteamento foi realizado com base nas cotas obtidas por meio do levantamento planialtimétrico, conforme mostrado na Figura 06. Inicialmente, definiu-se o talvegue principal com o comprimento de 1.055,00 m, alinhando-o o máximo possível com as vias previstas no projeto urbanístico. Com as cotas mínima e máxima desse trecho sendo de 79 m e 65 m, respectivamente, a inclinação resultante foi de 1,32%.

Figura 06 – Mapa de curva de nível do loteamento.



Fonte: Autora (2024)

3.1.3 Coeficiente de Manning

Os coeficientes de Manning (n) para escoamento superficial foram retirados do *Manual of Practice* (ASCE, 1982). Para fins de cálculo foi adotado o valor para o cenário mais crítico possível, que foi o coeficiente para superfícies de asfalto liso. A Tabela 02 apresenta os coeficientes de Manning para cada tipo diferente de uso e ocupação do solo.

Tabela 02 - Coeficientes de Manning (n) para diferentes superfícies.

Superfície	Manning's
------------	-----------

Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Forro de concreto comum	0,013
Boa madeira	0,014
Tijolo com argamassa de cimento	0,014
Argila vitrificada	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos metálicos corrugados	0,024
Superfície de entulho de cimento	0,024
Solos em pousio (sem resíduos)	0,05
Solos cultivados	
Cobertura de resíduos < 20%	0,06
Cobertura de resíduos > 20%	0,17
Alcance (natural)	0,13
Grama	
Curto, pradaria	0,15
Denso	0,24
Grama bermuda	0,41
Bosque	
Vegetação rasteira leve	0,4
Vegetação densa	0,8

Fonte: Adaptado de ASCE (1982)

3.1.4 Coeficiente de armazenamento em depressões

Para utilizar o SWMM (Storm Water Management Model), é essencial considerar o armazenamento de água em depressões, tanto em áreas permeáveis quanto impermeáveis. Essa característica é fundamental para o modelo e afeta o comportamento do escoamento superficial. O valor de armazenamento para a área de estudo foi definido com base no cenário mais crítico, que envolvia superfícies impermeáveis, e foi estabelecido em 1,27 mm. Isso ocorreu porque não foi possível realizar medições diretas no campo para avaliar a profundidade e a capacidade de retenção de água, análise de dados de eventos de chuva para compreender o comportamento do armazenamento, entre outros estudos, para determinar esse quantitativo.

A Tabela 03 mostra os fatores de armazenamento recomendados para cada tipo de uso e ocupação do solo.

Tabela 03 – Coeficientes de armazenamento em Depressões.

Superfície	Valor (mm)
Superfícies impermeáveis	1,27 – 2,54

Gramados	2,54 – 5,08
Pasto	5,08
Lixo florestal	7,62

Fonte: Adaptada de (Source: ASCE,(1992), Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York, NY)

3.1.5 Coeficiente CN (Curve Number)

Dentre os modelos de transformação de chuva em vazão, o método do Soil Conservation Service (SCS) foi a alternativa escolhida para as simulações, pois ele calcula a chuva efetiva levando em consideração a precipitação acumulada, o tipo de solo, a condição de umidade anterior do solo, além do uso e ocupação do solo. Esse método é especialmente apropriado para bacias urbanas de pequeno porte (NRCS, 2004). Desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), é um método empírico que estima tanto o volume quanto a distribuição do escoamento superficial (Sartori *et al.*, 2005).

O coeficiente CN é influenciado pelas características do solo hidrológico e pelo uso e ocupação do solo em diferentes áreas. De acordo com o NRCS (Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos Estados Unidos), existem quatro grupos hidrológicos de solo, que são classificados da seguinte forma:

Tabela 04 – Grupos hidrológicos de solo

Grupo	Descrição	Características principais
A	Solos com baixo potencial de geração de escoamento superficial. Transmitem água livremente devido à alta permeabilidade.	Solos arenosos profundos, baixa presença de silte e argila.
B	Solos com potencial moderadamente baixo de geração de escoamento superficial. Transmitem água razoavelmente bem, mas menos que o Grupo A.	Solos arenosos menos profundos, permeabilidade acima da média.
C	Solos com potencial moderadamente alto de geração de escoamento superficial. Menor capacidade de infiltração e maior volume de escoamento.	Percentual considerável de argila, solos pouco profundos.
D	Solos com alto potencial de geração de	Solos pouco profundos,

escoamento superficial. Baixa capacidade de infiltração devido à presença de argilas expansivas.

escoamento da água é restrito ou muito restrito.

Fonte: Adaptado de USDA-NRCS (1986)

De acordo com Plano Diretor de Drenagem Urbana (Teresina, 2010), os tipos de solos que ocorrem nesta sub-bacia elementar são os Latossolos Amarelos (68%) e Alissolos (32%). Isto significa que os solos predominantes são do grupo hidrológico B, de forma que o efeito combinado de urbanização do loteamento, com solos mais impermeáveis contribui para aumentar o escoamento superficial.

Uma vez definido o grupo hidrológico de solo, foram estipulados os valores de CN para cada tipo de uso e ocupação encontrado no loteamento, seguindo a Figura 07:

Figura 07- Classes Hidrológicas do Solo – NRCS

Descrição do Uso de Terra	Classes Hidrológicas do Solo - NRCS			
	A	B	C	D
Terra cultivada				
• Sem tratamento para conservação	72	81	88	91
• Com tratamento para conservação	62	71	78	81
Pastagem				
• Condição ruim	68	79	86	89
• Condição boa	39	61	74	80
Campo				
• Condição boa	30	58	71	78
Floresta				
• Densidade baixa, coberturas pobres, sem cobertura	45	66	77	83
• Boa cobertura ²	25	55	70	77
Espaços abertos, gramados, parques, campos de golfe, cemitérios etc.				
• Condição boa: cobertura de grama em 75% ou mais da área	39	61	74	80
• Condição justa: cobertura de grama em 50-75% da área	49	69	79	84
Áreas comerciais e de negócios (85% impermeáveis)	89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeáveis)	81	88	91	93
Residencial ³				
Tamanho médio do lote (% impermeáveis ⁴)				
• 0,05 ha ou menos (65)	77	85	90	92
• 0,10 ha (38)	61	75	83	87
• 0,13 ha (30)	57	72	81	86
• 0,20 ha (25)	54	70	80	85
• 0,40 ha (20)	51	68	79	84
Estacionamento pavimentado, telhados, calçadas etc. ⁵	98	98	98	98
Ruas e estradas				
• Pavimentada com meio fio e drenagem ⁵	98	98	98	98
• Em cascalho	76	85	89	91
• Sujas	72	82	87	89

Fonte: SCS Urban Hydrology for Small Watersheds, 2nd Ed., (TR-55), June 1986.

O CN do loteamento foi calculado utilizando a média ponderada das áreas correspondentes a cada classe de uso do solo, considerando os valores de CN

atribuídos a elas. A Tabela 05 apresenta os valores de CN atribuídos para cada categoria e o valor final obtido.

Tabela 05 - Média Ponderada dos Valores de CN (Curve Number) por Classe de Uso do Solo no Loteamento.

DESCRIÇÃO	ÁREA TOTAL (m²)	CN ATRIBUÍDO	ÁREA x CN
Área de preservação permanente (app)	50.365,17	61	3.072.675,37
Área verde	31.565,71	61	1.925.508,31
Vias de circulação (ruas e avenidas)	27.970,78	98	2.741.137,44
Área de quadras	80.203,22	98	7.859.715,56
Área total do terreno	190.104,88	-	15.598.036,68
Média ponderada do CN	-	82	

Fonte: Autora (2024)

A Tabela 06 apresenta o resumo dos principais parâmetros de entrada do loteamento.

Tabela 06 – Parâmetros de entrada do loteamento.

Propriedade	Valor	Unidade
Área	19,01	ha
Largura característica	2138,59	m
Declividade	1,32	%
Área impermeável	56,90	%
Coeficiente de manning (impermeável)	0,011	-
Coeficiente de manning (permeável)	0,4	-
Armazenamento em depressões (impermeável)	1,27	-
Armazenamento em depressões (permeável)	2,54	-
CN	82	-

Fonte: Autora (2024)

3.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Os eventos de chuvas foram implementados utilizando a equação genérica das

curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Teresina (Equação 1), conforme determinado pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana (Teresina, 2010). Essa abordagem foi adotada devido à ausência de dados meteorológicos específicos para o local.

$$i = \frac{1194,237 \cdot T^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}} \quad [1]$$

Sendo i a intensidade da chuva em mm/h, T o período de retorno em anos e t o tempo de concentração da bacia em min.

Os períodos de retorno utilizados para análise foram os de 2, 5 e 10 anos.

A equação utilizada para determinar o tempo de concentração foi adotada segundo o estudo realizado por Silveira (2005), onde os parâmetros a serem considerados são o comprimento do talvegue, a inclinação média e a área do local. Sendo assim, a equação desenvolvida por Schaake *et al.* (1967) (Equação 2) é a melhor que se adapta às características do local.

$$t_c = \frac{4,968 \cdot L^{0,24}}{S^{0,16} \cdot A_{imp}^{0,26}} \quad [2]$$

Onde: t_c é o tempo de concentração em minutos; L é o comprimento do talvegue em km; S é a declividade (m/m); A_{imp} é a fração de área impermeável.

Com isso, o tempo de concentração encontrado da área de estudo foi de aproximadamente 12 minutos.

Para a geração dos hietogramas, foi utilizado o método de distribuição por blocos alternados, que é reconhecido por maximizar os picos dos hidrogramas em bacias durante simulações hidrológicas. Ao organizar os eventos de chuva em blocos de intensidade decrescente e distribuí-los temporalmente ao longo do hietograma, esse método faz com que os picos centrais se tornem mais pronunciados, especialmente quando os intervalos de tempo para os blocos são reduzidos. Essa abordagem resulta em uma representação mais detalhada da distribuição temporal das chuvas, essencial para avaliar o comportamento do escoamento superficial.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDrU) (2010) recomenda que a duração total da precipitação seja igual ou superior ao tempo de concentração (t_c) da bacia, garantindo que toda a área "sinta" o efeito da chuva. Com base nisso, foi adotada uma precipitação com duração de 60 minutos. Além disso, o PDDrU

sugere que o intervalo de discretização dessa chuva seja aproximadamente um quinto do tempo de concentração da área de estudo, o que, neste caso, resulta em 2 minutos.

Os hietogramas gerados com essa metodologia foram representados nas figuras seguintes: o hietograma para o tempo de retorno de 2 anos está na Figura 08, o de 5 anos na Figura 09, e o de 11 anos na Figura 10. Essas figuras fornecem uma base visual para a simulação dos cenários de drenagem, permitindo uma análise comparativa dos volumes de escoamento sob diferentes condições de precipitação.

Figura 08 – Hietograma para TR de 2 anos.

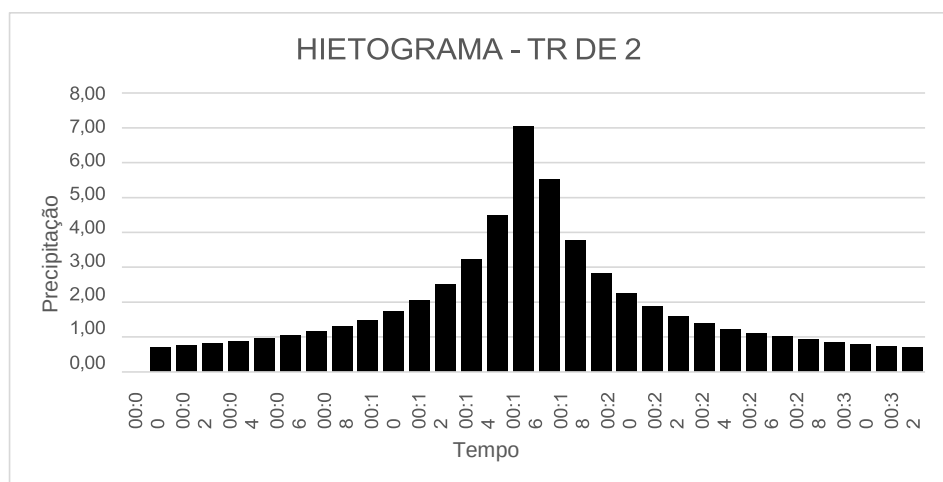
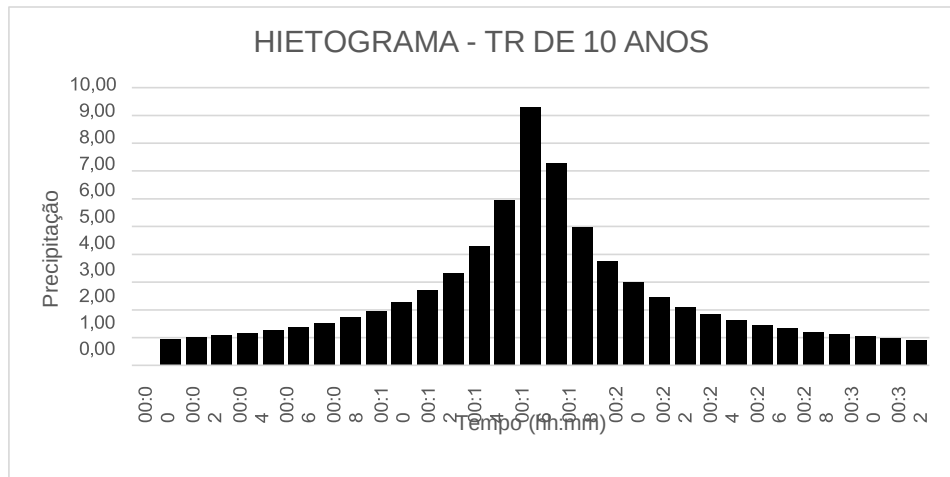


Figura 10 – Hietograma para TR de 10 anos.

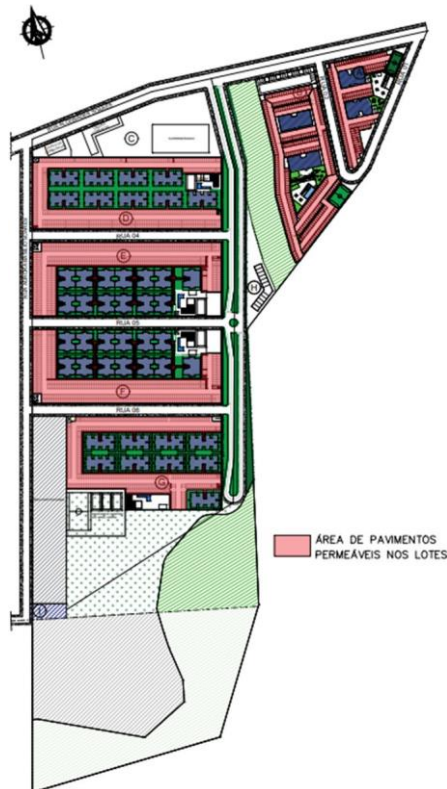


Fonte: Autora (2024)

3.3 MODELAGEM DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

A área de intervenção com os pavimentos permeáveis considerada foi referente a área de estacionamentos, ruas e avenidas, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 – Delimitação das áreas de aplicação de pavimento permeável.



Fonte: Autora (2024)

A área de intervenção corresponde a 68.043,77 m², cerca de 35,79% da área total do loteamento e 62,90% da área impermeável total. A quantificação dessa área ocorreu por meio do programa computacional Autodesk Autocad.

Para a simulação do cenário com pavimentos permeáveis, foi necessário definir a abordagem de infiltração que melhor se adequasse às condições da área de estudo. Optou-se por um modelo de infiltração total, que considera que toda a água da chuva será absorvida pelo solo, sem escoamento superficial. Essa escolha foi feita com base na suposição de que a área não possui um sistema de drenagem existente, o que torna essencial que o solo seja capaz de reter toda a precipitação.

Para o dimensionamento da camada de armazenamento do pavimento, foi adotada uma profundidade de 150 mm, correspondente à mínima espessura verificada em projetos semelhantes (Araujo; Tucci; Goldefum, 2000).

Os dados das camadas do pavimento permeável usado no software encontram-se na Tabela 07.

Tabela 07 - Dados de cada camada utilizada na simulação do pavimento permeável.

Camada	Parâmetro	Unidade	Valor
Superfície	Armazenamento	mm	0,00
	Volume de vegetação	%	0,00
	Rugosidade (n)	-	0,10
	Declividade	%	1,00
Pavimento	Espessura	mm	150,00
	Índice de vazios	-	0,15
	Parcela impermeável	%	0,00
	Permeabilidade	-	15,00
	Fator de coagulação	-	0,00
Solo	Espessura	mm	0,00
	Porosidade	%	-
	Capacidade de campo	mm	-
	Ponto de murcha	%	-
	Condutividade	mm/hr	-
	Condutividade	%	-
	Sucção capilar	mm	-
Armazenamento	Altura da camada de armazenamento	mm	150,00
	Índice de vazios	-	0,66
	Taxa de infiltração	mm/hr	12,70
	Fator de colmatação	-	0,00
Dreno	Coeficiente de drenagem	-	0,00

Expoente de drenagem	-	-
Altura da tomada de água	mm	-

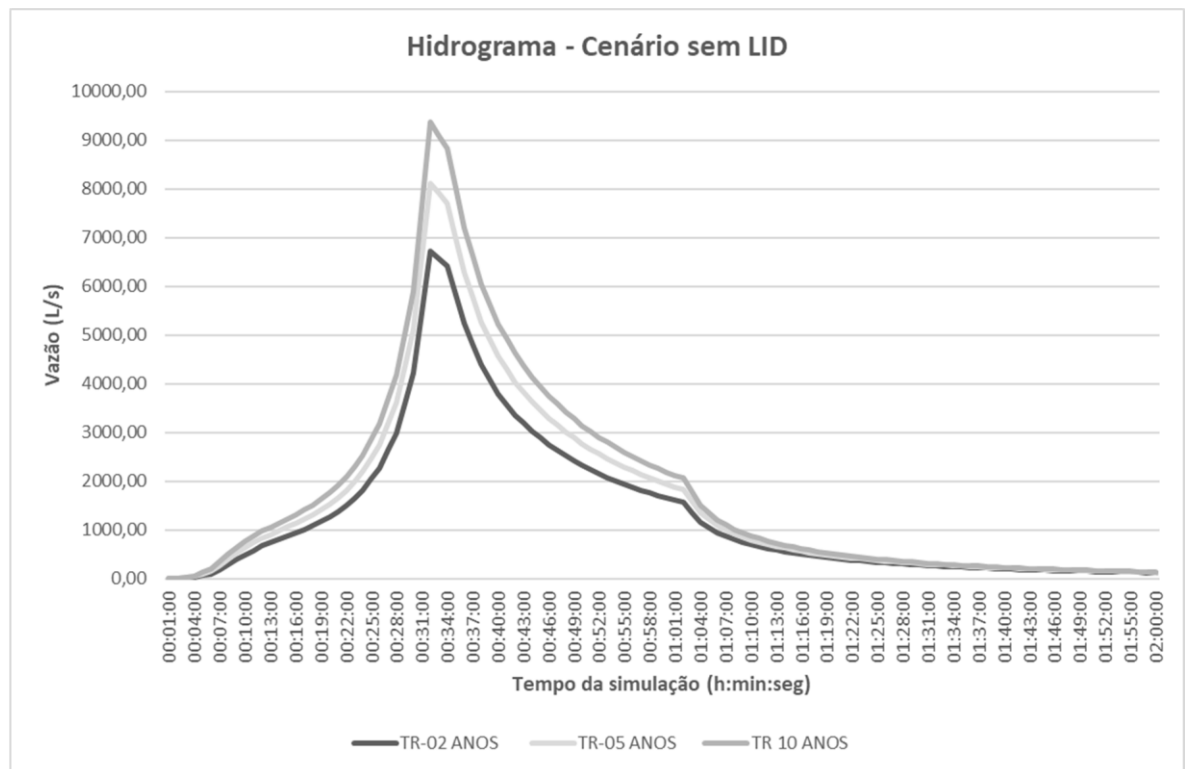
Fonte: Autora (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise comparativa dos hidrogramas entre os cenários com e sem aplicação dos pavimentos permeáveis

Os hidrogramas da área de estudo, antes da aplicação dos pavimentos permeáveis, para os diferentes eventos de precipitação encontram-se na Figura 12.

Figura 12 - Escoamento superficial considerando os cenários sem aplicação das LID's.



Fonte: Autora (2024)

Os resultados apresentados nos hidrogramas refletem a resposta hidrológica para os três diferentes períodos de retorno (TR) de precipitação: 2 anos, 5 anos e 10 anos. Cada curva no gráfico representa o fluxo de vazão (em litros por segundo) ao longo do tempo (em horas) após um evento de precipitação com duração de 60 minutos.

Considerando o cenário sem aplicação dos pavimentos permeáveis, para o TR de 2 anos, a vazão de pico registrada foi de 6.719,98 L/s (6,71 m³/s) com um volume

escoado final de 9.651,00 m³. No caso do TR de 5 anos, a vazão de pico aumentou para 8.118,56 L/s (8,11 m³/s) e o volume escoado final foi de 11.495 m³. Para o TR de 10 anos, a vazão de pico foi ainda maior, atingindo 9.365,11 L/s (9,36 m³/s), com um volume escoado final de 13.110,00 m³. Os resultados das simulações para os três diferentes períodos de retorno (TR) de precipitação foram consolidados na Tabela 08, que apresenta a vazão de pico e o volume escoado final para os cenários sem a aplicação de pavimentos permeáveis. Observa-se que, à medida que o período de retorno aumenta, há um crescimento significativo tanto na vazão de pico quanto no volume escoado, conforme esperado em eventos de precipitação mais intensos.

Tabela 08 – Vazão de Pico e Volume Escoado Final para Diferentes Períodos de Retorno (TR) sem Pavimentos Permeáveis.

Indicadores	Sem LID (TR 2 anos)	Sem LID (TR 5 anos)	Sem LID (TR 10 anos)
Vazão de Pico (m³/s)	6,71	8,11	9,36
Volume Escoado Final (m³)	9651,00	11495,00	13110,00

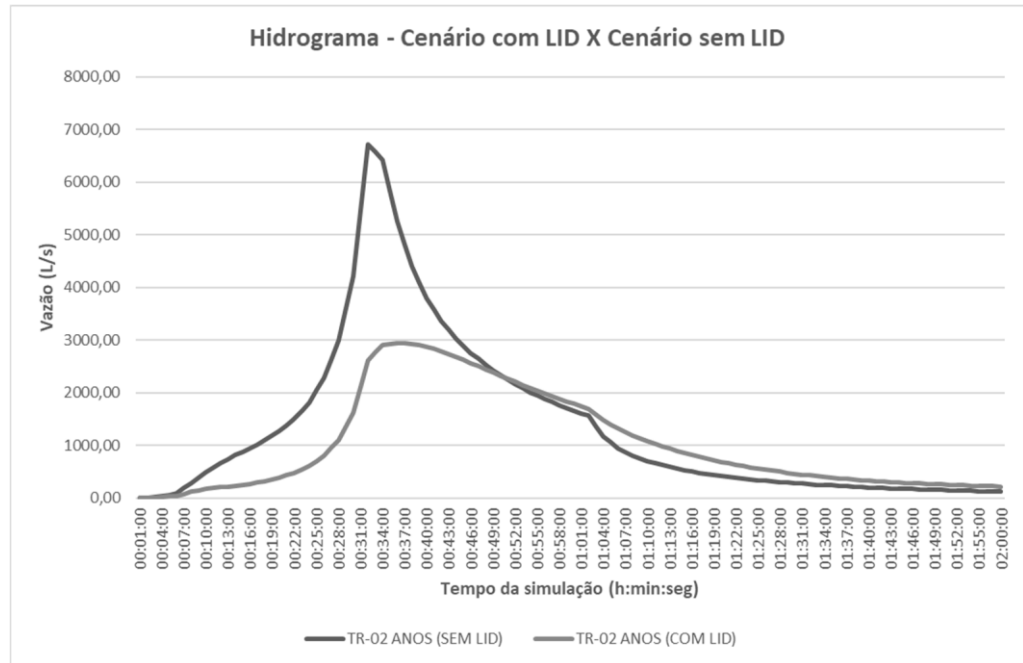
Fonte: Autora (2024)

Todas as curvas no hidrograma exibem um aumento rápido na vazão, seguido por um declínio gradual. Isso é característico de eventos de precipitação intensa, onde a água da chuva escoar rapidamente para os cursos d'água, seguido por um período de recessão onde a vazão diminui à medida que o escoamento superficial e o fluxo base se estabilizam. O tempo até o pico de vazão é o mesmo para todos os períodos de retorno, ocorrendo aos 32 minutos, sugerindo que o tempo de concentração da sub-bacia é relativamente curto e não varia significativamente com a intensidade do evento de precipitação.

Após a aplicação dos pavimentos permeáveis na área de estudo, observou-se uma mudança significativa no comportamento hidrológico dos hidrogramas. Foram simulados eventos de precipitação para os períodos de retorno (TR) de 2, 5 e 10 anos, e os resultados gerados com a aplicação dos pavimentos permeáveis indicam uma redução na vazão de pico, além de um prolongamento do tempo de retardo. Esses efeitos são apresentados nos hidrogramas das Figuras 13, 14 e 15, que mostram,

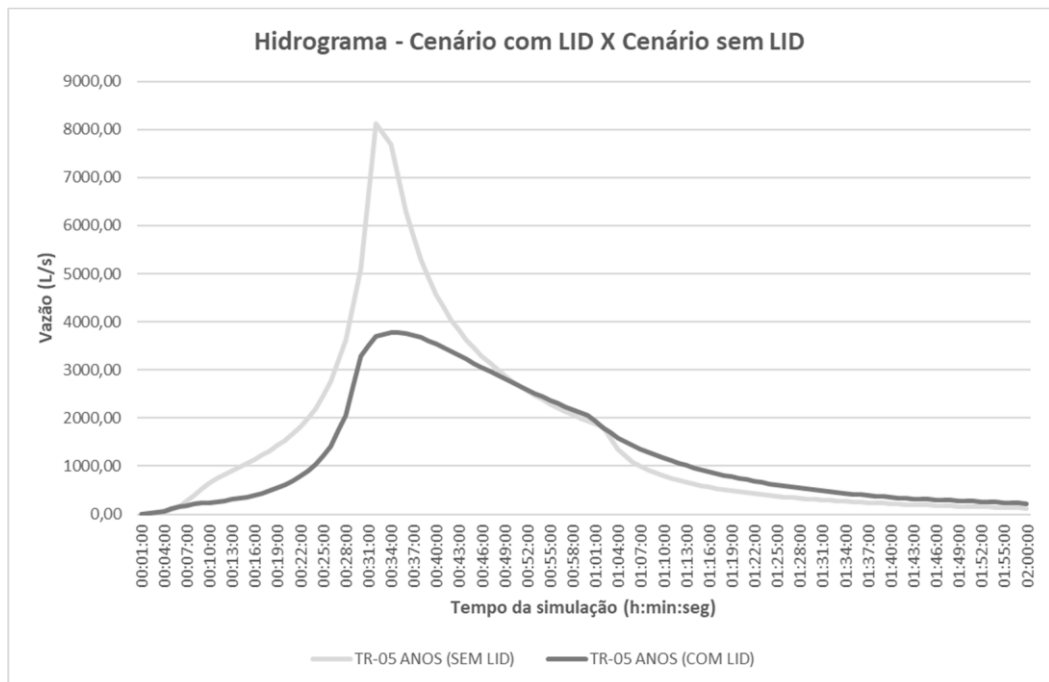
respectivamente, os cenários para os TR de 2, 5 e 10 anos.

Figura 13 - Escoamento superficial considerando os cenários simulados para o TR de 02 anos.



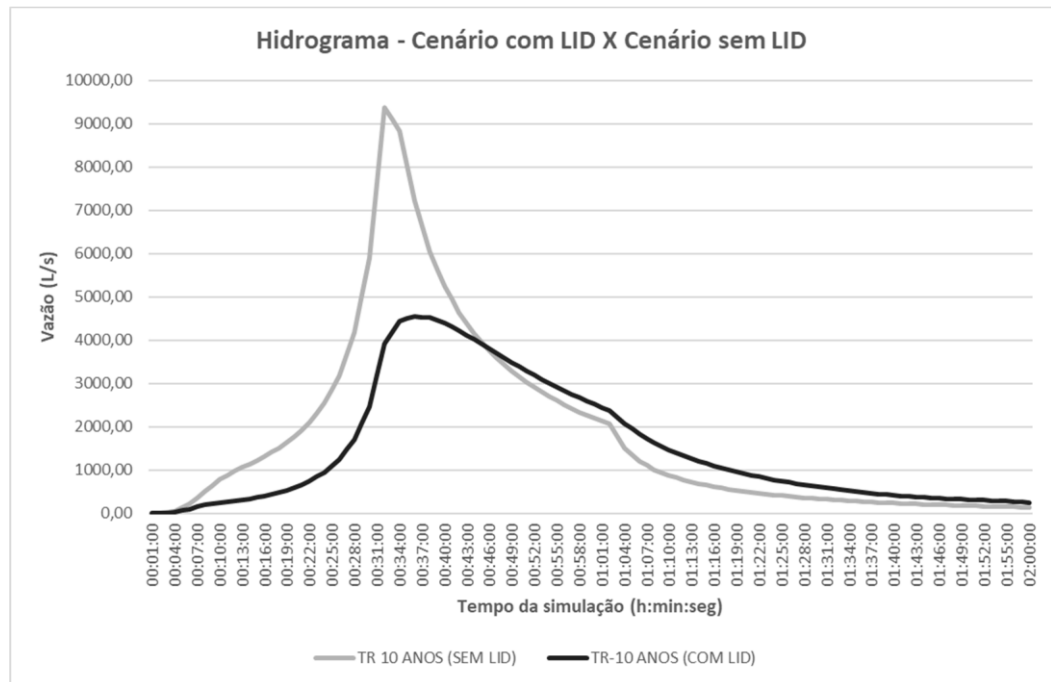
Fonte: Autora (2024)

Figura 14 - Escoamento superficial considerando os cenários simulados para o TR de 05 anos.



Fonte: Autora (2024)

Figura 15 - Escoamento superficial considerando os cenários simulados para o TR de 10 anos.



Fonte: Autora (2024)

Para o TR de 2 anos, a vazão de pico no cenário com LID foi de aproximadamente 2.900,18 L/s (2,9 m³/s) com um volume escoado final de 7.340 m³. No caso do TR de 5 anos, a vazão de pico foi reduzida para 3.768,61 L/s (3,77 m³/s) e o volume escoado final foi de 7.340 m³. Para o TR de 10 anos, a vazão de pico foi de aproximadamente 4.457,99 L/s (4,46 m³/s), com um volume escoado final de 10.636,00 m³.

Além da redução das vazões de pico, a forma do hidrograma no cenário com LID mostra um declínio mais suave nas vazões após o pico, sugerindo uma liberação mais controlada da água da chuva. Isso se deve à capacidade do pavimento permeável de retardar e infiltrar a água, resultando em uma liberação mais distribuída ao longo do tempo. No cenário com LID, este tempo é ligeiramente maior, o que indica que as práticas de LID aumentam o tempo de concentração, promovendo a infiltração e retardando o escoamento superficial.

Os principais resultados da simulação para os cenários com LID são resumidos na Tabela 09 a seguir.

Tabela 09 –Vazão de Pico e Volume Escoado Final para Diferentes Períodos de Retorno (TR) com Pavimentos Permeáveis

Indicadores	Com LID (TR 2 anos)	Com LID (TR 5 anos)	Com LID (TR 10 anos)
Vazão de Pico (m³/s)	2,90	3,77	4,46
Volume Escoado Final (m³)	7340,00	7340,00	10636,00

Fonte: Autora (2024)

Verificou-se também que, ao observar os dados simulados, com a aplicação das LID's o escoamento teve um retardo de 07 minutos para o TR de 02 anos, 05 minutos para o TR de 05 anos e de 07 minutos para o TR de 10 anos, em relação ao cenário sem LID.

A Tabela 10 apresenta um resumo das reduções para os valores de vazão de pico, volume escoado e tempo de simulação até a vazão de pico.

Tabela 10 – Reduções de parâmetros após implementação das LID's.

Tempo de Retorno (anos)	Redução da vazão de pico (%)	Redução do volume escoado (%)	Retardo do tempo da vazão de pico (min)
2	56,82%	23,98%	7
5	53,58%	20,74%	5
10	52,41%	18,87%	7

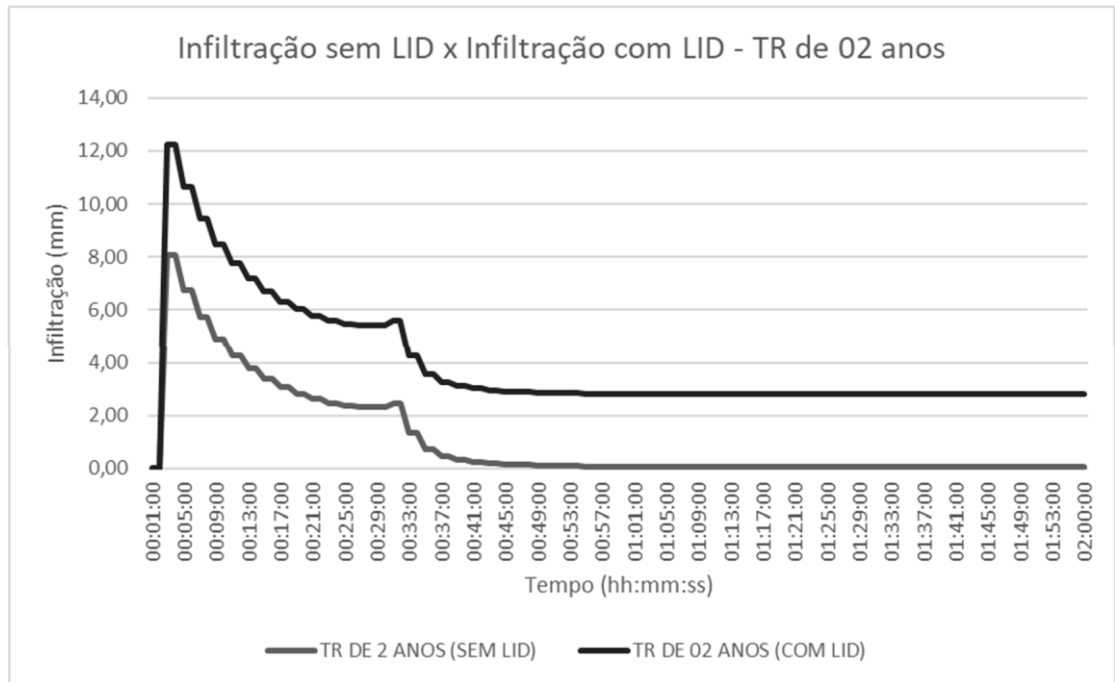
Fonte: Autora (2024)

Embora a intensidade dos eventos de precipitação permaneça a mesma, ao se comparar os cenários sem aplicação das LID's e com a aplicação das LID's, a implementação dos pavimentos permeáveis reduz significativamente o volume de escoamento superficial e, conseqüentemente, as vazões de pico.

4.2 Análise comparativa da infiltração ao longo do tempo entre os cenários com e sem aplicação dos pavimentos permeáveis

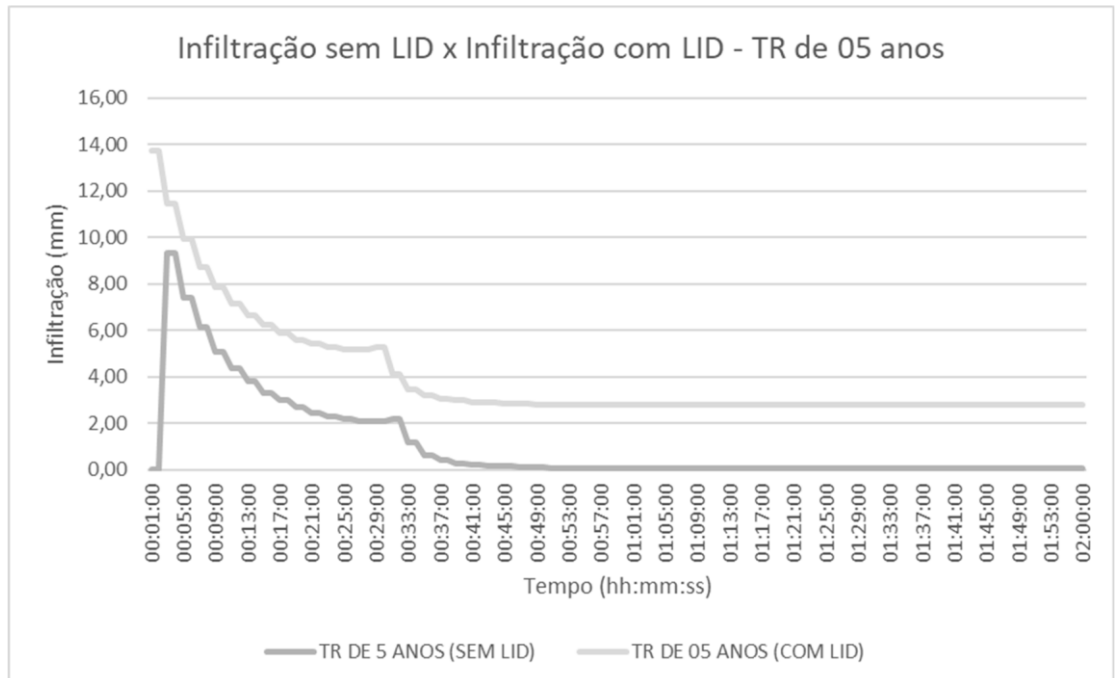
Outro parâmetro analisado foi a infiltração da água no solo em função dos diferentes tempos de retorno. Os gráficos que apresentam os valores de infiltração na área de estudo para os diversos eventos de precipitação estão localizados nas Figuras 16, 17 e 18.

Figura 16- Infiltração considerando os cenários simulados para o TR de 02 anos.



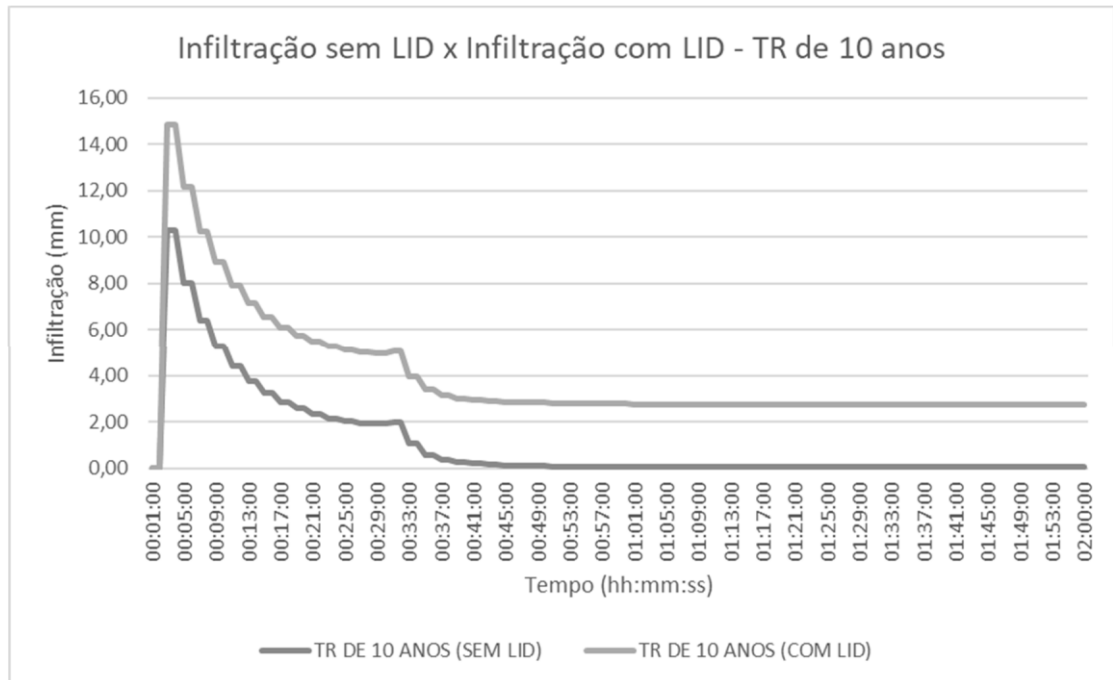
Fonte: Autora (2024)

Figura 17- Infiltração considerando os cenários simulados para o TR de 05 anos.



Fonte: Autora (2024)

Figura 18- Infiltração considerando os cenários simulados para o TR de 10 anos.



Fonte: Autora (2024)

Nos cenários sem a aplicação de pavimentos permeáveis, observa-se que tanto para os períodos de retorno (TR) de 2 anos quanto para os de 5 anos e 10 anos, a infiltração atinge seu pico inicial próximo de 10 mm logo após o início da precipitação. Este valor representa a capacidade máxima de infiltração do solo no início do evento, antes que o solo comece a se saturar.

Há uma rápida diminuição na taxa de infiltração após o pico inicial, estabilizando-se abaixo de 1 mm após aproximadamente 30 minutos. Esta rápida queda na infiltração sugere que o solo rapidamente se aproxima de sua capacidade de saturação, reduzindo significativamente a taxa de percolação da água. Como resultado, a maior parte da precipitação que não é infiltrada contribui para o escoamento superficial.

Comparando os diferentes TRs, observa-se que a infiltração inicial é relativamente similar entre os períodos de retorno. No entanto, a intensidade e a duração do evento de precipitação influenciam a taxa de declínio da infiltração, com eventos mais intensos (como o TR de 10 anos) resultando em uma saturação mais rápida do solo. Isso indica que, em eventos de precipitação mais severos, a capacidade do solo de infiltrar água é ainda mais limitada, o que aumenta o problema do escoamento superficial.

Já nos cenários onde foram aplicados os pavimentos permeáveis, observa-se que a infiltração inicial é substancialmente mais alta, atingindo picos próximos de 14 mm logo após o início da precipitação. Este aumento na infiltração inicial é indicativo da eficácia dos pavimentos permeáveis em permitir que a água da chuva penetre rapidamente no solo, reduzindo o escoamento superficial.

Após o pico inicial, a infiltração diminui gradualmente, estabilizando-se em torno de 2 mm após cerca de 30 minutos. Esta estabilização em um valor ainda significativo de infiltração sugere que os pavimentos permeáveis continuam a facilitar a percolação da água, mesmo após o solo começar a se aproximar da saturação. A presença de pavimentos permeáveis permite uma infiltração contínua e mais prolongada, reduzindo assim a quantidade de água que contribui para o escoamento superficial.

Analisando os diferentes TRs, a infiltração inicial é bastante similar entre os períodos de retorno, mas há uma ligeira variação na taxa de declínio da infiltração, especialmente para o TR de 10 anos. Em eventos de precipitação mais intensos, a capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis é testada, mas ainda se mostra eficaz em comparação com o cenário sem LID's.

Para facilitar a compreensão dos resultados, a Tabela 11 foi elaborada, detalhando os valores de infiltração para cada cenário.

Tabela 11 – Resumo do cenário modelado com e sem a aplicação do pavimento permeável.

Tempo de Retorno (anos)	Cenário Modelado	Infiltração (mm)	Aumento de Infiltração (%)
2	Sem pavimentos permeáveis	2,11	-
2	Com pavimentos permeáveis	7,82	270,61
5	Sem pavimentos permeáveis	2,13	-
5	Com pavimentos permeáveis	7,94	272,77
10	Sem pavimentos permeáveis	2,14	-
10	Com pavimentos permeáveis	7,86	267,28

Fonte: Autora (2024)

A eficácia dos pavimentos permeáveis na gestão do escoamento superficial e na mitigação dos impactos de eventos de precipitação intensa é corroborada por resultados de estudos diversos. Collins *et al.* (2008), em seu experimento na Carolina

do Norte, demonstraram que pavimentos permeáveis reduziram as taxas de escoamento superficial em relação ao asfalto convencional. De forma semelhante, em Teresina-PI, a implementação desses pavimentos resultou em uma redução significativa das vazões de pico, com uma diminuição de 56,82% para o tempo de retorno de 2 anos, confirmando a eficácia observada por Collins *et al.*

No que diz respeito à capacidade de infiltração, Brattebo e Booth (2003) verificaram em Renton, Washington, que, mesmo após seis anos de uso contínuo, os pavimentos permeáveis continuavam a infiltrar praticamente toda a precipitação, inclusive durante eventos extremos de até 7,4 mm/h. Em consonância, os dados deste estudo mostraram um aumento substancial na infiltração inicial, atingindo picos próximos de 14 mm, o que reduziu consideravelmente o volume de escoamento superficial. Esses resultados indicam que os pavimentos permeáveis mantêm sua eficiência ao longo do tempo, mesmo sob condições climáticas severas, ajudando a mitigar o risco de inundações.

A atenuação dos picos de vazão também é um aspecto relevante. Schluter *et al.* (2004), em seu estudo na Escócia, observaram um desempenho positivo dos pavimentos permeáveis, com a atenuação de picos de vazão com uma média de 46,5% e um tempo de retardo significativo de até 143 minutos. No loteamento deste estudo, foi observado um retardo de até 7 minutos no tempo até o pico de vazão após a implementação dos pavimentos permeáveis, sugerindo um aumento no tempo de concentração e uma liberação mais controlada da água da chuva. Este comportamento prolongado na resposta hidrológica do sistema é fundamental para a redução dos impactos de enchentes em áreas urbanas.

Esses resultados ressaltam a importância e a eficácia dos pavimentos permeáveis, confirmando os achados desta pesquisa quanto à maior capacidade de infiltração inicial e à infiltração contínua ao longo do tempo, que ajudam a diminuir o escoamento superficial e, por consequência, os riscos de inundações urbanas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou como a implementação de pavimentos permeáveis pode melhorar a gestão do escoamento superficial em Teresina-PI. Usando o software SWMM para simular diferentes cenários, compararam-se áreas com pavimentação convencional e áreas com pavimentos permeáveis. A análise focou na redução do

volume de escoamento, na diminuição da vazão de pico, no aumento do tempo de retardo durante chuvas e na melhoria da infiltração da água no solo.

Os resultados das simulações revelaram que os pavimentos permeáveis podem reduzir significativamente o volume de escoamento, com uma diminuição de até 24%. Essa redução é crucial para diminuir o risco de alagamentos em áreas urbanas, onde a impermeabilização do solo é alta. Além disso, a vazão de pico foi reduzida em até 57%, o que ajuda a evitar a sobrecarga dos sistemas de drenagem durante chuvas fortes.

Os pavimentos permeáveis também aumentaram o tempo de retardo, adiando o pico de vazão em até 7 minutos. Isso proporciona uma janela adicional para que o escoamento seja gerido de forma mais eficiente pelos sistemas de drenagem, ajudando a prevenir inundações imediatas. O aumento na capacidade de infiltração observado nas áreas com pavimentos permeáveis foi significativo, comparado com as áreas pavimentadas convencionalmente. Essa maior infiltração não só reduz o volume de escoamento superficial, mas também favorece a recarga dos aquíferos subterrâneos, beneficiando o ciclo hidrológico local.

Este estudo confirma que os pavimentos permeáveis são uma solução eficaz para melhorar a gestão das águas pluviais em ambientes urbanos, especialmente em regiões propensas a alagamentos. Os resultados mostram que essa tecnologia pode reduzir problemas relacionados ao escoamento superficial e aumentar a resiliência urbana durante eventos de precipitação intensa.

No entanto, é importante reconhecer algumas limitações, como a variabilidade nas características dos pavimentos permeáveis e a necessidade de manutenção para garantir o desempenho contínuo. As simulações foram baseadas em condições específicas, o que pode não refletir todas as variabilidades de um ambiente urbano real.

Futuras pesquisas poderiam se concentrar no desempenho a longo prazo dos pavimentos permeáveis, incluindo aspectos de desgaste e manutenção, além de realizar análises de custo-benefício. Também seria valioso simular diferentes tipos de áreas urbanas e condições climáticas para entender melhor o impacto dos pavimentos permeáveis em diversos contextos. Em resumo, este estudo oferece uma base sólida para futuras pesquisas e implementações dessa tecnologia em outras áreas urbanas, confirmando sua eficácia na gestão das águas pluviais.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.
- ASCE (1982). **Gravity Sanitary Sewer Design and Construction, ASCE Manual of Practice** No. 60, New York, NY.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015. 25 p.
- BARBOSA, I. S. S. ; SA, G. S. ; SANTOS, L. P. R. ; FREIRE, A. S. ; SOUSA, M. C. B. . **Avaliação do Uso de Telhados Verdes através de Modelagem Computacional na Sub-Bacia P13 em Teresina-PI.** In: 7º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, 2023, Porto Alegre. Anais do 7º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis. Madri: IAHR Publishing, 2023. v. 3. p. 635-641.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana.** ("SciELO - Brasil - Melhoria da qualidade da água de rios urbanos: novos ...") Porto Alegre: ABRH, 2005. 266p.
- BRATTEBO, B. O; BOOTH, B. D. 2003. **"Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems."** ("[PDF] Long-term stormwater quantity and quality performance of ...") *Water Research*, 37. p. 4369-4376.
- CANHOLI, J. F. **Medidas de controle "in situ" do escoamento superficial em áreas urbanas: análise de aspectos técnicos e legais.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- CHAHAR, B.R.; GRAILLOT, D.; GAUR, S. **Storm-Water Management through Infiltration Trenches.** Technical release: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, p. 274-281, 2012.
- CLAR, M.; BARFILEFD, B.; O'CONNOR, T. **Stormwater best management practices design guide: Volume 1 -General considerations.** Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2004. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report. Acesso em: 11.jun. 2023.
- COLLINS, K.A; HUNT, W.F; HATHAWAY, J.M. (2007). **Hydrological and water quality comparison of four types of permeable pavement and standar asphalts in eastern North Carolina.** *Journal of Hydrological Engineering* 13(12): 1146 – 1157.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. **Performance and implementation of low impact development – A review.** ("New Mathematical Optimization Approaches for LID Systems") ("New Mathematical Optimization Approaches for LID Systems") *Science of the Total Environment*, v. 607–608, p. 413–432, 2017.

Environmental Protection Agency. EPA. (1999). **Storm water Technology Fact Sheet Infiltration Trench**. EPA 832- F -99-019. Office of Water, Washington DC. September 1999.

FLETCHER T.D.; SHUSTER, W.; HUNT, W.F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.T.; BARRAUD, S.; DAVIES, A.S.; KRAJEWSKI, J.B.; MIKKELSEN, P.S.; RIVARD, G.; UHL, M.DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M. **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.

GUO, X. et al. **Modelling Low Impact Development in watersheds using the storm water management model**. Urban Water Journal, v. 16, n. 2, p. 146–155, 2019.

HAMEL, P.; DALY, E.; FLETCHER, T.D. **Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanization on baseflow: A review**. Journal of Hydrology, v.485, p.201-211, 2013.

HAMMES, Gabriela. **Aproveitamento de água pluvial captada a partir de pavimentos permeáveis para uso não potável**. 2017. 109 p. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

HUANG, T.; WANG, Y.; ZHANG, J. **Simulation, and evaluation of Low Impact Development of urban residential district based on SWMM and GIS**. Earth and Environmental Science, v. 74, n. 1, 2017.

JABÔR, Marcos. **DRENAGEM DE RODOVIAS**. [S. l.]: ABDER, 2020. 196 p. Disponível em: <https://www.abder.org.br/midia/trabalhos-tecnicos/>. Acesso em: 17 jun. 2023.

JUNG, Y.; HAN, S.; JO, D. **Optimal design of permeable pavement using harmony search algorithm with SWMM**. Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 382, p. 385–394, 2016.

KIPKIE, C.; JAMES, W. **Feasibility of a permeable pavement option in SWMM for long term continuous modeling**. Journal of Water Management Modeling, v. 6062, p. 303–324, 2000.

KIRBY, A. **Sud's – innovation or a tried and tested practice? Proceedings of the ICE Municipal Engineer**, v.158, n.2, p.115-122, 2005.

KONG, F. et al. **Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development**. (“Kong, F., et al. (2017) Modeling Stormwater Management at the City ...”) Environmental Modelling and Software, v. 95, p. 132–142, 2017.

KOURTINS,I.; TSIHRINTZIS,V.; BALTAS, E. **Simulation of Low Impact Development (LID) Practices and Comparison with Conventional Drainage Solutions**. Proceedings, 2018.

KURUPPU, U.; RAHMAN, A.; RAHMAN, M. A. **Permeable pavement as a stormwater best management practice: A review and discussion**. Environmental Earth Sciences, v. 78, n. 10, p. 1–20, 2019.

MAIDMENT, D.R. **GIS and hydrology modeling**. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. Environmental Modeling with GIS. New York: Oxford University Press, p.147- 167, 1993.

MULLANEY, J.; LUCKE, T. **Practical review of pervious pavement designs**. Clean - Soil, Air, Water, v. 42, n. 2, p. 111–124, 2014.

NRCS - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (2004). **National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology. Chapter 10 – Estimations of Direct Runoff from Storm Rainfall**. United States Department of Agriculture.

PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; LE CLOIREC, P. 2000. **Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement**. Water Research. Amsterdam, v.34, n.18, p.4446-4454.

PALLA, A.; GNECCO, I. **Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale**." ("Water | Free Full-Text | Hydrological Modelling and Evaluation of ...") Journal of Hydrology, v. 528, p. 361–368, 2015.

QIN, H.; LI, Z.; FU, G. **The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics**. Journal of Environmental Management, v.129, p.1-9, 2013.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's manual version 5.1**. United States Environmental Protection Agency, p. 1–352, 2015.

SA, G. S. ; BARBOSA, I. S. S. ; SANTOS, L. P. R. ; SOUSA, M. C. B. . **MODELAGEM HIDROLÓGICA COM USO DE MICRO RESERVATÓRIOS NA SUB BACIA PE11 EM TERESINA - PI**. In: XIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Teresina - PI, 2022, Teresina

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos: Parte 1: Classificação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SILVEIRA, A.L.L. (2005). **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 1, janeiro/março.

SCHAAKE, J. C., GEYER, J. C., KNAPP, J. W., 1967, **Experimental examination of the rational method**, Journal of Hydraulics Division, ASCE, vol. 93, No. HY6, nov., pp 353-370.

SCHOLZ, Miklas; GRABOWIECKI, Piotr. 2007. **Review of permeable pavement**

systems. Building and Environment. v. 42, n.11, p. 3830-3836.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 29 jul. 2024.

TERESINA. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral**, Teresina, Piauí, 2010.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina**. Relatório Final, 2010

TUCCI, C. E. M., **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS), 2001.

TUCCI, Carlos EM. **Regulamentação da drenagem urbana no Brasil**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 13, n. 1, p. 29-42, 2016.