PAVIMENTO PERMEÁVEL: ESTRATÉGIA PARA UMA DRENAGEM SUSTENTÁVEL

Permeable Pavement: A Strategy for Sustainable Drainage

Silvério, Wanny Lacerda[1]; Silva, Rangel Henrique Brandão[2]; Rabelo, Frederico André[3]; Reis, Ricardo Prado Abreu[4]

[1] Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós – Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia-GO, Brasil, wanny@discente.ufg.br.

[2] Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós – Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia-GO, Brasil, rangel.silva@ueg.br.

[3] Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós – Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia-GO, Brasil, fredericorabelo@ufg.br.

[4] Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós – Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia-GO, Brasil, ricardo_reis@ufg.br.

RESUMO

O aumento da frequência e intensidade das inundações urbanas, agravado pelas mudanças climáticas, urbanização acelerada e crescente impermeabilização do solo, tem gerado impactos significativos nas cidades brasileiras. Diante desse cenário, os pavimentos permeáveis surgem como uma solução baseada na natureza, capaz de promover a infiltração da água pluvial, reduzir o escoamento superficial e contribuir para a manutenção ou restabelecimento do balanço hídrico na área urbanizada. Este estudo teve como objetivo comparar o desempenho hidráulico de dois cenários de aplicação de piso drenante: um instalado diretamente sobre solo compactado e outro sobre uma camada de brita com função de reservatório. A metodologia consistiu na simulação de ambos os cenários em um trecho urbano plano da cidade de Goiânia (GO), desconsiderando a inclinação da via e utilizando parâmetros pluviométricos locais com base em um evento de chuva com tempo de retorno de 10 anos e duração de 10 minutos. Os resultados demonstraram que o pavimento permeável instalado sobre um reservatório de brita reteve 20,60% da água precipitada, enquanto no cenário onde o pavimento foi instalado sobre o solo compactado, a retenção foi de apenas 0,80%. Conclui-se que a adoção de pisos drenantes sobre reservatórios de agregados pode representar uma estratégia de maior eficiência para o controle de enxurradas.

Palavras-chave: Drenagem urbana; Pavimento permeável; Infiltração pluvial; Infraestrutura verde.

ABSTRACT

The increase in the frequency and intensity of urban flooding, aggravated by climate change, accelerated urbanization and increasing soil impermeability, has generated significant impacts in Brazilian cities. In view of this scenario, permeable pavements emerge as a nature-based solution, capable of promoting rainwater infiltration, reducing surface runoff and contributing to the maintenance or restoration of the water balance in urbanized areas. This study aimed to compare the hydraulic performance of two scenarios of application of a draining pavement: one installed directly on compacted soil and the other on a layer of gravel with a reservoir function. The methodology consisted of simulating both scenarios in a flat urban stretch of the city of Goiânia (GO), disregarding the slope of the road and using local rainfall parameters based on a rain event with a return time of 10 years and duration of 10 minutes. The results showed that the permeable pavement installed over a gravel reservoir retained 20.60% of the precipitated water, while in the scenario where the pavement was installed over compacted soil, it retained only 0.80%. It is concluded that the adoption of draining floors over aggregate reservoirs may represent a more efficient strategy for controlling floods.

Keywords: *Urban drainage; Permeable pavement; Rainwater infiltration; Green infrastructure.*

1 INTRODUÇÃO

O aumento da frequência e intensidade das inundações urbanas tem se consolidado como um dos principais desafios das cidades contemporâneas, especialmente em contextos de urbanização acelerada. Esse cenário está associado a fatores como eventos extremos de

DOI: https://doi.org/10.46421/sispred.v4.7797

precipitação intensificados pelas mudanças climáticas, impermeabilização crescente do solo, expansão urbana desordenada e deficiências nos sistemas tradicionais de drenagem (Roy et al., 2021; Yang et al., 2022).

No Brasil, Oliveira (2021) observa que os sistemas de drenagem foram historicamente projetados para escoar rapidamente as águas pluviais por meio de micro e macrodrenagem. No entanto, essa abordagem, ao priorizar o transporte ágil do escoamento superficial, frequentemente sobrecarrega os corpos hídricos urbanos, agravando alagamentos e impactos negativos à população (Vaz et al., 2021).

Nesse contexto, os pavimentos permeáveis surgem como soluções baseadas na natureza, promovendo infiltração, reduzindo volume e velocidade do escoamento superficial e contribuindo para o restabelecimento do balanço hídrico urbano (Abduljaleel; Chikabvumbwa; Haq, 2025). Segundo Reis (2018), esses pavimentos podem ser aplicados sobre solo compactado ou sobre camadas de brita que funcionam como reservatórios temporários, permitindo a infiltração parcial ou total da água da chuva, conforme as características do solo.

Estudos apontam que esses pavimentos podem reter mais de 50% da água da chuva, contribuindo significativamente para a redução do escoamento superficial e o controle de enchentes (Alsubih et al., 2017; Guan et al., 2021). Diante desse potencial, esta pesquisa busca comparar o desempenho hidrológico de pavimentos permeáveis instalados sobre solo compactado e sobre brita, identificando qual solução oferece maior eficiência na infiltração e mitigação do escoamento, em relação ao pavimento asfáltico convencional.

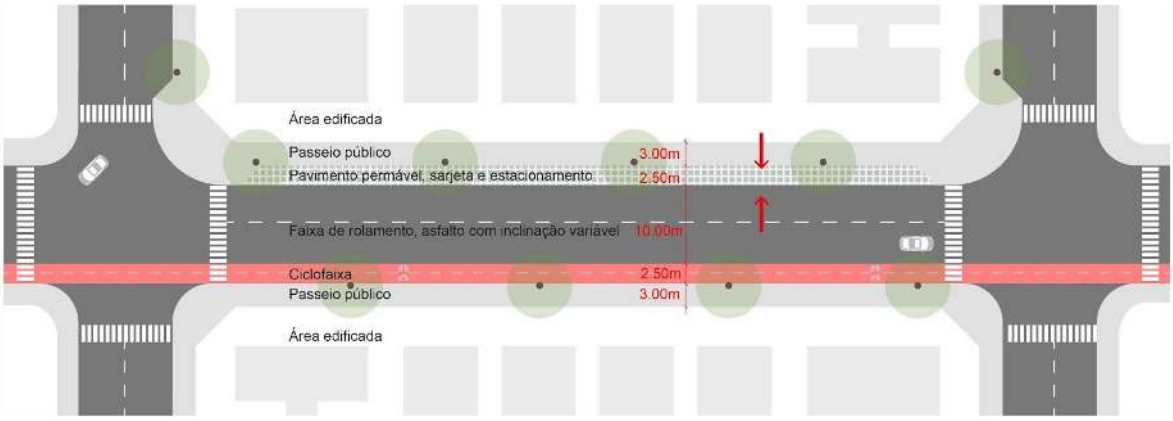
2 MÉTODO

A etapa metodológica da pesquisa consistiu na análise comparativa de dois cenários distintos de aplicação de pavimentos permeáveis, ambos desconsiderando a inclinação da via urbana para fins de uniformização dos dados. O primeiro cenário considerou a aplicação direta do pavimento sobre o solo natural compactado (procedimento amplamente utilizado na execução desse tipo de pavimento), enquanto o segundo contemplou a instalação do mesmo pavimento sobre uma camada de brita, que funciona como reservatório temporário para retenção da água de chuva. Essa simulação permitiu avaliar o desempenho hidrológico de cada solução quanto à infiltração da água pluvial, buscando identificar qual configuração oferece maior eficiência na redução do escoamento superficial.

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi desenvolvida com base em um espaço urbano típico da cidade de Goiânia – GO, cujas condições edafoclimáticas foram utilizadas na definição dos parâmetros de simulação. A área analisada corresponde à via em frente a uma quadra com 100 metros lineares, inserida em zona urbana consolidada, com edificações de alturas variadas e elevada taxa de impermeabilização do solo. A Figura 1 apresenta o layout característico da área de estudo, composta por calçadas de concreto (3 m de largura em ambos os lados), faixa de estacionamento com piso drenante (2,5 m), faixa de rolamento em asfalto (10 m) e ciclovia asfaltada (2,5 m). As calçadas foram ampliadas nas esquinas para aumentar a segurança dos pedestres e evitar tráfego sobre o piso permeável. É importante embasar o texto do artigo com a citação de fontes bibliográficas.

Figura 1 – Características principais do cenário de estudo



Fonte: Autores (2025)

2.2 Cenários de Simulação

Dois cenários foram simulados para comparar o desempenho hidrológico dos pavimentos. No Cenário 1, o piso drenante (5 cm de espessura) foi aplicado diretamente sobre o solo compactado, adotando-se o coeficiente de permeabilidade (K) de 0,00048 cm/s, conforme Mendes (2019). No Cenário 2, foi inserida uma camada de brita n° 0 com 20 cm de espessura entre o solo e o piso, conforme Khan *et al.* (2024), atribuindo-se à brita um coeficiente de permeabilidade de 5,0 cm/s, segundo o Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006). Para garantir uniformidade na análise, a inclinação da via (máx. de 20%) foi desconsiderada na modelagem.

2.3 Ferramentas e Dados Utilizados

As simulações foram realizadas em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel, com base em parâmetros técnicos e normas nacionais. O dimensionamento da camada de brita seguiu critérios de Khan *et al.* (2024) e do DNIT (2006), garantindo capacidade adequada de vazão e resistência à colmatação. A taxa de infiltração do solo foi obtida de Mendes (2019), e os valores de porosidade dos materiais basearam-se em Reis (2018) e DNIT (2006). Os coeficientes de escoamento superficial foram extraídos do Urban Drainage Design Manual (FHWA, 2013), conforme o tipo de material da seção viária. Para os cálculos pluviométricos, utilizou-se a equação de chuva proposta por Costa *et al.* (2001), recomendada pela Lei nº 9511 (Goiânia, 2014).

As fórmulas utilizadas para determinar os principais parâmetros adotados para os cenários foram descritas nas equações de 1 a 6 a seguir.

Equação de chuva de Goiânia – Costa *et al.* (2001):

$$i = \frac{64{,}3044 \cdot \left(T^{0{,}1471}\right)}{\left(t + 24{,}8\right)^{0{,}97471}} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Sendo,

i = intensidade de precipitação (mm/min);
T = tempo de recorrência ou intervalo (anos);
t = duração da precipitação (min).

Vazão de projeto:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot A_c}{60} \quad \text{(Eq. 2)}$$

Sendo,

Q = Vazão de projeto (L/min);
c = Coeficiente de escoamento superficial;
i = Chuva de projeto (mm/h);
A_c = Área de Contribuição (m²).

Volume de chuva:

$$V_P = Q \cdot \Delta t \quad \text{(Eq. 3)}$$

Em que,

V_P = Volume da chuva de projeto (L);
Q = Vazão de projeto (L/min);
Δt = Tempo de duração da chuva de projeto (min).

Volume retido na camada de brita:

$$V_R = A_b \cdot h \cdot n \quad \text{(Eq. 4)}$$

Em que,

V_R = Volume de reservatório de retenção (m³);
A_b = Área da base do sistema de infiltração (m²);
h = Altura do reservatório de retenção (m);
n = Porosidade do material de preenchimento (%).

Volume infiltrado:

$$V_I = \Delta t \,.\, I \,.\, A_{¿} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Sendo,

V_I= Volume da chuva de projeto a ser infiltrado (m³);
Δt = Tempo de duração da chuva de projeto (s);
I = Taxa de infiltração (m³/m²/s);
$A_{¿}$= Área da superfície de infiltração (m²).

Volume de escoamento superficial:

$$V_E = V_P - V_R - V_I \quad \text{(Eq. 6)}$$

Em que,

V_E = Volume de escoamento superficial (m³);
V_P = Volume da chuva de projeto (m³);
V_R = Volume de reservatório de retenção (m³);
V_I= Volume da chuva de projeto a ser infiltrado (m³).

2.4 Parâmetros de Análise

Os principais parâmetros analisados foram: coeficiente de permeabilidade de cada cenário, redução do escoamento superficial em relação ao pavimento asfáltico convencional e eficiência hidráulica do sistema. A comparação entre os casos teve como objetivo identificar qual das soluções apresenta melhor desempenho em termos de drenagem urbana sustentável. A avaliação considerou a capacidade de retenção e percolação da água pluvial nas faixas de estacionamento, utilizando como referência o comportamento hidrológico da microbacia urbana simulada.

2.5 Memorial de Cálculo Hidrológico

Para embasar os resultados simulados nos dois cenários propostos, elaborou-se um memorial de cálculo hidrológico considerando as dimensões reais da quadra analisada e os parâmetros típicos da cidade de Goiânia-GO. O piso drenante foi dimensionado com 100 metros de comprimento e 2,5 metros de largura, compatível com a faixa de estacionamento, sendo a altura do solo considerada variável. A chuva de projeto adotada corresponde a um evento com tempo de retorno de 10 anos e duração de 10 minutos, com intensidade obtida a partir da equação IDF (Intensidade-Duração-Frequência) específica para Goiânia-GO.

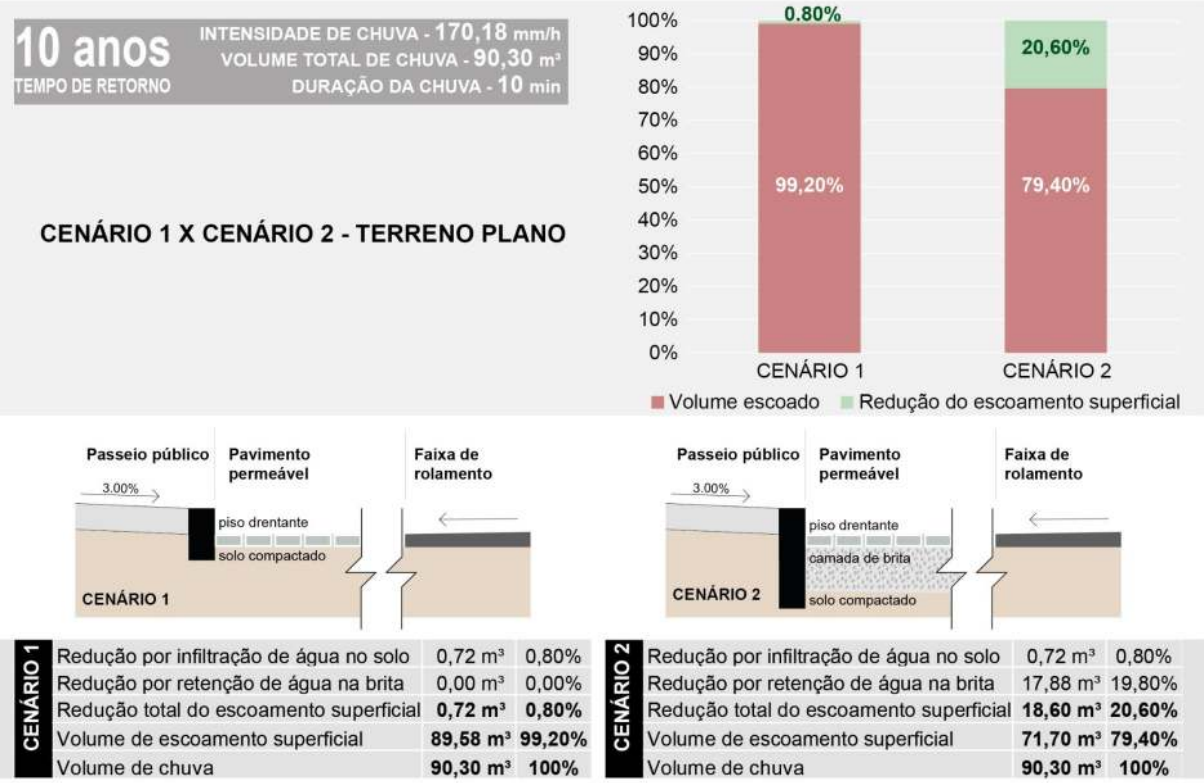
As áreas de contribuição foram delimitadas da seguinte forma: quadra edificada (60 × 100 m, com escoamento para duas ruas e coeficiente de escoamento de 0,78), faixa de rolamento (15 × 100 m, com escoamento para duas sarjetas e coeficiente de 0,83) e calçadas (3 × 100 m, com escoamento para uma sarjeta e coeficiente de 0,80), conforme FHWA (2013). As vazões parciais de cada segmento foram calculadas pela fórmula racional e somadas para determinar a vazão total da chuva de projeto.

Com base nesses dados, estimaram-se os volumes total de água precipitada, infiltrado durante o evento chuvoso, escoado superficialmente e excedente não absorvido pelo sistema. Esses valores serviram de base para a análise da eficiência hidráulica dos pavimentos nos dois cenários simulados, permitindo uma comparação robusta da capacidade de retenção e infiltração das soluções adotadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para o cenário de terreno plano revelam diferenças significativas no desempenho hidrológico entre os dois casos analisados. No Cenário 1, em que o pavimento permeável foi aplicado diretamente sobre o solo compactado, houve redução de 0,80% no volume de escoamento superficial em relação ao total precipitado, com infiltração de 0,72 m³ no solo e nenhuma retenção na estrutura do piso. O volume escoado foi de 89,58 m³, representando 99,20% do total precipitado (90,30 m³). A Figura 2 apresenta a comparação dos principais parâmetros de desempenho hidrológico dos dois cenários.

Figura 2 – Resultados Comparativos de Ambos os Cenários



CENÁRIO 1			
	Redução por infiltração de água no solo	0,72 m³	0,80%
	Redução por retenção de água na brita	0,00 m³	0,00%
	Redução total do escoamento superficial	**0,72 m³**	**0,80%**
	Volume de escoamento superficial	**89,58 m³**	**99,20%**
	Volume de chuva	**90,30 m³**	**100%**

CENÁRIO 2			
	Redução por infiltração de água no solo	0,72 m³	0,80%
	Redução por retenção de água na brita	17,88 m³	19,80%
	Redução total do escoamento superficial	**18,60 m³**	**20,60%**
	Volume de escoamento superficial	**71,70 m³**	**79,40%**
	Volume de chuva	**90,30 m³**	**100%**

Fonte: Autores (2025)

No Cenário 2, com aplicação do pavimento sobre camada de brita com função de reservatório, o desempenho foi significativamente superior. A redução do escoamento atingiu 20,60%, com os mesmos 0,72 m³ infiltrados e 17,88 m³ retidos, resultando em 71,70 m³ escoados. Os dados evidenciam a eficácia da brita como elemento de armazenamento e retardamento do escoamento, reforçando sua relevância como estratégia de controle de águas pluviais em áreas planas urbanas.

A eficiência da estrutura granular observada corrobora os achados de Koohmishi e Azarhoosh (2021), que demonstraram, em ensaios de larga escala, que camadas com agregados de granulometria aberta apresentam condutividades hidráulicas superiores às de solos compactados. A distribuição e o tamanho dos vazios, assim como a conectividade entre poros, são determinantes para a percolação. Os autores destacam que a condutividade hidráulica se relaciona fortemente ao diâmetro efetivo das partículas, à porosidade e ao grau de compactação.

Adicionalmente, esta análise ressalta a importância do direcionamento adequado do escoamento superficial às áreas de infiltração. Em contextos urbanos, superfícies inclinadas, como ruas e calçadas, aceleram o escoamento e reduzem o tempo de residência da água sobre o pavimento, comprometendo a infiltração. Hou et al. (2019) indicam que a inclinação afeta diretamente a eficiência hidráulica dos pavimentos permeáveis: quanto maior a inclinação (longitudinal ou transversal), menor a taxa de infiltração. Em seus ensaios, observaram reduções de até 72,2% em inclinações de 5°, sendo a influência transversal até 1,4 vezes superior à longitudinal, devido à redução do caminho de escoamento lateral e ao aumento da velocidade superficial da lâmina d'água.

Dessa forma, os dados desta pesquisa reforçam a necessidade de estratégias complementares para o controle do escoamento em áreas planas e inclinadas. O uso de camadas granulares de alta porosidade, associadas a soluções de armazenamento temporário e controle de vazão, como drenagem subterrânea ou mecanismos de retenção, mostra-se eficaz para compensar as limitações impostas pela baixa infiltração do solo ou pela presença de declividades.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa demonstrou que a adoção de pavimentos permeáveis, especialmente quando associados a camadas de brita com função de reservatório, constitui uma estratégia eficaz para o controle do escoamento superficial em áreas urbanas. A comparação entre os dois cenários simulados — solo compactado e camada de brita — evidenciou ganhos significativos em retenção e infiltração da água pluvial, com destaque para o sistema com brita, que reteve cerca de 20,60% do volume precipitado durante a chuva de projeto. O resultado reforça a importância de incorporar essa solução na infraestrutura verde urbana, promovendo maior resiliência frente a eventos extremos intensificados pelas mudanças climáticas.

Recomenda-se, portanto, a inserção prioritária de pisos drenantes nas faixas de estacionamento de áreas urbanas com potencial de recarga hídrica, preferencialmente sobre camadas de brita que atuem como reservatórios temporários. Essa configuração reduz a sobrecarga dos sistemas tradicionais de drenagem e contribui para o reequilíbrio do ciclo hidrológico urbano. Como proposta para pesquisas futuras, destaca-se a importância de incluir a inclinação das vias na modelagem hidráulica, aproximando os resultados das condições reais de topografia urbana e ampliando a aplicabilidade técnica dos sistemas drenantes em contextos mais complexos.

REFERÊNCIAS

ABDULJALEEL, YASIR; CHIKABVUMBWA, SYLVESTER RICHARD; HAQ, FARAZ UL. Assessing the efficacy of Permeable Interlocking Concrete Pavers (PICP) in managing stormwater runoff under climate change and land use scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 646, p. 132329, 2025. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132329. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132329. Acesso em: 4 dez. 2024.

ALSUBIH, M., ARTHUR, S., WRIGHT, G., & ALLEN, D. Experimental study on the hydrological performance of a permeable pavement. **Urban Water Journal**, 14(4), 427–434, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1080/1573062X. 2016.1176221. Acesso em: 4 dez. 2024.

BROWN, S.A. SCHALL, J.D. MORRIS, J.L. DOHERTY, C.L. STEIN S.M. E WARNER, J.C. (2009) **Urban Drainage Design Manual**, 3rd Edition. Springfield: Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circular No. 22., revised in August 2013.

COSTA, A.R.; SANTOS, A.C.C;. OLIVEIRA, L.F.C. Regionalização de equações de chuva no cerrado. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 5., 2001, Aracaju. Anais. Aracaju: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.1 CD-ROM.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de drenagem de Rodovias.** - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2006. 333p. (IPR. Publ., 724).

GOIÂNIA. **Plano para controle de águas pluviais e de drenagem urbana. Lei Municipal nº 9511/2014.** Prefeitura Municipal. Diário Oficial do Município de Goiânia, 2014. Disponível em: https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2014/lo_20141215_000009511.pdf. Acesso em: 14 abr. de 2025.

GUAN, X., WANG, J., & XIAO, F. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. **Journal of Cleaner Production**, 303, 127022, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022. Acesso em: 4 dez. 2024.

HOU, Jingming; ZHANG, Yangwei; TONG, Yu; GUO, Kaihua; QI, Wenchao; HINKELMANN, Reinhard. Experimental study for effects of terrain features and rainfall intensity on infiltration rate of modelled permeable pavement. **Journal of Environmental Management**, [S.l.], v. 243, p. 177–186, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.096. Acesso em: 30 abr. 2025.

KHAN, Zishan Raza; AHMAD, Syed Aqeel; SINGH, Vikash. Water transmissible pavement: A physics of granular sub-base permeability through road dust analysis using machine learning. **Indian Journal of Pure & Applied Physics,** [S.l.], v. 62, n. 4, p. 274–284, abr. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.56042/ijpap.v62i4.7768. Acesso em: 24 abr. 2025.

KOOHMISHI, Mehdi; AZARHOOSH, Alireza. Assessment of permeability of granular drainage layer considering particle size and air void distribution. **Construction and Building Materials,** [S.l.], v. 270, 121373, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121373. Acesso em: 30 abr. 2025.

MENDES, T. A. (2019). **Modelagem física e numérica da infiltração e escoamento em superfícies não saturadas e com cobertura vegetativa.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-158/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 255 p.

OLIVEIRA, T. H. **Sistema de drenagem urbana sustentável como estratégia para resiliência aos impactos das mudanças climáticas.** Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2021.

REIS, R. P. A. (2018). **Avaliação de desempenho e modelagem numérica de sistemas de infiltração de água de chuva integrados aos sistemas prediais.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 279 p.

Roy, S., Bose, A., & Chowdhury, I. R. (2021). Flood risk assessment using geospatial data and multi-criteria decision approach: A study from historically active floodprone region of Himalayan foothill, India. **Arabian Journal of Geosciences**, 14(11), 999. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07324-8. Acesso em: 22 nov. 2024.

VAZ, I. C. M.; GHISI, E.; THIVES, L. P. Stormwater harvested from permeable pavements as a means to save potable water in buildings. **WATER**, v. 13, n. 14, p. 1896, 2021. DOI: 10.3390/w13141896. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/13/14/1896. Acesso em: 22 nov. 2024.

Yang, K., Hou, H., Li, Y., Chen, Y., Wang, L., Wang, P., & Hu, T. (2022). Future urban waterlogging simulation based on LULC forecast model: A case study in Haining City, China. **Sustainable Cities and Society**, 87, 104167. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104167. Acesso em: 22 nov. 2024.