

ECOEFIÊNCIA DE PAVIMENTOS DRENANTES DE CONCRETO HIPOCARBÔNICO: aplicação de um índice multicritério

ECO-EFFICIENCY OF LOW-CARBON PERVIOUS CONCRETE PAVEMENTS: application of a multicriteria index

**Mayara Carelli de Paula Costa, Eng. Civil, mestranda do PPG Ambiente Construído –
Universidade Federal de Juiz de Fora.**

eng.mayaracarelli@gmail.com

**Leonardo Rocha Olivi, Prof. D.Sc, Energia Elétrica FENG - Universidade Federal de Juiz de
Fora.**

leonardo.olivi@ufjf.br

Número da sessão temática da submissão – 3

Resumo

O estudo avalia a ecoeficiência de pavimentos drenantes de concreto hipocarbônico como solução sustentável para ambientes urbanos, com base em revisão de literatura e aplicação de um modelo comparativo multicritério. A abordagem integra parâmetros técnicos, como resistência à compressão, abrasão, permeabilidade e vida útil, a variáveis ambientais, notadamente emissões de CO₂, e econômicas, representadas pelo custo, de modo a qualificar o desempenho global das diferentes composições. A metodologia, apoiada em dados experimentais publicados, permite ponderar sistematicamente esses critérios e identificar alternativas mais equilibradas. Os resultados indicam que materiais oriundos de resíduos minerais, industriais e da siderurgia apresentam maior ecoeficiência, em razão da menor necessidade de processamento e da redução da pegada de carbono. Em contraste, compósitos que dependem de rotas químicas mais complexas, como certos geopolímeros, mostram desempenho inferior. Conclui-se que resíduos de fácil processamento constituem rota promissora para concretos hipocarbônicos, tecnicamente robustos e escaláveis.

Palavras-chave: pavimentos drenantes; concretos hipocarbônicos ecoeficiência; ecoeficiência

Abstract

The study assesses the eco-efficiency of low-carbon pervious concrete pavements as a sustainable solution for urban environments, based on a literature review and the application of a multicriteria comparative model. The approach integrates technical parameters such as compressive strength, abrasion resistance, permeability and service life with environmental variables, notably CO₂ emissions, and economic aspects represented by cost, in order to qualify the overall performance of different mixtures. The methodology, supported by published experimental data, allows systematic weighting of these criteria and the identification of more balanced alternatives. The results indicate that mixtures incorporating mineral, industrial and steelmaking waste exhibit higher eco-efficiency due to their lower processing requirements and reduced carbon footprint. In contrast, composites that rely on more complex chemical routes, such as certain geopolymers, show inferior performance. It is concluded that easily processable waste materials constitute a promising pathway for producing technically robust and scalable low-carbon concretes.

Keywords: pervious pavements; low-carbon concretes; eco-efficiency.

1. Introdução

A crescente urbanização tem gerado impactos significativos ao meio ambiente, sobretudo em relação à impermeabilização das superfícies das cidades, resultando em consequências negativas sobre a drenagem urbana e a qualidade ambiental (Souza, Cruz e Tucci, 2012).

Nesse contexto, sobressai o conceito de ecoeficiência, que propõe conciliar crescimento econômico e preservação ambiental por meio da minimização do uso de recursos naturais e da redução dos impactos ambientais associados aos processos produtivos. Esse termo é entendido como a oferta de bens e serviços capazes de atender às necessidades humanas e melhorar a qualidade de vida, ao mesmo tempo em que reduzem de forma contínua a pressão sobre os ecossistemas ao longo de todo o ciclo de vida. A expressão ecoeficiência foi introduzida pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) em 1992, estabelecendo-se como um princípio orientador para a sustentabilidade empresarial e industrial, ao articular simultaneamente eficiência econômica e responsabilidade ambiental (WBCSD, 1992).

Um aspecto central no enfrentamento dos desafios das cidades contemporâneas são os serviços ecossistêmicos proporcionados pelas infraestruturas verdes, incluindo a regulação do microclima e o controle do escoamento superficial. Estratégias urbanas de longo prazo, que integrem diversos setores, são essenciais para maximizar esses benefícios e promover cidades mais sustentáveis e resilientes. Contudo, a resiliência urbana permanece um conceito amplo, compreendido como a capacidade dos sistemas urbanos de absorver distúrbios mantendo suas funções essenciais, podendo tanto facilitar quanto dificultar transformações rumo à sustentabilidade (De Luca *et al.*, 2021).

O adensamento habitacional e a intensificação das atividades humanas aumentam a vulnerabilidade das cidades a riscos como inundações, deslizamentos e estresse hídrico. A adoção de estratégias integradas de planejamento, que considerem infraestruturas inovadoras, economia circular e soluções baseadas na natureza, é crucial para mitigar vulnerabilidades e promover sustentabilidade (Amiraal & Cornaro, 2019; Chang *et al.*, 2020).

A incorporação dos princípios da economia circular revela-se estratégica para fortalecer a resiliência urbana e contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS (UNEP, 2025). Promove a maximização da vida útil dos materiais, a minimização da geração de resíduos e a reinserção de subprodutos no sistema produtivo, reduzindo o impacto ambiental do setor da construção civil. Essa abordagem, integrada ao planejamento e gestão das infraestruturas urbanas, facilita o uso de materiais alternativos, incrementa o emprego de tecnologias inovadoras e processos construtivos de baixo carbono, aumentando a robustez dos sistemas urbanos frente aos distúrbios climáticos e antrópicos (Khajuria *et al.*, 2025).

Neste cenário, ganha importância crescente a aplicação dos pavimentos drenantes de concreto como parte das tecnologias capazes de promover o desenvolvimento urbano de baixo impacto (Souza *et al.*, 2012; Tucci, 2012). Diferentes tipologias, incluindo, concreto poroso, bloco permeável, peças permeáveis de juntas largas, placa permeável e concreto com grama, demonstram potencial para mitigar os efeitos adversos da impermeabilização, permitindo infiltração da água, reduzindo picos de escoamento superficial e favorecendo a recarga do lençol freático (Marchi *et al.*, 2018).

A literatura destaca que os sistemas modernos de drenagem urbana evoluíram significativamente ao reconhecerem o papel essencial do solo e da vegetação no controle quali- quantitativo das águas pluviais (Souza *et al.*, 2012). Modelos recentes, como o *Low Impact Development* (LID), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e *Sustainable Drainage Systems* (SuDS), incorporam pavimentos permeáveis como componentes-chave para a sustentabilidade hídrica e ambiental das cidades, permitindo o controle descentralizado do escoamento e promovendo a multifuncionalidade das infraestruturas (Souza *et al.*, 2012; Tucci, 2012;). No Brasil, embora existam experiências isoladas positivas, a adoção sistêmica dos pavimentos drenantes enfrenta desafios como lacunas normativas, cultura técnica tradicional, custos iniciais elevados e dificuldades na manutenção, especialmente relacionadas a durabilidade–(Marchi *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2012;). Ainda assim, aplicações práticas em cidades como São Paulo, Curitiba e Florianópolis demonstram o potencial desses pavimentos em melhorar o desempenho hidráulico, reduzir poluição difusa e promover benefícios ambientais como a diminuição das ilhas de calor e aumento da biodiversidade urbana (Delatte, 2014; Marchi *et al.*, 2018).

Adicionalmente, destaca-se na literatura recente a incorporação de resíduos e materiais reciclados na produção de pavimentos de concreto permeáveis. Pesquisas apontam que substituir parcialmente agregados naturais por resíduos, além de promover destinação sustentável desses rejeitos, pode melhorar propriedades técnicas fundamentais, como porosidade, resistência à compressão, e durabilidade (Awolusi *et al.*, 2024; Rashid *et al.*, 2013; Savić *et al.*, 2025). Contudo, desafios persistem quanto à avaliação de longo prazo, padronização de ensaios, monitoramento em escala real e análise dos impactos ambientais do ciclo de vida, como emissões de CO₂ e consumo energético (Marchi *et al.*, 2018).

1.2 Materiais e tecnologias empregados na produção de concretos permeáveis

Concretos permeáveis vêm sendo formulados com diferentes estratégias de substituição e incorporação de materiais, visando conciliar desempenho técnico e sustentabilidade. De acordo com o ilustrado na Figura 1, agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) são amplamente utilizados como alternativa aos agregados naturais, com respaldo técnico e ambiental (Huang e Wang, 2024; Li *et al.*, 2023; Silva Junior *et al.*, 2021). Fibras recicladas, como polipropileno, poliéster e fibras vegetais, também são aplicadas para melhorar tenacidade e durabilidade, exigindo controle adequado de dosagem (Oni, Xia e Liu, 2020; Marinelli, Puthiyaveetil e Rasheed, 2024). Resíduos minerais, industriais e siderúrgicos, como cinzas volantes, escória de alto-forno, zeólita e areia de fundição, são incorporados para aprimorar propriedades físico-químicas e reduzir impactos ambientais (Fernandes *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2025; Teymouri *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2025). Os de origem polimérica, como borracha de pneus e plásticos reciclados, são empregados em aplicações com menor exigência estrutural, promovendo reaproveitamento de rejeitos e leveza dos elementos (Azunna *et al.*, 2024; De Oliveira *et al.*, 2019; Sekar *et al.*, 2022). Ligantes geopoliméricos e sistemas ativados alcalinamente, muitas vezes combinados com biomassa, têm sido explorados como substitutos ao cimento Portland, com potencial de redução de emissões e bom desempenho técnico (Arafa *et al.*, 2021; Merino-Lechuga *et al.*, 2024; 2025). Por fim, nanomateriais como grafeno e nanotubos de carbono são aplicados para densificar a matriz e agregar funcionalidades específicas, embora apresentem desafios econômicos e operacionais que limitam sua difusão (Barišić *et al.*, 2025; Yahyae e Mofidi, 2024).



Figura 1: Exemplo de técnicas e materiais utilizado nos estudos. (A) Ensaio compressão diametral de amostras com RCD; (B) Aspersão de nanografeno no concreto e (C) Resíduos de origem industrial e siderúrgica. Fonte: Huang e Wang, 2024; Barišić *et al.* (2025); Teymouri *et al.* (2020)

1.3 Objetivo da pesquisa

Este estudo tem por objetivo avaliar a ecoeficiência de pavimentos drenantes de concreto com incorporação de resíduos, por meio de um índice multicritério que integra parâmetros técnicos, ambientais e econômicos. As tipologias analisadas incluem agregados reciclados, fibras vegetais ou industriais, resíduos minerais e industriais, resíduos poliméricos, ligantes geopoliméricos com biomassa e nanomateriais. Busca-se identificar quais composições apresentam melhor equilíbrio entre desempenho mecânico, eficiência hidráulica e sustentabilidade, conforme os critérios técnicos normativos e de órgãos do setor.

2. Metodologia

O estudo adotou uma abordagem quali-quantitativa, fundamentada na construção de um Índice de Ecoeficiência (IEco) multidimensional, com o objetivo de comparar diferentes composições de pavimentos drenantes de concreto. O IEco permitiu o ranqueamento dos sistemas conforme critérios técnicos, ambientais e operacionais, assegurando uma análise transparente e abrangente. A estruturação dos critérios de avaliação foi baseada em revisão bibliográfica e na definição de indicadores que englobam propriedades técnicas (resistência, abrasão, permeabilidade, durabilidade), efeitos da incorporação de resíduos, impactos ambientais (emissões de CO₂, energia embutida), custos e restrições operacionais. Foram extraídos dados relevantes de diversos artigos para compor uma base comparativa robusta.

Para análise, os pavimentos foram classificados em sete categorias, de acordo com sua tipologia e os materiais utilizados, de acordo com o mostrado na Tabela 1: (i) convencionais; (ii) com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD); (iii) com fibras recicladas ou vegetais; (iv) com resíduos minerais e industriais; (v) com polímeros reciclados ou resíduos plásticos; (vi) geopoliméricos e com biomassa; (vii) com adições e nanomateriais reciclados.

Tabela 1: Indicadores de avaliação

Critério de avaliação	Justificativa técnica
Permeabilidade	Notas mais altas indicam maior capacidade de infiltração de água, favorecendo o controle do escoamento superficial e a recarga de aquíferos (Marchi <i>et al.</i> , 2018);
Vida útil	Notas superiores correspondem a maior durabilidade do pavimento, minimizando custos de manutenção e reduzindo impactos ambientais associados à reabilitação ou substituição prematura (Marchi <i>et al.</i> , 2018);
Resistência mecânica (compressão e flexão)	Maiores notas representam melhor integridade estrutural sob cargas estáticas e dinâmicas, prevenindo deformações e fissurações precoces, com relevância especial em áreas de tráfego intenso (Awolusi <i>et al.</i> , 2024);
Resistência à abrasão	Notas acentuadas indicam maior resistência superficial ao desgaste mecânico, prolongando a vida útil funcional em contextos urbanos com tráfego veicular e pedonal frequente (Savić <i>et al.</i> , 2025);
Pegada de carbono	Altas notas refletem menores emissões associadas à produção e uso do material, contribuindo para a mitigação climática e alinhamento aos ODS (Khajuria <i>et al.</i> , 2022; UNEP, 2025);
Teor de material reciclado	Notas elevadas indicam maior incorporação de resíduos ou reciclados, promovendo economia circular e reduzindo a extração de recursos naturais (Rashid <i>et al.</i> , 2013; Awolusi <i>et al.</i> , 2024);
Custo	Maiores notas, menores custos, essencial para viabilidade de aplicação em larga escala, influenciando decisões de investimento público e privado maiores notas correspondem a menores custos globais, favorecendo a viabilidade econômica e estimulando investimentos públicos e privados em infraestrutura urbana sustentável (Tucci, 2012; Khajuria <i>et al.</i> , 2022);

Fonte: Os autores (2025)

2.2 Sistemas de notas e interpretação dos critérios

A pontuação de cada critério é atribuída conforme a escala apresentada, a qual reflete o grau de atendimento aos requisitos técnicos, ambientais e econômicos estabelecidos para o projeto. Essa classificação tem por objetivo padronizar a avaliação, assegurando comparações consistentes entre diferentes alternativas de solução. Salienta-se que, para um critério ser considerado atendido, o desempenho deve estar em conformidade com os parâmetros mínimos definidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013) o, que estabelece requisitos normativos de resistência e durabilidade, bem como pelas diretrizes técnicas da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, que complementam os aspectos de permeabilidade, vida útil, sustentabilidade e aplicabilidade do concreto permeável, conforme mostrado na Tabela 2.

1 – Desempenho insuficiente: resultado muito inferior aos limites estabelecidos em norma, configurando não conformidade e inviabilidade técnica para aplicação;

2 – Desempenho mínimo aceitável: resultado que atende exatamente aos requisitos normativos, situando-se no limite inferior de conformidade;

3 – Desempenho satisfatório: resultado acima dos parâmetros normativos mínimos, garantindo maior confiabilidade e segurança técnica em uso.

Tabela 2: valores de referência para notas

Critério de avaliação	Referência
Permeabilidade	> 1mm/s
Vida útil	20 a 30 anos
Resistência compressão	≥ 35 MPa
Resistência a flexão	> 3 MPa
Resistência à abrasão	≤ 23 mm
Pegada de carbono	Reduzir no mínimo, 5%
Custo	Reduzir 5 a 15% do convencional

Fonte: Os autores (2025)

2.3 Índice de Ecoeficiência - IEco

O Índice de Ecoeficiência (IEco) é um indicador que integra, em um único valor, o desempenho global de cada alternativa analisada. Seu cálculo baseia-se na soma das notas atribuídas a cada critério técnico, ambiental ou econômico.

A formulação é expressa por:

$$IEco = \sum_{i=1}^n Nota_i \quad \text{Equação (1)}$$

Nota_i = nota atribuída ao critério *i*, variando de 1 a 3 e **n** = número total de critérios avaliados.

3. Resultados

As pontuações de cada critério e os respectivos valores de IEco para os grupos de materiais foram sistematizados, possibilitando a comparação multicritério entre as soluções, com base nos estudos reunidos na Tabela 3.

Tabela 3: Estudos de referência

Tipo	Estudos
Convencionais	De Oliveira <i>et al.</i> (2019); Delatte (2014); Marchi <i>et al.</i> (2018); Souza <i>et al.</i> (2012); Tucci (2012)
Agregados de RCD	Huang e Wang (2024); Li <i>et al.</i> (2023); Silva Junior <i>et al.</i> (2021)
Fibras de materiais reciclados	Marinelli, Puthiyaveetil e Rasheed (2024); Oni, Xia e Liu (2020)
Adições de resíduos minerais/industriais	Fernandes <i>et al.</i> (2021); Jiang <i>et al.</i> (2025); Li <i>et al.</i> (2025); Teymouri <i>et al.</i> (2020; 2024); Zhang <i>et al.</i> (2025)
Resíduos de origem polimérica	Azunna <i>et al.</i> (2024); De Oliveira <i>et al.</i> (2019); Sekar <i>et al.</i> (2022)
Lig. geopoliméricos e biomassa	Arafa <i>et al.</i> (2021); Huang e Wang (2024); Merino-Lechuga <i>et al.</i> (2024; 2025)
Nanomateriais	Barišić <i>et al.</i> (2025); Yahyaee e Mofidi (2024)

Fonte: Os autores (2025)

A Tabela 4 apresenta o resultado final do IEco para cada grupo de concretos drenantes, obtidos a partir da atribuição das notas individuais e do subsequente somatório.

Tabela 4: Resultado da atribuição das notas baseadas nos estudos

Critérios	Notas						
	Convencionais	Agregados de RCD	Fibras de materiais reciclados	Adições de resíduos minerais e industriais	Resíduos de origem polimérica	Lig. Geopolim. e biomassa	Nanoadições
Permeabilidade	3	3	3	2	2	3	2
Vida útil	2	2	2	3	2	3	3
Resistência compressão	2	1	2	3	2	3	3
Resistência a flexão	2	1	3	3	2	3	2
Resistência à abrasão	2	2	3	3	3	3	3
Pegada de carbono	1	3	2	3	3	2	2
Custo	2	2	2	3	3	2	1
Total:	14	14	17	20	17	19	16

Fonte: Os autores (2025)

A análise da Tabela 4 mostra que as misturas com adições de resíduos minerais, industriais e siderúrgicos alcançaram o maior Índice de Ecoeficiência (IEco = 20), resultado de desempenho consistente nos critérios mecânicos, de durabilidade, pegada de carbono e custo. Esse comportamento está em consonância com estudos que apontam escória de alto-forno, cinzas volantes e outros subprodutos minerais como adições pozolânicas ou cimentícias eficazes, capazes de refinar a microestrutura, melhorar a resistência e reduzir emissões pela substituição parcial do clínquer (Fernandes *et al.*, 2021; Huang e Wang, 2024; Jiang *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2025; Teymouri *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2025). Na sequência, os ligantes geopoliméricos associados à biomassa (IEco = 19) apresentaram desempenho técnico comparável, com elevadas resistências à compressão e à flexão e boa durabilidade, porém com penalização no critério custo devido ao uso de ativadores alcalinos e maior complexidade de processamento (Arafa *et al.*, 2021; Merino-Lechuga *et al.*, 2024; 2025).

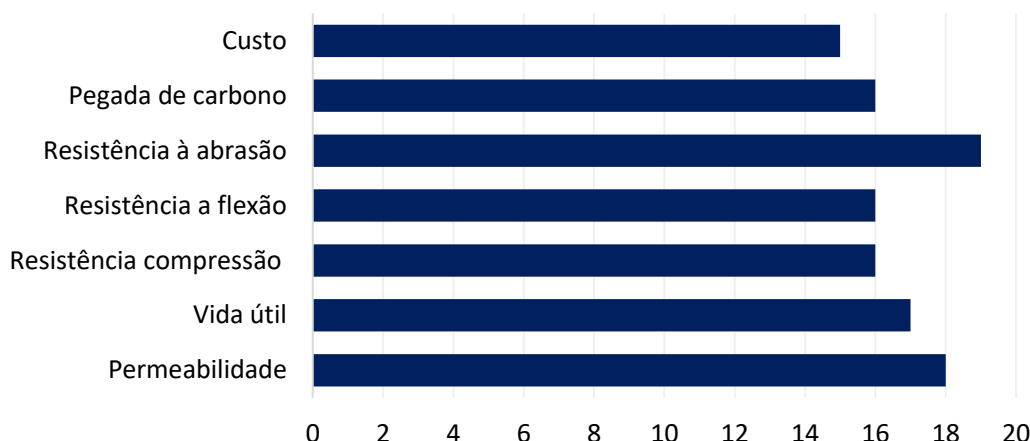


Figura 2: Gráfico de somatório das notas. Fonte: Os autores (2025)

A Figura 2 evidencia que o custo é o critério que mais contribui para reduzir o IEco global, sobretudo nos sistemas geopoliméricos e com nanoadições, em função dos encargos vinculados ao beneficiamento, transporte e ativação química. Em contrapartida, resistência à abrasão, permeabilidade e vida útil mostram desempenho satisfatório na maior parte das tipologias, reforçando o potencial técnico dos pavimentos permeáveis de concreto hipocarbônico. As soluções com fibras recicladas e resíduos poliméricos (IEco = 17) situam-se em faixa intermediária, combinando bom comportamento em flexão e abrasão com restrições de durabilidade e impactos ambientais ainda moderados (Azunna *et al.*, 2024; Huang e Wang, 2024; Marinelli, Puthiyaveetil e Rasheed, 2024; Silva Junior *et al.*, 2021). Os sistemas com nanomateriais (IEco = 16) apresentam ganhos localizados em densificação da matriz e resistência superficial (Barišić *et al.*, 2025; Yahyaee e Mofidi, 2024), mas permanecem limitados por custos elevados e ausência de normativas consolidadas. Por fim, os pavimentos convencionais e aqueles com RCD (IEco = 14) registram os menores índices de ecoeficiência, reflexo da alta pegada de carbono associada ao cimento Portland e da variabilidade dos resíduos, embora a reutilização de RCD ainda represente alternativa ambientalmente relevante em contextos de baixa solicitação estrutural (De Oliveira *et al.*, 2019; Silva Junior *et al.*, 2021).

4. Considerações finais

A aplicação do índice de ecoeficiência permitiu comparar, de forma sistemática, as diferentes composições de pavimentos drenantes, evidenciando as misturas com adições de resíduos minerais, industriais e siderúrgicos como a alternativa mais equilibrada. Materiais como escória de alto-forno e cinzas volantes, ao atuarem como adições pozolânicas e cimentícias, promovem o refinamento da microestrutura do concreto, elevam o desempenho mecânico e hidráulico e, simultaneamente, reduzem a fração de clínquer e a pegada de carbono. Em contraste, formulações baseadas em geopolímeros e nanomateriais apresentaram menor ecoeficiência global, em razão do maior custo e da complexidade de processamento, apesar de ganhos pontuais em propriedades específicas. O indicador proposto mostrou-se uma ferramenta simples e robusta para quantificar o desempenho técnico-ambiental e apoiar decisões alinhadas aos ODS 9, 11 e 12. Ao valorizar resíduos de fácil processamento, o estudo reforça a economia circular e o fortalecimento de cadeias de

reciclagem, posicionando os pavimentos drenantes hipocarbônicos como elementos estratégicos para cidades inteligentes, resilientes e socialmente inclusivas.

Referências

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Conceitos e requisitos para concreto permeável**. São Paulo: ABCP, 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ABDOLLAHIAN, S.; KAZEMI, H.; ROCKAWAY, T. D.; GULLAPALLI, V. Stormwater quality benefits of permeable pavement systems with deep aggregate layers. **Environments**, v. 5, n. 6, p. 68, 2018. DOI: 10.3390/environments5060068.

ADMIRAAL, H.; CORNARO, A. Future cities, resilient cities – The role of underground space in achieving urban resilience. **Underground Space**, v. 5, n. 3, p. 223–228, 2020. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.02.001.

AHN, J. X-ray image analysis of porosity of pervious concretes. **International Journal of Geomate**, 2014. DOI: 10.21660/2014.11.3249.

ARAFA, Salaheddin *et al.* Investigation into the permeability and strength of pervious geopolymer concrete containing coated biomass aggregate material. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 2075–2087, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.093.

AWOLUSI, T. F. *et al.* Evaluation of the properties of fiber-reinforced pervious concrete pavement incorporating glass powder and kaolin. **The Open Civil Engineering Journal**, v. 18, n. 1, 2024. DOI: 10.2174/0118741495303730240307101941.

AZUNNA, S. U. *et al.* Review on the Characteristic Properties of Crumb Rubber Concrete. **Cleaner Materials**, v. 12, 100237, mar. 2024. DOI: 10.1016/j.clema.2024.100237.

BARIŠIĆ, I. *et al.* Assimilating nanographene into the pervious concrete – surface treatment for enhanced paving performance. **Case Studies in Construction Materials**, v. 23, e04917, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04917.

BHARATI, S. K. *et al.* Developing porous concrete interlocking pavement blocks for low-volume roads. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119135, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119135.

BITTENCOURT, S. V. *et al.* Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, e00473, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00473.

BRASWELL, A. S. *et al.* Hydrologic and water quality evaluation of a permeable pavement and biofiltration device in series. **Water**, v. 10, n. 1, p. 33, 2018. DOI: 10.3390/w10010033.

CASCUDO, O. Ecoeficiência dos concretos e durabilidade das estruturas. **Concreto & Construções**, ed. 108, out.–dez. 2022.

CHANG, H. *et al.* Understanding Urban Flood Resilience in the Anthropocene: A Social–Ecological–Technological Systems (SETS) Learning Framework. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 111, n. 3, p. 837–857, 2020. DOI: 10.1080/24694452.2020.1850230.

DAI, K. *et al.* Hydrological effects of prefabricated permeable pavements on parking lots. **Water**, v. 14, n. 1, p. 45, 2021. DOI: 10.3390/w14010045.

DE LUCA, C. *et al.* Adaptive resilience of and through urban ecosystem services: a transdisciplinary approach to sustainability in Barcelona. **Ecology and Society**, v. 26, n. 4, p. 38, 2021. DOI: 10.5751/ES-12535-260438.

DE OLIVEIRA, E. A. *et al.* Environmental Implications of CO₂ Absorption by Pervious Concrete Pavement in Urban Roads. In: **XIII International Conference on Virtual City and Territory**, UPC, Barcelona, 2019. DOI: 10.5821/ctv.8425.

FERNANDES, A. M. G. *et al.* Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete paving blocks containing PET and rubber waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00733, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00733.

FERNANDES, G. *et al.* Pervious concrete with waste foundry sand: mechanical and hydraulic properties. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00951, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00951.

GIRI, P.; MAITI, R. Comprehensive assessment of engineering and environmental performance of permeable concrete with waste tire rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, p. 139602, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139602.

JIANG, Han *et al.* Study of municipal solid waste incinerator bottom ash in porous concrete: mechanical, physical, and environmental evaluation. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, e01234, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e01234.

KHAJURIA, A. *et al.* The SDG accelerator: Circular economy solutions through efficient sustainable consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 381, 135103, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135103.

LI. The feasibility analysis of recycled aggregates from construction and demolition waste for permeable pavement. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 27, p. 535–550, 2023. DOI: 10.1007/s12205-022-0767-0.

LI, T. *et al.* Multi-functional properties of low-carbon travertine aggregate pervious concrete modified by waste limestone powder. **Developments in the Built Environment**, v. 21, 100590, 2025. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100590.

MARCHI, B. *et al.* Smart Highway: Uma breve revisão das rodovias inteligentes quanto sua vida útil. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT**, 2018.

MARINELLI, A.; RASHEED, L. P. H. Considering environmental effects on porous concrete applications: an experimental investigation. **Procedia Structural Integrity**, v. 54, p. 332–339, 2024. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.091.

MERINO-LECHUGA, A. M. *et al.* Accelerated carbonation of alkali-activated vibro-compacted pervious concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v. 449, 138458, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138458.

MERINO-LECHUGA, A. M. *et al.* Technical and environmental assessment of CO₂-cured alkali-activated pervious paving blocks incorporating recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 489, 142286, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142286.

ONI, B.; XIA, J.; LIU, M. Mechanical properties of pressure moulded fibre reinforced pervious concrete pavement brick. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, e00431, 2020. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00431.

RASHID, M. A. *et al.* Hybrid green permeable pave with hexagonal modular pavement systems. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 16, p. 012055, 2013. DOI: 10.1088/1755-1315/16/1/012055.

SAÑUDO-FONTANEDA, L. A. *et al.* Infiltration behaviour of polymer-modified porous concrete and porous asphalt surfaces used in SuDS techniques. **Clean – Soil, Air, Water**, v. 42, n. 2, p. 139–145, 2013. DOI: 10.1002/clen.201300156.

SAVIĆ, A. *et al.* Development of porous concrete pavements with waste materials for flood control. **Science of Sintering**, 2025. DOI: 10.2298/sos241107002s.

SEKAR, A. R. C. *et al.* Investigation on the Behavior of the Plastone Blocks Made with Waste Plastics and Aggregates – Substitute for Cement Concrete Paver Blocks. **Thiagarajar College of Engineering**, Madurai, Índia. DOI: 10.2139/ssrn.4136987.

SHUBBAR, A. *et al.* Performance comparison of 45° and 90° herringboned permeable interlocking concrete pavement. **Infrastructures**, v. 8, n. 5, p. 97, 2023. DOI: 10.3390/infrastructures8050097.

SILVA JUNIOR, V. O. *et al.* The study of precast pavers production from concrete blocks waste. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 42, n. 1, p. 21–28, 2021. DOI: 10.5433/1679-0375.2021v42n1p21.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade de Áreas Urbanas. **RBRH**, v. 17, n. 2, p. 9–18, 2012. DOI: 10.21168/rbrh.v17n2.p9-18.

TEYMOURI, E. *et al.* Comparative analysis of adsorbent pervious concrete: engineering properties and environmental consideration. **Journal of Advanced Research in Applied Mechanics**, v. 119, n. 1, p. 92–111, 2024. DOI: 10.37934/aram.119.1.92111.

THAI, M. *et al.* Exploring the efficacy of travertine pervious concrete for hydraulic and mechanical properties. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, e01200, 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e01200.

TUCCI, C. E. M. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS, 2012.

UNEP. Sustainable Development Goals.

WANG, Y. *et al.* Insights into the Properties of Pervious Concrete Modified with Polymers and Fine Aggregate. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, e04627, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04627.

WBCSD. Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

YAHYAEE, T.; MOFIDI, S. R. The impact of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical and environmental properties of porous concrete in removing pollutants for use in surface runoffs. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, e02697, 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02697.

ZHANG, Y. *et al.* Study of municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA) and coal fly ash (CFA) applied to concrete pavement bricks: mechanical properties, microstructure, durability. **Case Studies in Construction Materials**, v. 23, e05057, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e05057.

ZHAO, J. *et al.* Stormwater runoff pollution control performance of permeable concrete pavement and constructed wetland combined system: toward on-site reuse. **Water Science & Technology**, v. 88, n. 6, p. 1345–1357, 2023. DOI: 10.2166/wst.2023.273.

ZHOU, Z. *et al.* Review on the characteristic properties of crumb rubber concrete. **Cleaner Materials**, v. 2, 100066, 2024. DOI: 10.1016/j.clema.2024.100066.