

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CALÇADAS DE CONCRETO PERMEÁVEL NO CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Carine Burdak Tymoczuk¹; Fernando Allan Oliveira Dos Santos²; Eduardo Pereira³; Cesar

Augusto Medeiros Destro⁴ & Rafael Jansen Mikami⁵

Abstract: Accelerated urbanization has led to significant changes in urban areas, resulting in an excess of impervious surfaces and an increase in the frequency of flooding. Pervious pavements are a sustainable drainage solution designed to restore surface permeability and act as a temporary storage for stormwater. This study aimed to assess the potential performance of pervious pavements in a residential development located in Ponta Grossa/PR. The micro-drainage network was modeled using EPA SWMM software to simulate surface runoff under the current scenario. Pervious pavements were designed to replace the existing sidewalks, and simulations were carried out considering both minimum and maximum base thicknesses. For the design storm used in the simulation, a peak flow of 2.5 m³/s was observed at the drainage outlet under current conditions. Replacing conventional sidewalks with pervious ones reduced the peak flow to 2.3 m³/s with the minimum base thickness and to 1.35 m³/s with the maximum thickness. The results indicated that the use of pervious pavements alone was sufficient to reduce surface runoff. Performance was directly influenced by the base thickness, suggesting that this parameter can be optimized to enhance the effectiveness of pervious pavements.

Resumo: A urbanização acelerada foi responsável pela modificação intensa das áreas urbanas, resultando em um excesso de áreas impermeáveis e aumento da frequência de inundações. Os pavimentos permeáveis são técnicas de drenagem sustentável que tem como objetivo recuperar a permeabilidade das superfícies além de funcionar como um reservatório de amortecimento de águas pluviais. Neste estudo o objetivo foi avaliar o desempenho potencial de calçadas permeáveis em um loteamento situado em Ponta Grossa/PR. A rede de microdrenagem foi modelada no software EPA SWMM para simular o escoamento superficial. Pavimentos permeáveis foram dimensionados para substituição das calçadas do empreendimento, sendo simulados dispositivos com a altura de base mínima e máxima. Para a chuva de projeto empregada na simulação, foi observada uma vazão máxima de 2,5 m³/s no exutório da rede no cenário atual. A substituição das calçadas convencionais por permeáveis permitiu a redução da vazão de pico para 2,3 m³/s para a altura de base mínima e para 1,35 m³/s para a altura de base máxima. Os resultados obtidos demonstraram que o uso de pavimentos permeáveis apenas nas calçadas já foi suficiente para atenuar as vazões de escoamento superficial. O desempenho foi afetado diretamente pela altura da base, sendo este um parâmetro pode ser ajustado para potencializar a eficiência dos pavimentos permeáveis.

Palavras-Chave – concreto permeável, drenagem, escoamento superficial

1) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 84030-000, Ponta Grossa/PR, carineburdak@gmail.com

2) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, 85503-390, Pato Branco/PR, fernandoallan@alunos.utfpr.edu.br

3) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 84030-000, Ponta Grossa/PR, eduardopereira@uepg.br

4) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, 85503-390, Pato Branco/PR, cesardestro@utfpr.edu.br

5) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, 85503-390, Pato Branco/PR, rjmikami@utfpr.edu.br

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização modifica de forma intensa o meio ambiente, afetando significativamente o ciclo hidrológico local. Um dos principais efeitos notados é a impermeabilização excessiva da superfície urbana, que reduz a infiltração da água e, por consequência, gera um aumento no escoamento superficial. As redes de microdrenagem são responsáveis pela coleta e transporte de águas pluviais, porém são frequentes os casos de alagamentos e inundações causados pela sobrecarga do sistema urbano e dos cursos d'água. De acordo com relatório da Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2023), 93% dos municípios brasileiros registraram algum tipo de desastre natural entre 2013 e 2022, sendo as enchentes, inundações, escorregamentos e deslizamentos de encostas os eventos mais frequentes. Esses dados reforçam a necessidade de buscar soluções sustentáveis para o manejo de águas pluviais.

Os pavimentos permeáveis são técnicas contempladas na drenagem urbana sustentável, sendo compostos por uma camada de revestimento permeável que permite a infiltração da água no seu interior (Hamouda et al., 2025). O revestimento é apoiado em uma base permeável, composta por material granular que se comporta como um reservatório para as águas pluviais coletadas enquanto estas se infiltram no solo. Revestimentos como o concreto permeável possuem uma permeabilidade elevada, podendo superar a de solos naturais. Conforme citam Braga *et al.* (2022), isso possibilita a redução do volume de escoamento superficial da água decorrente de precipitações. Além dos benefícios na drenagem urbana, Sartipi e Saripi (2019) destacam que os pavimentos permeáveis aumentam a segurança das vias devido à maior rugosidade, reduzem a emissão de ruídos e contribuem para a amenização de efeitos de ilhas de calor. Estudos têm avaliado inclusive o potencial de pavimentos de concreto permeável na remoção de poluentes, conforme abordado por Khankhage *et al.* (2023).

Felix *et al.* (2024) avaliaram o uso de pavimentos permeáveis em uma área urbana de Campina Grande/PB e observaram uma redução de pontos críticos de alagamento após a simulação da implantação da técnica compensatória. Para uma chuva de projeto com tempo de retorno de 5 anos a redução da vazão de pico foi de 49%. Oliveira *et al.* (2017) compararam o uso de pavimentos intertravados e pavimentos de concreto poroso em um estacionamento, realizando a modelagem hidrológica da área de estudo. Os autores obtiveram como resultado uma redução na vazão de pico de 30% no cenário com pavimentos permeáveis, sendo notada uma redução de 65% no volume de escoamento superficial. O efeito do pavimento permeável também pode ser amplificado com o uso integrado de outras técnicas como os microreservatórios e telhados verdes, conforme estudado por Pereira *et al.* (2022) e Lopes e Silva (2017).

Apesar de ser uma técnica com grande potencial na drenagem urbana sustentável, a eficiência dos pavimentos permeáveis depende de diversos fatores além da permeabilidade do material de revestimento. Hamouda *et al.* (2025) citam fatores como a permeabilidade do solo, características das camadas do pavimento permeável, além das características hidrológicas da área de aplicação do dispositivo. Conforme abordado por Coutinho *et al.* (2020), a condutividade hidráulica das camadas do pavimento difere, de forma que a infiltração de água no subleito é menor do que o fluxo de entrada de água no dispositivo. Ainda que métodos de dimensionamento hidráulico de pavimentos permeáveis sejam relatados na literatura, a análise do comportamento dessas estruturas é complexa. Modelos como o *Storm Water Management Model* (SWMM) têm sido empregado com o intuito de avaliar os processos hidrológicos em áreas urbanas e o efeito de técnicas de drenagem sustentável (Silva; Costa; Castro, 2013).

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial da água por meio do modelo SWMM. Utilizando-se um loteamento situado no município de Ponta Grossa/PR como estudo de caso, a avaliação do uso dos pavimentos permeáveis exclusivamente nas calçadas públicas foi realizada com o intuito de identificar o efeito da dimensão da base permeável para as condições locais de permeabilidade do solo.

METODOLOGIA

Área de estudo

Para avaliar o desempenho de pavimentos permeáveis, um estudo de caso foi desenvolvido em uma parcela de loteamento localizado no bairro Neves, no município de Ponta Grossa/PR, conforme a Figura 1. Dentro do loteamento em questão a área de estudo foi delimitada de forma a separar as áreas que contribuem para um único exutório.

Figura 1 – Delimitação da área de estudo e rede de microdrenagem do loteamento



A área de estudo totaliza 10,3 hectares, sendo 25,6% ocupados por pavimentos, 6,8% por calçadas e 67,6% por lotes. Consiste em uma região residencial, com lotes de até 300 m² e taxa de ocupação de no máximo 50%.

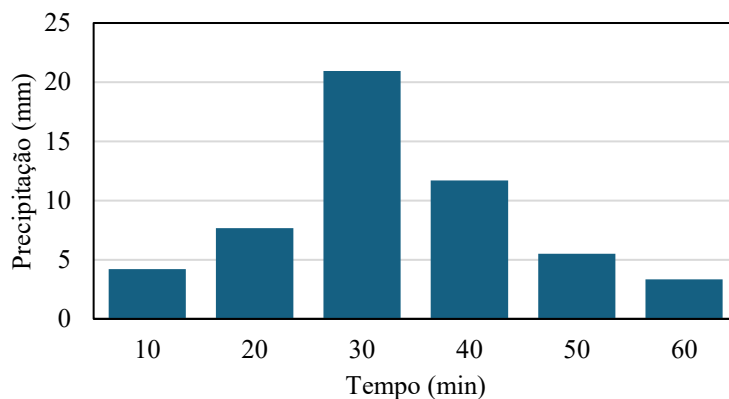
Determinação da Chuva de Projeto

Para avaliar o comportamento hidrológico da área de estudo e realizar a simulação do escoamento superficial, foi determinado um hietograma de projeto pelo método dos blocos alternados. Para o município de Ponta Grossa, a equação IDF foi desenvolvida por Fendrich (1998), sendo apresentada na Equação 1.

$$i = \frac{1902,38 \cdot Tr^{0,152}}{(t+21)^{0,893}} \quad (1)$$

Em que: i – intensidade de precipitação (mm/h), Tr – período de retorno (anos), t – duração da precipitação (minutos). O hietograma de projeto foi calculado considerando $Tr = 10$ anos e uma chuva de duração de 1 hora, valores mínimos recomendados pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Os blocos de precipitação foram calculados em intervalos de 10 minutos, sendo apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Hietograma de projeto para simulação do escoamento superficial



Dimensionamento dos Pavimentos Permeáveis

O dimensionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis foi realizado por meio do procedimento exposto na NBR 16416 (ABNT, 2015). A altura mínima da camada de base foi calculada por meio da Equação 2:

$$h_{min} = \frac{\Delta Q_c R + P - f \cdot T_e}{V_r} \quad (1)$$

Em que: h_{min} – altura mínima da base, ΔQ_c – precipitação excedente da área de contribuição, R – proporção entre área de contribuição e área do pavimento, P – precipitação de projeto, f – taxa de infiltração do solo, T_e – tempo de enchimento, V_r – índice de vazios.

Adotou-se um tempo de enchimento de 2 horas, conforme recomendação da norma, e um índice de vazios de 40% para a camada de base. Devido às características de baixa permeabilidade do solo da região, adotou-se uma taxa de infiltração de 10^{-5} m/s conforme classificação pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Utilizou-se ainda, apenas 50% da taxa de infiltração como segurança e prevendo-se a colmatação do solo ao longo do tempo. A precipitação total de projeto, resultante do hietograma da Figura 2, foi de 53,3 mm.

O loteamento deste estudo foi dividido em áreas de contribuição, sendo computadas as áreas de calçada permeável, áreas de lotes e de ruas. Considerando as calçadas permeáveis responsáveis pela coleta da água precipitada diretamente sobre as calçadas e das águas escoadas sobre as ruas, a altura mínima de base seria em média de 0,5 m. No cenário das calçadas permeáveis sendo responsáveis pelo amortecimento de toda a área do loteamento, as alturas de base ultrapassariam 1,5 m, se tornando inviáveis. Além disso, recomenda-se que a água permaneça no pavimento por no máximo 72 h, limitando a altura de base. Considerando esse critério, a altura de base máxima seria de 0,9 m. Dessa forma, para avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis e o efeito da camada de base, foi realizada a simulação considerando a altura mínima de 0,5 m e máxima de 0,9 m.

Simulação do Escoamento Superficial

A simulação do escoamento superficial na área do loteamento foi realizada por meio do software EPA SWMM. Foram realizadas as simulações de três cenários distintos: I) loteamento com calçadas convencionais; II) calçadas permeáveis com altura de base mínima e; III) calçadas permeáveis com altura de base máxima. Para a simulação do cenário I a rede de microdrenagem do

loteamento foi modelada no software, inserindo-se as informações das bacias de contribuição, poços de visita e galerias pluviais com os respectivos diâmetros. O hietograma de projeto (Figura 2) foi utilizado para a simulação inicial, obtendo-se como resultado as vazões desenvolvidas nas galerias e possíveis alagamentos causados pela extravasão de poços de visita. Para os cenários II e III, os pavimentos permeáveis foram cadastrados no software, sendo adicionados à cada bacia de contribuição conforme a área de calçadas existente. As informações das calçadas permeáveis foram inseridas no software conforme requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015) e dados médios da literatura, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Dados utilizados na simulação dos pavimentos permeáveis

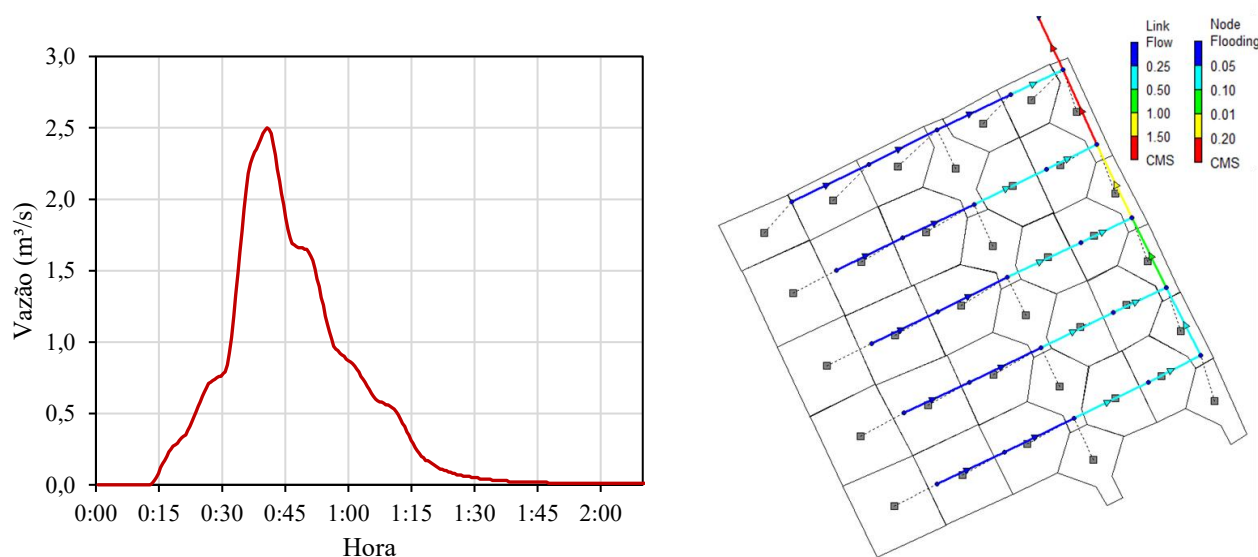
Elemento	Propriedade	Valor	Referência
Revestimento – Concreto Permeável	Espessura	60 mm	NBR 16416 (ABNT, 2015)
	Proporção Vazios/Sólidos	0,25 (Porosidade 20%)	Yu et al. (2023)
	Taxa de Infiltração	0,25 cm/s	Adresi et al. (2024)
Base Permeável – Camada de Brita	Espessura	500 ou 900 mm	Dimensionamento
	Proporção Vazios/Sólidos	0,67 (40% vazios)	≥ 32% conforme NBR 16416 (ABNT, 2015)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Simulação do Sistema de Microdrenagem Convencional

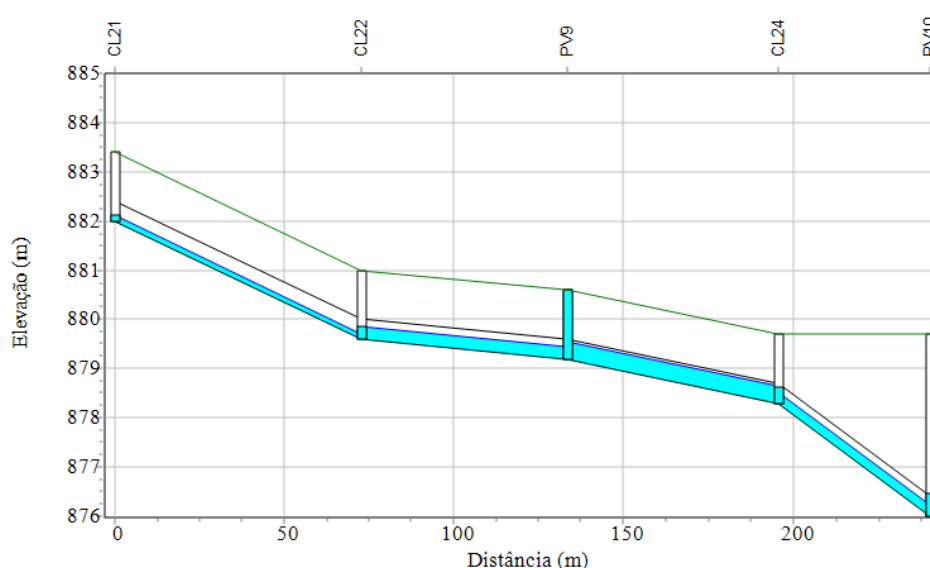
Após a simulação do sistema de microdrenagem convencional no software EPA SWMM, foi analisado o hidrograma referente ao escoamento no exutório do sistema e a distribuição de vazões nas galerias, conforme a Figura 3.

Figura 3 – (a) Hidrograma do escoamento no exutório do sistema e (b) vazões nas galerias no tempo de vazão de pico



O pico de vazão observado no hidrograma foi de aproximadamente $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, após 40 minutos do início da precipitação. Apesar de o método de dimensionamento de galerias pluviais geralmente não considerar a distribuição temporal da chuva, a vazão observada na simulação se aproximou da vazão de dimensionamento do trecho analisado. Na Figura 3b nota-se que no tempo de 40 minutos a maioria das galerias apresenta vazão inferior a $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, especialmente nos trechos de início de rede. Nos trechos finais da rede as vazões passam a superar $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 4 ilustra o perfil longitudinal de um dos trechos do sistema.

Figura 4 – Perfil longitudinal de trecho com sobrecarga e extravasamento de poço de visita na simulação

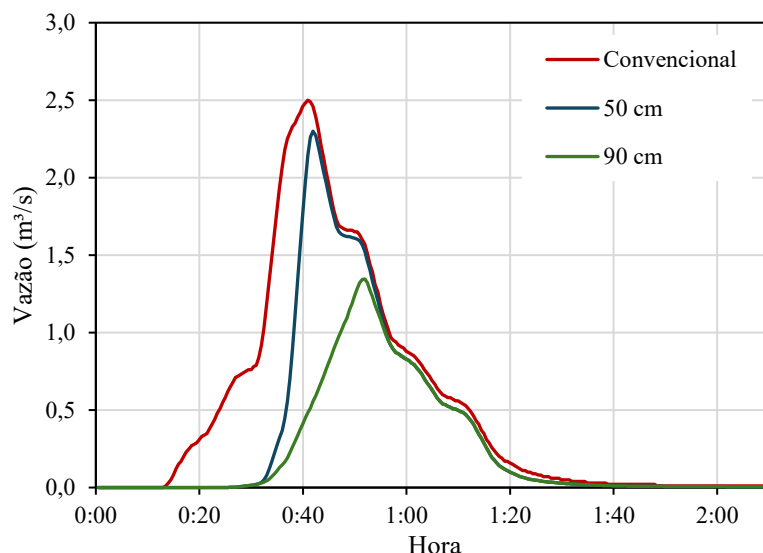


Na Figura 4 observa-se que, para a precipitação utilizada na simulação houve a sobrecarga de uma galeria, ocasionando o extravasamento de água no poço de visita PV9. Isso demonstra que para precipitações intensas, extrapolando o tempo de retorno de projeto, essa área estará sujeita a alagamentos pontuais devido à sobrecarga do sistema.

Simulação do Sistema com Calçadas Permeáveis

Após a simulação dos cenários II e III, contemplando calçadas permeáveis com as alturas de base mínima e máxima (50 e 90 cm), a distribuição temporal da vazão foi analisada em comparação ao cenário I, com calçadas convencionais. Na Figura 5 estão ilustradas as respectivas vazões no exutório da rede de microdrenagem. No cenário com calçadas convencionais foi observada a vazão máxima no exutório da rede de microdrenagem. Para a simulação com calçadas permeáveis com altura de base de 50 cm observa-se que houve uma pequena redução na vazão de pico, atingindo um máximo de $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste cenário, a calçada permeável apresentou capacidade de amortecimento apenas do volume de água precipitado diretamente sobre a calçada e sobre as vias do loteamento. Apesar da pequena diferença nas vazões de pico, observa-se que houve um efeito de armazenamento significativo identificado pela defasagem do início de escoamento no exutório do sistema comparando-se as calçadas convencionais e permeáveis com base de 50 cm.

Figura 5 – Variação temporal das vazões no exutório da rede de microdrenagem

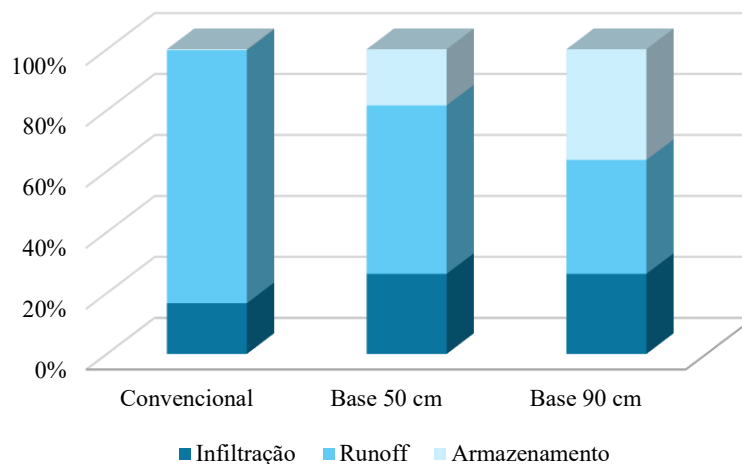


Devido à baixa permeabilidade do solo, a base permeável é preenchida rapidamente pela água escoada superficialmente, porém com taxa de infiltração lenta. Desta forma, a capacidade das calçadas permeáveis é atingida rapidamente e o volume de água excedente é direcionado à rede de microdrenagem. A partir de 55 minutos do início da simulação as vazões no exutório são praticamente coincidentes nos cenários de sistema convencional e calçadas permeáveis com a altura de base mínima.

Considerando-se o terceiro cenário simulado, a utilização de um sistema permeável com base de 90 cm de altura gerou uma redução considerável na vazão de pico no exutório do sistema, atingindo um máximo de 1,3 m³/s. A redução foi na ordem de 48%, atingindo eficiência similar à encontrada nos estudos de Felix *et al.* (2024) e Oliveira *et al.* (2017). A maior eficiência observada neste cenário se deve à maior capacidade do reservatório formado pela base permeável, que foi suficiente para amortecer um volume considerável do escoamento superficial. Para a chuva de projeto o amortecimento foi suficiente para atenuar o pico de vazão, aliviando assim o sistema de microdrenagem convencional. Além disso, as sobrecargas na rede destacadas na Figura 4 também foram atenuadas, evitando o extravasamento pelo poço de visita 9.

Conforme identificado nos resultados, as calçadas permeáveis têm potencial como dispositivo sustentável de drenagem urbana, atuando como técnica de infiltração e armazenamento. A altura da camada de base teve impacto significativo na área de estudo para a precipitação de projeto simulada. Nota-se, porém, que a permeabilidade do solo foi um fator limitante neste estudo. Mesmo apresentando uma vazão de pico consideravelmente inferior, as calçadas com base de 90 cm infiltraram a mesma lâmina d'água que as calçadas dimensionadas com a altura de base de 50 cm durante o tempo de simulação (3 horas). Este resultado destaca a importância de considerar a capacidade hidráulica de cada camada do pavimento e não apenas do revestimento permeável, conforme indicado por Coutinho *et al.* (2020). Na Figura 6 estão representadas as frações da lâmina d'água precipitada que infiltraram no solo, escoaram superficialmente e permaneceram armazenadas ao final da simulação.

Figura 6 – Percentual da lâmina d'água infiltrada, escoada superficialmente e armazenada ao final da simulação



Na figura identifica-se que a contribuição das calçadas permeáveis foi principalmente devido aos efeitos de armazenamento na base permeável do dispositivo. Para ambas as alturas de base, a infiltração foi a mesma, visto que a área de calçada permeável não foi alterada. O armazenamento, por outro lado, foi proporcional à altura da camada de base, impactando diretamente no escoamento superficial. Outro ponto a se destacar é que, ao final da simulação, as calçadas permeáveis estão parcialmente cheias e sua capacidade máxima será recuperada apenas após a infiltração completa da água. Dessa forma, devido à baixa permeabilidade do solo esses dispositivos apresentarão menor eficiência em uma precipitação subsequente.

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi avaliada a eficiência de calçadas permeáveis como medidas de controle do escoamento superficial em um loteamento. As simulações realizadas na área de estudo demonstraram que as calçadas permeáveis apresentaram um efeito significativo no escoamento superficial, reduzindo as vazões de pico proporcionalmente à altura da base permeável. A permeabilidade do solo foi um dos fatores limitantes na eficiência dos pavimentos, especialmente na simulação com altura de base mínima. A altura da base demonstrou-se como parâmetro relevante na capacidade das calçadas permeáveis, associada ao efeito de armazenamento. No entanto, a altura da camada é limitada e influencia diretamente o custo do sistema. Uma altura intermediária pode ser definida de forma a equilibrar o custo e a eficiência desejada no amortecimento de escoamento superficial. Destaca-se que nesta pesquisa foi considerada a implantação de estruturas permeáveis apenas nas áreas de calçadas, que representam uma pequena fração do loteamento. Ainda assim, o efeito no escoamento superficial foi notável apesar da baixa permeabilidade do solo. A atenuação do escoamento superficial pode ser potencializada ainda considerando-se que podem ser executados pavimentos permeáveis em vias públicas, estacionamentos e em áreas institucionais. A ampliação da área de pavimento permeável impacta tanto no armazenamento como na infiltração, sendo uma forma de aprimorar o desempenho do dispositivo ainda com a altura de base mínima. Há também a possibilidade do uso de múltiplas técnicas de controle do escoamento superficial no loteamento, complementando os pavimentos permeáveis.

REFERÊNCIAS

A FRAMEWORK FOR EFFECTIVE HYDROLOGIC INVESTIGATION OF PERVIOUS CONCRETE PAVEMENTS. In: EL-HASSAN, H. **Pervious Concrete Pavements: Design, Performance, and Applications**. 1st eded. Chantilly: Elsevier Science & Technology, 2025. (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering Series).

ADRESI, M.; YAMANI, A. R.; TABARESTANI, M. K. Evaluating the effectiveness of innovative pervious concrete pavement system for mitigating urban heat island effects, de-icing, and de-clogging. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 449, p. 138361, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416 Pavimentos Permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BRAGA, N. T. D. S.; JUNIOR, E. S. A.; CORDEIRO, L. D. N. P. Performance and runoff coefficient of permeable concretes subjected to heavy rainfall simulations. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. e20220216, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Desastres obrigam mais de 4,2 milhões de pessoas que foram negligenciadas pelas políticas públicas a buscarem alternativas de moradia nos últimos dez anos**. Brasília/DF: CNM, 2023.

COUTINHO, A. P. *et al.* Caracterização hidráulica das camadas de um pavimento permeável. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 191–203, 2020.

FELIX, S. R.; RODRIGUES, A. C. L.; BARBOSA, D. L. Avaliação da implementação de pavimentos permeáveis para melhoria da drenagem em uma área urbana de Campina Grande - PB. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 2024, Recife. **Anais**. Recife: ABRH, 2024. p. 1–10.

FENDRICH, R. **Chuvas intensas para obras de drenagem no estado do Paraná**. Curitiba: Champagnat, 1998.

KHANKHAJE, E. *et al.* Laboratory evaluation of heavy metal removal from stormwater runoff by pervious concrete pavement containing seashell and oil palm kernel shell. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 400, p. 132648, 2023.

LOPES, M. D.; SILVA, G. B. L. da. Avaliação do efeito integrado de pavimento permeável e reservatório de retenção no controle do escoamento superficial. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1–8.

OLIVEIRA, L. F. G. S.; REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. Projeto de pavimentos permeáveis em estacionamento com apoio de modelagem matemática - MODCEL. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1–8.

PEREIRA, J. A. *et al.* Modelagem hidráulico-hidrológica: utilização de técnicas compensatórias. *In*: XIV ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 2022, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: ABRH, 2022. p. 1–10.

SARTIPI, M.; SARTIPI, F. Stormwater retention using pervious concrete pavement: Great Western Sydney case study. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 11, p. e00274, 2019.

SILVA, M. P. da; COSTA, L. H. M.; CASTRO, arco A. H. de. Aplicação do modelo de gestão de drenagem urbana SWMM no controle de alagamentos em Barreiras-BA. *In*: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves. **Anais**. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1–8.

YU, F. *et al.* A review of the pore structure of pervious concrete: Analyzing method, characterization parameters and the effect on performance. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 365, p. 129971, 2023.