

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AMANDA THAÍS DA SILVA SANTOS
ANA CRISTINE DE SIQUEIRA BRINGEL
LUIZ HENRIQUE MATIAS DA SILVA
RODRIGO DE SOUZA PATRÍCIO

PAVIMENTAÇÃO COM CONCRETO PERMEÁVEL

Sistema de drenagem superficial de pavimentos

RECIFE
2022

AMANDA THAÍS DA SILVA SANTOS
ANA CRISTINE DE SIQUEIRA BRINGEL
LUIZ HENRIQUE MATIAS DA SILVA
RODRIGO DE SOUZA PATRÍCIO

PAVIMENTAÇÃO EM CONCRETO PERMEÁVEL

Sistema de drenagem superficial de pavimentos

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Disciplina TCC do Curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário Brasileiro - UNIBRA, como parte
dos requisitos para conclusão do curso.

Orientador(a): Prof^a Dr^a em Química - Elaine
Cavalcanti Rodrigues Vaz.

RECIFE
2022

Ficha catalográfica elaborada pela
bibliotecária: Dayane Apolinário, CRB4- 2338/ O.

S237p Santos, Amanda Thaís da Silva.

Pavimentação com concreto permeável: Sistema de drenagem superficial de pavimentos. / Amanda Thaís da Silva Santos; [et al.]. - Recife: O Autor, 2022.

51 p.

Orientador(a): Dr^a. Elaine Cavalcanti Rodrigues Vaz.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA. Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.

Inclui Referências.

1. Drenagem urbana. 2. Pavimento permeável. 3. Sustentabilidade. I. Santos, Amanda Thaís da Silva. II. Bringel, Ana Cristine de Siqueira. III. Silva, Luiz Henrique Matias da. IV. Patrício, Rodrigo de Souza. V. Centro Universitário Brasileiro - Unibra. VI. Título.

CDU: 624

Dedico a Deus que me deu forças e discernimento para concluir este projeto de vida, de forma satisfatória (**Ana Bringel**).

A meus familiares e amigos que contribuíram de forma significativa na minha formação profissional (**Rodrigo Patrício**).

Dedico à minha mãe e minha tia que me auxiliaram e incentivaram desde o início do curso, aos meus irmãos que sempre me ajudaram nos momentos de dúvidas e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação (**Amanda Thaís**).

Dedico a minha família, pois ela é minha base para poder seguir em frente e em especial aos meus filhos que são o motivo de tudo isso (**Luiz Henrique**).

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, aos meus pais Antônio Alves Bringel e Ana Maria de Siqueira Bringel (in memoriam) pela luta incansável na minha orientação e formação pessoal e social (jamais esquecerei), às minhas filhas e netos pela alegria e torcida em tirar um sonho do papel, à minha tia materna Lúcia Siqueira (in memoriam) pela demonstração de alegria e orgulho a cada período concluído com êxito, sempre dizendo: “você não é desse mundo minha filhota”, à minha ex-companheira Marta Xavier pela inspiração em meu crescimento profissional, aos meus amigos (as) de trabalho, em especial Fátima Virgínia, Maurício Melo e Gilvandro Rosas, pelo apoio e incentivo, à Dona Fátima pelo carinho nos momentos difíceis e pela sua comidinha deliciosa que me levantava o astral, aos meus professores e orientadora pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso (**Ana Bringel**).

À empresa Techmetria por ter contribuído de forma significativa no meu crescimento profissional (**Rodrigo Patrício**).

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para superar todas as dificuldades (**Amanda Thaís**).

Agradeço a Deus por tudo que tem feito em minha vida (**Luiz Henrique**).

RESISTÊNCIA

Não permita que ninguém te comprima

E se te tracionarem, não saia de sua zona
elástica

Não deixe que te plastifiquem e te levem
à ruptura

Porque na vida...

Quem deve determinar nosso módulo de
elasticidade

Somos nós mesmos.

(Ana Bringel, 2020)

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 12 |
| 2.1 Drenagem..... | 12 |
| 2.2 Drenagem Urbana no Recife..... | 12 |
| 2.3 Concreto Permeável..... | 14 |
| 2.4 Controle de Enchentes Utilizando Pavimento de Concreto Permeável..... | 15 |
| 3 DELINEAMENTO METODOLÓGICO | 19 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 4.1 Problemática da Cidade do Recife | 25 |
| 4.2 Plano Diretor de Drenagem do Recife..... | 29 |
| 4.3 Parâmetros do Projeto de Drenagem do Recife..... | 32 |
| 4.3.1 <i>Tipologia de revestimentos</i> | 34 |
| 4.3.2 <i>Coeficiente de permeabilidade</i> | 36 |
| 4.4 Sistemas de Infiltração..... | 40 |
| 4.5 Execução..... | 43 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 46 |
| REFERÊNCIAS | 48 |

PAVIMENTAÇÃO COM CONCRETO PERMEÁVEL: Sistema de drenagem superficial de pavimentos

Amanda Thaís da Silva Santos

Ana Cristine de Siqueira Bringel

Luiz Henrique Matias da Silva

Rodrigo de Souza Patrício

Elaine Cavalcanti Rodrigues Vaz¹

RESUMO: O processo crescente e desordenado da urbanização no Brasil tem elevado, significativamente, o número de áreas cada vez mais impermeabilizadas. Isso cria um desequilíbrio no eco sistema natural, provocando sérios problemas que incluem erosão, esgotamento do lençol freático, poluição de rios, lagos e mares etc. Intensificou-se, associado ao fato, a ocorrência cada vez maior de inundações precoces urbanas devido à sobrecarga dos sistemas de drenagem. Como não podemos imaginar as cidades sem pavimentos, foi necessário criar sistemas que mitiguem esses danos, como o concreto permeável. O pavimento tradicional, seja rígido ou flexível, impede que a água infiltre no solo e realimente o lençol freático. Buscando soluções atenuantes, a indústria da engenharia civil procura sistemas construtivos e materiais capazes de absorver melhor esse escoamento superficial, através de pavimentos permeáveis, comprovando-se assim a necessidade pelas questões do desenvolvimento sustentável: econômico, ambiental e social. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva apresentar referencial teórico embasado na história e evolução do uso de pavimentos permeáveis nas obras da construção civil. Sistemas de pavimentos permeáveis melhoram a qualidade de vida da sociedade, em especial auxiliando nos sistemas de drenagem pluvial, sendo assim, essas alternativas construtivas sustentáveis em colaboração com o uso de tecnologias dão segmento ao conceito de baixo custo e menor impacto ambiental. No entanto, é importante e relevante aumentar os trabalhos sobre a sustentabilidade das construções, sendo necessário o constante estudo e desenvolvimento de métodos de avaliação de desempenho sustentável dos sistemas para apoiar-se nas tomadas de decisões.

Palavras-chave: Drenagem urbana. Pavimento permeável. Sustentabilidade.

¹ Professor da UNIBRA. Doutora em Química. E-mail: elaine.cavalcanti@grupounibra.com

1 INTRODUÇÃO

A urbanização no Brasil é crescente e desordenada, presentemente, a população urbana gira em torno de 85%, enquanto na década de 50, esse percentual se apresentava inferior a 40% (PARKINSON et al., 2003). Tais números sinalizam o quão precipitado se deu esse evento e que, devido à falta de planejamento no processo de urbanização, dentre os principais problemas estão as questões de drenagem urbana. Os sistemas de drenagem pluviais, no Brasil, possuem como foco o escoamento rápido da água precipitada outorgando o problema para a jusante (PARKINSON et al., 2003).

As enchentes e inundações, afetam a sustentabilidade das cidades, trazendo prejuízos sociais, ambientais e econômicos. Somente na cidade do Recife/PE, as enchentes e inundações geram prejuízos financeiros significativos ao poder público, à indústria e ao comércio. Uma solução que se apresenta, relevante, para os pavimentos e que consegue atuar bem sobre a drenagem, são os pavimentos permeáveis. Além disso, a impermeabilização da superfície em áreas urbanas reduz a permeabilidade do solo, contribuindo para a não recarga do lençol freático, podendo acarretar problemas sérios de secas em períodos de grandes estiagens, tal qual se verifica nos últimos anos (TUCCI, 2003). Dessa forma, entendendo as inundações e enchentes como consequências de processos relacionados a edificações de ambientes urbanos onde a principal característica é falta de sustentabilidade, tornou-se, indiscutivelmente, necessário ampliar o estudo de materiais e a aplicação de sistemas capazes de minimizar esses efeitos negativos.

O concreto permeável ou poroso (figura 1), apesar de ser praticamente similar ao convencional, tem como principal função o aumento significativo da permeabilidade de pavimentos, submetidos a cargas reduzidas, gerando um maior índice de vazios, em torno de 15% a 25%, essencialmente com a mesma granulometria, o que facilita a passagem da água e do ar (TECNOSIL, 2022). Uma de suas grandes vantagens é que se trata de uma tecnologia conhecida – o concreto, precisando apenas de algumas adaptações no seu traço e confecção para atingir o objetivo de impermeabilidade, resistência e durabilidade (ANDRADE, 2020). Vale salientar que o concreto permeável também pode ser produzido em peças pré-moldadas ou moldado *in loco* e seu sistema poderá durar até dez anos com a parte

Íntegra, a depender dos cuidados necessários quanto à colmatção, que é o entupimento das camadas superiores.

Figura 1: Estrutura macroscópica do concreto permeável, observando-se a passagem de água.



FONTE: TECNOSIL, 2022

Um sistema de drenagem microdrenagem (sistema de condutos construídos com o objetivo de receber e conduzir as águas das chuvas provenientes do escoamento superficial e é definido, basicamente, pelo traçado das ruas) convencional é composto por sarjetas, bocas de lobo, galerias e canais, enquanto para o sistema sustentável, os mais utilizados são os reservatórios, áreas de infiltração, jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis, tanques de retenção e retenção. Ambos os sistemas podem ser utilizados em conjuntos, tanto com a conciliação do método convencional com o sustentável, como a utilização de mais de um método de cada sistema. Quando bem projetados e com manutenção adequada podem eliminar os problemas com inundações e alagamentos (CECCATTO e FERRAZ, 2019).

Os pavimentos permeáveis, ao contrário dos sistemas de microdrenagem, evitam o escoamento superficial, infiltrando em sua estrutura quase que 100% da água da chuva, podendo então ser absorvida pelo solo ou transportada através de auxiliares de drenagem. A percolação da água é feita de forma rápida, sendo suficiente para a percolação de quase toda água da chuva, evitando a formação de poças e resultando em um baixo coeficiente de escoamento superficial. Estes

pavimentos são dimensionados levando em consideração a média pluviométrica do local de implementação, a permeabilidade e suporte do solo e ainda o nível do lençol freático (MARCHIONI e SILVA, 2019).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar as vantagens da utilização do pavimento de concreto permeável com a finalidade de evitar inundações. Para tanto, fez-se uma análise do Plano Diretor de Drenagem do Recife (PDDR).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Drenagem

Drenagem é o conjunto de obras que se destinam a remover o excesso de água da superfície de um terreno ou do subsolo (MICHAELIS, 2022). No período entre 1850 e 1990 a drenagem urbana tradicional no Brasil se caracterizou por uma abordagem Higienista, onde havia a coleta e o afastamento imediato das águas pluviais para jusante. Tal método resultava na elevação do pico de cheias, acirrando a situação das cidades e resultando em diversos problemas intersetoriais.

Devido à intensa urbanização desordenada no Brasil, nessa época, onde os mananciais foram aterrados e os leitos dos rios transformados em canalizações e/ou cederam espaços para as vias de tráfego de veículos, conseqüentemente, hoje, as ruas apresentam enormes possibilidades de se tornarem rios nas situações de chuvas intensas (CHRISTOFIDIS, 2020).

Após 1990 aconteceu uma nova transição evolutiva denominada Ambientalista, onde o manejo das águas pluviais urbanas, no Brasil, passou a adotar os princípios que já vinham sendo aplicados em outros países, onde o objetivo seria resgatar os aspectos da dinâmica das águas, especialmente (TUCCI e CORDEIRO, 2004).

A visão da gestão integrada das águas urbanas gerou vários debates no Brasil, onde foram mostrados que, se as cidades fossem bem planejadas integralmente, reduzir-se-iam os problemas ocasionados pelas enchentes.

Em 1997 foi sancionada a Lei nº 9.433, mais conhecida como Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, onde, dentre os benefícios, está a definição das bacias hidrográficas como unidades de planejamento para gestão das águas, as quais são conduzidas pelas prefeituras e sociedade civil, além dos governos estaduais e federal.

2.2 Drenagem Urbana no Recife

Drenagem urbana é o sistema de manejo projetado pelo poder público do município para coletar águas provenientes da chuva e escoá-las para galerias de

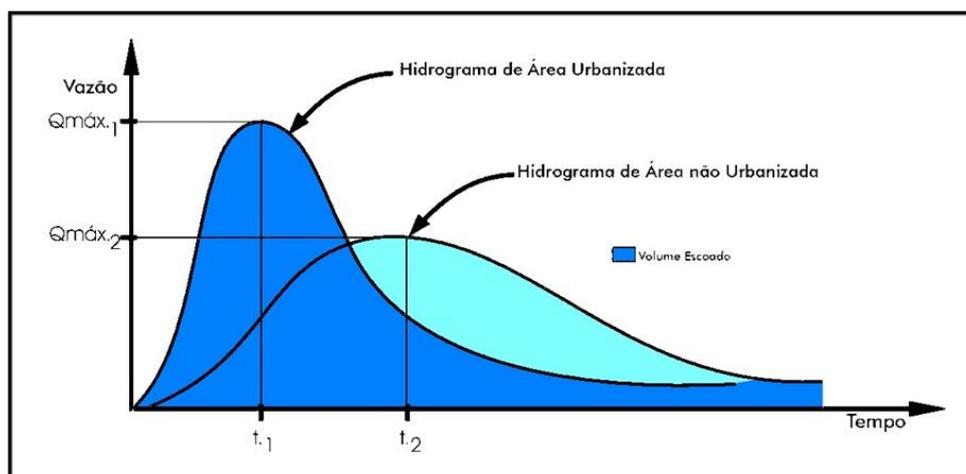
águas pluviais e esgotos pluviais até um curso hídrico capaz de recebê-las. Os problemas de drenagem urbana requerem soluções alternativas estruturais e não estruturais, baseadas em conhecimentos da dinâmica ambiental, climatológica e hidrológica, além de componentes sociais e políticos-institucionais que contemplem planejamento de drenagem, obras de infraestrutura e de planejamento urbano, analisados de forma integrada nos planos diretores de drenagem (CANHOLI, 2014).

A influência das mudanças climáticas nas inundações da cidade do Recife, as chuvas intensas, apesar de serem fenômenos sazonais e naturais, provocam inundações devido à ação antrópica, que invade o espaço das planícies de inundação ou de áreas costeiras e avançam em direção às partes mais elevadas do relevo, tendendo a ser a principal responsável pelas ocorrências registradas nas metrópoles. Em períodos de enchentes, as vazões geradas podem atingir magnitude que supere a capacidade de descarga da calha do curso d'água, resultando no extravasamento para áreas marginais ao leito fluvial menor (SINGEP, 2018).

A incorporação das várzeas dos rios ao sistema viário das cidades, com o consequente processo de retificação de canais fluviais meandantes e obras de canalização, intensificaram a impermeabilização das planícies de inundação, com consequente aceleração dos escoamentos superficiais e aumento dos picos de vazão e de ocorrência de inundações (POMPÊO, 2000).

Na figura 2 verifica-se que os picos de cheias depois da urbanização ocorrem mais cedo e com mais severidade do que antes do desenvolvimento, quando as características de uso e ocupação favoreciam a infiltração.

Figura 2: Efeitos da urbanização sobre o hidrograma da bacia.



Fonte: de NETTO (1994), recuperado de: VIRGILLIS (2009).

2.3 Concreto Permeável

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR) nº 16416/2015, Concreto Permeável de Cimento Portland (CPCP) é aquele cujos vazios interligados permitem a percolação de água por ação da gravidade. Ainda segundo a mesma norma, pavimento permeável é aquele capaz de resistir aos esforços mecânicos e às condições de rolamento, além de permitir a infiltração de água ou seu acúmulo temporário sem prejuízo para a estrutura.

Segundo a NBR-7207/82 da ABNT tem-se a seguinte definição: o pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a:

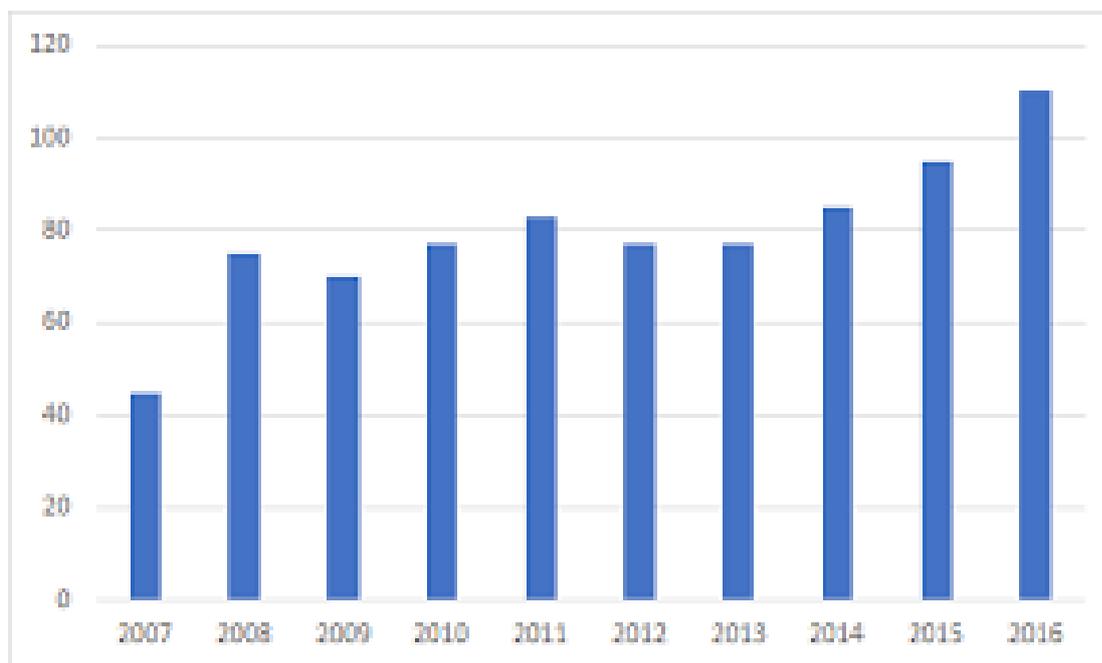
- a) Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) Resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O sistema de pavimentos em Concreto Permeável de Cimento Portland (CPCP) pode ser aplicado em estacionamentos, calçadas, ciclovias e ciclofaixas, quadras poliesportivas, áreas comuns de condomínios, áreas industriais, galpões, praças, estabilização de taludes, vias para pedestres, vias de tráfego leve (como ciclomotor, motoneta, motocicleta, triciclo, quadriciclo, automóvel, utilitário, caminhonete e camionete, com volume diário médio (VDM) de até 400, podendo existir, ocasionalmente, o tráfego de ônibus e caminhões em número não superior a um volume médio diário (VMD) de 20, ajudando, assim, no controle de impactos provenientes das mudanças realizadas sobre o meio ambiente natural, uma vez que, em relação ao concreto convencional, possui baixo consumo de cimento, cuja fabricação emite gases de efeito estufa, assim como, reduzem o efeito das ilhas de calor e os ruídos causados pelo contato dos pneus automotivos, minimizam o efeito de aquaplanagem e diminuem os sólidos, como nitrogênio e fósforo, suspensos nas águas pluviais (ABCP,2021). Segundo a Agência de Proteção Ambiental (EPA) apud Sumanasooriya et. al (2010), o concreto permeável está entre as melhores técnicas na redução do escoamento superficial de águas pluviais.

O Concreto Permeável de Cimento Portland recentemente ganhou notoriedade quando foi reconhecido pelo Conselho de Soluções Ecológicas dos

EUA, responsável por classificar as construções sustentáveis através do LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), traduzindo - Liderança em Energia e Design Ambiental. O interesse crescente por esse material é a razão pelo qual o número de pesquisas, sobre ele, cresceu nos primeiros anos do século XXI (Figura 3).

Figura 3: Crescimento do CPCP no século XXI



Fonte: Adaptado de Zhong et al (2018)

2.4 Controle de Enchentes Utilizando Pavimento de Concreto Permeável

De acordo com Suderhsa (2002), é necessário a adoção de controle de enchentes que considerem as seguintes diretrizes:

- incremento de vazão em determinado local não deve ser transferido para áreas localizadas à jusante;
- avaliação de impactos devidos à instalação de novos empreendimentos deve ser realizada no âmbito da bacia hidrográfica como um todo;
- o horizonte de avaliação não deve se limitar ao estado presente, mas em possíveis formas de ocupações urbanas futuras;

d) o controle das enchentes deve se basear, preferencialmente, em medidas não estruturais. O uso destes dispositivos não é indicado em vias de grande tráfego, pois estes pavimentos podem ser deformados ou entupidos, tornando-se impermeáveis.

A composição do CPCP tem uma relação A/C em torno de 0,28 a 0,40 (muito baixa), sendo necessário, dependendo de cada projeto, a utilização de aditivos, plastificantes e estabilizantes, tem granulometria aberta (agregados com predominância de um mesmo tamanho de partícula, que não contêm finos ou contêm uma pequena quantidade de finos, resultando após a compactação em um índice de vazios relativamente grande.

De acordo com Lamb et al (2013), o *American Concrete Institute* (ACI) recomenda o uso de pedrisco, ou brita zero, por ser essa a faixa granulométrica mais adequada para o CPCP: 9,50 mm é o seu diâmetro máximo e 4,80 o módulo de finura. Corroborando com tal recomendação, muitos autores em suas pesquisas utilizaram a brita zero como agregado graúdo na mistura do CPCP. A figura 4 apresenta imagens de diferentes pegas em função do fator água/cimento.

Figura 4: Amostra de concreto permeável com diferentes teores de água/cimento: (a) Pouca água; (b) Quantidade adequada de água; (c) Muita água



Fonte: (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

As figuras 5 e 6 apresentam os ensaios de Slump teste e do abatimento por tronco de cone para a formulação do traço de um concreto permeável.

Figura 5: *Slump* do concreto permeável.



FONTE: (escolaengenharia.com.br, 2019).

Figura 6: Ensaio do abatimento por tronco de cone.



FONTE: (REASE, Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, 2015)

Os resultados mostram que a fluidez no estado fresco é próxima de nula (a depender do projeto) para o CPCP.

O teste de Slump objetiva determinar a consistência do concreto, ou seja, a trabalhabilidade do concreto em massa, o Slump é a medida do seu abatimento realizado no ensaio. Deve ser feito assim que o caminhão betoneira chegar na obra, em caso de utilização de concreto usinado, e se o concreto for executado na obra o teste deve ser feito após a fabricação do concreto e momentos antes de ser aplicado nas estruturas em questão. Um dos métodos mais utilizados para determinar a consistência é o ensaio de abatimento do concreto, também conhecido

como Slump test. Neste ensaio, colocamos uma massa de concreto dentro de uma forma tronco-cônica, em três camadas igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes. A norma prevê que se ocorrer o desmoronamento da massa de concreto poroso ao realizar o desmolde, de modo que impeça a medição do assentamento, o ensaio deve ser desconsiderado e realizada nova determinação sobre outra porção de concreto da amostra.

3 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica, assim como o ensaio apresentado, os quais foram utilizados a leitura e compreensão de referências já publicadas que condizem com o tema abordado, tais como: dissertações, monografias, teses, artigos técnicos, livros, normas técnicas brasileiras, estudos e experimentos de terceiros/empresas, leis municipais do Recife. Foram utilizadas bases de dados como Google Acadêmico e Scielo, com os descritores: drenagem urbana, pavimento permeável e sustentabilidade. A pesquisa foi realizada entre os meses de agosto a dezembro de 2022.

O ensaio apresentado, foi realizado na Universidade de Pernambuco – Escola Politécnica de Pernambuco, em 2022, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Este trabalho consiste numa pesquisa aplicada de natureza descritiva, que foi desenvolvida no intuito de analisar o desempenho de diferentes tipos de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI – UPE).

O Recife é uma cidade implantada dentro de um estuário, que está localizada no estado de Pernambuco, no setor oriental da Região Nordeste do Brasil. É a maior área urbana do estado, banhada a leste pelo Oceano Atlântico e limitada pelos municípios de Olinda, Paulista, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes e São Lourenço da Mata. A cidade está situada sobre uma planície aluvional (fluviomarinha), constituída por ilhas, penínsulas, alagados e manguezais envolvidos por cinco rios: Beberibe, Capibaribe, Tejipió, braços do Jaboatão e do Pirapama, conferindo-lhe características peculiares. Essa planície é circundada por colinas em arco que se estendem do norte ao sul, de Olinda até Jaboatão.

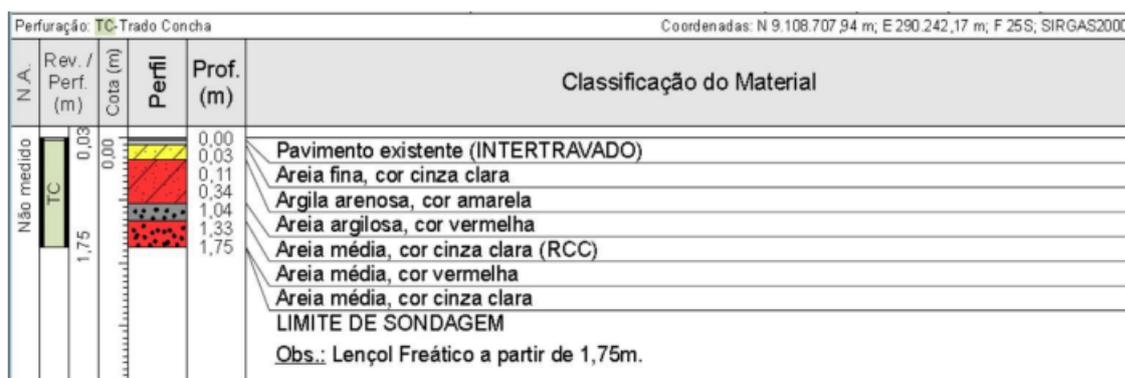
O manual de drenagem e manejo das águas pluviais do Recife, especifica que o subsolo da planície é de formação aluvionar, onde se intercalam camadas de areia e argila, que variam do tipo orgânicas até aquelas, produtos do intemperismo nas rochas das colinas. Nestas últimas, o subsolo é do grupo barreiras, sendo composto de argila-arenosa, de consistência dura, que se comporta, ao norte, mais sujeita aos deslizamentos quando saturadas pela água, e ao sul, mais friáveis ou propensas a aberturas de grandes voçorocas (RECIFE, 2016).

A região escolhida para estudo foi a Escola Politécnica de Pernambuco (POLI – UPE), que está entre os pontos críticos de alagamentos, e situa-se no bairro da Madalena, Recife-PE.

Nos ensaios para caracterização do solo - estudo geotécnico, foi realizada uma sondagem com auxílio da pá e picareta e do trado tipo concha até a identificação da profundidade do nível d'água, em Dezembro/2019.

O perfil denota a existência de um pavimento existente (intertravado sextavado), seguido de um colchão de areia fina, e por camadas de argila arenosa amarelada, areia argilosa avermelhada, areia grossa cinza clara (RCC), areia média avermelhada e areia média cinza clara. Estes materiais encontrados nas camadas estão coerentes com o Perfil Geotécnico apresentado para o Prédio IAUPE (ANEXO 1). Com relação ao lençol freático, o mesmo foi encontrado a 1,75 m da superfície e, portanto não influencia no comportamento do pavimento.

Perfil Geotécnico (POLI-UPE) realizado em 11/12/2019



Fonte: Autora (2021).

Para a realização desse ensaio, na análise granulométrica, utilizou-se a ABNT NBR 7181 (2016), em que foi possível determinar a distribuição granulométrica do solo por sedimentação. Os materiais constituintes das camadas de solo foram classificados de acordo com o sistema Transportation Research Board (TRB).

Os limites de liquidez e de plasticidade foram determinados conforme a metodologia estabelecida pela ABNT NBR 6459 (2017) e ABNT NBR 7180 (2016), respectivamente.

O ensaio de compactação foi empregado segundo a ABNT NBR 7182 (2020) e tem a finalidade de obter a densidade máxima e a umidade ótima do solo para a energia de compactação de Proctor Intermediário.

Para a realização do CBR foi adotado o procedimento da ABNT NBR 9895 (2017).

Na fase de execução das pistas experimentais, foi verificado o grau de compactação (GC) do subleito in loco, através do ensaio para determinação da massa específica aparente do solo in situ, conforme prescrito na ABNT NBR 7185 (2016). Além disso, determinou-se a umidade com emprego do speedy, de acordo com o procedimento estabelecido pela norma DNER-ME 052/94.

Durante a etapa de execução das pistas experimentais, foi verificada a taxa de infiltração em 3 pontos distintos da camada do subleito. Para tanto, foi utilizado o infiltrômetro de anel simples, que consiste num cilindro metálico de 15 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que foi cravado a aproximadamente 1 cm no solo. Inicialmente, verteu-se um volume de água conhecido (200 ml), o suficiente apenas para formar uma lâmina d'água na superfície do solo interior do infiltrômetro, e cronometrou-se o tempo de infiltração da água. Este procedimento foi repetido até que os intervalos de tempo de infiltração da água, entre um volume e outro, se tornassem constantes.

O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi baseado na Lei de Darcy:

$$K = \frac{V \times L}{A \times h \times t}$$

Onde:

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

K = o coeficiente de permeabilidade (cm/s);

h = o desnível entre a superfície de entrada e de saída (cm);

A = seção da amostra de solo (cm²);

t = intervalo de tempo (s);

L = a espessura da camada de solo, medida na direção do escoamento (cm).

Diante disto, foi realizada a coleta de dados pluviométricos de um evento de chuva ocorrido no dia 13/06/2019. Os referidos dados foram obtidos do site do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais),

através das medições realizadas na estação pluviométrica localizada no bairro da Boa Vista, nas coordenadas 291611,94 E e 9107591,25 S, a uma distância de 2,30 km da região de estudo. De acordo com os dados levantados, verificou-se que neste dia 13/06/2019 ocorreu uma chuva extrema de 194,6 mm em 24h, que provocou enormes alagamentos, transbordamento de rios e canais nas regiões metropolitanas de Recife.

O tempo de retorno da chuva foi calculado pela nova equação IDF do Recife disponibilizada pela EMLURB, através do Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife.

$$i = \frac{611,3425 \times Tr^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}}$$

Sendo:

i = intensidade de chuva (mm/h);

Tr = Tempo de retorno (anos); e

t = Duração da chuva (min).

No estudo de tráfego, o objetivo é obter, através de métodos sistemáticos de coleta, dados relativos aos cinco elementos fundamentais do tráfego (motorista, pedestre, veículo, via e meio ambiente) e seu inter-relacionamento (DNIT, 2006). De acordo com os dados fornecidos pelo Departamento de Recursos Humanos da POLI/UPE, verificou-se que o quantitativo de docentes e funcionários administrativos é de aproximadamente 243 pessoas. Além disso, verificou-se que a quantidade de vagas do estacionamento é de 101.

Diante dos estudos básicos apresentados para a região, foi realizado o dimensionamento mecânico e hidráulico das estruturas dos pavimentos permeáveis.

O dimensionamento mecânico foi embasado na metodologia da Instrução de Projeto (IP-06/2004) do município de São Paulo, que por sua vez, é preconizada pela ABCP, e teve como elementos básicos os estudos geotécnicos do subleito, bem como os dados do estudo de tráfego.

Quanto ao dimensionamento hidráulico, em função do coeficiente de permeabilidade do subleito ($1,72 \times 10^{-4}$ m/s), foi definido o sistema de infiltração

total. A determinação da espessura da camada de reservatório do pavimento baseou-se na metodologia prescrita no estudo de Antunes (2017). No entanto, também foi realizado um comparativo com o dimensionamento realizado através do método da Curva envelope e da metodologia estabelecida pela ABNT NBR 16416 (2015).

No intuito de definir a área de contribuição, fez-se necessário a delimitação das bacias e sub-bacias de contribuição do estacionamento da POLI/UPE. Para tanto, adotou-se a metodologia utilizada no estudo de SILVA (2018), que engloba a análise das curvas de níveis, do MDT (Modelo Digital de Terreno).

Nesta pesquisa foram analisadas 04 diferentes tipos de estruturas de pavimentos permeáveis.

E1 - Revestimento em peça de concreto permeável e base composta por brita reciclada de dimensão máxima de 12,5 mm.

E2 - Revestimento em peça de concreto permeável e base composta por brita convencional de dimensão máxima de 25 mm.

E3 - Revestimento em concreto permeável com camadas de base/sub-base compostas por brita reciclada de dimensão máxima de 19 mm e subleito com substituição parcial por areia grossa reciclada.

E4 - Revestimento em concreto permeável com camadas de base/sub-base compostas por brita reciclada de dimensão máxima de 19 mm.

Os materiais utilizados nas camadas constituintes das estruturas de pavimentos permeáveis (E1 e E2): camada de base (brita reciclada e convencional), camada de assentamento (pedrisco) e rejuntamento (areia grossa).

O ensaio para determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados utilizados na camada de base (brita reciclada e brita convencional), foi realizado de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 6458 (2017).

Tendo em vista que o sistema de infiltração adotado para as estruturas de pavimento foi de infiltração total, foi necessário a utilização de uma manta geossintética do tipo não-tecido R-16, entre a parte inferior da base do pavimento e o subleito, e utilizada no intuito de evitar a colmatação da estrutura, devido à penetração de finos provenientes do solo do subleito na camada de base.

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o pavimento permeável deve sofrer intervenções de manutenção sempre que existirem condições que

comprometam o desempenho mecânico ou hidráulico do pavimento. Além disso, quando os pavimentos permeáveis apresentam coeficiente de permeabilidade $\geq 10^{-5}$ m/s, deve-se realizar ações de limpeza.

No intuito de verificar a capacidade de permeabilidade das estruturas de pavimentos, foi realizado um monitoramento do nível do lençol freático na área de estudo. Para tanto, foram implantados 6 (Seis) piezômetros (tubos de PVC $\varnothing 100$ mm) no entorno do estacionamento da POLI/UPE.

Através da análise do desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis, espera-se poder determinar qual a estrutura de pavimento implantada que apresenta a maior eficiência, considerando a capacidade de permeabilidade e as propriedades físicas e mecânicas das estruturas analisadas. Diante desse contexto, vêm sendo desenvolvidos estudos no intuito de analisar a eficiência do pavimento permeável e implantar melhorias técnicas.

CONCLUSÕES DO ENSAIO

Diante dos resultados apresentados nesta pesquisa, verificou-se que a região de estudo (Estacionamento da POLI/UPE) está situada entre os 159 pontos de alagamentos da cidade do Recife, e é caracterizada como uma área de tráfego leve. Do ponto de vista geológico é constituída por um solo com presença predominante de material arenoso e argiloso, e possui um subleito que é classificado com comportamento de excelente a bom e grau de permeabilidade médio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

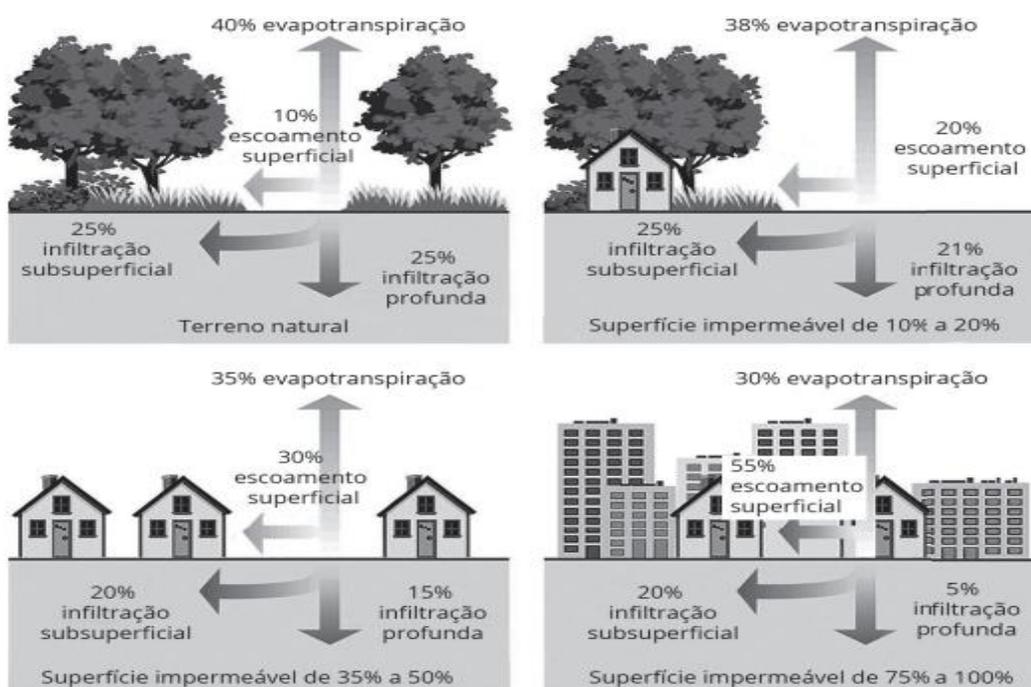
4.1 Problemática da Cidade do Recife

O Recife está confinado entre o mar e os morros, onde correm os rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió, que possuem um mesmo estuário. Fazem parte ainda desta macrodrenagem os riachos Jiquiá, Curado, Morno, Camaragibe, Dondon e Moxotó. Existem 99 canais: totalizando 115.308 m de canais – microdrenagem. A rede de microdrenagem, composta por galerias e canaletas, apresenta extensão aproximada de 1.580 km. Muitos segmentos estão subdimensionados; não há cadastro desta rede de drenagem.

Para Genz e Tucci (1995), os principais impactos que decorrem do desenvolvimento de uma área urbana sobre os processos hidrológicos, estão ligados à forma de ocupação da terra, e também ao aumento das superfícies impermeáveis em grande parte das bacias que se localizam próximas às zonas de expansão urbana ou inseridas no perímetro urbano. Segundo Canholi (2005) essa urbanização caótica e o uso inadequado do solo provocam a redução da capacidade de armazenamento natural dos deflúvios; estes, por sua vez demandarão outros locais para ocupar. A vegetação tem um papel importante no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação; quanto maior for a superfície de folhagem, maior a área de retenção da água durante a precipitação. Esse volume retido é evaporado assim que houver capacidade potencial de evaporação. Quando esse volume, retido pelas plantas, é totalmente evaporado, as plantas passam a perder umidade para o ambiente por meio da transpiração. A planta retira essa umidade do solo através das suas raízes. O balanço hídrico na bacia urbana altera-se, com o aumento do volume do escoamento superficial e a redução da recarga natural dos aquíferos e da evapotranspiração (PRINCE GEORGE'S COUNTY, 1999).

Com a impermeabilização das superfícies através da pavimentação das ruas, passeios e construções, a água precipitada não se infiltra no solo, e portanto, o armazenamento natural do conteúdo de água no perfil do solo não acontece, causando o aumento do escoamento superficial (Figura 07).

Figura 07: Efeitos da urbanização no escoamento superficial



FONTE: (Adaptado de Prince George's County, 1999). Alterações no ciclo hidrológico em decorrência da urbanização.

Os problemas recorrentes do sistema de drenagem do Recife são:

- Uso do sistema de drenagem para escoamento de dejetos;
- Ocupação das áreas de inundação;
- Inúmeras áreas afetadas por alagamentos, devido influência das marés;
- Obstruções na macrodrenagem em virtude da presença de esgotos e crescimento da vegetação; galerias semi-obstruídas e danificadas;
- Vários assentamentos de baixa renda, localizados ao longo dos rios e canais causando confinamento da calha fluvial;

- A ocupação dos morros e encostas aumentando as vazões, a formação de sedimentos e pondo em risco a vida da população.

Cunha (2001) cita que as atividades humanas podem modificar o comportamento da descarga e da carga sólida do rio. Atividades como construções de casas, desmatamento das margens e práticas agrícolas podem modificar o "ir e vir" dos sedimentos que os rios transportam. Com a ocupação das margens do rio (Figura 08) e a conseqüente urbanização, a planície passa a receber diversos resíduos produzidos pelas comunidades que ali habitam (Figuras 10 e 11). Isto vai se tornar um problema a partir do momento em que as águas do rio, durante as cheias, invadem a planície e carregam tais resíduos para dentro do leito do rio.

Figura 08: Ocupação indevida das margens: Canal Rio do Ibura



FONTE: Plano Diretor de Drenagem do Recife – PDDR

O assoreamento é o acúmulo de terra, lixo e matéria orgânica no fundo de rios ou mananciais. O fenômeno geralmente acontece quando o curso d'água não possui matas ciliares (vegetação nas margens do rio), levando-os a ficarem muito próximos ao nível das ruas, quando não executada a dragagem preventiva ou regular (Figura 09).

Figura 09: Nível do canal próximo ao nível das ruas laterais: Canal São Pedro – Jiquiá



FONTE: Plano Diretor de Drenagem do Recife – PDDR

Figura 10: Canal Iraque - Areias



Figura 11: Canal Três Carneiros – Ibura



FONTE: Plano Diretor de Drenagem do Recife - PDDR

A urbanização de canais tem como objetivo remover os entulhos, facilitando o escoamento das águas e prevenindo alagamentos, principalmente no período de chuvas mais intensas (Figuras 12 e 13).

Figura 12: Canal Rio da Prata – Ibura (urbanizado)



FONTE: Plano Diretor de Drenagem do Recife – PDDR

Figura 13: Canal de Santa Terezinha – Santo Amaro (urbanizado)



FONTE: Plano Diretor de Drenagem do Recife - PDDR

4.2 Plano Diretor de Drenagem do Recife

O Plano Diretor de Drenagem do Recife – PDDR apresenta o estado desejado para o Recife em 2037:

- Diagnóstico do Sistema de Drenagem Atual (concluído);
- Relatório de Caracterização da Área de Influência (concluído);
- Relatório Ambiental – RAP (concluído);

- Relatório Concepção: Estudo de Alternativas + Estudos complementares – com estimativa de custo, e indicação solução escolhida, diretrizes de programas, projetos e sistema gestão (concluído);
- Proposta de Tratamento das Margens de Rios e Riachos (concluído);
- Minuta Projeto de Lei do PDDR (concluído);
- Manual de Drenagem (concluído);
- Cadastro de Macrodrenagem - 99 Canais (realizado);
- Cadastro de Microdrenagem (realizado).

O Plano Diretor também propõe a construção de reservatório de acumulação ou retardo em lotes com área superior a 500,00m², edificado ou não, que tenha área impermeabilizada superior a 25% da área total.

$$V = K \times A \times I$$

Onde:

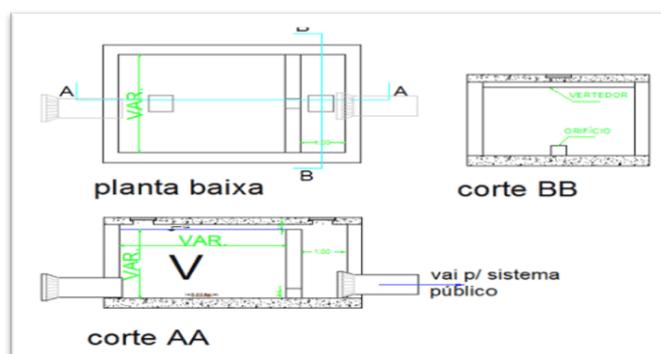
V = volume calculado do reservatório em m³;

K = coeficiente de abatimento (acumulação - **K** = 0,15; retardo - **K** = 0,25);

A = área total do lote;

I = 0,06m/h - intensidade da chuva de vazão média de cheias na cidade do Recife.

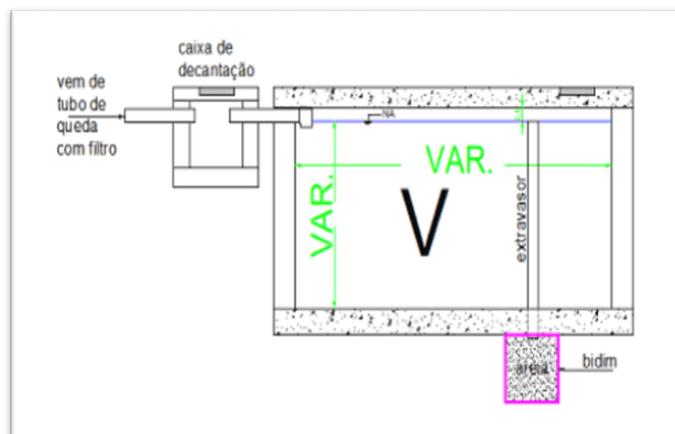
Figura 14: Reservatório de Retardo



Fonte: Plano Diretor de Drenagem do Recife - PDDR

O reservatório de retardo é destinado ao acúmulo de águas pluviais para posterior descarga na rede pública, captadas de telhados, coberturas, terraços, estacionamentos, pátios e outros.

Figura 15: Reservatório de Acumulação



Fonte: Plano Diretor de Drenagem do Recife - PDDR

O reservatório de acumulação é destinado ao acúmulo de águas pluviais para posterior utilização, captadas de telhados, coberturas, terraços, estacionamentos, pátios e outros.

O pavimento de concreto permeável na realidade é um sistema que permite que a água flua livremente para um reservatório de base e sub-base, coletando e armazenando a água da chuva. Esse sistema consegue absorver uma chuva de 75mm a depender da taxa de infiltração do solo, o qual deve ser submetido a teste geotécnico. Tal sistema, também, poderá ser implantado em solo colapsivo (solo não saturado que, quando umedecido, sofre redução de volume, podendo provocar recalques nas fundações e danos às estruturas), ou expansivo (solo não saturado, que contém argilominerais que na estação chuvosa aumenta de volume e no período seco contrai em sua superfície), desde que utilize uma manta impermeável para isolar, e seria apenas com a finalidade de reservatório e não de infiltração. A manta feita de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) é conhecida como geomembrana. Para não danificar a geomembrana é necessário aplicar uma camada de areia fina que servirá de filtro e depois uma camada de pó de pedra compacta para isentar de qualquer material cortante ou pontiagudo (VIRGILLIS, 2009).

O dimensionamento do pavimento de concreto permeável deverá ser executado após o estudo do solo, que é a análise estrutural de suas propriedades, o qual deverá resistir aos esforços solicitados, análise da hidrologia para verificar o quanto o solo precisa absorver de água, índice pluviométrico na região, altura do lençol freático, entre outros.

Esse sistema permeável possibilita a drenagem muito rápida da água, em torno de 200l/m²/min.

Apesar do alto índice de vazios, quando adequadamente dosado, executado e curado de forma correta, o pavimento de concreto permeável pode chegar a ter resistência à compressão acima de 20 Mpa = 200Kg/cm² e 3,5 Mpa à flexão, valores esses, mais do que suficientes para suportar cargas provenientes de tráfego leve de veículos e altas cargas por eixo de caminhões.

A diferença é que a execução do concreto permeável requer a utilização de equipamentos específicos para compactação e confecção das juntas, de forma a garantir o seu desempenho de resistência e permeabilidade.

4.3 Parâmetros do Projeto de Drenagem do Recife

- **Área da bacia de contribuição a ser controlada:** é a área que terá suas águas pluviais direcionadas para a medida. Este parâmetro depende da natureza da medida escolhida. No caso de pavimentos permeáveis, a área deve ser menor do que 10 ha, ou seja, 100.000 m²;
- **Capacidade de infiltração do solo:** tem influência sobre o desempenho dos dispositivos de infiltração. Se a capacidade de infiltração estiver fora dos limites estabelecidos, medidas infiltrantes não podem ser utilizadas. No caso de pavimentos permeáveis, o solo do local deve ter capacidade de infiltração entre 7 e 200 mm/h;
- **Nível do lençol freático:** também tem influência sobre o desempenho dos dispositivos de infiltração, sendo que o nível máximo do lençol freático deve ser de até 1 m abaixo do fundo do dispositivo. Se o nível do lençol freático for alto (acima de 1 m do fundo), a implantação do pavimento permeável só pode ser feita se seu fundo for impermeável;
- **Risco de contaminação de aquífero:** se o aquífero em questão for muito sensível à poluição, não se recomenda a utilização de medidas que promovam a infiltração, tais como os pavimentos permeáveis infiltrantes pois geralmente, as águas pluviais

carregam esgoto e poluentes de origem difusa. Os pavimentos permeáveis de retenção com fundo impermeabilizado podem ser utilizados;

- **Fragilidade do solo à ação da água:** No caso de medidas de infiltração, alguns tipos de solo podem perder suas características e sofrer desestruturação, mediante presença frequente de água. E mesmo em medidas de retenção ou retenção, isso pode ocorrer, tornando o fundo da estrutura muito barrento;

- **Permeabilidade do subsolo nos dispositivos de infiltração:** quando o subsolo apresenta baixa permeabilidade não se recomenda o uso de medidas infiltrantes como os pavimentos permeáveis infiltrantes mas, pode-se utilizar os pavimentos permeáveis de retenção com fundo impermeabilizado;

- **Declividade do terreno:** como altas declividades restringem a implantação de dispositivos de retenção e infiltração, estes não são recomendados em terrenos muito íngremes;

- **Ausência de local de destino para a descarga do volume regularizado de água:** Pavimentos permeáveis (tanto os infiltrantes como os de retenção) devem possuir extravasores conectados à rede de microdrenagem, caso ocorram chuvas mais intensas do que a de projeto. Portanto, na ausência de um local de destino para a descarga, são inviáveis;

- **Disponibilidade de área:** Apesar da necessidade de espaços amplos, os pavimentos permeáveis podem ser implantados em substituição a pavimentação comum em diversos tipos de áreas, como vias de tráfego leve, calçadas, praças, pátios e estacionamentos, o que aumenta a disponibilidade de regiões adequadas;

- **Presença de instalações subterrâneas:** Se houver interferências de outras redes, como rede de água, esgoto, luz e telefone, os pavimentos permeáveis só poderão ser implantados se estas puderem ser realocadas ou se a configuração de projeto da medida puder ser modificada e adaptada;

- **Afluência poluída:** A afluência de altas cargas de esgotos pode prejudicar o funcionamento dos pavimentos permeáveis, nestes casos pode ser necessária a implantação de estruturas mais complexas e caras que o próprio pavimento, o que pode inviabilizar sua implantação;

- **Afluência com alta taxa de sedimentos e lixo:** se não for possível controlar a fonte de poluição, deve-se considerar a manutenção como rotina ou estruturas de retenção a montante. Assim, o projeto do dispositivo de pré-tratamento pode acabar

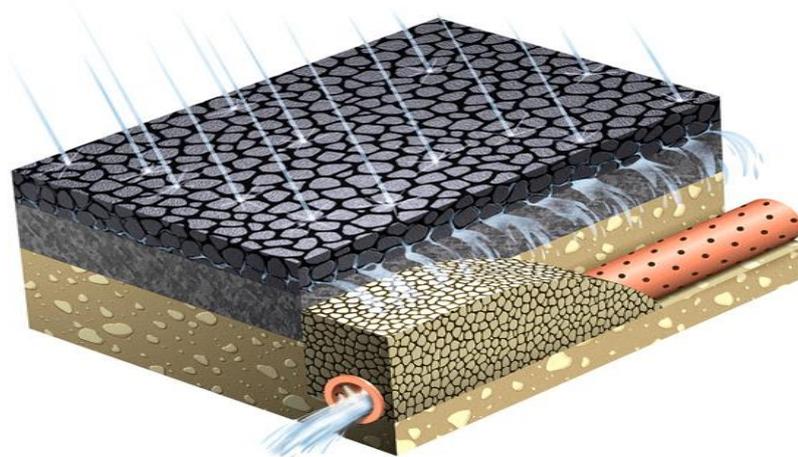
se tornando mais complexo e caro do que a própria medida, inviabilizando sua implantação;

- **Esforços e tráfego intensos:** A implantação de pavimentos permeáveis não é recomendada em áreas com tráfego intenso;

- **Flexibilidade de desenho:** Os pavimentos permeáveis estão limitados, somente, à geometria do local em que serão implantados;

- **Limites de altura ou profundidade da medida de controle:** em medidas que contam com a infiltração no seu modo de funcionamento, a comparação entre o tempo de residência desejado e a altura (condicionada pelo volume), pode resultar numa limitação desta última, dependendo da capacidade de infiltração do solo. Dessa forma, o pavimento permeável só poderá ser instalado caso seja possível modificar sua área superficial sem que seja modificado seu volume.

Figura 16: Seção típica de pavimento permeável



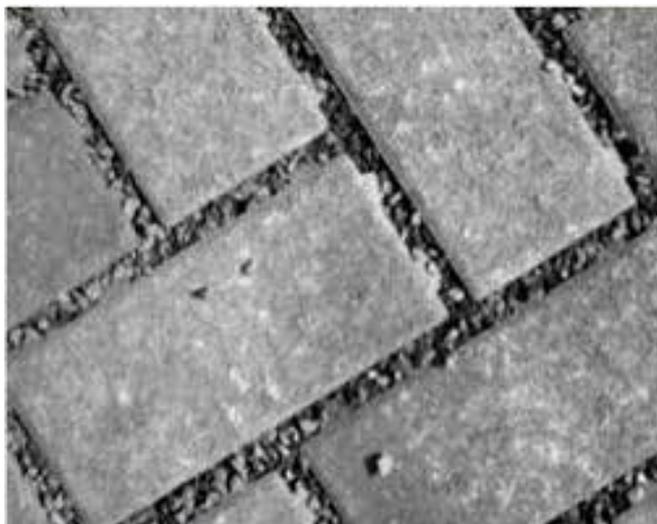
Fonte: Inova Civil

4.3.1 Tipologia de revestimentos

- Revestimento de peças de concreto com juntas alargadas: revestimento permeável cuja percolação de água ocorre por juntas entre as peças de concreto.

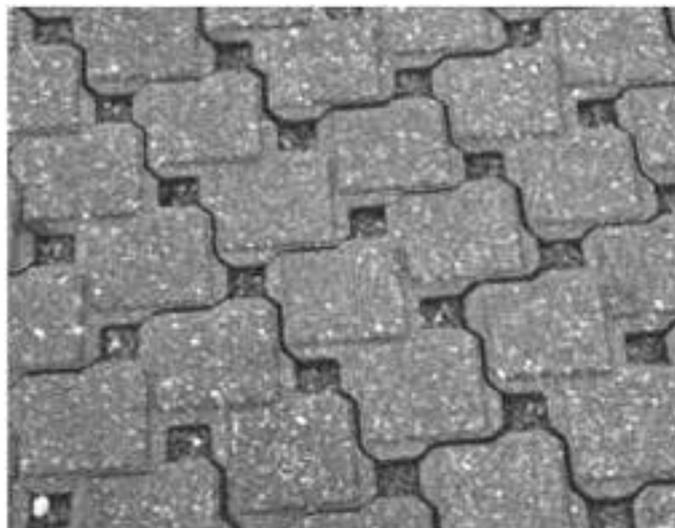
As peças de concreto devem apresentar juntas alargadas com espaçadores incorporados às peças com espessura entre 6 mm e 10 mm. A velocidade de infiltração de água depende da área total das aberturas e das características do material de rejuntamento, da camada de assentamento, da sub-base, da base e do próprio subleito ou do sistema de drenagem. As peças de concreto devem atender aos requisitos da norma ABNT NBR 9781:2013.

Figura 17: Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto com juntas alargadas.



- Revestimento de peças de concreto com áreas vazadas: revestimento permeável cuja percolação de água ocorre por áreas vazadas das peças de concreto. O arranjo geométrico deste tipo de peça deve atender ao mesmo requisito das peças com juntas alargadas, ou seja, deve apresentar entre 5% a 15% de áreas abertas.

Figura 18: Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto com áreas vazadas.



- Revestimento de peças de concreto permeável: revestimento permeável cuja percolação de água ocorre por peças de concreto permeável.

Figura 19: Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto permeável com intertravamento.



Figura 20: Pavimento com revestimento constituído por peças de concreto permeável sem intertravamento.



4.3.2 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de infiltração de água no solo, referida em m/s (PINTO, 2002). A melhor forma de se avaliar o desempenho de um pavimento permeável e garantir que ele irá contribuir com a diminuição do escoamento superficial de água, problema típico de áreas impermeáveis, é medindo a velocidade de infiltração de um volume conhecido de água, ou seja, determinando-se o seu coeficiente de permeabilidade.

Nas pesquisas de Huang et al (2010), que utilizaram agregados finos, os resultados mostraram que a substituição de 7% em peso do agregado graúdo por areia de rio resultou em um aumento da resistência à compressão de 9,6 para 14,5 MPa aos 7 dias de idade, sem comprometer a porosidade que foi mantida acima dos 15% tomados como valor mínimo. Considera-se que em 10 anos o revestimento sofrerá

uma redução de 80% no seu coeficiente de permeabilidade, assim o coeficiente de permeabilidade inicial deve ser suficientemente alto para garantir o funcionamento hidráulico por toda a vida útil do pavimento.

Tabela 01 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

| Tipo de solo | Coeficiente de permeabilidade k (m/s) | Grau de permeabilidade |
|---|---------------------------------------|--------------------------|
| Brita | $> 10^{-3}$ | Alta |
| Areia de brita, areia limpa, areia fina | 10^{-3} a 10^{-5} | Média |
| Areia, areia suja e silte arenoso | 10^{-5} a 10^{-7} | Baixa |
| Silte, silte argiloso | 10^{-7} a 10^{-9} | Muito baixa |
| Argila | $< 10^{-9}$ | Praticamente Impermeável |

Fonte: ABNT NBR 16416:2015

Materiais para base e sub-base

Para a base e sub-base utiliza-se brita lavada com Abrasão Los Angeles menor que 40, determinado de acordo com a norma brasileira NBR NM 51 - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". É necessário um Índice de Suporte Califórnia (CBR) de pelo menos 80%, determinado de acordo com a norma brasileira NBR 9895 - Solo: Índice de Suporte Califórnia. A capacidade de atuar como reservatório de água da base e sub-base vai depender do índice de vazios do agregado, que é determinado de acordo com a Norma Brasileira NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios que deve ser de, no mínimo, 32%.

A camada de sub-base e/ou de base deve ser constituída de materiais pétreos de granulometria aberta, devendo cumprir as especificações da Tabela 1.

Tabela 2 – Especificação para o material de sub-base e/ou base

| Propriedade | Método | Especificação |
|--|----------------|---------------|
| Abrasão “Los Angeles” | ABNT NBR NM 51 | < 40 % |
| Índice de vazios | ABNT NBR NM 45 | ≥ 32 % |
| Índice de suporte califórnia (CBR) | ABNT NBR 9895 | ≥ 80 % |
| Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm | ABNT NBR NM 46 | ≤ 2 % |

Fonte: ABNT NBR 16416:2015

Recomenda-se a distribuição granulométrica da Tabela 3 para o material de sub-base e/ou base.

Tabela 3 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base

| Peneira com abertura de malha | Porcentagem retida, em massa % | |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------|
| | Sub-base | Base |
| 75 mm | 0 | — |
| 63 mm | 0 a 10 | — |
| 50 mm | 30 a 65 | — |
| 37,5 mm | 85 a 100 | 0 |
| 25 mm | 90 a 100 | 0 a 5 |
| 19 mm | 95 a 100 | 0 a 35 |
| 12,5 mm | — | 40 a 75 |
| 4,75 mm | — | 90 a 100 |
| 2,36 mm | — | 95 a 100 |

Fonte: ABNT NBR 16416:2015

A camada de assentamento se aplica apenas aos projetos de pavimento intertravado permeável ou pavimento com placas de concreto permeáveis.

A camada deve ser uniforme e constante e sua espessura deve ser especificada em projeto, podendo estar entre 20 mm e 60 mm na condição não compactada. A variação máxima permitida é + ou – 5 mm em relação à espessura especificada.

Deve-se utilizar na camada materiais pétreos de granulometria aberta, devendo cumprir as especificações da Tabela 4.

Tabela 4: Especificação para o material de assentamento.

| Propriedade | Método | Especificação |
|--|----------------|---------------|
| Abrasão "Los Angeles" | ABNT NBR NM 51 | < 40 % |
| Índice de vazios | ABNT NBR NM 45 | ≥ 32 % |
| Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm | ABNT NBR NM 46 | ≤ 2 % |
| Dimensão máxima característica (D _{máx}) | ABNT NBR 7212 | 9,5 mm |

Fonte: ABNT NBR 16416:2015

O pavimento permeável, independente do tipo de revestimento adotado, deve apresentar, quando recém-construído, coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} m/s. Este requisito deve ser avaliado em campo após a execução do pavimento.

O coeficiente de permeabilidade pode ser previamente avaliado em laboratório, podendo-se ensaiar apenas a camada de revestimento ou o revestimento juntamente com toda a estrutura do pavimento. A Tabela 5 resume as considerações para a determinação do coeficiente de permeabilidade em campo e em laboratório.

Tabela 5: Determinação do coeficiente de permeabilidade

| Tipo de revestimento | Método de Ensaio | | Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído m/s |
|--|---------------------------|----------|---|
| | Local de avaliação | | |
| | Em laboratório | Em campo | |
| Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas) | Anexo A | Anexo A | > 10^{-3} |
| Peça de concreto permeável | ABNT NBR 13292 ou Anexo A | | |
| Placa de concreto permeável | | | |
| Concreto permeável moldado no local | | | |

Fonte: ABNT NBR 16416:2015

Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

Tabela 6: Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

| Tipo de revestimento | Tipo de solicitação | Espessura mínima (mm) | Resistência mecânica característica (MPa) | Método de ensaio |
|--|----------------------|-----------------------|---|------------------|
| Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas) | Tráfego de pedestres | 60,0 | $\geq 35,0^a$ | ABNT NBR 9781 |
| | Tráfego leve | 80,0 | | |
| Peça de concreto permeável | Tráfego de pedestres | 60,0 | $\geq 20,0^a$ | |
| | Tráfego leve | 80,0 | | |
| Placa de concreto permeável | Tráfego de pedestres | 60,0 | $\geq 2,0^b$ | ABNT NBR 15805 |
| | Tráfego leve | 80,0 | | |
| Concreto permeável moldado no local | Tráfego de pedestres | 60,0 | $\geq 1,0^c$ | ABNT NBR 12142 |
| | Tráfego leve | 100,0 | $\geq 2,0^c$ | |

^a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781.
^b determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805.
^c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142.

4.4 Sistemas de Infiltração

A opção entre os tipos de sistemas de infiltração dependerá das condições locais do solo, risco de contaminação e distância do lençol freático. Recomenda-se que a estrutura do pavimento permaneça saturada por no máximo 24h.

Deve-se utilizar agregado graúdo com $d_{máx.} = 9,5\text{mm}$ no rejunte e camada de assentamento.

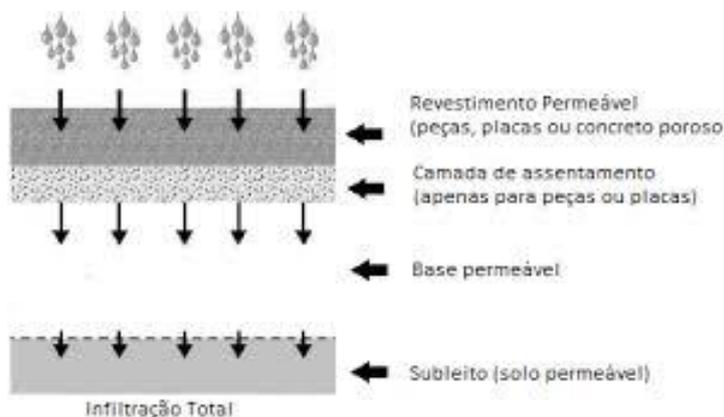
A altura das camadas varia em função do tráfego, tipo de solo e regime de chuvas na região. As camadas de base e sub-base devem ser dimensionadas para funcionarem como reservatório e também suportarem a carga solicitada. Na base é sugerido a utilização de um agregado com volume de vazios de pelo menos 40%.

A camada de assentamento deve ter espessura de 5,0cm e a base e sub-base devem ser dimensionadas, dependendo de cada caso.

No sistema sem infiltração, o dreno deverá ser instalado no fundo que é impermeabilizado.

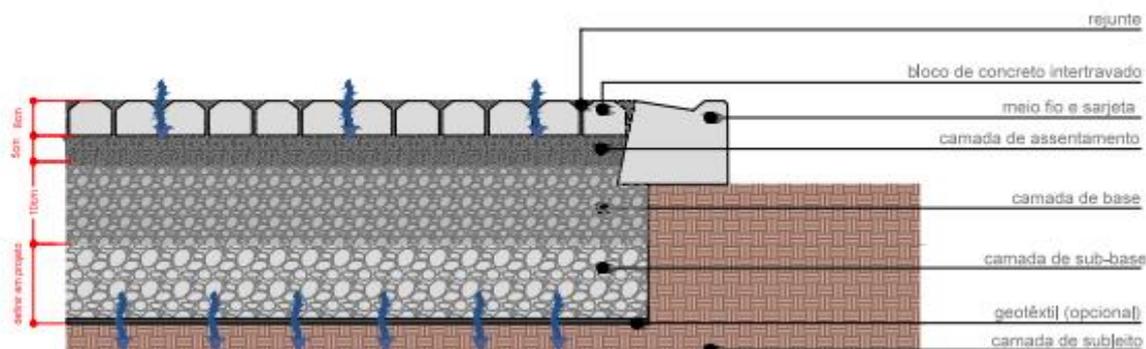
- **Infiltração total:** nesse sistema de infiltração, toda a água precipitada alcança o subleito e se infiltra.

Figura 21: Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total



Fonte: ABNT NBR 16416:2015

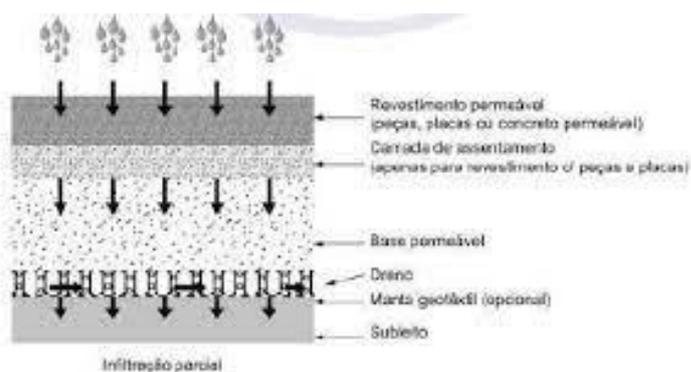
Figura 21.1: Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total



Fonte: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

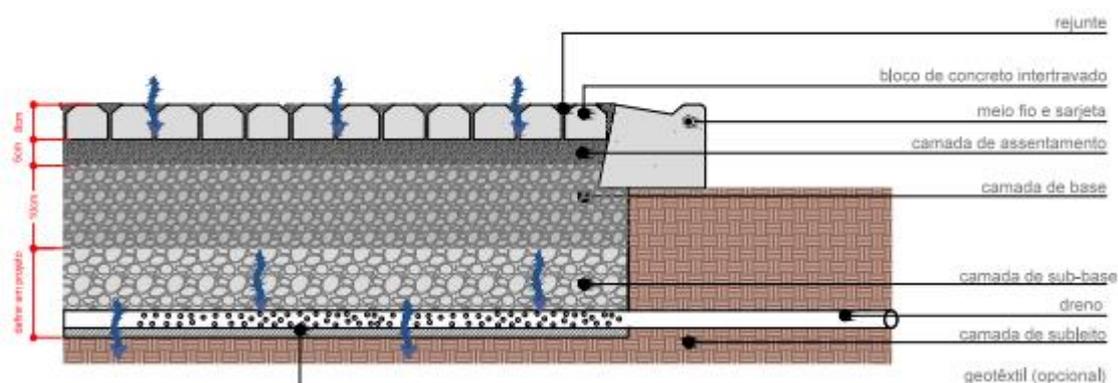
- **Infiltração parcial:** nesse sistema de infiltração, parte da água precipitada alcança o subleito e se infiltra, porém parte da água fica temporariamente na estrutura permeável, sendo depois removida pelo dreno.

Figura 21.1: Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração total



Fonte: ABNT NBR 16416:2015

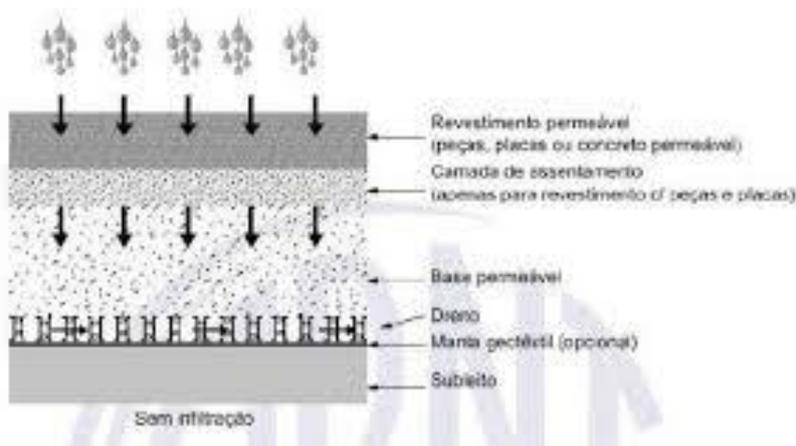
Figura 22.1: Exemplo de sistema de pavimento permeável com infiltração parcial



Fonte: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

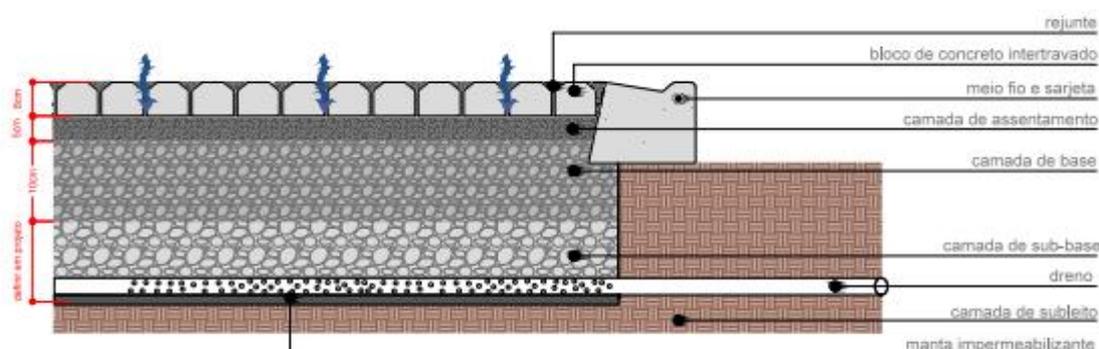
- **Sem infiltração:** nesse sistema de infiltração, a água fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito, sendo depois removida pelo dreno.

Figura 23: Exemplo de sistema de pavimento permeável sem infiltração



Fonte: ABNT NBR 16416:2015

Figura 23.1: Exemplo de sistema de pavimento permeável sem infiltração



Fonte: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

4.5 Execução

Um exemplo de execução pode conter as seguintes etapas:

- Retirada da base com estrutura fechada (sem infiltração). A altura da estrutura depende das condições locais de chuva e necessidade de armazenamento (ver projeto). Verifique a norma NBR 16416;
- Nivelamento e abertura das valas dos drenos;
- Compactação do subleito. Deve-se verificar a necessidade ou não do uso da manta plástica, conforme o tipo de solo. A manta é recomendada para solos argilosos de baixa permeabilidade. Verifique a norma ABNT 16416;
- Colocação da manta impermeável para proteção do solo (evitar saturação do solo de baixa permeabilidade e aumentar a condição de armazenamento da água). Proteção do entorno do pavimento no encontro com as áreas impermeáveis;

- Instalação dos tubos dreno de 4" (acelera a retirada da água da estrutura e direciona a coleta para a cisterna);
- O nível da cisterna deve levar em consideração o nível da entrada do tubo dreno do pavimento e a saída do ladrão da cisterna, que deve ser direcionado por gravidade até o sistema de drenagem de águas pluviais;
- Instalação da caixa de acesso à cisterna;
- Material de base: 20 cm de brita 19 mm, sem finos e com granulometria uniforme (maioria das partículas em torno de 19 mm);
- O material de base também deve ser compactado e nivelado;
- O material de revestimento: 4 cm de brita 6,3 mm, sem finos e com granulometria uniforme (maioria das partículas em torno de 6,3 mm);
- A camada de revestimento não deve ser compactada antes da colocação das peças;
- Espalhamento do material de rejuntamento após a colocação de todo revestimento;
- Após a colocação do material de rejuntamento, deve-se retirar o excesso e realizar a compactação do revestimento com placa vibratória e com proteção de borracha para, não danificar as peças ou placas do revestimento;
- Após a compactação, deve-se verificar se o material de rejuntamento está preenchendo todas as juntas e espaços por onde a água irá percolar. É feita a limpeza da superfície, verifica-se se há alguma peça quebrada ou desnivelada e é feita a liberação do pavimento permeável;
- Antes da liberação deve-se fazer o teste para medir o coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável. Norma ABNT NBR 16416:2015.

Em relação ao custo benefício para implementação do concreto poroso, em relação ao concreto tradicional, segundo estudos, verificou-se que os valores dos orçamentos, em percentuais, variam de acordo com a permeabilidade do solo.

Exemplo:

Observou-se que, para solos com taxas de infiltração maiores que $1,11 \times 10^{-5} \text{m.s}^{-1}$, o custo de implantação do pavimento com concreto poroso, de infiltração total, é 2,4% mais baixo.

Para taxas de infiltração entre $1,4 \times 10^{-6} \text{m.s}^{-1}$ e $1,11 \times 10^{-5} \text{m.s}^{-1}$, o custo de implantação do concreto poroso, de infiltração total, é, em média, 14,55% mais alto. Isso ocorre porque as alturas calculadas pelo dimensionamento hidrológico-hidráulico são

maiores que as alturas calculadas pelo método mecânico, com consequente incremento na camada de brita que compõe a sub-base e base do pavimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intensificação das chuvas é consequência da mudança climática, que, associada ao processo de urbanização sem planejamento, são identificadas como as causas de enchentes frequentes e outros desastres ocorridos no País. Em contrapartida, os sistemas tradicionais de drenagem urbana apresentam-se ineficientes para o transporte de volume excedente de água, onde, nem mesmo os sistemas constituídos de reservatórios de amortecimento aliviam os efeitos das chuvas de intensidades elevadas. Entretanto, acredita-se que as medidas preventivas aliadas à aplicação de políticas públicas adequadas poderão levar a mudanças de comportamento da população, onde os mais conscientes e éticos poderão capacitar e estruturar as cidades à resiliência.

Objetivando amenizar esta situação, várias iniciativas têm sido desenvolvidas, porém, o modelo que utiliza os sistemas de drenagem aos pavimentos permeáveis tem se mostrado eficiente no processo de minimização dos problemas referentes às enchentes urbanas. Os pavimentos permeáveis têm se mostrado eficientes, no entanto, foi observado na literatura, alguns aspectos negativos como o alto custo e não poder receber tráfego pesado, restringindo as áreas possíveis de sua implementação. É importante ressaltar que, o tráfego pesado geralmente acontece nas marginais, setores industriais e comerciais, entretanto em muitas cidades os veículos pesados têm sido proibidos de circular, sendo possível adotar a pavimentação permeável como ótima solução custo x benefício.

Analisando a literatura, os pavimentos porosos são mais eficientes que os pavimentos de concreto tradicional, pois permitem uma rápida drenagem da água, evita a poluição do lençol freático (quando realizada sua manutenção periódica), apesar de mais oneroso, reduz o impacto e o custo da infraestrutura para tratamento de águas pluviais. Para verificar se o pavimento é, efetivamente permeável deve-se determinar o coeficiente de permeabilidade do pavimento acabado. Valores de coeficiente de permeabilidade acima de 10 m/s atestam que o pavimento irá funcionar de forma adequada. Para pavimentos permeáveis com juntas alargadas deve-se especificar largura de juntas com no mínimo 5% de área abertas em relação à área total do pavimento. Os agregados utilizados no pavimento permeável devem respeitar as distribuições granulométricas indicadas para cada camada, sempre

considerando a presença de baixos teores de finos e distribuição granulométrica que proporcione um teor de vazios na ordem de 30%. As peças de concreto poroso devem atender aos requisitos de resistência à compressão e de coeficiente de permeabilidade.

Esse novo olhar para o ambiente integrado e sustentável à vida humana, será necessário para passar-se pelas mudanças climáticas com menos perdas de vidas e maior resistência às doenças. Caso isso não aconteça, ter-se-ão cada vez mais estatísticas de desastres em que a drenagem tradicional não funcionará, em que as encostas deslizarão por falta de um sistema de geotecnia adequado para os problemas de contenção e drenagem. Entretanto, com este trabalho, objetivamos, chamar a atenção para a relevância da mudança de comportamento, em que a convivência com as águas com respeito, ética e maturidade é possível e poderá fazer toda a diferença na saúde pública e na sobrevivência humana no planeta nas próximas gerações.

REFERÊNCIAS

ALEGRIA, Manuela. Pavimento permeável: solução sustentável para a redução de enchentes. Revista Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.revistameioambiente.com.br/2011/03/17/pavimento-permeavel-solucao-sustentavel-para-a-reducao-de-enchentes/>. Acesso em: 25 nov. 2022.

ANTUNES, P. Uso do Pavimento Permeável de Concreto para Atenuação de Cheias Urbanas. 2017. 132p. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416:2015**:Pavimentos Permeáveis de Concreto–requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889:2020**:Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

BALBO, José Tadeu. Pavimentos de Concreto Permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. São Paulo, 2020.

BATEZINI, Rafael. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. 2013.

CANHOLI, Aluísio Pardo. Drenagem urbana e controle de enchentes / Aluísio Pardo Canholi. -- 2. ed. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2014.

CASTRO, T. Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis. 2011. 92p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

COSTA, F. Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação. 2019. 181p. Tese (Doutorado do Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

DEMETRIOS, Christofidis; Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes Assumpção, Débora Cynamon Kligerman. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza SAÚDE DEBATE | RIO DE JANEIRO, V. 43, N. ESPECIAL 3, P. 94-108, DEZ 2019.

LAMB, G. S.; OLIVEIRA, I. A.; PERERA, G.; PASSUELO, A.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo do comportamento de elementos de drenagem confeccionados em concretos permeáveis. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon. Anais [...]. Gramado, Out. 2013. Disponível em: Acesso em: nov. 2022.

MEDINA, J. e MOTTA, L.M.G. Mecânica de pavimentos. Rio de Janeiro. 2005. 2ª ed.

OLIVEIRA, Regina Lúcia Melo DE; SILVA, Simone Rosa DA. Alternativas compensatórias para drenagem urbana em ponto crítico da Cidade do Recife – PE.

ONO, Bruno Watanabe; BALBO, José Tadeu; CARGNIN, Andréia Posser. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado, 177p. Revista de Transportes, volume 5, ed. 3.

PARISSOTO, MICHAEL; LINHARES,VÍTOR MARQUES; FERREIRA, LÍVIA ZOPPAS; PERERA, GABRIEL GALVAN; SCHWETZ, PAULETE FRIDMAN, LORENZI, ALEXANDRE. Desenvolvimento e Aperfeiçoamento da Confecção de Pisos e Elementos Drenantes de Concreto Permeável. Feira de Inovação Tecnológica da UFRGS – FINOVA. Porto Alegre, 2014.

PARKINSON, J.;MILOGRANA, J.; CAMPOS, L. C., R. **Drenagem urbana sustentável no Brasil** . Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Loughborough University, 2003. (Relatório de workshop de 7 de maio de 2003).

Disponível em: www.abctransmisul.com.br/relatori.pdf. Acesso em: out. 2022.

PINTO, C. Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de textos. 2ª edição. São Paulo, 2002.

POMPÊO, C. A. Drenagem urbana sustentável. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

PRINCE, George's County (1999) Low-Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach. Maryland: Department of Environmental Resources. Disponível em: < <ftp://lowimpactdevelopment.org/pub>>.

SENÇO, Wlastermiler de. Manual de Técnicas de Pavimentação, vol.1. São Paulo: Pini, 1997.

SILVA, A.C. Modelagem hidrológica-hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018. p.103.

SILVA JUNIOR, M. Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015. p.28.

SILVA, R.; MOURA, E. Drenagem Urbana Sustentável, 14. SILVA, E. R.; SILVA, S. R. [Orgs.]. Sustentabilidade urbana. Recife: EDUPE, p. 86, 2017. 254p.

SUZUKI, Carlos Yukio; AZEVEDO, Angela Martins; KABBACH, Júnior; FELIPE, Issa. Drenagem: subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TUCCI, C. Drenagem Urbana. Ciência e Cultura. v.55, n.4, 2003. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020 Acesso em: 13 Dez. 2022.

TUCCI CEM, Cordeiro OM. Diretrizes estratégicas para a ciência e tecnologia em recursos hídricos no Brasil. REGA. 2004; 1(1):21-35.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento da drenagem urbana. RBRH Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Inundações urbanas. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gestão integrada das águas urbanas. REGA, v. 5, n. 2, p. 71-81, 2008.

VIRGILIIS, A. Procedimento de Projeto e Execução de Pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheia, s.l.: USP- Biblioteca Digital. São Paulo, SP 2009. 191p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-122549/pt-br.php>. Acesso em: 28 nov. 2022.

XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Planejamento Urbano com técnicas de desenvolvimento de baixo impacto 2009 - Campo Grande – MS

Disponível em <https://www.abrhydro.org.br> > SGCv3 > Acesso em: 12 de dez. de 2022.

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. Construction and Building Materials. Vol. 183, set. 2018. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818315289?dgcid=raven_sd_rec_ommender_email. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. Construction and Building Materials. Vol. 109, p. 177-187, abr. 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816300514>. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>.