

**Comportamento das propriedades dos pavimentos permeáveis
utilizando materiais distintos em suas composições: uma revisão da
literatura**

*Behavior of permeable pavement properties using different materials in their
compositions: a literature review*

*Comportamiento de las propiedades de los pavimentos permeables utilizando
diferentes materiales en sus composiciones: una revisión de la literatura*

Amanda Rafaely Monte do Prado

Mestranda em Engenharia Civil, UPE, Brasil.
armp@poli.br

Amaury Gouveia Pessoa Neto

Mestrando em Engenharia Civil, UPE, Brasil.
apgn@poli.br

Débora Vieira Muniz

Mestranda em Engenharia Civil, UPE, Brasil.
dvm@poli.br

Simone Rosa da Silva

Professora Doutora, UPE, Brasil.
simonerosa@poli.br

Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani

Professora Doutora, UPE, Brasil.
emilia.rabbani@upe.br

RESUMO

A presente revisão sistemática aborda o comportamento das propriedades dos pavimentos permeáveis com distintos materiais em suas composições, com o objetivo de levantar o estado da arte dessa área de estudo em um cenário mundial. Para isso, foi elencada a maior quantidade de trabalhos disponíveis possível, conforme os critérios de elegibilidade e qualidade, detectados nas bases de dados Engineering Village, Scopus e Science Direct. Após a leitura dos títulos e resumos de todos os artigos identificados, foram escolhidos 28 associados ao tema, dos quais 15 foram incluídos para a revisão. Esse resultado possibilitou demonstrar que a técnica compensatória do pavimento permeável é utilizada em diversas partes do mundo, apresentando resultados satisfatórios. Diversos estudos apresentados neste trabalho tiveram como objetivo realizar a substituição ou mesmo a introdução de outros tipos de materiais na composição dos pavimentos permeáveis, buscando atingir melhores resultados em suas propriedades, principalmente nas mecânicas e hidráulicas.

PALAVRAS-CHAVE: Elegibilidade. Propriedades Mecânicas e Hidráulicas. Técnica Compensatória.

ABSTRACT

The present systematic review addresses the behavior of the properties of permeable pavements with different materials in their compositions, with the objective of raising the state of the art of this area of study in a world scenario. For this, the largest possible number of available works was listed, according to the eligibility and quality criteria, detected in the Engineering Village, Scopus and Science Direct databases. After reading the titles and abstracts of all identified articles, 28 associated with the topic were chosen, of which 15 were included for the review. This result made it possible to demonstrate that the permeable pavement compensatory technique is used in several parts of the world, presenting satisfactory results. Several studies presented in this work aimed to replace or even introduce other types of materials in the composition of permeable pavements, seeking to achieve better results in their properties, especially in mechanical and hydraulic ones.

KEY-WORDS: Eligibility. Mechanical and Hydraulic Properties. Compensatory Technique.

RESUMEN

La presente revisión sistemática aborda el comportamiento de las propiedades de los pavimentos permeables con diferentes materiales en sus composiciones, con el objetivo de elevar el estado del arte de esta área de estudio en un escenario mundial. Para ello, se enumeró el mayor número posible de obras disponibles, según los criterios de elegibilidad y calidad, detectados en las bases de datos Engineering Village, Scopus y Science Direct. Luego de la lectura de los títulos y resúmenes de todos los artículos identificados, se eligieron 28 asociados al tema, de los cuales 15 fueron incluidos para la revisión. Este resultado permitió demostrar que la técnica compensatoria de pavimento permeable es utilizada en varias partes del mundo, presentando resultados satisfactorios. Varios estudios presentados en este trabajo tuvieron como objetivo reemplazar o incluso introducir otro tipo de materiales en la composición de los pavimentos permeables, buscando lograr mejores resultados en sus propiedades, especialmente en las mecánicas e hidráulicas.

PALABRAS-CLAVE: Elegibilidad. Propiedades mecánicas e hidráulicas. Técnica Compensatoria.

1 INTRODUÇÃO

A partir da metade do século XX, a evolução da urbanização ocorreu no Brasil de maneira intensa, onde, impulsionado pelas melhorias geradas pela industrialização, houve uma explosão demográfica causada pelo processo de migração de pessoas do campo em direção à cidade (ALVES *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2021). No entanto, esse fenômeno foi acontecendo em muitas cidades brasileiras de forma acelerada e desordenada, não havendo a fiscalização adequada da gestão pública, acarretando problemas sociais, econômicos, culturais e ambientais que interferem diretamente no cotidiano da população (ROCHA e SCHULER, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; SILVA JUNIOR *et al.*, 2020).

Consoante às referidas adversidades, a urbanização desordenada ocasiona consideráveis alterações no ciclo hidrológico natural em decorrência do desmatamento, degradação das áreas naturais, modificação da topografia natural do terreno, aumento da impermeabilização do solo, entre outras intervenções, causando a ampliação do escoamento superficial e da vazão dos cursos d'água e a diminuição da infiltração da água precipitada e da evapotranspiração (SANTOS *et al.*, 2018; BEGA; RIBEIRO; LIMA, 2019; FONSECA NETO *et al.*, 2020). Assim, de acordo com Silva Júnior e Silva (2016), os impactos causados por essas modificações, sobretudo as inundações e os alagamentos urbanos, provocam a redução da qualidade de vida da população.

Objetivando controlar a quantidade de água escoada superficialmente, bem como reduzir os impactos a jusante do curso d'água, as técnicas compensatórias são consideradas soluções urbanísticas ambientalmente adequadas para o manejo das águas pluviais em áreas urbanizadas (LINO *et al.*, 2019). Pavimentos permeáveis, telhados verdes, micro reservatórios individuais, poços de infiltração, bacias de retenção, trincheiras de infiltração, valas vegetadas e jardins de chuvas são alguns exemplos das técnicas compensatórias mais conhecidas, sendo algumas já previstas em legislações específicas (REIS; ILHA, 2019; RODRIGUES; SANTINI JUNIOR, 2021; RODRIGUEZ; TEIXEIRA, 2021).

Dentre as referidas técnicas, os pavimentos permeáveis são uma das soluções sustentáveis de drenagem urbana mais amplamente utilizada, tendo como objetivo a redução dos impactos hídricos e ambientais (ELIZONDO-MARTINEZ *et al.*, 2020). Dentre suas vantagens, tem-se a redução do escoamento urbano, com menor pico das águas das chuvas; a recarga das águas subterrâneas; a mitigação da poluição; a melhoria na segurança ao dirigir em dias chuvosos, com maior resistência à derrapagem; a redução do ruído; e o resfriamento do pavimento (CHU; TANG; FWA, 2018; MA *et al.*, 2020).

A adoção dessa solução é essencial para a construção das chamadas “cidades esponja”, ou seja, aquelas que apresentam boa resposta na adaptação às mudanças ambientais. Com uma melhor gestão do volume gerado durante as chuvas, cenários de alagamento seriam evitados ou atenuados. Ainda, com a permissão da infiltração da água e conseqüente recarga das águas subterrâneas, a falta de água e as ilhas de calor poderiam ser minimizadas (ZHU; HUANG; YANG, 2018).

Comumente, o concreto e o asfalto são os elementos mais empregados na sua concepção, especialmente o primeiro, que apresenta vantagens nas operações construtivas se comparado ao segundo. Além disso, também reduz impactos ambientais relacionados à temperatura (ELIZONDO-MARTINEZ *et al.*, 2020). O concreto permeável, ou ainda concreto

poroso, é definido como aquele “sem finos”, que permite a infiltração das águas pluviais (GANESH *et al.*, 2018), em consonância com o conceito de pavimento permeável.

Entretanto, a utilização dos materiais citados também acarreta consequências ambientais. Para os pavimentos asfálticos, há a necessidade de gerenciamento de resíduos perigosos, assim como as emissões de gases de efeito estufa durante o processamento das matérias primas. Já os pavimentos de concreto, também há emissão de gases de efeito estufa associados à alta energia necessária durante a fabricação do cimento Portland (ELIZONDO-MARTINEZ *et al.*, 2020).

Diante do contexto, o desenvolvimento de estudos que visem à substituição parcial ou total de quaisquer desses dois elementos na concepção dos pavimentos permeáveis, bem como a adição de novos materiais e suas influências nas propriedades dos mesmos são de fundamental importância.

2 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem por objetivo reunir informações e dados acerca do comportamento das propriedades dos pavimentos permeáveis com distintos materiais em suas composições.

3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho consistiu na elaboração de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a partir de protocolo de pesquisa, cuja pergunta central busca identificar como a variação da composição dos pavimentos permeáveis afetam suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

As bases selecionadas foram a Engineering Village, Scopus e Science Direct. E as strings de busca utilizadas foram construídas a partir dos termos de busca relacionados a temática escolhida, tendo como configuração genérica a seguinte estrutura: ("Pavement" AND "Drainage") AND ("Properties" OR "Mechanical Properties" OR "Mechanical Permeability") AND ("Materials" OR "Building Materials").

As limitações para os estudos selecionados foram os idiomas inglês e/ou português, nas áreas de interesse relacionadas as engenharias civil e ambiental e, por fim, serem publicados em periódicos, congressos ou em formato de capítulos de livros, nos últimos cinco anos (2017 a 2021).

A partir dos dados obtidos através da aplicação da string de busca em cada base, foram selecionados os estudos do tipo quantitativo e experimental, assim como foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão e, em seguida, de qualidade, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Critérios de inclusão, exclusão e qualidade

Critérios de Inclusão	
CI1	Os estudos devem ter realizados experimentos que analisem o comportamento das propriedades.
CI2	Os pavimentos permeáveis utilizados nos estudos devem ter diferentes tipos de materiais em suas composições.
Critérios de Exclusão	
CE1	Não serão considerados estudos que não realizarem experimentos que analisem o comportamento das propriedades.
CE2	Não serão considerados pavimentos utilizados nos estudos, cujas composições não apresentem materiais diferentes dos "tradicionais".
CE3	Não serão considerando estudos cujos strings de busca não aparecem no título, no resumo ou nas palavras-chaves.
Critérios de Qualidade	
CQ1	Analisado por pares.
CQ2	Metodologia detalhada e compreensível.
CQ3	Resultados agregaram valor à área de pesquisa.
CQ4	Resultados avaliados de modo imparcial e descritos com clareza.

Fonte: Elaborado pelos autores

Posteriormente, aplicaram-se as fichas de avaliação de qualidade (Quadro 2) e elegibilidade dos estudos e de extração de dados (Quadro 3).

Quadro 2 – Ficha de avaliação da qualidade

Descrição do critério de qualidade	Tipo de resposta	Resposta
A metodologia detalhada é compreensível?	Pick One List	(Sim, Não)
Os resultados agregam valor à área de pesquisa?	Pick One List	(Sim, Não)
Os resultados são descritos com clareza?	Labeled Scale	Baixo nível de clareza = 01 Médio nível de clareza = 02 Alto nível de clareza = 03

Fonte: Elaborado pelos autores

Quadro 3 – Ficha de elegibilidade dos estudos e de extração de dados

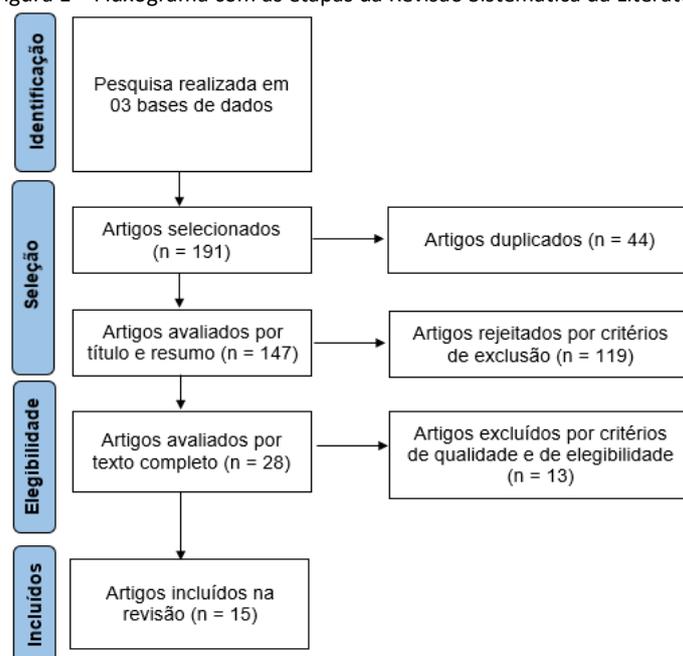
Descrição do critério de elegibilidade	Tipo de resposta	Resposta
Houve extração de dados?	Pick One List	(Sim, Não)
Houve análise das propriedades dos pavimentos permeáveis?	Pick One List	(Sim, Não)
Foram realizados experimentos de avaliação de propriedades?	Pick One List	(Sim, Não)
Foram utilizados diferentes tipos de materiais na composição do pavimento permeável?	Pick One List	(Sim, Não)
Principais propriedades abordadas no estudo?	Pick Many List	(Resistência mecânica, permeabilidade, porosidade)

Fonte: Elaborado pelos autores

4 RESULTADOS

Utilizando a metodologia descrita, na pesquisa realizada nas 03 bases de dados foram encontrados inicialmente 191 artigos. Na fase de seleção, foram excluídos 44 artigos duplicados e, pela aplicação dos critérios de seleção por meio da leitura do título e do resumo, foram excluídos 119 artigos. Os 28 artigos selecionados foram avaliados por critérios de elegibilidade e qualidade após a leitura completa dos textos, o que resultou na exclusão de 13 artigos, ficando com um total de 15 artigos incluídos para esta revisão sistemática da literatura. A Figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas de identificação, seleção e elegibilidade que resultaram nos artigos que compõem esta pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma com as etapas da Revisão Sistemática da Literatura



Fonte: Elaborado pelos autores

O Quadro 4 apresenta um resumo de informações importantes dos trabalhos selecionados, sendo eles: autor, ano, país, materiais utilizados na composição do pavimento permeável e principais propriedades estudadas.

Quadro 4 – Quadro resumo dos artigos selecionados

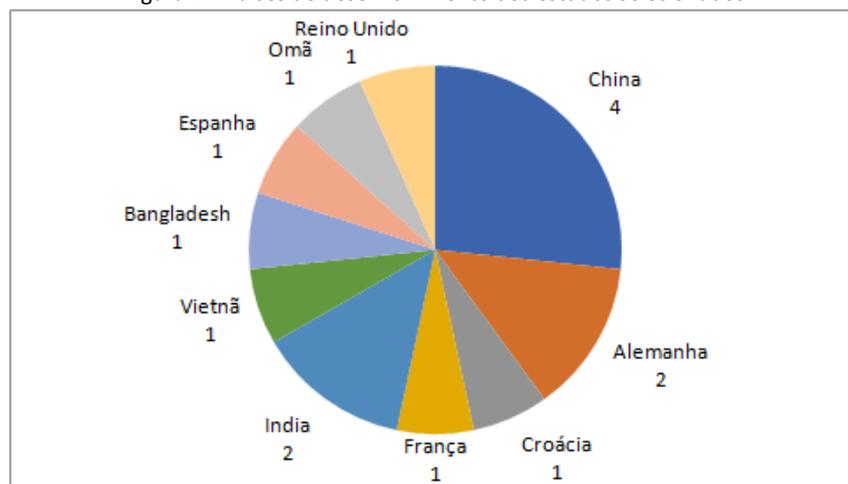
Autores	Ano	País	Materiais utilizados no pavimento permeável	Principais propriedades estudadas
Li <i>et al.</i>	2017	China	Concreto de pós reativos composto por misturas minerais e aditivos	Resistência à compressão, resistência à flexão, permeabilidade, porosidade
Nguyen <i>et al.</i>	2017	França	Substituição parcial de agregados naturais por 03 tipos de conchas esmagadas	Resistência à compressão, durabilidade, porosidade e permeabilidade
Ganesh <i>et al.</i>	2018	Índia	Substituição parcial com escória granulada de alto forno e a adição de fibras de celulose	Resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e permeabilidade
Grubeša <i>et al.</i>	2018	Croácia	Misturas de concreto permeável com 03 diferentes tipos de agregados (dolomita, diabásio e escória de aço de um aterro sanitário)	Resistência à compressão, resistência à flexão, porosidade e permeabilidade.
Yongtao <i>et al.</i>	2018	China	Novo bloco de drenagem com pedra, areia, cinzas volantes, cimento e orifícios artificiais	Resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração dividida e permeabilidade
Heweidak e Amin	2019	Reino Unido	Espuma fenólica OASIS	Taxa de infiltração
Hu <i>et al.</i>	2019	China	Adição de carvão ativado	Resistência da mistura e desgaste por abrasão
Meddah <i>et al.</i>	2019	Omã	Agregados reciclados de diferentes fontes (borracha, concha, plástico picado, agregado de concreto reciclado, etc)	Porosidade, resistência, densidade e permeabilidade
Torzis <i>et al.</i>	2019	Alemanha	Ligantes de poliuretano (PU)	Permeabilidade

Autores	Ano	País	Materiais utilizados no pavimento permeável	Principais propriedades estudadas
Torz <i>et al.</i>	2019	Alemanha	Ligantes de poliuretano (PU)	Porosidade, resistência mecânica e permeabilidade
Ahmed e Hoque	2020	Bangladesh	Substituição parcial do cimento por cinzas volantes	Resistência à compressão e permeabilidade
Elizondo-Martinez <i>et al.</i>	2020	Espanha	Metacaulim e mistura de geopolímeros	Permeabilidade, Resistência à tração indireta
Ngo <i>et al.</i>	2020	Vietnã	Substituição do agregado por grãos de concreto aerado autoclavado e agregados reciclados	Permeabilidade, resistência à compressão e absorção de água
Rathan <i>et al.</i>	2021	India	Blocos de pavimento intertravado permeáveis com eco areia	Resistência à compressão, resistência à tração dividida, e a resistência à flexão
Xu <i>et al.</i>	2021	China	Agregados de calcário e basalto	Permeabilidade, Resistência à flexão

Fonte: Elaborado pelos autores

A revisão sistemática da literatura reuniu estudos de 10 países diferentes, de forma que 60% dos estudos foram desenvolvidos por países asiáticos, com destaque de 04 trabalhos na China, e os demais 40% foram desenvolvidos em países europeus (Figura 2).

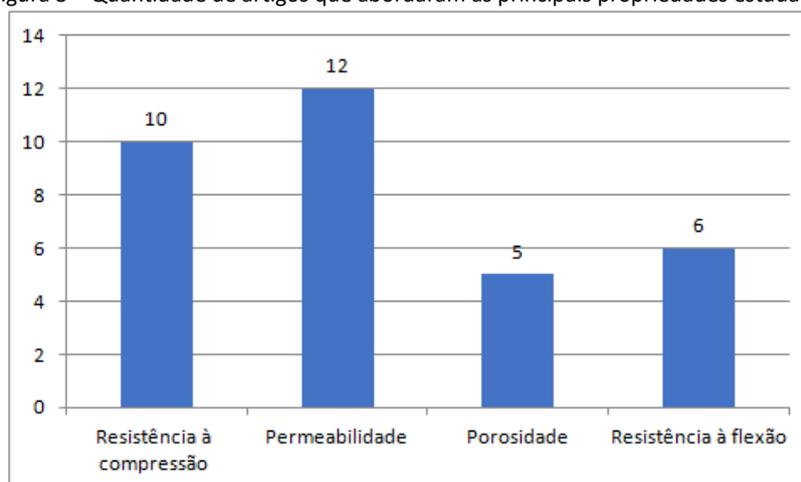
Figura 2 – Países de desenvolvimento dos estudos selecionados



Fonte: Elaborado pelos autores

Entre as propriedades mecânicas e hidráulicas avaliadas pelos artigos, destacam-se as resistências à compressão e à flexão, a permeabilidade e a porosidade, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Quantidade de artigos que abordaram as principais propriedades estudadas



Fonte: Elaborado pelos autores

A revisão sistemática da literatura se propõe a apresentar os resultados obtidos pela avaliação das propriedades dos pavimentos permeáveis avaliados pelos estudos, bem como, discutir suas principais contribuições.

Apesar de o pavimento permeável ser utilizado em diversos países com resultados satisfatórios, algumas questões ainda não foram resolvidas e continuam sendo estudadas por pesquisadores. Por isso, diversos estudos procuram inserir ou substituir materiais na composição dos pavimentos permeáveis, buscando atingir melhores resultados em suas propriedades, principalmente nas mecânicas e hidráulicas. Muitos desses problemas, que ainda não foram solucionados, estão relacionados à durabilidade e ao comportamento em uso de longo prazo dos pavimentos.

Neste sentido, Nguyen *et al.* (2017) utilizaram conchas do mar esmagadas da costa oeste francesa em substituição parcial aos agregados naturais no desenvolvimento de um concreto permeável. Após substituir 60% dos agregados naturais do concreto permeável por três tipos de conchas do mar esmagadas, os autores verificaram os efeitos na durabilidade, comparando os resultados obtidos nos testes de resistência ao gelo-degelo, teste de enfiamento e teste de lixiviação do concreto permeável com e sem as conchas.

Considerando que as conchas esmagadas são mais frágeis do que os agregados naturais, os concretos permeáveis feitos com as conchas trituradas apresentaram uma menor resistência mecânica e uma menor durabilidade de congelamento/descongelamento em relação aos concretos permeáveis sem as conchas. O experimento mostrou que algumas características químicas das conchas esmagadas podem ter mais influência na durabilidade do que nas propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável. Também foi possível comparar os resultados em função do tipo de concha utilizada.

A permeabilidade à água de concretos permeáveis com ou sem conchas trituradas variam entre 2,2 e 3,4 mm.s, que em comparação com o valor recomendado de 1,0 mm.s, são altos o suficiente para serem usados para sua utilização. Apesar de alguns efeitos desfavoráveis, o estudo mostrou uma durabilidade aceitável de concreto permeável com e sem cascas para aplicação de baixa carga de tráfego, evidenciando o potencial do material e a necessidade de que os estudos se aprofundem com verificações em campo.

Além da durabilidade, outra dificuldade existente é a conciliação entre as propriedades de permeabilidade e resistência mecânica. Na busca por determinar a proporção da mistura que

produz o equilíbrio entre a resistência à compressão e a permeabilidade, Ahmed e Hoque (2020) fornecem uma visão geral dos pavimentos permeáveis através de testes realizados com diferentes misturas que possibilitam a análise do comportamento do pavimento.

Para este estudo, foram selecionadas um total de 14 misturas para serem testadas, incluindo 42 amostras cilíndricas padrão, com variação na proporção de agregado, no tamanho do agregado e no conteúdo de água. Também foi realizada uma adição de material cimentício suplementar, uma alternativa sustentável ao cimento Portland comum, por meio da substituição de 20% do peso do cimento por cinzas volantes.

Como resultado, foram relatadas e discutidas as mudanças nas propriedades do concreto permeável em função das alterações na mistura. As análises indicaram que não foi possível identificar uma receita precisa para o equilíbrio entre a resistência à compressão e permeabilidade, considerando também que os testes utilizados não fornecem uma compreensão clara do comportamento do concreto permeável. Entretanto, os pavimentos permeáveis se apresentam como uma solução aceitável para áreas de baixo impacto.

Em contrapartida a este estudo, Yongtao *et al.* (2018) propuseram um novo tipo de bloco de drenagem preparado com orifícios artificiais com o objetivo de resolver os conflitos entre a resistência e a permeabilidade existente nos produtos de pavimentação. O bloco possui algumas vantagens como o maior controle da permeabilidade da água e a existência de uma passagem cônica, onde o furo superior é menor do que o furo inferior, fazendo com que não seja facilmente bloqueado pelos poluentes na superfície da estrada.

As principais matérias-primas para a preparação de novos blocos de drenagem são pedra, areia, cinzas volantes e cimento. As amostras foram submetidas a testes de desempenho mecânico como a resistência à compressão e à flexão, resistência à tração dividida e testes de coeficiente de permeabilidade à água.

Os resultados mostram que o projeto do novo tijolo de drenagem tem potencial para solucionar a questão, devido aos bons resultados nos testes realizados. Além disso, considerando que os orifícios são artificiais, é possível realizar ajustes e preparar blocos com diferentes desempenhos para atender às várias necessidades existentes.

Também buscando soluções para a durabilidade dos pavimentos de concreto permeável, Li *et al.* (2017) desenvolveram um inovador pavimento de concreto permeável de alta resistência. Para isso, foi introduzido um concreto de pós reativos como matriz, além de construir poros acessíveis. Nesta mistura, foram utilizados diversos materiais como recursos para atingir o objetivo, entre eles: sílica ativa, cinzas volantes, agentes de expansão, aditivo superplastificante, areia de rio, látex de estireno-butadieno, sol de sílica e fibras de polipropileno.

Os resultados experimentais mostraram que a resistência à compressão de 7 dias atingiu 61,37 Mpa, associado a um coeficiente de permeabilidade de 13,02 mm/s, que indica um desempenho favorável para ampla aplicação. A proporção de mistura ideal foi determinada para garantir um desempenho do pavimento de concreto permeável com alta resistência. Os resultados mostram que o produto otimizado possui mais de 70 MPa de resistência à compressão e cerca de 10 MPa de resistência à flexão.

Seguindo a tendência dos blocos permeáveis, Rathan *et al.* (2021) desenvolveram blocos de pavimento intertravado permeáveis e avaliaram a influência da gradação de agregados e da porcentagem de finos no seu desempenho mecânico, funcional e estrutural. Foram confeccionadas 12 diferentes misturas de concreto permeável com gradação variável do

agregado e diferentes porcentagem de finos. Na composição, os agregados finos foram substituídos por 5% e 10% da “eco areia”, subproduto do calcário, que tem a sílica cristalina como principal subproduto.

Pelos resultados dos testes e softwares utilizados, observou-se que a resistência à compressão, resistência à tração dividida, e a resistência à flexão aumentam com o aumento do percentual de finos. Os autores do estudo citam que os blocos de pavimento intertravado permeáveis podem ser um material de pavimentação eficaz para estradas de baixo volume, ilhas de calor urbanas e pavimentos com problemas de drenagem.

Alguns estudos buscam minimizar o uso de cimento em pavimentos de concreto poroso através da adição de materiais alternativos, devido ao impacto ambiental na produção do cimento. Neste sentido, Elizondo-Martinez *et al.* (2020) propõe uma substituição parcial do cimento por diferentes quantidades de metacaulim e por uma mistura de geopolímeros contendo metacaulim e pó de basalto. Para as misturas experimentais, o metacaulim foi usado para substituir parcialmente o cimento em quantidades de 5% e 10% do peso do cimento.

Após a análise de propriedades mecânicas e volumétricas, foi possível concluir que a substituição de 5% do cimento por metacaulim aumenta tanto a resistência à tração indireta quanto a permeabilidade, mas uma substituição de 10% do cimento por metacaulim reduz ambas as propriedades. Já as misturas de geopolímero podem atingir permeabilidade significativamente maior do que o concreto poroso tradicional, mas isso diminui sua resistência à tração indireta.

Considerando os resultados promissores, alguns ajustes nas misturas podem atingir resultados de aumento das propriedades mecânicas sem afetar negativamente a porosidade, tornando estes materiais solução potencial frente ao concreto de cimento poroso tradicional.

A substituição do cimento também ocorreu no estudo desenvolvido por Ganesh *et al.* (2018), que estudaram as propriedades mecânicas e a permeabilidade do concreto permeável, considerando a substituição parcial de 30% do cimento por escória granulada de alto forno e a adição de fibras de celulose, inclusive com a combinação de ambos os materiais.

As propriedades como resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e permeabilidade foram avaliadas por meio de testes. Os resultados apontaram um aumento na resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e diminuição da permeabilidade nas misturas do concreto permeável com adição dos materiais selecionados, quando comparado ao concreto permeável sem modificações.

O asfalto poroso comumente utilizado é composto por materiais aglutinantes à base de betume. No estudo desenvolvido por Torzs *et al.* (2019), um material aglutinante à base de poliuretano (PU) foi selecionado para formar uma camada de pavimento flexível e poroso, mas também capaz de aumentar a resistência. Duas composições de materiais de pavimento poroso com poliuretano foram investigadas, com diferenças apenas em termos de distribuição do tamanho de partículas dos agregados e diâmetros máximos dos grãos. Os agregados empregados foram um cascalho fino de diabásio e um enchimento de calcário.

O estudo buscou fornecer uma visão sobre o espaço nos poros a partir de tomografias computadorizadas dos dois pavimentos. Também foram determinadas propriedades mecânicas e hidráulicas em experimentos de laboratório. As imagens obtidas e os volumes reconstruídos apresentados forneceram ideias sobre o efeito delimitador do aglutinante de poliuretano, que se encontram no escopo das investigações futuras, onde serão analisados os efeitos do entupimento nas propriedades hidráulicas.

Outro artigo desenvolvido por Torzs *et al.* (2019) buscou investigar as propriedades hidráulicas de estruturas de pavimento revestidas com poliuretano. Além dos experimentos realizados, o desempenho de modelos hidráulicos para descrever o comportamento de retenção de água e condutividade hidráulica foram estudados.

Os resultados mostraram que o comportamento de retenção de água e os valores de entrada de ar correspondentes do pavimento ligado ao poliuretano foram muito baixos. No entanto, as propriedades investigadas podem influenciar o desempenho hidráulico e o comportamento de drenagem de uma estrutura rodoviária real.

Hu *et al.* (2019) estudaram a viabilidade do uso de carvão ativado em mistura asfáltica porosa e os efeitos do material no teor ideal de asfalto, nas propriedades e nas características de filtração através de testes de laboratório. O concreto asfáltico poroso foi preparado com ligante de asfalto modificado com estireno-butadieno-estireno, agregado de basalto triturado, enchimento de calcário e o carvão ativado.

Os resultados dos testes de perda de abrasão e drenagem do aglutinante mostraram que o carvão ativado aumenta o teor ideal de asfalto da mistura do asfalto poroso. A resistência do pavimento asfáltico permeável é afetada pelo efeito de amolecimento do alto teor de asfalto e o efeito de rigidez do carvão ativado. Além disso, pode melhorar as características de ligação entre ligante asfáltico e agregado, contribuindo para melhor estabilidade à umidade da mistura.

Ngo *et al.* (2020) investigaram as propriedades de concretos permeáveis preparados a partir de agregados reciclados e subprodutos industriais, como os grãos de concreto aerado autoclavado. Foram avaliados os efeitos da utilização de resíduos de construção e demolição na razão de vazios, permeabilidade, resistência à compressão, absorção de água, teste de evaporação e no teste de redução da temperatura da superfície.

Os resultados indicaram que aumentar o conteúdo de grãos de concreto areado autoclavado diminui a resistência do concreto permeável, mas melhora gradualmente as propriedades de retenção de água do pavimento.

O estudo realizado por Meddah *et al.* (2019) também utilizou misturas de concreto permeáveis contendo diferentes materiais reciclados, além de uma mistura de controle, para testes de propriedades mecânicas e hidráulicas. O principal objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito do uso de vários tipos e de agregados reciclados como uma substituição parcial do agregado natural. Dois tipos de materiais foram utilizados (agregados naturais e reciclados coletados de diferentes fontes) num total de 7 misturas projetadas com uma variedade de frações granulares naturais e recicladas.

Os resultados apontaram que o tipo, tamanho e as combinações dos agregados reciclados afetaram fortemente as propriedades frescas e endurecidas do concreto permeável incluindo densidade, resistência e porosidade. Verificou-se ainda que a classificação, o tamanho e o conteúdo dos agregados (naturais ou reciclados) regem as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. O uso de vários agregados reciclados e resíduos para produzir evidenciou o potencial para transformar o concreto permeável de cimento Portland em um material verde com utilização de sistema de drenagem.

No estudo realizado por Grubeša *et al.* (2018) foram confeccionadas seis misturas de concreto permeável com três tipos diferentes de agregado (dolomita, diabásio e escória de aço de um aterro sanitário croata perto da cidade de Sisak), considerando duas frações diferentes para os agregados (4–8 mm e 8–16 mm). Após 28 dias submersos em um tanque d'água, foram

avaliadas as propriedades do concreto permeável endurecido, entre elas a resistência à compressão, resistência à flexão, densidade, porosidade e permeabilidade.

O estudo concluiu que, do ponto de vista hidrológico, o agregado ideal é o diabásio, que permite que a água passe suavemente. Já em relação às propriedades mecânicas, nenhuma das misturas conseguiu atender aos critérios europeus para camadas superficiais de pavimentos. Para estudos futuros, os autores notaram que fração de agregado mais grosseiros podem resultar em melhorias nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável.

Heweidak e Amin (2019) adicionaram ao pavimento permeável uma camada de um material com células altamente porosas chamado de espuma fenólica OASIS®. O estudo analisou os efeitos da presença do material nas propriedades hidráulicas do pavimento permeável, na taxa de infiltração, na capacidade de armazenamento de água e no adiamento do pico de fluxo de água durante chuvas de diferentes intensidades.

O pavimento era composto por uma sub-base de 250 mm, uma base de 50 mm, camadas de pavimentação de 100 mm sem camada de geotêxtil e espessuras de 15 mm, 25 mm e 35 mm do material OASIS. Foi observado que o material aumentou significativamente a atenuação do pico de fluxo pela absorção de água e que 35 mm espessura da camada OASIS® poderia absorver aproximadamente um evento de chuva inteiro de 100 mm / h.

Em alguns países europeus, têm se tornado popular a utilização de pavimentos permeáveis de dupla camada, que possuem uma fina camada superior com melhor desempenho na estrada e uma subcamada espessa que garante a melhor capacidade de drenagem.

No artigo desenvolvido por Xu *et al.* (2021) foi estudada a viabilidade de aplicação do calcário como agregado na subcamada de drenagem de um pavimento permeável asfáltico de camada dupla. Com base nos resultados, as propriedades laboratoriais relacionadas ao desempenho em campo da mistura de calcário podem atender aos requisitos das especificações.

Comparado com a mistura que utilizou basalto, a permeabilidade da água da mistura com calcário é relativamente baixa. Do ponto de vista da resistência à flexão, os resultados da mistura com calcário foram menores do que a mistura de basalto, entretanto a rigidez à flexão da mistura de calcário foi menor.

5 CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática da literatura permitiu apresentar os desempenhos das propriedades dos pavimentos permeáveis considerados pelos estudos selecionados, como também possibilitou discutir suas principais contribuições nas sociedades mundiais.

A quantidade de trabalhos encontrados nas bases elencadas para as restrições realizadas foi bastante significativa, tendo a busca retornado um total de 191 artigos. Esses dados revelam um crescimento no interesse acerca da temática, provavelmente ocasionado pela crescente preocupação com as questões ambientais. Na busca específica por artigos que tratassem como a variação da composição dos pavimentos permeáveis afetam suas propriedades mecânicas e hidráulicas, por meio de critérios de elegibilidade e qualidade, foi selecionado um total de 15 estudos para este trabalho.

Esta revisão possibilitou demonstrar que apesar da técnica compensatória do pavimento permeável ser utilizada em diversas partes do mundo apresentando resultados satisfatórios, alguns dilemas ainda precisam ser avaliados por pesquisadores. Assim, diversos estudos apresentados neste trabalho buscaram substituir ou mesmo introduzir outros tipos de

materiais na composição dos pavimentos permeáveis, objetivando atingir melhores resultados em suas propriedades, principalmente nas mecânicas e hidráulicas.

6 REFERÊNCIAS

- AHMED, T.; HOQUE, S. Study on pervious concrete pavement mix designs. **Earth and Environmental Science**, 476 (2020) 012062.
- ALVES, P. B. R.; MELO FILHO, H.; TSUYUGUCHI, B. B.; RUFINO, I. A. A.; FEITOSA, P. H. C. Mapping of flood susceptibility in Campina Grande country – PB: A spatial multicriteria approach. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 24, n. 1, p. 28-43, 2018.
- BEGA, J. M. M.; RIBEIRO, N. U. F.; LIMA, C. G. R. Suscetibilidade a enchentes: estudo de caso na microbacia hidrográfica do Córrego da Onça em Três Lagoas - MS. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 15, n. 3, p. 33-44, 2019.
- CHU, L.; TANG, B.; FWA, T. F. Evaluation of functional characteristics of laboratory mix design of porous pavement materials. **Construction and building materials**, 191 (2018) 281-289
- ELIZONDO-MARTINEZ, E. J. *et al.* Physical and mechanical characterization of sustainable and innovative porous concrete for urban pavements containing metakaolin. **Sustainability**, 2020, 12, 4243; doi:10.3390/su12104243.
- FONSECA NETO, G. C.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; RODRIGUES, A. B.; RIBEIRO NETO, A.; CABRAL, J. J. S. P. Modelagem bidimensional para a verificação hidráulica da canalização de um trecho do rio Fragoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 6, p. 2963-2977, 2020.
- GANESH, K. M. *et al.* Study of mechanical properties of pervious concrete as a pavement material by partial replacement of Ggbs in cement with addition of cellulose fibers. **International Journal of Engineering & Technology**, 7 (3.31) (2018) 219-223.
- GRUBEŠA, I. N.; BARIŠIĆ, I.; DUCMAN, V.; KORAT, L. Draining capability of single-sized pervious concrete. **Construction and Building Materials**, 169 (2018) 252-260.
- HEWEIDAK, M.; AMIN, S. Effects of OASIS® phenolic foam on hydraulic behaviour of permeable pavement systems. **Journal of Environmental Management**, 230 (2019) 212-220.
- HU, X.; DAI, K.; PAN, P. Investigation of engineering properties and filtration characteristics of porous asphalt concrete containing activated carbon. **Journal of Cleaner Production**, 209 (2019) 1484-1493.
- KOHLMAN RABBANI, E. R.; BARKOKEBAS JUNIOR, B. (Org.). **Aplicações do método PRISMA para revisão sistemática da literatura na Engenharia Civil**. 1. ed. Recife: EDUPE, 2019. p. 21 - 38.
- LI, J.; ZHANG, Y.; LIU, G.; PENG, X. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials** 138 (2017) 479-485.
- LIMA, D. F.; SOUSA JUNIOR, A. M.; LIMA JUNIOR, F. O.; QUEIROZ, J. H. M. Expansão urbana de São Miguel/RN: Análise no recorte temporal de 2000 a 2017. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 80, p. 182-200, 2021.
- LINO, W. E. F.; KOHLMAN RABBANI, Emilia Rahnemay ; ZLATAR, T. ; CABRAL, J. J. S. P. . Utilização de técnicas compensatórias de drenagem urbana. In: Tomi Zlatar; Emilia Rahnemay Kohlman Rabbani; Béda Barkokébas Júnior. (Org.). **Aplicação do método prisma para revisão sistemática da literatura na engenharia civil**. 1ed.Recife: EDUPE, 2019, v. 1, p. 21-38.
- MA, G. *et al.* Investigation on the deformation behavior of open-graded unbound granular materials for permeable pavement. **Construction and Building Materials**, 260 (2020) 119800.
- MEDDAH, M. S.; ORAIMI, M. A.; HAGO, A. W.; JABRI, K. A. Effect of Recycled Aggregates on Previous Concrete Properties. **Materials Science and Engineering**, 603 (2019) 032010.

NGO, K. T.; NGUYEN, T. D.; PHAN, Q. M.; NGUYEN, V. T.; KAWAMOTO, K. Influence of AAC grains on some properties of permeable pavement utilizing of CDW and industrial by-product. **Materials Science and Engineering**, 869 (2020) 032046.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; BARAUD, F.; LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. **Construction and Building Materials**, 135 (2017) 137-150.

RATHAN, A. S. R. T.; SAI, A. V.; SUNITHA, V. Mechanical and structural performance evaluation of pervious interlocking paver blocks. **Construction and Building Materials**, 292 (2021) 123438.

ROCHA, A. P.; SCHULER, C. A. B. Avaliação espaço temporal da suscetibilidade a movimentos de massa utilizando ortofotocartas e modelagem espacial multicritério na dinâmica de áreas de risco nas Microrregiões do Jordão e Ibura, Recife-PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 9, p. 1747-1770, 2016.

REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. O. Influência das condições de instalação do sistema predial de água pluvial nas soluções de drenagem na fonte. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 129-141, 2019.

RODRIGUES, G. C.; SANTINI JUNIOR, M. A. Avaliação do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do município de Fernandópolis, São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 231-237, 2021.

RODRIGUEZ, C. A. M.; TEIXEIRA, B. A. N. Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de São Carlos (SP), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 143-150, 2021.

SANTOS, C. L., SILVA, O. G. VITAL, S. R. O., WANDERLEY, L. S. A. Análise da suscetibilidade à ocorrência de enchentes e inundações na bacia do rio Jaguaribe – João Pessoa/PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1876-1888, 2018.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 943-952, 2017.

SILVA, A. K. C.; SANTOS, A. H. V.; FARIAS, P. L.; BARBOSA, C. L. M. Impactos ambientais no rio Capibaribe: O caso do município de Paudalho - PE. In: Selva, V. S. F. *et al.* (org.). **Tecnologias no contexto das vulnerabilidades ambientais**. 1. ed. Ananindeua: Itacaiúnas, 2019. p. 441-460.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; FONSECA NETO, G. C.; CABRAL, J. J. S. P. Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 37, n. 1, p. 222-240, 2020.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R. Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 2034-2053, 2016.

TÖRZS, T.; GRABE, J.; LU, G.; OESER, M. Investigations on microstructure characteristics of porous pavement based on X-ray CT scanning. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 7th AP-UNSAT (2019) 609-614.

TÖRZS, T.; LU, G.; MONTEIRO, A. O.; WANG, D.; GRABE, J.; OESER, M. Hydraulic properties of polyurethane-bound permeable pavement materials considering unsaturated flow. **Construction and Building Materials**, 212 (2019) 422-430.

XU, G.; FAN, J.; MA, T.; ZHAO, W.; DING, X.; WANG, Z. Research on application feasibility of limestone in sublayer of Double-Layer permeable asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, 287 (2021) 123051.

ZHU, Y.; HUANG, J.; YANG, L. Research and development of mechanical properties of new drainage bricks. **Materials Science and Engineering**, 392 (2018) 022033. doi:10.1088/1757-899X/392/2/022033