

SUBMETIDO 20/06/2024

APROVADO 27/08/2024

PUBLICADO ON-LINE 16/09/2024

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 07/11/2025

EDITORA ASSOCIADA

Profa. Dra. Nelma Mirian Chagas de Araújo

 Mayara da Silva Lima ^[1]

 Maria Thereza
Rocha Chaves ^[2]

 Marcos Fábio
Porto de Aguiar ^[3]

 Teresa Raquel
Lima Farias ^[4] *

[1] engenheiramayaralima@gmail.com

[2] mtchaves@gmail.com

[3] marcosporto@ifce.edu.br

[4] teresafarias@ifce.edu.br

Departamento de Construção Civil,
Instituto Federal do Ceará (IFCE),
Fortaleza, Ceará, Brasil

* Autor para correspondência.

Influência do resíduo de construção e de demolição como agregado na produção de concreto para pavimentos permeáveis

RESUMO: A indústria da construção é uma das principais geradoras globais de resíduos, o que torna a reciclagem desses materiais uma solução crucial para o gerenciamento sustentável. Este estudo avaliou a viabilidade do uso de resíduos de construção e de demolição (RCD) como agregados na produção de concreto permeável, comparando seu desempenho com concreto feito de agregados naturais e uma mistura 1:1 de ambos. O método envolveu ensaios de compressão axial, ensaios de resistência à flexão e medições de condutividade hidráulica, levando em consideração as condições hidrológicas específicas da região estudada. Os resultados demonstraram que, embora as lajes de concreto permeáveis contendo RCD atendessem aos padrões regulatórios mínimos de condutividade hidráulica, apenas as lajes com agregados naturais satisfizeram os requisitos de resistência mecânica. A avaliação de uma seção experimental de pavimento permeável, construída *in situ* usando agregados naturais, indicou que a condutividade hidráulica do sistema pavimento-solo foi oito vezes menor que a da laje de concreto permeável, classificando-a como um pavimento com condutividade hidráulica média. Durante o monitoramento de 24 eventos de chuva, apenas um evento, com precipitação superior a 50 mm, resultou em um coeficiente de escoamento superficial de 0,16%, confirmando a eficácia do pavimento permeável na redução do escoamento superficial. Essas descobertas destacam o potencial do concreto permeável com RCD como uma solução sustentável para drenagem urbana, apesar das limitações de resistência mecânica que precisam ser abordadas em pesquisas futuras. Portanto, estudos adicionais são recomendados para explorar estratégias para melhorar a resistência mecânica para otimizar o uso de RCD em concreto permeável.

Palavras-chave: composição de concreto permeável; condutividade hidráulica; drenagem urbana; pavimento permeável; resíduos de construção e de demolição.

Influence of construction and demolition waste as aggregate in the production of concrete for permeable pavements

ABSTRACT: The construction industry is one of the main global waste generators, making recycling of these materials a crucial solution for sustainable management. This study evaluated the feasibility of using construction and demolition waste (CDW) as aggregates in producing permeable concrete, comparing its performance with concrete made from natural aggregates and a 1:1 blend of both. The method involved axial compression tests, flexural strength tests, and hydraulic conductivity measurements, taking into account the specific hydrological conditions of the studied region. The results demonstrated that, although permeable concrete slabs containing CDW met the minimum regulatory standards for hydraulic conductivity, only slabs with natural aggregates satisfied the mechanical strength requirements. The assessment of an experimental section of permeable pavement, constructed in situ using natural aggregates, indicated that the hydraulic conductivity of the pavement-soil system was eight times lower than that of the permeable concrete slab, classifying it as a pavement with medium hydraulic conductivity. During the monitoring of 24 rainfall events, only one event, with precipitation exceeding 50 mm, resulted in a surface runoff coefficient of 0.16%, confirming the effectiveness of permeable pavement in reducing surface runoff. These findings highlight the potential of permeable concrete with CDW as a sustainable solution for urban drainage, despite the mechanical strength limitations that need to be addressed in future research. Therefore, additional studies are recommended to explore strategies for improving its mechanical resistance and optimizing the use of CDW in permeable concrete.

Keywords: construction and demolition waste; hydraulic conductivity; permeable concrete composition; permeable pavement; urban drainage.

1 Introdução

O rápido avanço econômico tem impulsionado a expansão da construção civil, resultando em uma crise ambiental global devido ao esgotamento dos recursos naturais, geralmente não renováveis, e à produção excessiva de resíduos. A indústria da construção desempenha um papel essencial na economia de qualquer país, sendo uma das maiores geradoras de resíduos em escala mundial (Marques *et al.*, 2020).

De acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio (ABREMA, 2023), estima-se que, no Brasil, foram geradas cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção civil e de demolição (RCD) no ano de 2022. A região Sudeste apresenta a maior geração anual, com 50,6%, seguida pela região Nordeste, com 19,6%, a região Sul, com 14,0%, a região Centro-Oeste, com 11,9%, e, por fim, a região Norte com 3,8%.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) frequentemente contêm substâncias consideradas impurezas ou contaminantes, como betume, polímeros, gesso, materiais orgânicos, amianto e substâncias reativas. Esses componentes podem comprometer não apenas o desempenho estrutural dos materiais produzidos a partir desses resíduos,

mas também causar impactos ambientais significativos. A disposição adequada de RCD é, portanto, um dos grandes desafios contemporâneos (Carneiro *et al.*, 2001; Jacobi; Besen, 2011; Oliveira, 2017).

Nesse contexto, práticas como reciclagem, recuperação e reutilização de resíduos são essenciais e devem ser incentivadas como alternativas viáveis para mitigar os efeitos negativos associados ao descarte inadequado desses materiais (Dutta; Das, 2010). A incorporação de RCD pode proporcionar benefícios ambientais, sociais e econômicos, contribuindo para a redução dos impactos adversos da indústria da construção, como, por exemplo, na fabricação de argamassas e concretos (Batista *et al.*, 2022; Silva; Melo, 2023), na pavimentação intertravada (Bins *et al.*, 2022) e na pavimentação permeável (Oliveira, 2017; Santos *et al.*, 2018).

A urbanização crescente tende a reduzir a condutividade hidráulica das áreas que contribuem para o reabastecimento dos lençóis freáticos. A expansão de superfícies impermeáveis pode resultar em um aumento significativo do escoamento superficial, sobrecarregando os sistemas de drenagem existentes. Além disso, o manejo e descarte inadequados de resíduos agravam problemas como enchentes e inundações em áreas urbanas.

Pavimentos permeáveis surgem como uma solução eficaz para os desafios de drenagem urbana, dada sua capacidade superior de infiltração, que permite a penetração da água em sua estrutura. Isso não só reduz o volume de escoamento superficial, mas também contribui para a melhoria da qualidade da água, ao reter poluentes presentes no escoamento (Becker; Conegero; Pinheiro, 2022). A adoção desses pavimentos torna-se cada vez mais necessária como medida para amortecer vazões de pico e mitigar os impactos das chuvas em áreas densamente urbanizadas (Rama; Shanthi, 2018; Valença *et al.*, 2021).

A escolha do RCD como agregado para concreto permeável fundamenta-se em características técnicas e ambientais, como a alta disponibilidade do material. Ademais, a utilização de RCD como agregado graúdo em concreto para pavimentos permeáveis representa uma destinação sustentável para esses resíduos, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de agregados naturais.

Sob o ponto de vista técnico, os RCDs contêm materiais amplamente utilizados na construção civil, como tijolos, argamassa e concreto, que possuem o potencial de substituir os agregados convencionais. No entanto, para viabilizar essa substituição e influenciar políticas públicas ou práticas da indústria da construção, é imprescindível avaliar de que maneira essa incorporação pode ser realizada, de forma a atender aos requisitos de desempenho mecânico e hidráulico estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras vigentes.

A elevada porosidade e a absorção dos agregados reciclados, associadas à heterogeneidade intrínseca desses materiais, contribuem para melhorar as propriedades hidráulicas do concreto. Contudo, acabam prejudicando a resistência dos concretos que incorporam RCD em suas misturas (Resende *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2020). A conformidade com esses parâmetros normativos é fundamental para assegurar a viabilidade e a segurança da aplicação dos RCDs em concreto permeável, garantindo que suas propriedades atendam aos padrões exigidos para aplicações estruturais e de drenagem.

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar o desempenho das propriedades mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis fabricados com agregados naturais e reciclados. Este estudo compreende uma seção de materiais e métodos (seção 2) que incluiu o estudo do traço do concreto permeável e a confecção

das placas de concreto, a análise da condutividade hidráulica do solo, das placas e do pavimento *in situ*, o dimensionamento da camada de armazenamento do pavimento permeável e a parcela experimental. Na seção de resultados (seção 3), foram apresentadas a caracterização dos agregados, a resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão, a condutividade hidráulica do solo, das placas de concreto permeável e da parcela experimental, bem como o impacto na redução do escoamento superficial. Por fim, na seção 4, são apresentadas as considerações finais deste estudo.

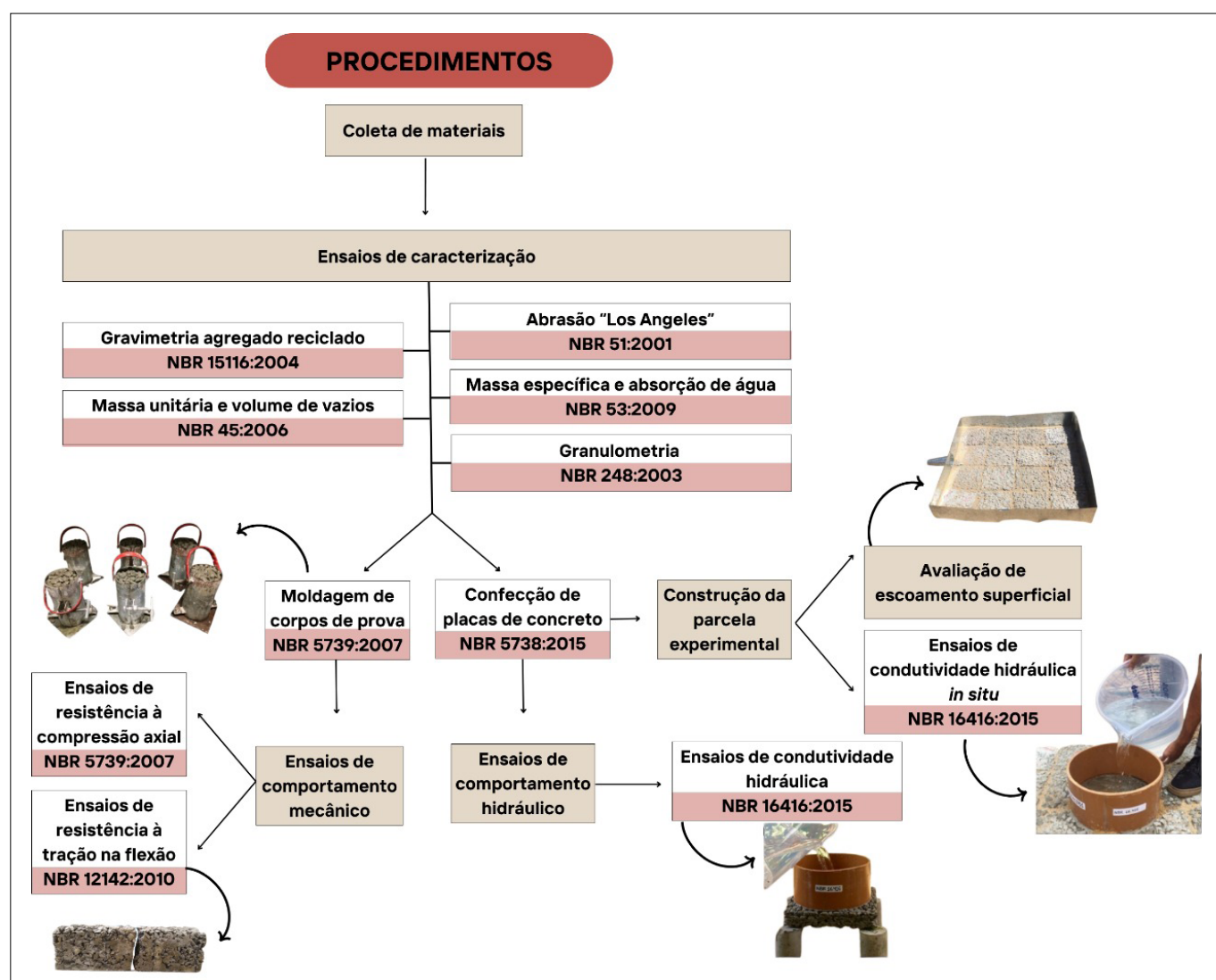
Figura 1 ▼

Fluxograma dos procedimentos metodológicos realizados neste estudo.

Fonte: elaborado pelos autores

2 Materiais e métodos

Nesta pesquisa, as matrizes de concreto foram produzidas utilizando Agregados Naturais (AN) e Agregados Reciclados (AR) provenientes de RCD. A síntese dos procedimentos metodológicos realizados está ilustrada na Figura 1.



Inicialmente, na etapa de campo, foram coletadas amostras de agregados reciclados de RCD em uma usina de reciclagem para a confecção das placas de concreto permeável. A fim de garantir a representatividade das amostras em relação ao material disponível na usina, adotou-se um protocolo sistemático de coleta. Múltiplos

lotes de agregados foram coletados em diferentes pontos de estocagem e em momentos distintos do processo de reciclagem, visando capturar a variabilidade inerente ao material processado. Além disso, o material coletado foi homogeneizado antes de ser submetido às análises laboratoriais e à execução das placas.

Os ensaios de caracterização dos agregados reciclados incluíram gravimetria, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004), massa unitária e volume de vazios, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), abrasão “Los Angeles”, pela NBR NM 51 (ABNT, 2001), e testes de massa específica e absorção de água, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009). Todos os ensaios foram realizados com base nas normas da ABNT, que padronizam os métodos construtivos nacionalmente.

Foram analisadas as seguintes proporções de agregados: a) Concreto Referência (CREF), composto por 100% de agregado natural; b) Concreto com Agregado Reciclado de Resíduo Misto (CARM), com 70% de agregado natural e 30% de agregado de resíduo misto; e c) Concreto com Agregado Reciclado (CAR), composto por 100% de AR. A escolha do percentual de 70% de agregado natural e 30% de RCD para a composição dos pavimentos permeáveis visa não apenas otimizar o equilíbrio entre propriedades mecânicas e ambientais, mas também serve como um ponto de partida metodológico para estudos futuros. Estudos, como o de Brasileiro *et al.* (2020), sugerem o uso de taxas mais baixas de substituição de agregados naturais por reciclados.

Esse equilíbrio permite avaliar as interações e sinergias entre os materiais reciclados e os agregados convencionais, proporcionando um referencial para dosagens em pesquisas subsequentes. Ao adotar essa proporção, espera-se estabelecer uma base consistente para futuras investigações, permitindo que outros estudos possam ajustar ou expandir as formulações conforme as necessidades de seus próprios contextos experimentais e objetivos específicos, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico e a promoção de práticas mais sustentáveis na construção civil.

Para obter resultados relativos à resistência à compressão de cada uma das matrizes de concreto, a metodologia seguiu as orientações da norma NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando uma amostra de 18 corpos de prova (CP) cilíndricos, sendo 6 CPs para cada grupo (CAR, CARM e CREF).

Os ensaios para determinação da resistência à tração indireta, por meio de testes de flexão em corpos de prova prismáticos, seguiram as prescrições da NBR 12142 (ABNT, 2010). Ressalta-se que os seis corpos de prova submetidos aos testes de flexão foram selecionados com base na mistura que apresentou maior representatividade em termos de resistência à compressão. A partir dessa mistura, três placas foram utilizadas para medir a condutividade hidráulica, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015a).

Para a análise da condutividade hidráulica, seguindo a metodologia da NBR 16416 (ABNT, 2015b), foram moldadas placas de concreto permeável. A composição com melhores resultados de desempenho hidráulico e mecânico foi utilizada na construção de uma parcela experimental de pavimento permeável. A condutividade hidráulica saturada *in situ* foi determinada e o coeficiente de escoamento superficial foi avaliado com base em eventos pluviométricos reais. Para monitorar os eventos de precipitação, foi instalada uma estação pluviométrica automática no local da parcela experimental.

2.1 Estudo do traço do concreto permeável e confecção das placas de concreto

Tabela 1 ▼

Descrição dos traços experimentais.

Fonte: dados da pesquisa

Inicialmente, adotou-se um traço de 1:4 com uma relação água/cimento (a/c) em torno de 0,4, conforme estudos realizados por Claudino (2018) e Silva *et al.* (2019). O concreto com essa dosagem foi identificado como concreto de agregado reciclado (CAR). Foram elaborados três traços distintos, descritos na Tabela 1.

Identificação e características	Traço	Consumo de materiais em kg/m ³				
		Cimento	Areia	Brita AR	Brita AN	Água
CAR: Concreto com 100% Agregado reciclado (AR)	1: 0: 4: 0: 0,4	318	0	1274	0	127
CARM: Concreto com 30% Agregado reciclado (AR), 70% Agregado Natural (NA), 8% com teor de finos ^a e aditivo	1: 0,32: 1,2: 2,8: 0,39	460	146	552	1.289	179
CREF: Concreto com 100% Agregado Natural (NA), 20% com teor de finos ^a e aditivo	1: 0,6: 0: 3: 0,37	415	249	0	1.244	153

^a Material passante na #150mm e retido na #75 mm

Placas de concreto permeável foram moldadas para análise da condutividade hidráulica em laboratório. Foram confeccionadas três placas distintas, produzidas com CREF, CARM e CAR, com dimensões de 35 cm de largura, 35 cm de comprimento e 6 cm de altura.

Em uma etapa posterior, para a construção de uma parcela experimental de campo de 1 m², foram confeccionadas 16 placas de concreto permeável utilizando o traço que apresentou o melhor desempenho mecânico e hidráulico após as análises laboratoriais. Cada placa da parcela possui 25 cm de largura, 25 cm de comprimento e alturas variando entre 6 cm e 6,5 cm.

2.2 Análise da condutividade hidráulica do solo, das placas e do pavimento *in situ*

A condutividade hidráulica é uma propriedade física que caracteriza a capacidade de um material de permitir a passagem de água através de seus poros, sob a influência de um gradiente de pressão. Em pavimentos permeáveis, essa medida é fundamental para avaliar a eficiência com que o sistema pode infiltrar e drenar a água, contribuindo para a gestão das águas pluviais e para a redução do escoamento superficial. A NBR 13292 (ABNT, 2021), que trata da determinação da condutividade hidráulica em solos, adapta o ensaio para pavimentos permeáveis.

Para o dimensionamento da base permeável de armazenamento (Figura 2), foi necessária a realização de uma análise da condutividade hidráulica do solo no qual o pavimento foi implantado. Para isso, amostras indeformadas foram coletadas na camada superficial do solo.

Figura 2 ►

Composição do pavimento permeável.

Fonte: adaptada de ABNT (2015b)

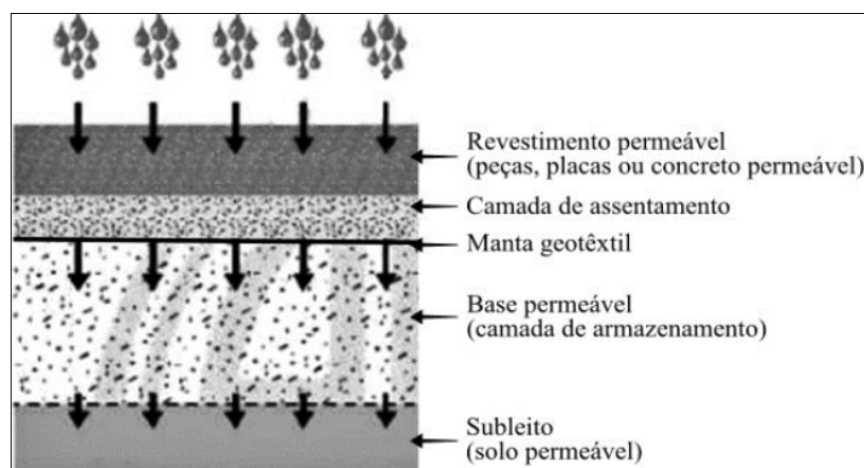


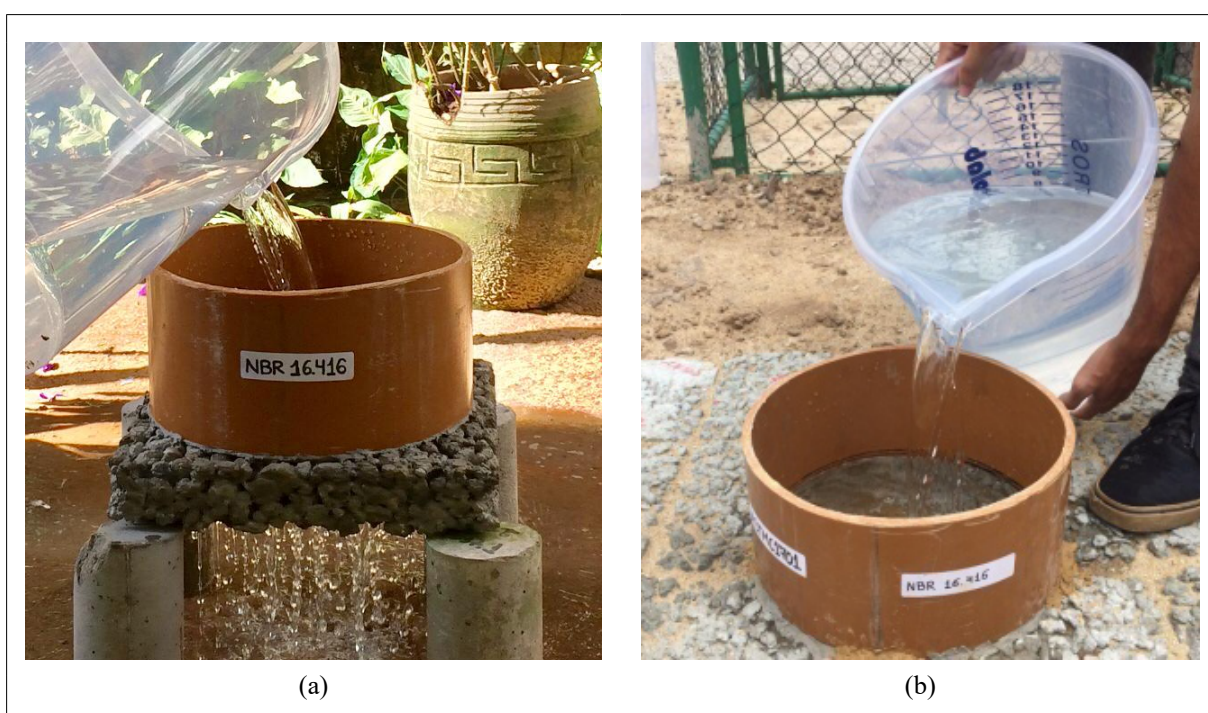
Figura 3 ▼

Teste de condutividade hidráulica em: (a) placa de concreto permeável;

(b) parcela *in situ*.

Fonte: arquivo dos autores

A condutividade hidráulica (K) foi determinada utilizando o método do Permeâmetro de Carga Constante, conforme a metodologia descrita na NBR 13292 (ABNT, 2021). Para a avaliação da condutividade hidráulica das placas, adotaram-se os procedimentos descritos pela NBR 16416 (ABNT, 2015b), utilizando um anel de infiltração cilíndrico vazado, com diâmetro de 300 mm, acoplado no centro da placa de concreto. A água foi vertida no anel de infiltração conforme a norma que regulamenta este ensaio (Figura 3a).



O método sugerido na norma envolve a aplicação de um fluxo de água sobre uma amostra do pavimento, medindo-se o volume de água infiltrada em um determinado período. O ensaio foi realizado duas vezes em cada placa, e os tempos para infiltração total da massa de água foram registrados conforme as diretrizes da NBR 16416 (ABNT, 2015b). Adicionalmente, a condutividade hidráulica do concreto permeável foi analisada *in situ* (Figura 3b). As medições foram realizadas no início, meio e final do período de monitoramento, com o objetivo de avaliar a variação no desempenho hidráulico ao longo do tempo, em função da acomodação das camadas e da possível colmatção do pavimento.

A condutividade hidráulica (K) foi calculada conforme a Equação 1, conforme indicado na NBR 16416 (ABNT, 2015b):

$$K = \frac{C \times m}{d^2 \times t} \quad (1)$$

onde: K é a condutividade hidráulica (em mm/h); C é o fator de conversão do sistema SI, com valor igual a 4.583.666.000; m é a massa de água infiltrada (em kg); d é o diâmetro interno do cilindro (em mm) e t é o tempo de percolação da água (em s).

2.3 Dimensionamento da camada de armazenamento do pavimento permeável

A camada subjacente ao revestimento permeável, que funciona como reservatório, deve possuir espessura suficiente para armazenar temporariamente o volume de água drenado a partir de sua superfície. Para isso, essa camada de base foi dimensionada com base na chuva de projeto.

A NBR 16416 (ABNT, 2015b) estabelece critérios para o dimensionamento hidráulico das camadas dos pavimentos permeáveis. A espessura da base granular ou camada reservatória é definida pela Equação 2, sendo recomendável considerar as condições locais de solo e precipitação:

$$H_{MAX} = \frac{\Delta Q_c \times R + P - f \times T_e}{V_r} \quad (2)$$

onde: H_{MAX} é a espessura total da camada reservatória (em m); ΔQ_c é a precipitação excedente da área de contribuição para uma dada chuva de projeto (em m); R é a relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável, considerada igual a 1 neste estudo; P é a precipitação de projeto (em m); f é a taxa de infiltração da água no solo (em m/h); T_e é o tempo efetivo de enchimento da camada reservatória, geralmente igual a 2 horas; V_r é o índice de vazios da camada.

Conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015b), a precipitação de projeto deve seguir a metodologia de dimensionamento do sistema de microdrenagem, utilizando equações e curvas de intensidade, duração e frequência (IDF) para gerar chuvas de projeto, com base em valores de precipitação em intervalos menores do que a duração total da chuva. Ainda segundo essa norma, o período de retorno mínimo para o dimensionamento hidráulico de pavimentos permeáveis deve ser de dez anos, considerando-se uma duração mínima de 60 minutos.

A intensidade de precipitação foi calculada utilizando a equação IDF (Equação 3), desenvolvida por Silva, Palácio Junior e Campos (2013) para Fortaleza, para períodos de retorno de 5 a 100 anos e durações de chuva de até 120 minutos:

$$i = \frac{2.345,29 \times T^{0,172}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (3)$$

onde: i é a intensidade média de chuva, em mm/h, para a duração da chuva de t minutos; T denota o período de retorno da precipitação, em anos.

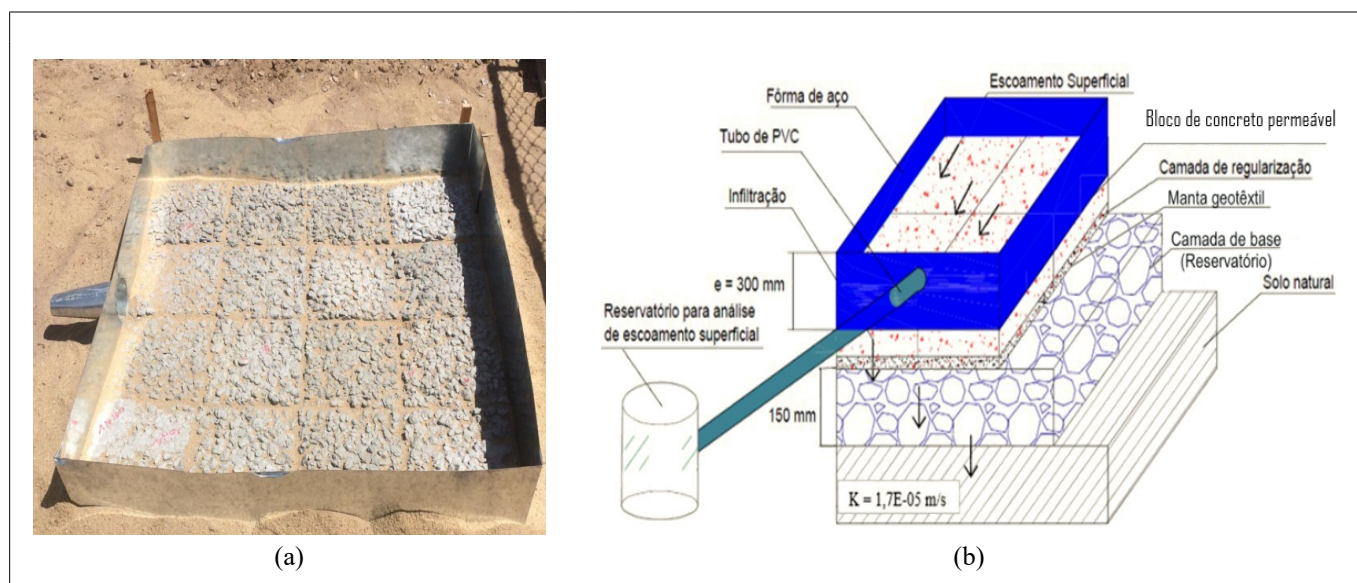
Ao aplicar os coeficientes ΔQ_c , R , P , f , T_e e V_r na Equação 2, obteve-se um valor de H_{MAX} insignificante, devido à intensidade de chuva de projeto de 68,56 mm/h (ou $1,9 \times 10^{-5}$ m/s) e à taxa de infiltração do solo de $1,7 \times 10^{-5}$ m/s, calculadas a partir da Equação 3 para um período de retorno de 20 anos e duração de chuva de 1 hora. Diante disso, optou-se por adotar a espessura mínima de camada de armazenamento de 150 mm, conforme recomendação de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), para garantir maior eficiência e taxa de infiltração para o pavimento permeável.

2.4 Parcela experimental da pesquisa

Figura 4 ▼

Parcela experimental da pesquisa sobre pavimento permeável. (a) Com forma acoplada para análise da capacidade de infiltração. (b) Esquema da estrutura do pavimento permeável. Fonte: arquivo dos autores

A parcela experimental foi instalada no Campus Fortaleza do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), com a montagem completa realizada em 23 de dezembro de 2019, e o primeiro evento de precipitação registrado em 30 de dezembro de 2019. Na Figura 4a, observa-se a parcela experimental com as fôrmas de aço acopladas. A Figura 4b ilustra um esquema da estrutura do pavimento permeável montado, que consiste em uma camada de revestimento permeável (concreto permeável) de 60 mm, assentada em uma camada de regularização de aproximadamente 50 mm, sobre uma camada de base (armazenamento) de 150 mm.



Ao final de cada evento pluviométrico, verificou-se se havia volume de água escoado superficialmente e armazenado no reservatório de escoamento. O cálculo do coeficiente de escoamento superficial baseou-se nesse volume armazenado, em conjunto com os dados de precipitação registrados pela estação pluviométrica automática.

3 Resultados e discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos na investigação da eficácia do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados para a fabricação de concreto permeável. Os principais parâmetros analisados incluem a resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão, a condutividade hidráulica do solo e das placas de concreto permeável, bem como o impacto na redução do escoamento superficial.

3.1 Caracterização dos agregados

Esta subseção detalha a caracterização dos agregados utilizados, abordando a composição gravimétrica, o desgaste por abrasão, a massa específica e absorção de água, além das massas unitárias e dos volumes de vazios.

3.1.1 Composição gravimétrica do agregado reciclado

Os resultados da análise visual da composição dos agregados reciclados graúdos, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004), são apresentados na Tabela 2. Observou-se que a amostra é predominantemente composta por concreto e argamassa, representando mais de 80% do total (Figura 5). A presença de cerâmica foi de 5,65%, enquanto a de asfalto foi de 13,88%. Com base na predominância de concreto e argamassa, classifica-se o agregado reciclado como Agregado de Resíduo Misto (ARM).

Figura 5 ►

Caracterização visual do agregado reciclado, sendo
(a) concreto/argamassa,
(b) asfalto e
(c) material cerâmico.
Fonte: arquivo dos autores

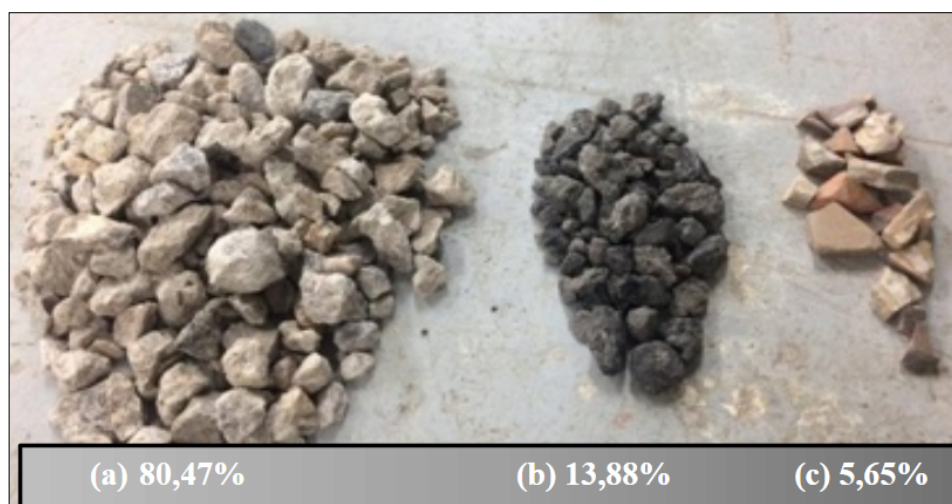


Tabela 2 ►

Composição gravimétrica do agregado reciclado.
Fonte: dados da pesquisa

Material	Grupo	Porcentagem (%)
Cerâmica	G3	5,65
Asfalto	G4	13,88
Concreto/argamassa	G1 e G2	80,47

Após os ensaios mecânicos, concluiu-se que seria necessário melhorar a composição do agregado reciclado. Assim, a porcentagem de asfalto e cerâmica foi eliminada, resultando em um agregado composto 100% por resíduos de concreto (ARC). Foram então utilizados agregados ARM e ARC em diferentes traços de concreto.

3.1.2 Desgaste por abrasão Los Angeles dos agregados

Os resultados do ensaio de abrasão Los Angeles indicaram um desgaste de 37% para o AN (Agregado Natural), 32% para o ARC (Agregado Reciclado de Concreto) e 49%

para o ARM (Agregado de Resíduo Misto) (Tabela 3). Verificou-se que o desgaste do ARM foi 32% superior ao do AN e 53% maior em comparação ao ARC. De acordo com o DNIT (2006), para uso em camadas granulares de pavimentos, o desgaste por abrasão Los Angeles deve ser igual ou inferior a 50%, podendo valores superiores serem aceitos com base em experiência de uso.

Tabela 3 ►

Resultados do ensaio de
abrasão Los Angeles.
Fonte: dados da pesquisa

Material	Perda por abrasão (%)
AN	37
ARC	32
ARM	49

Tabela 4 ▼

Valores de massas
específicas e de absorção de
água do agregado reciclado,
da mistura do agregado
reciclado com o natural e do
agregado natural.
Fonte: dados da pesquisa

Com base nesses resultados, todos os agregados estudados são considerados adequados para compor camadas de pavimentos.

3.1.3 Massa específica e absorção de água dos agregados

Os valores de absorção de água e de massa específica seca, saturada e aparente obtidos para o agregado reciclado (AR), para o agregado natural (AN) e para a mistura de ambos na proporção de 50% estão apresentados na Tabela 4.

Característica	Agregado reciclado	Mistura AR e AN 50%	Agregado natural
Massa específica seca (g/cm ³)	2,517	2,401	2,648
Massa específica saturada (g/cm ³)	2,225	2,343	2,615
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,341	2,370	2,628
Absorção de água (%)	5,20	1,19	0,48

Em relação às massas específicas, infere-se que, entre as três amostras analisadas, o agregado natural apresentou os maiores valores de massa específica. Quanto aos valores de absorção de água, observou-se que a absorção do agregado reciclado foi aproximadamente dez vezes superior à do agregado natural. O agregado reciclado desta pesquisa apresentou uma absorção de 5,2%. Embora elevado, esse valor está dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004), que define requisitos para a utilização de agregados reciclados de classe A em pavimentação e na preparação de concretos sem função estrutural. De acordo com essa norma, os agregados de resíduos de concreto (ARC) devem ter absorção máxima de 7%, enquanto os agregados de resíduos mistos (ARM), como os utilizados neste estudo, podem ter absorção igual ou inferior a 12%.

É notório que agregados reciclados apresentam valores de absorção de água mais elevados em comparação com agregados naturais. Santos (2017) registrou uma absorção de 8,62% para AR, aproximadamente cinco vezes maior que a do AN, que foi de 1,69%. Oliveira (2017) encontrou uma absorção de 6,57% para AR. A absorção de 5,2% encontrada nesta pesquisa é inferior aos valores obtidos por esses autores, mas ainda dentro dos limites estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004). Segundo Cabral (2007), essas diferenças são atribuídas à variabilidade na composição e

porosidade dos RCD, além do método de britagem utilizado. O autor salienta que a consideração dessas características é essencial ao se utilizar agregados reciclados na produção de concreto.

Tam, Gao e Tam (2005) afirmam que agregados com alta absorção de água geralmente resultam em concretos com desempenho inferior, afetando propriedades como resistência, durabilidade, deformação e retração.

Tabela 5 ▼

Valores de massas unitárias soltas e compactadas e volume de vazios do agregado reciclado, do agregado natural e da mistura de ambos.
Fonte: dados da pesquisa

3.1.4 Massa unitária solta e compactada dos agregados e volume de vazios

Os valores de volume de vazios e de massas unitárias soltas e compactadas para o agregado reciclado, o agregado natural e a mistura de ambos em proporção de 50% estão apresentados na Tabela 5.

Característica	Agregado reciclado	Mistura AR e AN 50%	Agregado natural
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,187	1,299	1,380
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,302	1,431	1,484
Volume de vazios (%)	50,57	43,15	45,92

Com base nos resultados, observa-se que os agregados reciclados apresentam valores menores de massa unitária, que aumentam proporcionalmente com o incremento da proporção de agregado natural. Estudos anteriores, como os de Oliveira (2017), Santos *et al.* (2018) e Santos (2017) também reportaram menores valores de massa unitária para agregados reciclados em comparação aos naturais, reforçando os achados desta pesquisa. Cabral (2007) sugere que a forma irregular das partículas dos agregados reciclados contribui para a redução da massa unitária. Entretanto, essas variações também dependem da granulometria dos agregados reciclados.

Os resultados de volume de vazios obtidos nesta pesquisa são consistentes com os valores reportados em outros estudos (Mikami *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019).

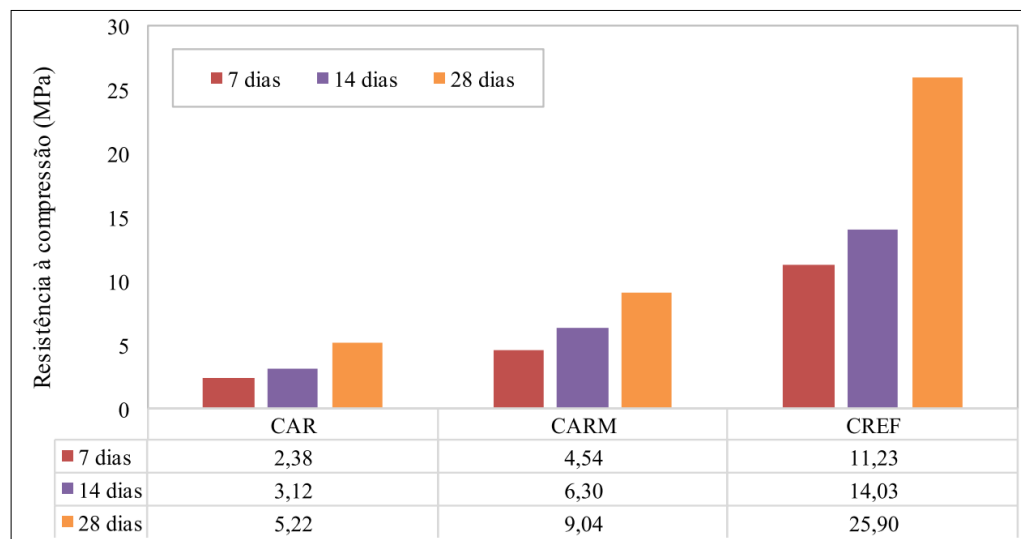
3.2 Resistência à compressão axial

O diagrama apresentado na Figura 6 (próxima página) ilustra os valores médios de resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concreto permeável, obtidos para os diferentes traços de concreto aos 7, 14 e 28 dias de cura. Segundo o American Concrete Institute (ACI, 2010), no estado endurecido, o concreto poroso deve apresentar resistência à compressão simples variando entre 2,8 MPa e 28 MPa. Com base nesses parâmetros, observa-se que o concreto estudado nesta pesquisa se enquadra na faixa estabelecida pelo ACI (2010), exceto para o traço de concreto com agregado reciclado (CAR) aos 7 dias de cura.

Figura 6 ►

Resistência à compressão dos três diferentes traços de concreto para 7, 14 e 28 dias de cura.

Fonte: dados da pesquisa



Os resultados indicam que o concreto produzido exclusivamente com agregado reciclado (CAR) apresenta desempenho inferior aos padrões normativos em relação à resistência à compressão. O concreto que utiliza uma mistura de agregados natural e reciclado (CARM) demonstrou uma resistência 90% superior à do CAR aos 7 dias de cura, resultado que pode ser atribuído à substituição de 70% do agregado reciclado por agregado natural e à adição de 8% de agregados miúdos.

Aos 28 dias de cura, o concreto produzido com 100% de agregado natural (CREF) apresentou os maiores valores de resistência à compressão, alcançando 25,9 MPa, aproximadamente cinco vezes superior ao CAR. De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015b), estruturas de concreto permeável devem ter resistência à compressão superior a 20 MPa após 28 dias de cura. Portanto, apenas o traço contendo agregado natural (CREF) atendeu a essa especificação.

A resistência reduzida dos traços desenvolvidos com agregado reciclado está associada à baixa qualidade do RCD. Conforme Cabral (2007), concretos produzidos com agregado reciclado tendem a ter valores de resistência à compressão inferiores em comparação com aqueles feitos com agregado natural. Lian e Zhuge (2010) também identificaram que a resistência à compressão e a condutividade hidráulica de concretos porosos são influenciadas pelo tipo de rocha de origem do agregado graúdo, independentemente de sua graduação, o que corrobora os resultados obtidos neste estudo. Resende *et al.* (2024) sugerem que a substituição de agregados naturais por reciclados diminui tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração, destacando a necessidade de reforços adicionais, como adições minerais, fibras de aço ou sintéticas e nanopartículas.

Além disso, a elevada porosidade e absorção dos agregados reciclados, associada à heterogeneidade intrínseca desses materiais, influencia diretamente na resistência do concreto (Resende *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2020). Segundo Carvalho *et al.* (2023), a falta de padronização na qualidade dos resíduos representa um desafio significativo na incorporação de materiais residuais ao ciclo de produção. Portanto, a exploração contínua e o incentivo ao uso desses materiais são essenciais.

Outros estudos sobre a substituição de agregados naturais por reciclados em concreto também observaram decréscimos na resistência à compressão, conforme demonstrado por Rizvi *et al.* (2009), Batezini (2013), Pereira e Barbosa (2015), Oliveira (2017), Claudino (2018), Mikami *et al.* (2018) e Santos e Ferrari (2019). A variabilidade na composição do RCD utilizado na fabricação do agregado reciclado pode ter contribuído

para o comprometimento dos níveis de resistência à compressão do concreto fabricado com esse material.

A porosidade característica do concreto permeável é outro fator que explica sua menor resistência em comparação ao concreto convencional. De maneira geral, traços de concreto permeável utilizam pequenos percentuais de agregados miúdos (5% a 10%), o que aumenta a porosidade e a condutividade hidráulica, resultando em uma redução da resistência (Claudino, 2018).

Embora o desempenho mecânico do concreto permeável produzido com RCD não tenha atingido os limites normativos, essa limitação não deve desencorajar sua aplicação. O uso de agregados reciclados oferece uma alternativa sustentável aos agregados convencionais, contribuindo para a redução da exploração de recursos naturais. A incorporação de RCD em concreto permeável pode ser vantajosa em aplicações onde a capacidade de carga é secundária ou onde a principal exigência é a drenagem eficiente, como em calçadas, áreas de estacionamento de baixo tráfego e paisagismo urbano.

Recomenda-se a realização de estudos adicionais que aprofundem a análise da viabilidade técnica e econômica da utilização de RCD em concreto permeável. Futuras pesquisas devem focar na otimização da mistura de RCD com outros materiais que possam compensar a redução da resistência mecânica, sem comprometer a sustentabilidade do material. Além disso, é crucial explorar o desempenho a longo prazo desses pavimentos sob condições ambientais variáveis.

3.3 Resistência à tração na flexão

A resistência à flexão foi avaliada apenas no traço de concreto que apresentou os maiores valores de resistência à compressão axial (CREF), visto que, geralmente, os valores de resistência à tração na flexão representam cerca de 8% a 10% dos valores de resistência à compressão. Aos 28 dias de cura, o valor médio de resistência à tração na flexão foi de 2,7 MPa. A NBR 16416 (ABNT, 2015b) recomenda que, para placas de pavimentos permeáveis de concreto com espessura de 60 mm, destinadas ao tráfego de pedestres, o valor de resistência à tração na flexão seja superior a 2,0 MPa. Os resultados obtidos indicam que o concreto permeável com agregado natural atende a essa especificação, sendo comparáveis aos valores reportados em pesquisas anteriores (Oliveira, 2017; Pils *et al.*, 2019).

3.4 Condutividade hidráulica do solo, das placas de concreto permeável e da parcela experimental

Os valores de condutividade hidráulica obtidos para as diferentes placas de concreto demonstraram que a placa produzida com 100% de agregado reciclado (CAR) apresentou uma condutividade média de $2,30 \times 10^{-2}$ m/s. Para a placa confeccionada com a mistura de agregado reciclado e agregado natural (CARM), a condutividade foi de $1,11 \times 10^{-2}$ m/s, enquanto a placa composta exclusivamente por agregado natural (CREF) exibiu um valor de $4,96 \times 10^{-3}$ m/s. Todos os traços de placas analisados estão em conformidade com a NBR 16416 (ABNT, 2015b), que especifica uma condutividade hidráulica mínima de 10^{-3} m/s para pavimentos permeáveis recém-construídos.

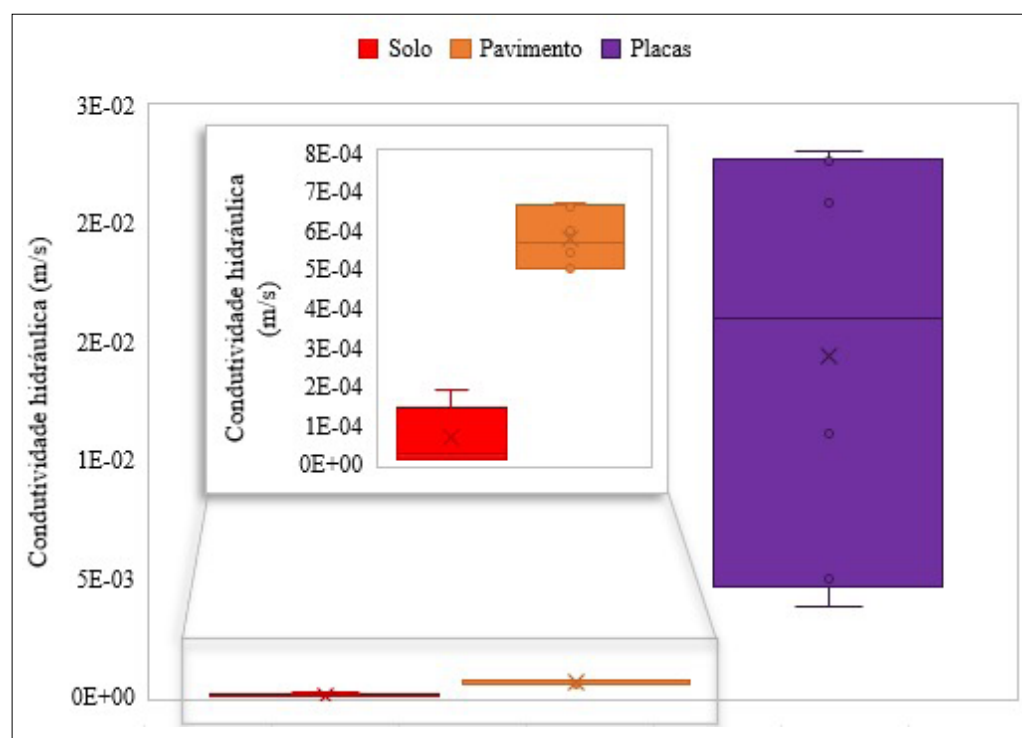
No entanto, essa conformidade não se refletiu nos valores de condutividade hidráulica obtidos na etapa experimental com o pavimento permeável. Os valores registrados variaram de $5,02 \times 10^{-4}$ m/s a $6,67 \times 10^{-4}$ m/s, o que permite classificar a condutividade hidráulica como média, de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015b). A condutividade hidráulica média do solo natural, onde o pavimento foi instalado, foi de $6,8 \times 10^{-5}$ m/s. Esse valor é característico de um grau de permeabilidade mediano, indicando que o solo é adequado para a implantação de pavimentos permeáveis, considerando apenas essa propriedade.

Na Figura 7 são apresentados os resultados da condutividade hidráulica saturada do solo natural, das placas de concreto permeável (CAR, CARM e CREF) e da estrutura de pavimento permeável *in situ* no início, meio e fim do experimento.

Figura 7 ►

Box-plot com resultados de condutividade hidráulica saturada do solo do local do experimento, das placas de concreto permeável e da estrutura de pavimento permeável *in situ*.

Fonte: dados da pesquisa



Observou-se que a redução na quantidade de agregados miúdos no traço de concreto resultou em um aumento na condutividade hidráulica. A presença de agregados miúdos tende a preencher os vazios no concreto, reduzindo o volume de poros e, consequentemente, a condutividade. A placa que apresentou a maior condutividade não continha agregados miúdos, enquanto a que continha 20% desses agregados mostrou a menor condutividade.

Os valores mais baixos e com maior variabilidade foram observados no solo natural. Em termos de condutividade hidráulica, as placas de concreto permeável demonstraram um valor médio de $1,4 \times 10^{-2}$ m/s, considerado médio segundo as normas de referência. Entretanto, nos estudos realizados no pavimento permeável *in situ*, a condutividade hidráulica do sistema concreto-solo foi menor, com um valor médio de $5,8 \times 10^{-4}$ m/s, indicando a influência da condutividade do solo do local do experimento.

Uma redução de cerca de oito vezes foi observada quando se comparou a condutividade média da placa CREF ($4,9 \times 10^{-3}$ m/s) com a condutividade observada na etapa experimental ($5,79 \times 10^{-4}$ m/s). Tal diferença pode ser atribuída à influência da condutividade do solo e das camadas de assentamento.

Tabela 6 ▼

Compilação dos principais resultados de estudos anteriores levantados quanto a condutividade hidráulica e resistência à compressão aos 28 dias de concreto permeável, comparativamente aos obtidos no presente estudo.

Fonte: dados da pesquisa

De acordo com Marchioni e Becciu (2014), para validar a permeabilidade de um pavimento, é fundamental determinar o coeficiente de permeabilidade do pavimento finalizado *in situ* – valores de condutividade hidráulica superiores a 1×10^{-5} m/s indicam que o pavimento funcionará adequadamente. Em estudo de capacidade de infiltração de blocos de concreto em uma pista experimental, Ono, Balbo e Cargnin (2017) encontraram uma condutividade hidráulica média de $4,9 \times 10^{-3}$ m/s. Os resultados obtidos na presente pesquisa são consistentes com os de Ono, Balbo e Cargnin (2017) e atendem ao critério de condutividade hidráulica recomendado por Marchioni e Becciu (2014).

Na Tabela 6 apresenta-se uma síntese comparativa dos valores de condutividade hidráulica e resistência à compressão de estudos anteriores com pavimentos permeáveis.

Autor	Condutividade hidráulica (m/s)	Resistência à compressão aos 28 dias	Escala da pesquisa
Rizvi <i>et al.</i> (2009)	$1,5 \times 10^{-2} - 7,8 \times 10^{-2}$	5,53 – 9,76 MPa	Laboratório
Oliveira (2017)	$1,4 \times 10^{-3}$	12,0 – 14,0 MPa	Laboratório
Ono, Balbo e Cargnin (2017)	$4,8 \times 10^{-3}$	4,36 – 14,07 MPa	Campo e laboratório
Claudino (2018)	$1,8 \times 10^{-2}$	12,8 MPa	Laboratório
Mikami <i>et al.</i> (2018)	$8,2 \times 10^{-3} - 9,5 \times 10^{-2}$	10,15 MPa	Laboratório
Silva <i>et al.</i> (2019)	$> 1 \times 10^{-3}$	4,0 – 28,0 MPa	Laboratório
Pils <i>et al.</i> (2019)	$9,0 \times 10^{-4} - 1,2 \times 10^{-3}$	–	Laboratório
Valença <i>et al.</i> (2021)	$3,0 \times 10^{-3} - 5,7 \times 10^{-3}$	–	Laboratório
Dias, Silva e Marques (2021)	$> 8,4 \times 10^{-3}$	> 34 MPa	Laboratório
Presente estudo	$4,9 \times 10^{-3} - 2,3 \times 10^{-2}$	5,22 – 25,9 MPa	Campo e laboratório

Com exceção do estudo de Ono, Balbo e Cargnin (2017), realizado em campo, os demais referenciados na Tabela 6 foram conduzidos em laboratório, com aferição de resistência à compressão e condutividade hidráulica em peças e placas de concreto poroso. Ressalta-se que a variação nos resultados entre os estudos pode ser atribuída a uma ampla gama de fatores, como o traço utilizado, a granulometria do RCD selecionado e a aplicação de aditivos, entre outros.

Destaca-se que diversos estudos, incluindo Rizvi *et al.* (2009), Oliveira (2017), Ono, Balbo e Cargnin (2017), Claudino (2018) e Mikami *et al.* (2018), não conseguiram desenvolver misturas de concreto permeável que atendessem às exigências normativas mínimas de resistência à compressão aos 28 dias. Apenas três estudos, incluindo o presente, atenderam ao valor mínimo de resistência à compressão da NBR 16416 (ABNT, 2015b) de 20 MPa. No entanto, é importante ressaltar que apenas o CREF atendeu aos requisitos de desempenho mecânico (compressão e tração na flexão) da norma NBR 16416 (ABNT, 2015b).

Esses resultados destacam a complexidade envolvida no desenvolvimento de concreto permeável que apresente desempenho satisfatório tanto em termos mecânicos quanto hidráulicos. A dificuldade em atingir os parâmetros normativos pode ser atribuída a fatores como a elevada porosidade necessária para garantir a permeabilidade, que frequentemente compromete a integridade estrutural do material.

Esses achados destacam a necessidade de continuar explorando combinações otimizadas de materiais e técnicas de dosagem que possam aprimorar o desempenho geral do concreto permeável. Estudos futuros devem investigar alternativas como o uso de aditivos químicos, a modificação da granulometria dos agregados ou a combinação de diferentes tipos de agregados para alcançar um equilíbrio mais adequado entre resistência mecânica e capacidade de infiltração.

Quanto à condutividade hidráulica, conclui-se que o revestimento permeável confere ao pavimento uma condutividade média na ordem de grandeza entre 10^{-3} m/s e 10^{-5} m/s (ANBT, 2015b).

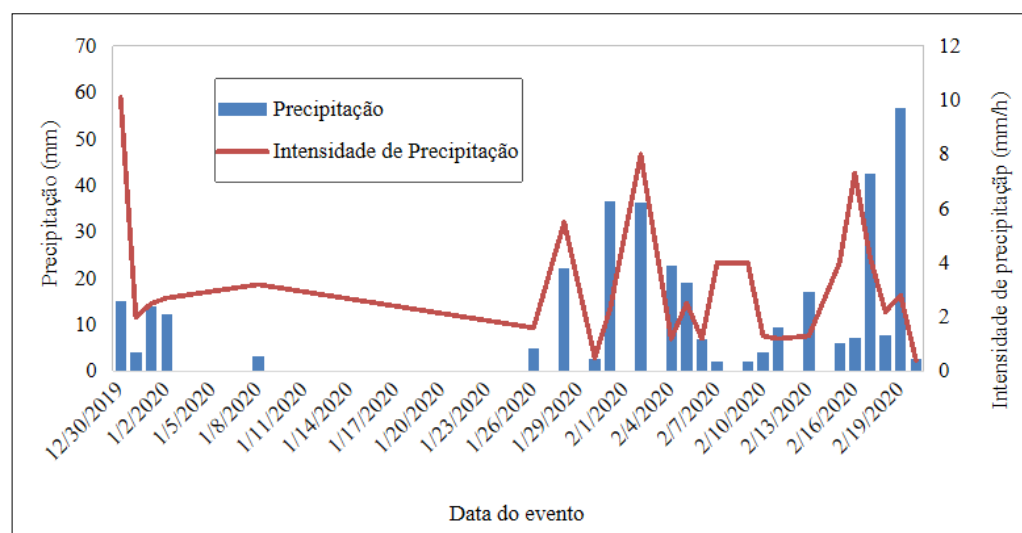
3.5 Impacto na redução do escoamento superficial

As precipitações e as respectivas intensidades observadas durante o período de monitoramento, que abrangeu de dezembro de 2019 a fevereiro de 2020, estão apresentadas na Figura 8.

Figura 8 ►

Precipitação e intensidade de precipitação dos eventos pluviométricos observados no período de monitoramento.

Fonte: dados da pesquisa



Durante o período de monitoramento, foram registrados 22 eventos de precipitação, com volumes variando de 2,03 mm a 42,40 mm e duração entre 0,5 horas e 20 horas. Em nenhum desses eventos foi observada lâmina de escoamento superficial sobre o pavimento. No entanto, durante o 23º evento, com precipitação de 56,63 mm e duração de 20 horas, ocorrido em 19 de fevereiro de 2020 e precedido por eventos nos dias imediatamente anteriores, foi registrado um escoamento superficial de 0,0925 mm. O coeficiente de escoamento superficial, determinado pela razão entre a lâmina escoada e o total de precipitação, foi de 0,16%.

Em comparação, Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) reportaram coeficientes de escoamento superficial entre 0,60 e 0,96 para precipitações médias de 18 mm em superfícies de solo compactado, concreto convencional e blocos de concreto, enquanto blocos vazados de concreto apresentaram coeficiente de 0,03. Concretos permeáveis, por sua vez, mostraram coeficiente de escoamento superficial de 0,005 para precipitação média de 20 mm. Com base nesses dados, observa-se que o pavimento permeável avaliado apresentou desempenho eficiente na minimização do escoamento superficial causado pelas precipitações.

4 Considerações finais

Este estudo investigou a influência do uso de resíduos de construção e de demolição (RCD) como substituto parcial do agregado graúdo natural em pavimentos permeáveis, analisando suas propriedades hidráulicas (condutividade hidráulica) e mecânicas (resistência à compressão e à tração). As conclusões principais foram as seguintes:

- Os concretos produzidos com RCD apresentaram resistência mecânica inferior (compressão axial) quando comparados aos concretos com agregados naturais;
- As resistências à compressão e à tração na flexão dos concretos com RCD ficaram abaixo dos limites exigidos pela norma, que são 20 MPa para compressão e 2 MPa para tração na flexão;
- Apenas o concreto com agregado natural atendeu aos requisitos normativos de desempenho mecânico, registrando valores médios de resistência à compressão e à tração na flexão de 25,9 MPa e 2,7 MPa, respectivamente;
- No que se refere à condutividade hidráulica, as placas de concreto permeável com agregados naturais apresentaram valor médio de $1,4 \times 10^{-2}$ m/s, considerado adequado pela norma de referência;
- Em condições *in situ*, a condutividade hidráulica do sistema pavimento permeável-solo foi menor, com valor médio de $5,8 \times 10^{-4}$ m/s, influenciado pela condutividade hidráulica do solo no local do experimento;
- Apenas um evento pluviométrico, com precipitação superior a 50 mm, resultou em um coeficiente de escoamento superficial de 0,16%, demonstrando a eficácia do pavimento em reduzir o escoamento superficial em ambientes urbanos.

Espera-se que este estudo contribua para a pesquisa contínua e para o desenvolvimento de tecnologias que incorporem materiais residuais em ciclos produtivos, promovendo práticas mais sustentáveis na construção civil. A reciclagem e a reutilização de RCD não apenas proporcionam uma alternativa viável para a disposição adequada de resíduos, mas também diminuem o consumo de recursos naturais, mitigando os impactos ambientais relacionados à extração e processamento desses materiais.

Recomenda-se, em pesquisas futuras, a análise de desempenhos com outras proporções de agregados naturais e reciclados. Estudos adicionais devem focar na otimização da mistura de RCD com outros materiais, na aplicação de diferentes técnicas de dosagem, no uso de aditivos químicos ou na modificação da granulometria, com o objetivo de melhorar a resistência mecânica sem comprometer a sustentabilidade e a permeabilidade do material. Além disso, é essencial avaliar o desempenho em longo prazo desses pavimentos sob condições ambientais variáveis.

Financiamento

A pesquisa foi financiada com bolsas de mestrado concedidas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este artigo é derivado de dissertação do curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal do Ceará (IFCE), disponível em: biblioteca.ifce.edu.br/index.asp?codigo_sophia=88566.

Contribuições ao artigo

LIMA, M. S.: concepção e execução da metodologia, coleta e tratamento de dados, análise e discussão dos resultados, redação textual. **CHAVES, M. T. R.:** análise e/ou interpretação dos dados, análise e discussão dos resultados, redação textual. **AGUIAR, M. F. P.:** administração do projeto, supervisão, revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. **FARIAS, T. R. L.:** concepção da metodologia, supervisão, obtenção de recursos, análise e discussão dos resultados, revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292:** Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b. 25 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do número de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51:** Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil:** 2023. São Paulo: ABREMA, 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 29 ago. 2024.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **522R-10:** Report on Pervious Concrete. Farmington Hills: ACI, 2010. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51663557>. Acesso em: 29 ago. 2024.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v5n3.p21-29>.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2012.tde-19072013-155819>.

BATISTA, B. C. C.; SILVA, Á. B. B. M.; NOÉ, A. F.; LOPES, R. K.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H. Influência da adição de RCD misto na resistência à compressão e na porosidade de argamassa. **Revista Principia – IFPB**, v. 59, n. 3, p. 934-946, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5005>.

BECKER, N.; CONEGERO, M. G.; PINHEIRO, I. G. Qualidade da água do escoamento superficial percolado em pavimento de concreto permeável dosado por diferentes métodos. **REGA – Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, e2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v19e2>.

BINS, G. O.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; SILVA, D. A. L. Análise de pisos intertravados com substituição do agregado miúdo por resíduo de construção e demolição. **Revista Principia – IFPB**, v. 59, n. 2, p. 427-444, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4975>.

BRASILEIRO, K. P. T. V.; NAHIME, B. O.; ALVES, M. M.; KUNAN, P. M.; ALVARES, V.; SANTOS, I. S.; SANTOS, J. V.; LOBO, F. A. Concreto permeável com agregado da reciclagem de resíduos da construção e demolição: revisão

bibliográfica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 73169-73180, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-684>.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2007.tde-21102007-164548>.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; BRUM, I. A. S.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V.; COSTA, D. B. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (org.). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. Cap. V, p. 142-187.

CARVALHO, A. R.; SILVA JÚNIOR, G.; FONTES, W. C.; SILVA, G. J. B.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, T. M. Influência do efeito filler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 4, p. 217-239, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700>.

CLAUDINO, G. O. **Drenagem urbana: avaliação das propriedades do concreto permeável para a realidade cearense utilizando insumos locais**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Quixadá, 2018.

DIAS, A. C.; SILVA, D. A. M.; MARQUES, C. S. A. Estudo da aplicação de pavimento permeável utilizando “pavers” como auxiliar no reuso de águas pluviais. In: FÓRUM CIENTÍFICO UNIFUNEC: EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 12., 2021, Santa Fé do Sul. **Anais [...]**. Santa Fé do Sul: UNIFUNEC, 2021. Disponível em: <https://seer.unifunec.edu.br/index.php/forum/article/view/5417>. Acesso em: 29 ago. 2024.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 29 ago. 2024.

DUTTA, S.; DAS, A. K. Analytical perspective on waste management for environmental remediation. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 7, p. 636-644, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.04.006>.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142011000100010>.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete: an experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2664-2671, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>.

MARCHIONI, M.; BECCIU, G. Permeable pavement used on sustainable drainage systems (SUDs): a synthetic review of recent literature. **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 139, p. 183-194, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2495/UW140161>.

MARQUES, H. F.; RIBEIRO, C. C.; OLIVEIRA, D. M.; BAMBERG, P.; ALMEIDA, M. L. B. Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 21912-21930, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-383>.

MIKAMI, R. J.; KRUGER, P.; PEREIRA, E.; KUMMER, A. C. B.; DÖLL, M. M. R. Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, e12163, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0497>.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatção em concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados de concreto**. 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/handle/123456789/15115>. Acesso em: 29 ago. 2024.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Revista Transportes**, v. 25, n. 3, p. 90-101, 2017. <https://doi.org/10.14295/transportes.v25i3.1314>.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 5., 2015, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: PUC-Campinas, 2015.

PILS, S. E.; OLIVEIRA, P.; REGOSO, F.; PAULON, V. A.; COSTELLA, M. F. Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 191-121, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000100009>.

RAMA, M.; SHANTHI, V. M. Experimental study on sedimentation removal of pervious concrete. **Archives of Civil Engineering**, v. 64, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0012>.

RESENDE, H. F.; REIS, E. D.; FERNANDES, F. M.; RODRIGUES, L. A.; ÂNGELO, F. A. Uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto: uma breve revisão de literatura. **Revista Principia – IFPB**, v. 61, n. 3, p. 691-709, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7086>.

RIZVI, R.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J.; HENDERSON, V. Incorporating recycled concrete aggregate in pervious concrete pavements. In: 2009 ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2009, Vancouver. **Proceedings [...]**. Vancouver: Transportation Association of Canada, 2009. Disponível em: <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2009/pdf/Rizvi.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 39-51, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300323>.

SANTOS, C. J. R.; LIMA, D. A.; SILVA JUNIOR, E. R.; BATISTA, L. S.; FERREIRA, M. L. M. Estudo do comportamento mecânico do concreto a partir da utilização de RCD como agregado graúdo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL (CONGEA), 9., 2018, São Bernardo do Campo. **Anais [...]**. São Bernardo do Campo: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2018. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/XI-018.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2024.

SANTOS, R. R. **Estudo da resistência mecânica do concreto permeável com substituição de agregado natural por agregado reciclado**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa, 2017.

SILVA, D. A.; MELO, C. E. L. Agregado reciclado, uma fonte sustentável de matéria-prima: uma revisão. **Revista Principia – IFPB**, v. 60, n. 2, p. 370-386, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6033>.

SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JUNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, n. 192, p. 48-59, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2014.106>.

SILVA, G. T. M.; RIBEIRO, C. C.; RIBEIRO, S. E. C.; OLIVEIRA, D. M.; OLIVEIRA, W. S.; ALMEIDA, M. L. B. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-357>.

SILVA, L. S.; COSTA, M. C. B.; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M.; BATISTA, N. J. S. Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional. **RCT – Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 5, n. 8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18227/rct.v5i8.5217>.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analyses of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195-1203, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>.

VALENÇA, G. S.; NASCIMENTO, L. G.; MENESES, M. M.; PIO, I. H. P.; CAJUEIRO, M. R. C.; COSTA, S. R. S.; PACÍFICO, A. G. L.; FONTES, J. C. S. Análise da viabilidade do uso do concreto permeável na utilização de pavimento leve em vias urbanas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 28803-28816, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-546>.