



**Utilização de pavimento permeável como alternativa compensatória
para drenagem urbana em Recife-PE**

Lucas Amorim Amaral Menezes

Mestrando, UPE, Brasil
Laam1@poli.br

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Professor Doutor, UPE, Brasil
Jaime.cabral@poli.br

RESUMO

O acelerado processo de urbanização nas últimas décadas altera a organização populacional mundial e acarreta modificações nas cidades, afetando diretamente o meio ambiente. O surgimento de soluções alternativas, como os pavimentos permeáveis, possuem conceitos sustentáveis e remodelam o sistema de drenagem para adaptação aos hidrogramas de cheias mais rápidos e mais críticos, com o objetivo de reduzir os impactos da urbanização. Este estudo objetivou analisar a viabilidade da utilização de um pavimento permeável, executado na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE), como uma alternativa compensatória em drenagem urbana, avaliando o sistema e o seu comportamento hidráulico. A metodologia seguiu as etapas de caracterização do subleito; caracterização e análise de conformidade normativa dos materiais das camadas do pavimento; e avaliação do desempenho hidráulico da pavimentação permeável, com a realização dos ensaios de permeabilidade, simulações hidráulicas de precipitação e avaliação do maior evento chuvoso, no período analisado de Março a Maio de 2023. Os resultados indicaram um solo de subleito de boa qualidade e material da camada de base em conformidade normativa. Em contrapartida, o material utilizado no assentamento e a resistência à compressão dos blocos do revestimento foram desconformes, mas sem influência negativa na utilização para o período. O desempenho hidráulico do pavimento foi analisado, apresentando alto coeficiente de permeabilidade recém construído ($3,26 \times 10^{-3}$ m/s) e bom comportamento nas simulações de chuvas intensas e no evento chuvoso natural. O pavimento permeável permitiu a infiltração e, conseqüentemente, redução dos volumes totais escoados, caracterizando-se como potencial mitigador dos alagamentos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Técnicas compensatórias. Infiltração. Manejo de águas pluviais.

1 INTRODUÇÃO

O mundo, nas últimas décadas, tem observado um acentuado crescimento urbano e, conforme o relatório da Organização das Nações Unidas (ONU), em 2018, a população urbana já representava 55,3% da população mundial (4,220 bilhões em área urbana e 7,633 bilhões no total) (ONU, 2019). No recorte nacional, segundo o último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2010, os índices de população urbana foram ainda maiores que o cenário global, representando 84,4% da população brasileira (IBGE, 2010). Considerando as projeções mundial e nacional, estes valores apontam índices maiores ainda para o ano de 2023.

Com relação à drenagem urbana, as soluções clássicas adotadas para o gerenciamento são limitadas, pois baseiam-se no conceito sanitário e higienista, objetivando apenas drenar a água. Em contrapartida, as soluções alternativas têm conceitos sustentáveis e visam um equilíbrio entre retenção e drenagem da água (SCHREIBER, 2022). Algumas destas soluções buscam resgatar as características existentes durante a pré-urbanização nas bacias e são denominadas medidas compensatórias, BMP (*Best Management Practices*) ou LID (*Low Impact Development*). Para isso, utilizam mecanismos mais completos, como Sistemas de Drenagem Sustentáveis (*Sustainable Drainage Systems - SUDS*), Infraestrutura Azul-Verde (*Blue-Green Infrastructure - BGI*) e Projeto Urbano Sensível à Água (*Water Sensitive Urban Design - WSUD*) (TANG *et al.*, 2018).

Os dispositivos compensatórios de infiltração têm por objetivo facilitar a retenção da água e, conseqüentemente, a redução do escoamento superficial direto, além de volumes escoados através da infiltração da água no solo, reduzindo a intensidade dos alagamentos (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018). Dentre os dispositivos, encontram-se os jardins de chuva, as valas de infiltração e os pavimentos permeáveis, todos promovem um controle de

água pluvial na fonte em que a precipitação ocorreu, visando reduzir o desequilíbrio no ciclo natural de infiltração, na percolação e no escoamento da água causado pela urbanização e pelas elevadas taxas de impermeabilização (BEZERRA *et al.*, 2022).

Os pavimentos permeáveis podem ser definidos como estruturas que possuem vazios em sua composição de camadas, os quais permitem a passagem de ar e água (DEBNATH; SARKAR, 2020). Sua camada de revestimento deve ser construída com o intuito de permitir a passagem rápida, por infiltração, da água, que ficará armazenada, por um determinado período, na camada de base até que a mesma percole para o solo do subleito (SILVA, 2019). Marchioni (2018) destaca que o nível de compactação das camadas é reduzido, permitindo o acúmulo de água nos vazios existentes e, também, que a superfície de revestimento do pavimento, recebedora direta das cargas mecânicas referentes ao tráfego, possibilite infiltração rápida da água.

O pavimento permeável possui uma superfície, como asfalto poroso, concreto permeável ou pavimento de concreto intertravado permeável, e múltiplas camadas permeáveis para armazenar a água da chuva até que se infiltre no solo subterrâneo ou seja coletada por um dreno (WEISS *et al.*, 2019). Assim, este estudo visou analisar a viabilidade da utilização do pavimento permeável como uma alternativa compensatória em drenagem urbana, avaliando o sistema e seu comportamento hidráulico. Em busca de suprir uma das lacunas destacadas por Weiss *et al.* (2019), ao apresentar dados de permeabilidade do pavimento e seu revestimento recém construído enquanto parâmetro comparativo de durabilidade ao longo do tempo, incorporando as análises do pavimento, tanto dos materiais quanto hidráulicas, em escala real, de uma obra executada na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE).

O pavimento permeável também pode ser estudado junto a outras técnicas. Um estudo recente, realizado em Wuhan, China, mostrou que a combinação de técnicas de baixo impacto, como células de biorretenção, pavimentos permeáveis e telhados verdes, obteve um bom desempenho de controle de escoamento para um local densamente povoado (Shang *et al.*, 2022). Logo, o presente trabalho analisou a alternativa compensatória de drenagem a partir do uso de pavimentos permeáveis, enquanto uma solução viável integrante dos Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SUDS), e seus possíveis impactos na redução dos danos causados pela urbanização e consequente impermeabilização do solo, visando aumentar a capacidade de infiltração e retenção de águas pluviais e reduzir o escoamento superficial direto, amortizando as inundações urbanas.

2 METODOLOGIA

Esta seção apresenta todas as etapas desenvolvidas durante as análises do pavimento permeável executadas na Escola Politécnica – POLI – da Universidade de Pernambuco – UPE, em Recife, Brasil, sendo elas: a caracterização do solo da área experimental; a caracterização dos materiais que compõem as camadas do pavimento permeável; e as análises de desempenho hidráulico, através de avaliações de permeabilidade, simulações hidráulicas de chuva em campo e dados de precipitações, ocorridos no período de observação de Março a Maio de 2023.

2.1 Área de Estudo

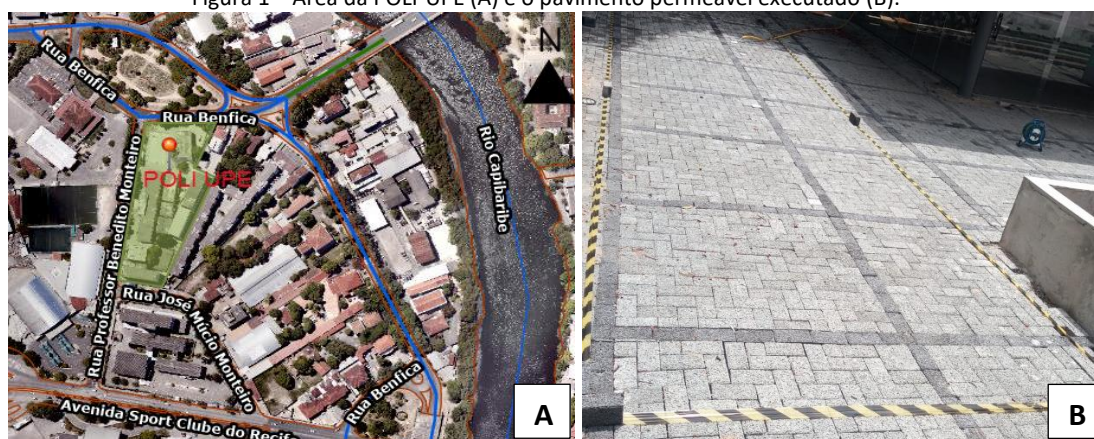
O pavimento permeável foi executado na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE), situada no bairro da Madalena, na cidade de Recife, capital do Estado de Pernambuco, representada pelas coordenadas geográficas: latitude 8°03'34"S e longitude 34°54'12"W. Conforme Cabral e Alencar (2005), a cidade está situada em uma grande planície de baixa altitude, com variação de cotas de 1 m a 10 m acima do nível do mar, contornada por uma cadeia de morros baixos com cotas de até 150 m de altitude.

A cidade se encontra na zona fisiográfica do litoral-mata atlântica, com clima quente e úmido e precipitação pluviométrica abundante, quando comparada à região Nordeste do Brasil, apresentado seu período mais chuvoso entre os meses de março e agosto. Quanto ao aspecto hidrográfico, é banhada pelos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió, todos com vários afluentes e canais de interligação, formando uma região estuarina compartilhada (CABRAL; ALENCAR, 2005).

A escolha desse campo experimental ocorreu através da adaptação de uma reforma em curso na área, visando a repaginação de parte do piso externo da POLI, com destinação ao uso de pedestres, em que, anteriormente, seria utilizada a pavimentação convencional, alterando-a para a pavimentação permeável. Este estudo também buscou justificar cientificamente essa escolha e ratificá-la como uma boa alternativa em relação ao projeto original de pavimentação convencional.

A Figura 1 (A) indica a localização da POLI, delimitada pelas vias urbanas: Rua Prof. Benedito Monteiro e Rua Benfica, e (B) mostra o pavimento permeável executado, com a demarcação da área retangular de 27 m² (2,7 m x 10 m) estudada. Ressalta-se que o projeto foi responsável pela reforma de uma área total de 470 m² de pavimentação permeável, mas este estudo foi realizado neste módulo de 27 m².

Figura 1 – Área da POLI-UPE (A) e o pavimento permeável executado (B).



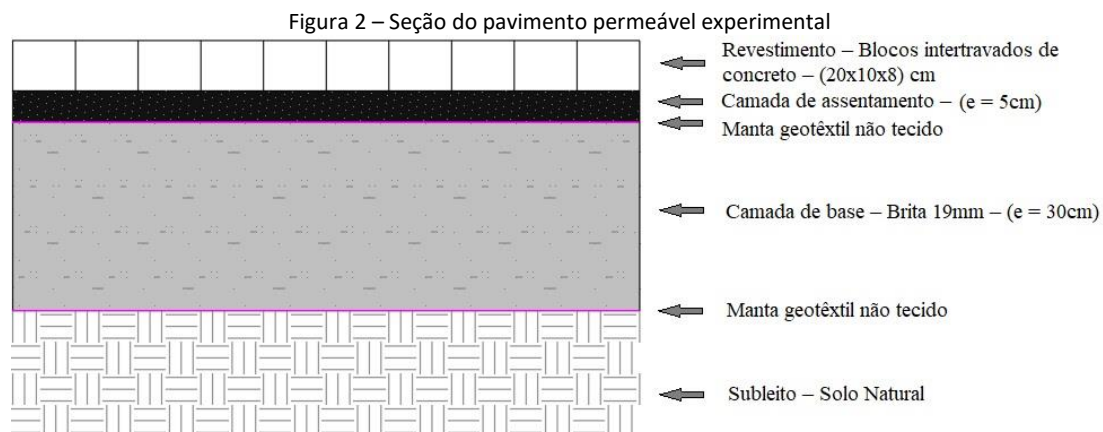
Fonte: Autores. (A) - Elaborado a partir do ESIG – Informações geográficas do Recife (2022).

2.2 Descrição do módulo experimental

A seção do pavimento executada na reforma foi dimensionada e determinada previamente devido aos estudos preexistentes sobre pavimentos permeáveis experimentais, realizados na POLI por Almeida (2017) e Silva (2022). O módulo experimental que compõe o

pavimento tem sua seção apresentada na Figura 2, por metro de largura do pavimento. Em ordem crescente de profundidade, o revestimento apresenta: blocos de concreto intertravado permeável retangulares, com 8 cm de espessura; uma camada de assentamento com pedrisco tipo pó de pedra, com 5 cm de espessura; uma camada de manta geotêxtil não tecido (comercialmente conhecida como Bidim); a camada de base com brita 19 mm, possuindo 30 cm de espessura; outra camada de manta geotêxtil não tecido (Bidim); e o subleito de suporte com o material natural do terreno.

A seção completa do pavimento experimental tem 43 cm de espessura, tipologia de uso para pedestres, como anteriormente destacado, e com o sistema de infiltração total, ou seja, toda água precipitada infiltra para o subleito sem o uso de drenos. Destaca-se que o processo executivo com o revestimento em blocos de concreto permeável é sem as juntas alargadas, sendo do tipo junta seca (sem rejuntamento) e a infiltração ocorre através das próprias peças permeáveis.



Fonte: Autores.

2.3 Caracterização do solo da área experimental

A caracterização do solo da área experimental baseou-se na profundidade de 0,45 m justamente por ser a interface onde termina a base e inicia o subleito de solo natural, necessitando, então, caracterizá-lo. Com a intenção de analisar as características do solo, foi realizada, previamente, a execução do pavimento: o nível do lençol freático, através de um furo de sondagem investigativa até a profundidade, onde foi encontrada a presença de água; ensaios laboratoriais de caracterização do solo por granulometria, a partir do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e da permeabilidade do subleito; além do ensaio de campo de permeabilidade do solo, com o teste do infiltrômetro com anel simples.

Para realização dos ensaios laboratoriais, foi coletada uma amostra deformada do solo, na profundidade 0,45 m (subleito do pavimento permeável), e, depois, repartida por quarteamento, subdividida e preparada para cada ensaio realizado, de acordo com a ABNT NBR 6457 (2016) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização.

2.4 Caracterização e requisitos dos materiais que compõem as camadas do pavimento

Para caracterizar as camadas do pavimento permeável experimental, foi adotada a norma nacional de pavimentos permeáveis de concreto da ABNT NBR 16416 (2015), uma vez que se faz importante analisar os critérios estabelecidos pelo regulamento nacional e se os mesmos produzem, de fato, um resultado satisfatório. Com este objetivo, em cada camada componente (base, assentamento e revestimento), foi verificada a aceitabilidade dos materiais utilizados, considerando os critérios e valores normativos para cada propriedade necessária de ser avaliada.

Para a brita 19 mm, que compõe a camada de base, foram avaliados: distribuição granulométrica, índice de vazios, material passante na peneira 0,075 mm e abrasão “Los Angeles”. Já para o pó de pedra da camada de assentamento, foram observadas todas as propriedades da camada de base, acrescidas da dimensão máxima característica. Para todas as propriedades, foram ensaiadas 3 amostras, cujo resultado final foi a média entre elas. Os blocos de revestimento, em um lote total de 24, respeitando a ABNT NBR 16416 (2015), foram avaliados através de inspeção visual, avaliação dimensional com paquímetro e resistência à compressão, sendo o coeficiente de permeabilidade analisado no desempenho hidráulico.

2.5 Análise do desempenho hidráulico

Na avaliação do desempenho, foram realizados os ensaios de permeabilidade do pavimento e duas simulações hidráulicas de chuvas, em campo. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade do pavimento, foi seguida a metodologia da ABNT NBR 16416 (2015), com a utilização, em campo, do anel de infiltração (cilindro vazado de 300 mm de diâmetro e 50 mm de altura). A realização do ensaio foi em 3 pontos diferentes, com uma repetição em cada, e realizados com intervalo superior a 24h da última precipitação ocorrida no local. Os ensaios foram repetidos em 3 dias diferentes e o resultado final do coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído levou em consideração todas as medições realizadas.

O procedimento indica o posicionamento do anel de infiltração e sua vedação na parte em contato com o pavimento com massa de calafetar. Para iniciar, cronometra-se o tempo de uma pré-molhagem, com água limpa, começando-se o ensaio em até 2min após o início desse processo, com o volume de água igual a 3,6 L se o tempo da pré-molhagem for superior a 30s; caso contrário, utiliza-se 18 L, despejando a água no anel de infiltração com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as demarcações internas do anel de 10 mm e 15 mm de altura. Destaca-se que o tempo deve ser cronometrado assim que a água tocar a superfície do pavimento e finalizado quando não houver mais água livre na superfície.

As simulações hidráulicas em campo ocorreram através de uma quantidade de água definida e uma área de ensaio delimitada, estabelecendo a altura da lâmina d’água, que representa uma precipitação, em milímetros. Foram utilizados 2 tanques-reservatórios com capacidade de 1.000 L (1 m³) cada. A primeira simulação foi realizada em toda a área do módulo experimental de 27 m² (2,7 m x 10 m) e a segunda foi realizada em uma área reduzida de 9,45

m² (2,7 m x 3,5 m), buscando avaliar o comportamento do pavimento experimental em uma situação mais crítica (igual volume de água e menor área de ensaio).

Nas simulações hidráulicas, foi utilizado um medidor de nível d'água automático (equipamento produzido pela empresa AMPEQ), que foi introduzido em um dos piezômetros, instalados no pavimento experimental (tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, cravado até a profundidade de 2 m e perfurado ao longo de toda sua extensão). Com isso, as leituras dos níveis de água atingidos no piezômetro foram realizadas de forma automática e consecutiva, através do sensor, a cada minuto, registrando os valores no aparelho de armazenamento de dados datalogger.

As simulações de chuva realizadas no pavimento permeável experimental objetivaram avaliar o seu comportamento em dois eventos induzidos de precipitações intensas. Para isso, os valores dos níveis d'água referentes ao sistema permeável completo, composto pelo pavimento permeável em si e pelo solo do subleito, foram avaliados em conjunto com a intensidade de chuva produzida. Foi realizada, também, a avaliação das condições anteriores à execução dos ensaios, possibilitando o entendimento sobre o comportamento do nível de água, justificado pelas condições de saturação do solo. Além disso, a umidade do solo foi avaliada através dos dados derivados dos eventos de chuva aos quais o sistema foi exposto anteriormente à realização das simulações.

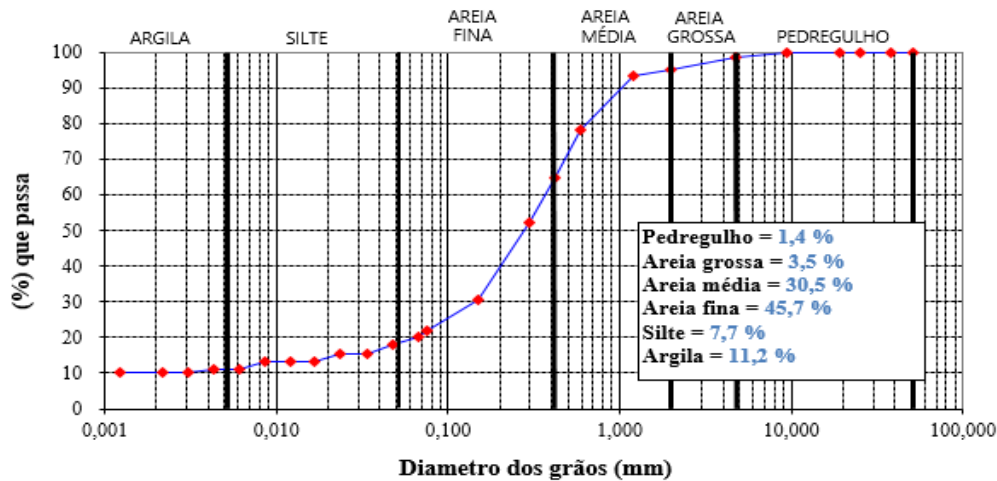
Em relação às condições após os ensaios, as análises visaram compreender: o modo de recuperação do sistema à condição inicial, antes do ensaio; o tempo para isso ocorrer; e os fatores que influenciam esse processo. Os resultados e o comportamento do sistema durante a realização dos ensaios propriamente ditos possibilitaram a avaliação do desempenho do pavimento permeável experimental diante dos eventos de precipitação intensa simulada. Além disso, o maior evento chuvoso diário natural foi avaliado, para o período de Março a Maio de 2023, de forma similar às simulações, através dos dados pluviométricos da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2023), para o posto pluviométrico mais próximo da área estudada, localizado no bairro de Santo Amaro.

3 RESULTADOS

3.1 Solo do subleito do pavimento permeável

A partir da análise do comportamento do solo (subleito do pavimento permeável experimental, com profundidade de 0,45 m), é possível observar a curva granulométrica da amostra, como mostra a Figura 3, em que há uma predominância da fração de areia, aproximadamente 80% da composição do solo, classificada como uma areia franca, conforme o triângulo textural. Quanto aos limites de consistência, os solos apresentaram baixa plasticidade, sendo classificados como não líquidos (NL) e não plásticos (NP).

Figura 3 – Curva granulométrica do solo do subleito.



Fonte: Autores.

O Índice de Suporte Califórnia é um importante ensaio para qualquer tipo de pavimentação, pois representa a capacidade de suporte de cargas do subleito. Através do ensaio realizado, avaliando pressão por penetração, foi encontrado o valor do ISC igual a 34%. Outro parâmetro obtido na realização do ensaio foi a expansão, através das leituras do deflectômetro, por 4 dias consecutivos, colocado no corpo de prova durante a submersão no tanque de água, com valor igual a 0%.

A determinação do coeficiente de permeabilidade do subleito foi realizada com o ensaio do permeâmetro, à carga constante por causa da característica granular do solo. Ao desenvolver o ensaio, foi necessário encontrar os dados de entrada da equação para a obtenção do coeficiente de permeabilidade, considerando-se, na realização do ensaio, o grau de compactação do subleito, determinado *in loco*, pelos estudos de Almeida (2017) e Silva (2022) para áreas adjacentes ao pavimento experimental, como igual a 90%. Aplicando-se a Equação 1, baseada na lei de Darcy, foi possível encontrar o coeficiente de permeabilidade do subleito igual a $6,38 \times 10^{-3}$ cm/s.

$$K = \frac{V \times L}{A \times h \times t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

V = Volume de água que atravessa a amostra (cm³);

L = Espessura da camada de solo no permeâmetro, medida na direção do escoamento (cm);

A = Área da amostra de solo no permeâmetro (cm²);

h = Carga hidráulica (cm); e

t = Intervalo de tempo (s).

Este valor de permeabilidade difere ao estabelecido pela ABNT NBR 16416 (2015), adotando-se o sistema de infiltração total, como foi executado, pois, para tal, o valor normativo mínimo indicado é 10^{-3} m/s. A norma nacional aponta um coeficiente mínimo bem restritivo, no

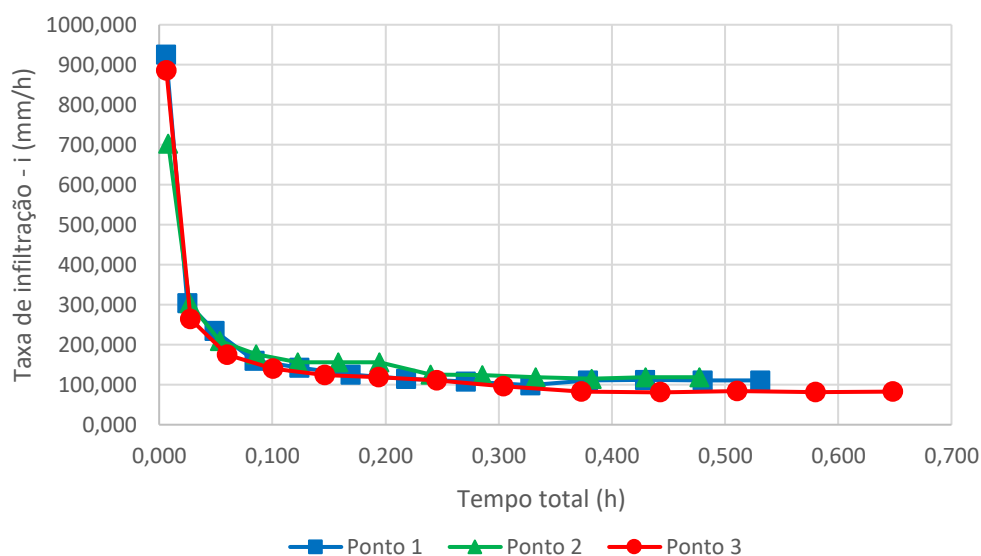
entanto, a norma americana ACI 522 R (2010) recomenda que o coeficiente mínimo de permeabilidade do solo para os sistemas de infiltração total seja superior a $3,60 \times 10^{-6}$ m/s, desde que este solo se estenda até pelo menos 1,20 m da superfície.

Devido a isto, buscando avaliar a adequação da escolha do sistema de infiltração total, foi realizado, também, o ensaio de permeabilidade à carga constante para uma amostra de solo na profundidade de 1,20 m, também caracterizada como granular. O valor do coeficiente de permeabilidade (K) foi de $8,76 \times 10^{-6}$ m/s, valor superior ao mínimo definido na norma americana, respaldando, assim, a escolha do sistema de infiltração total.

O teste de infiltração, realizado em campo com o infiltrômetro de anel simples, foi realizado em 3 pontos distintos na área do subleito e apresentou resultados de infiltração do solo, na condição de campo, visando uma análise mais completa, além do ensaio laboratorial de coeficiente de permeabilidade do solo. A Figura 4 mostra as curvas de infiltração dos pontos, destacando que os valores máximo e mínimo (tende à constância) da taxa de infiltração foram, respectivamente: para o ponto 1, 925,99 mm/h e de 111,2 mm/h; para o ponto 2, 702,48 mm/h e 118,44 mm/h; e para o ponto 3, 885,73 mm/h e 82,48 mm/h. Esses valores, conforme a ABNT NBR 16416 (2015), são para um grau médio de permeabilidade do solo (>36 mm/h e ≤ 3600 mm/h).

Então, em relação ao solo do subleito do pavimento permeável na profundidade de 45 cm, após os ensaios realizados, pode-se afirmar que há boas condições para a implantação de técnicas compensatórias de infiltração, haja vista a caracterização de sua composição, como areia franca, baixo percentual de finos e baixa plasticidade, além de também apresentar boa capacidade de suporte de cargas, através do ISC igual a 34%, e uma condição de permeabilidade compatível com as necessidades do sistema de infiltração total adotado para o pavimento permeável.

Figura 4 – Curvas de infiltração do solo do subleito



Fonte: Autores.

3.2 Materiais componentes das camadas do pavimento

A adequabilidade da brita 19 mm que compõe a base do pavimento, do pó de pedra da camada de assentamento e dos blocos de concreto permeáveis do revestimento foi avaliada através dos ensaios laboratoriais e critérios da ABNT NBR 16416 (2015), norma brasileira dos pavimentos permeáveis, por meio das análises necessárias. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados encontrados por propriedade ensaiada e a análise de conformidade para o agregado utilizado na base (brita 19 mm), destacando-se que o material atende a todos os requisitos especificados pela norma.

Tabela 1 – Ensaios da camada de base do pavimento permeável.

Propriedade	Resultado - Ensaios	Especificação normativa - ABNT NBR 16416 (2015)	Conformidade com a norma
Abrasão "Los Angeles"	26,81%	< 40%	SIM
Material passante na peneira 0,075 mm	0,57%	≤ 2%	SIM
Índice de vazios	42,77%	≥ 32%	SIM
Análise granulométrica	% retida acumulada nas peneiras: 37,5mm, 25mm, 19mm, 12,5mm, 4,75mm, 2,76mm		SIM

Fonte: Autores.

De forma similar à Tabela 1, a Tabela 2 mostra os resultados e a análise de conformidade para o pó de pedra utilizado na camada de assentamento. Salienta-se que o material utilizado possuía granulometria mais fina do que deveria, aspecto pontuado antes da execução, cujos responsáveis executivos mantiveram, e, de fato, o material não atendeu a nenhum dos requisitos especificados pela norma, apontando que o ensaio de abrasão “Los Angeles” não possui resultado devido à impossibilidade de execução por granulometria fina.

Tabela 2 – Ensaios da camada de assentamento do pavimento permeável.

Propriedade	Resultado - Ensaios	Especificação normativa - ABNT NBR 16416 (2015)	Conformidade com a norma
Abrasão "Los Angeles"	-	< 40%	NÃO
Material passante na peneira 0,075 mm	5,84%	≤ 2%	NÃO
Dimensão máxima característica	4,75 mm	9,5 mm	NÃO
Índice de vazios	27,89%	≥ 32%	NÃO
Análise granulométrica	% retida acumulada nas peneiras: 12,5 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; e 1,76 mm		NÃO

Fonte: Autores.

Para os blocos de concreto permeável do revestimento, a inspeção visual verificou a ausência de defeitos e delaminações significativas do concreto, sendo as peças homogêneas com arestas regulares. A avaliação dimensional de conformidade com a tolerância de ± 3 mm mostrou que apenas 3 dos 24 blocos apresentaram variações pouco acima do permitido em uma

das dimensões. Ao realizar o ensaio de resistência mecânica à compressão simples para avaliar se os blocos apresentavam no mínimo 20Mpa, encontrou-se uma média de 10,68Mpa, desconforme com a norma.

Ressalta-se que as condições de desconformidade do material da camada de assentamento e dos blocos de revestimento não impactaram o uso do pavimento, possivelmente pela sua baixa carga de tráfego de pedestres, mas, eventualmente, pode impactar na frequência de realização de manutenções e na vida útil do pavimento.

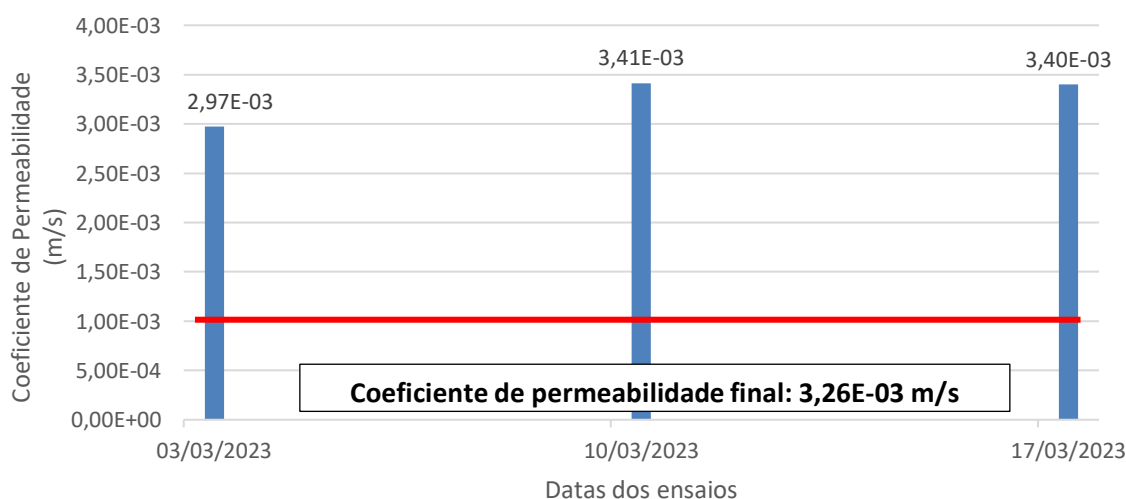
3.3 Coeficiente de permeabilidade do pavimento

Através da realização do ensaio com o anel de infiltração, de acordo com a metodologia proposta no anexo A da ABNT NBR 16416 (2015), foi encontrado um importante parâmetro da eficiência de infiltração do pavimento permeável, o coeficiente de permeabilidade. Salienta-se que é necessário o atingimento de valores acima de 10^{-3} m/s para o pavimento recém construído. Os ensaios foram realizados em 3 dias (03/03/2023, 10/03/2023 e 17/03/2023), sendo a escolha das datas devido à avaliação da permeabilidade ser no pavimento recém construído e ele ter sido finalizado em fevereiro de 2023.

Para cada um dos dias, 3 pontos foram ensaiados com uma repetição de medição, resultando em 6 medições válidas por dia. Todos os valores calculados foram superiores a 10^{-3} m/s, como pode ser observado na Figura 5, que apresenta os coeficientes médios para cada data ensaiada, além de indicar, por uma linha vermelha, o limite normativo de 10^{-3} m/s e destacar o valor final de permeabilidade, calculado através da média entre os 3 dias de medição.

O valor de permeabilidade do pavimento encontrado foi de $3,26 \times 10^{-3}$ m/s, indicando uma alta permeabilidade, sugerindo que, por este critério de análise, o pavimento apresenta um bom desempenho hidráulico quanto à capacidade de infiltração da água de chuva que venha a cair sobre ele. Outra forma interessante de se apresentar a permeabilidade do pavimento é apresentá-lo como sendo 3,26 mm a cada segundo.

Figura 5 – Permeabilidade do pavimento permeável recém construído.



Fonte: Autores.

3.3 Simulações hidráulicas de precipitação e evento chuvoso natural

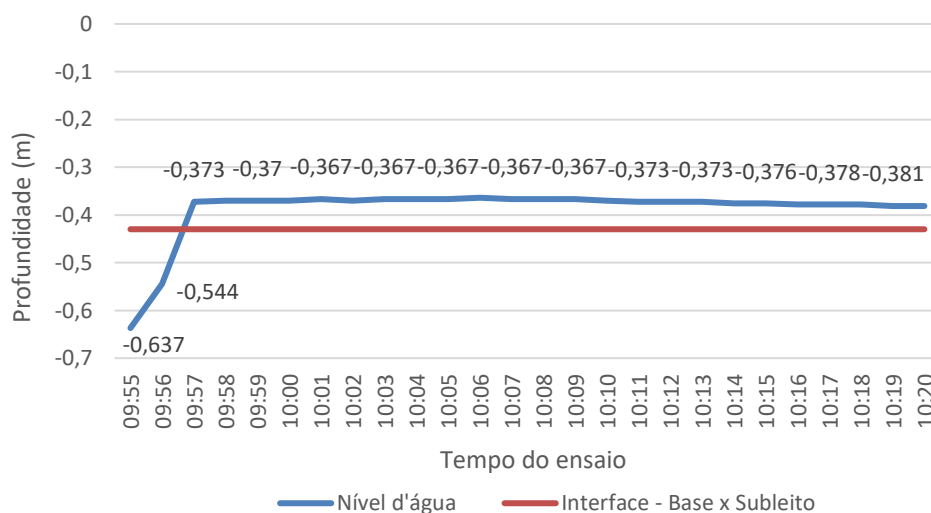
A primeira simulação foi realizada no dia 25/02/2023, com a utilização da área completa do pavimento experimental (27 m²). Os 2000 litros (1 m³ de cada tanque) foram colocados nessa área, mas, devido ao desnível e a algumas irregularidades na área total, a área da lâmina em que realmente ocorreram infiltração da água e ensaio foi de, aproximadamente, 16,4 m², valor calculado através da marcação da área molhada, que fica após o ensaio e foi confirmada com as filmagens do ensaio. A lâmina ficou visível enquanto o pavimento ainda estava recebendo água, sendo completamente infiltrada antes mesmo dos tanques esvaziarem completamente, pois a vazão de saída de água reduz à medida que o tempo passa.

As condições anteriores ao ensaio foram analisadas, observando-se que, a partir do dia 24/02 (anterior ao ensaio) até o início do ensaio, às 09:55h, do dia 25/02, o pavimento permeável recebeu precipitações, sendo uma delas 1h antes do ensaio, elevando o nível d'água de 0,892 m para 0,390 m. Depois dessa precipitação, o sistema, no seu processo de recuperação por infiltração, rebaixou o nível de água até a profundidade de 0,637 m, onde se iniciou o ensaio de simulação.

É notória a variação no comportamento do pavimento conforme a precipitação recebida ou não. Ou seja, o nível de água do sistema se eleva quando chove, resultando em um contato com a água, seguido por infiltração e, conseqüentemente, pela subida do nível. O processo é inverso quando o volume infiltrado cessa, permitindo, assim, que a água infiltrada no sistema continue o seu curso, rebaixando, desse modo, o nível de água. Quanto maior for a quantidade de água da chuva, maior será a penetração da água no solo, causando uma maior saturação do solo, o que torna o processo de infiltração gradativamente mais lento.

A primeira simulação de chuva, realizada com os 2 m³ de água na área efetiva de 16,4 m², resultou em uma precipitação simulada de 121,95 mm. Esse ensaio teve duração de 25 minutos: com esvaziamento total dos reservatórios em 14min seguido de avaliação contínua por mais 11min. Em todo o período foram realizadas leituras individualizadas por minuto do nível d'água. O comportamento do sistema durante o ensaio pode ser observado na Figura 6, em que, como nos demais gráficos similares, a interface Base x Subleito condiz à profundidade de 0,430 m ao final da camada de base do pavimento, apresentando-se graficamente apenas alguns valores, devido ao grande número de dados (leituras/min), escolhendo-se os representativos para o entendimento do comportamento.

Figura 6 – Simulação de chuva intensa nº 01.



Fonte: Autores.

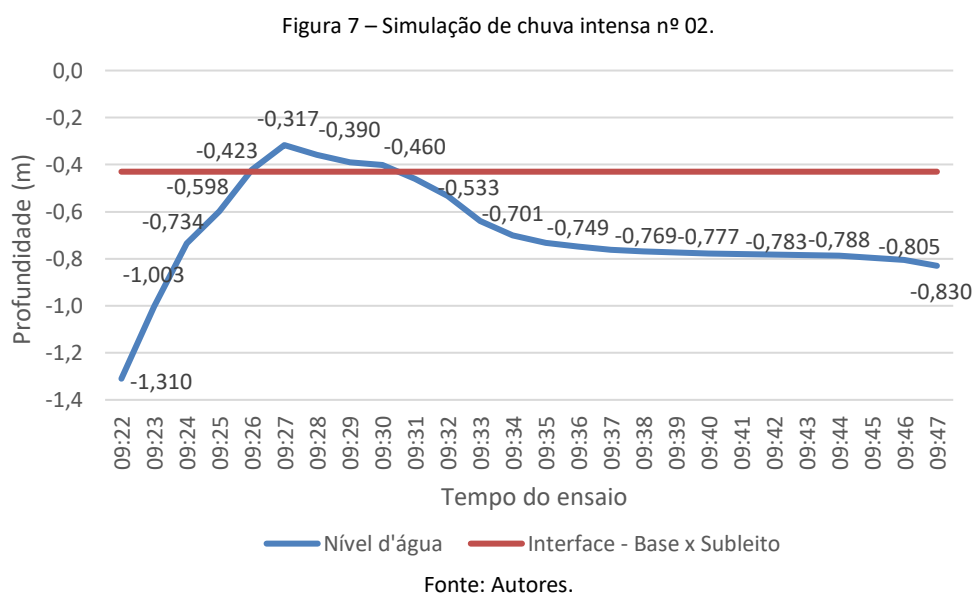
O ensaio iniciou com o nível de água na profundidade de 0,637 m e, após uma elevação rápida do nível, manteve-se praticamente estável até o final. Do instante 0 até 2min, o comportamento é de ascensão rápida, com manutenção do nível de água dentro da camada base do reservatório do pavimento permeável (profundidade de 0,430 m), desde passado o primeiro minuto até o final do ensaio. Esse comportamento indica que o pavimento manteve, durante o ensaio, sua taxa de infiltração similar à taxa de entrada de água no sistema após os primeiros minutos, resultando em um bom desempenho hidráulico de infiltração, considerando o alto volume de água no curto espaço de tempo (chuva simulada de aproximadamente 121,95 mm), mesmo o sistema estando com certo nível de saturação por conta das precipitações ocorridas no local nas horas anteriores ao início do ensaio.

A análise da condição de recuperação do pavimento permeável verificou o tempo que o sistema levou para retornar à condição inicial do pré-ensaio, isto é, ao mesmo valor de nível d'água. Esta avaliação iniciou às 09:55h do dia 25/02/2023, com a ascensão do nível de água, decorrente do início do ensaio, e finalizado quando o nível de água retornou a sua condição inicial, igual a 0,637 m de profundidade, ocorrendo, em média, 2h após, às 11:58h. A recuperação do pavimento para a chuva intensa simulada foi rápida, salientando-se que não ocorreu precipitação natural nesse intervalo de tempo de recuperação analisado.

A segunda simulação, realizada no dia 04/03/2023, buscou avaliar o comportamento do pavimento permeável a uma precipitação simulada mais intensa e sob outra condição prévia de ensaio. Para isso, definiu-se uma área retangular de 9,45 m², colocando-se os mesmos 2000 litros de água da primeira simulação, resultando em uma chuva simulada com cerca de 211,64 mm. Além da diferenciação na intensidade da precipitação simulada, também foi avaliada a resposta do pavimento sob uma condição prévia de ausência de chuvas naturais, ou seja, com o sistema praticamente não saturado. A APAC (2023) mostrou que, nos 4 dias anteriores ao ensaio, não choveu (posto pluviométrico Santo Amaro).

O ensaio iniciou às 09:22h do dia 04/03/2023, com nível d'água de 1,310 m. Similarmente ao ocorrido na primeira simulação, os primeiros minutos foram de rápida ascensão

do nível d’água, atingindo o valor mínimo de profundidade igual a 0,317 m após 5 minutos do início do ensaio. Posteriormente, o sistema teve seu nível d’água rebaixado ainda durante o ensaio, diferentemente do que ocorreu na primeira simulação, justificável pela condição de infiltrabilidade mais favorável do solo e do sistema, por sua menor saturação em comparação ao primeiro ensaio. A Figura 7 mostra o comportamento do gráfico durante o período de ensaio.

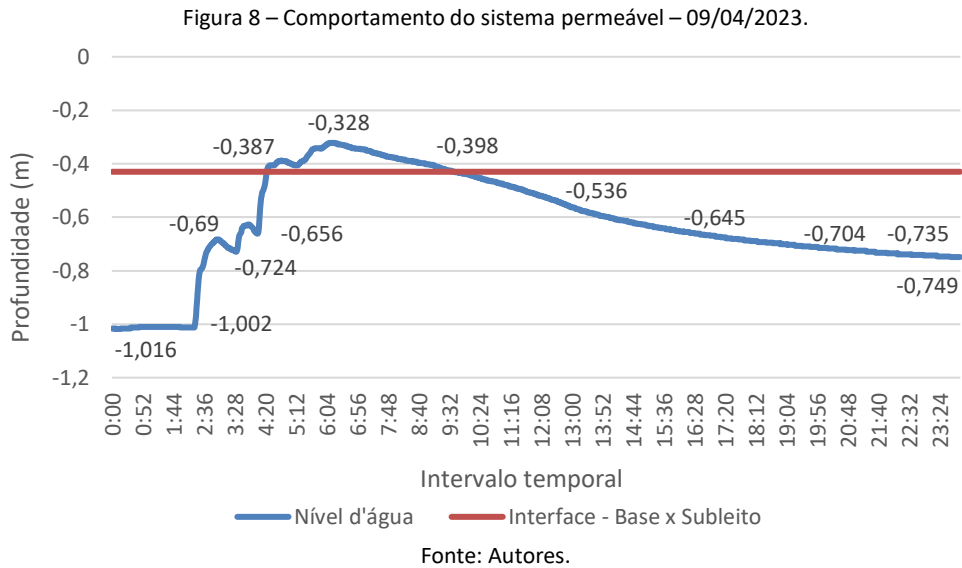


O pavimento permeável novamente teve um bom desempenho hidráulico ao ser submetido a uma simulação de chuva intensa de 211,64 mm, destacando-se que a lâmina de água formada foi completamente infiltrada antes do esvaziamento total dos reservatórios, assim como ocorreu na primeira simulação. Em relação à recuperação do pavimento após o ensaio, foi necessário mais tempo para o sistema voltar à condição pré-ensaio do que as 2h requeridas na primeira simulação, ocorrendo por volta de 24h depois, com nível de água aferido às 08:43h (dia 05/04/2023), em 1,310 m de profundidade, igual ao valor na condição inicial do ensaio às 09:22h (dia 04/04/2023). Verificou-se a inexistência de chuva natural no período de análise da recuperação do pavimento.

No dia 09/04/2023, o acumulado de chuva foi igual a 76 mm para o posto pluviométrico de Santo Amaro (APAC, 2023). Como não houve extravasamento de água no sistema, foi possível estimar o volume que o pavimento reteve no evento de chuva natural, resultando em 2,05 m³ retidos via infiltração para a área de 27 m², em um único dia. Salienta-se que as simulações, por conta do alto volume de água em um curto intervalo de tempo, tinham uma rápida ascensão e, depois, uma recuperação contínua, diferentemente da chuva natural, que se distribui ao longo do tempo.

Assim, foi possível identificar os movimentos de subida e descida do nível de água, mas sempre com o sistema permeável respondendo satisfatoriamente a cada nova necessidade de recebimento de águas pluviais, ratificando o seu bom desempenho hidráulico. A Figura 8 mostra o comportamento do sistema ao longo do dia 09/04/2023, pontuando-se que o nível de

saturação do solo era baixo, haja vista os três dias anteriores, com valores de precipitação iguais a 0 mm ou 1 mm (APAC, 2023).



O desempenho hidráulico do pavimento foi definido como bom, após a realização de duas simulações hidráulicas de chuvas intensas e do maior evento chuvoso diário natural para o período analisado, com a observação da resposta permeável do pavimento, avaliando-se, então, o comportamento do sistema para chuvas simuladas com valores de 121,95 mm e 211,64 mm e para chuva natural de 76 mm. Ressalta-se que as condições foram diferentes de saturação e umidade do solo, e o pavimento permeável respondeu positivamente a todos os eventos com altos volumes de água e na recuperação para a condição prévia às chuvas.

4 CONCLUSÕES

A presente pesquisa consistiu em avaliar a viabilidade da utilização de um pavimento permeável experimental enquanto alternativa compensatória para a drenagem urbana. Foram avaliados o solo do subleito de suporte do pavimento, as camadas e os materiais que as compõem, buscando analisar todo o sistema permeável e o seu desempenho hidráulico.

A avaliação do comportamento hidráulico do pavimento foi importante para encontrar respostas sobre o aumento dos volumes de água infiltrada em função do sistema permeável, como esse sistema respondeu às chuvas simuladas e à precipitação natural e, também, ao seu coeficiente de permeabilidade.

A temática abordada é relevante para cidades urbanizadas com altas taxas de impermeabilização, pois apresenta um dispositivo que pode ser implantado visando ambientes mais sustentáveis e resilientes à água, destacando que, quanto maior o número de dispositivos sustentáveis executados, maiores serão as reduções nos efeitos dos eventos pluviométricos extremos. O pavimento permeável experimental mostrou-se uma satisfatória técnica compensatória de infiltração, capaz de reduzir o escoamento superficial e os volumes escoados através da infiltração, com potencial real de mitigação dos alagamentos urbanos.

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 2016.
- ALMEIDA, N. **Análise de viabilidade técnica para a utilização de resíduos de construção e demolição no subleito e na base de um pavimento em concreto permeável**. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife – PE. 2017.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico**, 2023. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>. Acesso em: 07 Jun. 2023.
- BEZERRA, P. H. L. *et al.* Water Dynamics in an Infiltration Trench in an Urban Centre in Brazil: Monitoring and Modelling. **Water**, v. 14, n. 4, p. 513, 2022.
- CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A.V. Recife e a Convivência com as Águas. In: Hydroaid (Itália), PMSS/ Ministério das Cidades. (Org.). **Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, p. 111-130, 2005.
- DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 12, p. 1516-1531, 2020.
- ESIG. **Informações geográficas do Recife**. Disponível em: <https://esigportal2.recife.pe.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id>. Acesso em: 5 Set. 2022.
- FERREIRA, T. S.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B.; Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 23, n. 03, p. 437-446. 2018.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html>. Acesso em: 25 Ago. 2022.
- MARCHIONI, M. **Porous surfaces for permeable pavement: clogging and filtration mechanisms**. 158 p. Tese (Doutorado) - Politécnico de Milão, Itália. 2018.
- ONU. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. New York: United Nations. 2019.
- SCHREIBER, K. V. Best Management Practices as an Alternative Approach for Urban Flood Control. In: **Flood Handbook**. CRC Press, 2022. p. 53-76.
- SHANG, Y.; GUAN, Y.; TANG, Z.; FANG, Z. Comparison of the Engineering Strategies for Low Impact Development in a Densely Populated Old Urban Area. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1149, 2022.
- SILVA, A. K. B. **Análise do desempenho de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica (POLI-UPE)**. 172 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife – PE. 2022.
- SILVA, J. F. F. **Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade do Recife**. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru - PE. 2019.
- TANG Y.; CHAN, F.K.S.; O'DONNELL, E.C.; GRIFFITHS, J. Aligning ancient and modern approaches to sustainable urban water management in China: Ningbo as a “Blue-Green City” in the “Sponge City” campaign. **J Flood Risk Management**, 11, 2018.



WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; GULLIVER, J. S.; KHAZANOVICH, L. Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. **International Journal of Pavement Engineering**, v.20, n.2, p. 143–162, 2019.