



CONCRETOS PERMEÁVEIS COM AGREGADOS RECICLADOS: AVALIAÇÃO DA DIFUSIBILIDADE DE CO₂

Pervious concretes with recycled aggregate: evaluation of CO₂ diffusibility

Rodrigo Yuji Etani Soares

Egresso do Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (UDC) | Foz do Iguaçu, PR | rodorack@hotmail.com

Adriano Vieira Risson

Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (UDC) | Foz do Iguaçu, PR | adriano@udc.edu.br

Gersson F. B. Sandoval

Universidad Católica del Norte (UCN) | Antofagasta, Chile | gersson.barreto@ucn.cl

Edna Possan

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) | Foz do Iguaçu, PR | edna.possan@unila.edu.br

Kathleen Dall Bello de Souza Risson

Doutoranda no PPGIES-UNILA, Instituto Federal do Paraná -IFPR | Foz do Iguaçu, PR | kathleen.souza@ifpr.edu.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a difusibilidade de CO₂ em concretos permeáveis compostos por diferentes teores de agregado reciclado misto (AR). Os concretos permeáveis produzidos com 15, 30 e 45% de AR foram primeiramente avaliados quanto as propriedades hidráulicas e mecânicas. Então foram submetidos a carbonatação acelerada por 48 horas, em ambiente climatizado com 5% de CO₂, 60% de umidade e temperatura de 23 ± 5 °C. Foi utilizado indicador químico fenolftaleína e o software ImageJ para análise da difusão de CO₂. Diante dos resultados pode-se afirmar que os concretos permeáveis com agregado reciclados atendem os requisitos hidráulicos prescritos pela normativa brasileira (NBR 16416:2015) e se mostraram uma estratégia para a captura de CO₂, conforme o aumento do teor de agregado reciclado empregado.

Palavras-chave: Resíduo de construção e Demolição (RCD); Pavimento Permável; Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS).

ABSTRACT

This study aims to analyze the diffusibility of CO₂ in pervious concrete considering varying proportions of mixed recycled aggregate (AR). Pervious concrete mixes, containing 15%, 30%, and 45% AR, were subjected to initial assessments of their hydraulic and mechanical properties. Subsequently, they were exposed to accelerated carbonation over a span of 48 hours within a controlled environment featuring 5% CO₂, 60% humidity, and a temperature of 23 ± 5 °C. The analysis of CO₂ diffusion was conducted using the phenolphthalein chemical indicator and ImageJ software. The findings demonstrate that pervious concrete incorporating recycled aggregate satisfies the hydraulic prerequisites outlined in Brazilian regulations (NBR 16416:2015) and exhibits a capacity for CO₂ sequestration, with effectiveness correlated to the increased incorporation of recycled aggregate.

Keywords: Construction and Demolition Waste (CDW); Permeable Pavement; Carbon Capture, Use and Storage (CCUS).

1 INTRODUÇÃO

O concreto permeável utilizado em pavimentos, é composto principalmente por cimento Portland, agregado graúdo e água, podendo conter agregado miúdo em quantidade inferior a 10% da massa total dos agregados da mistura (OBLA, 2010) e devido a proporção dos materiais, métodos de compactação e origem e tamanho dos agregados (MIKAMI; PIERALISI; PEREIRA, 2024; RISSON *et al.*, 2021; SANDOVAL *et al.*, 2018), apresenta uma porcentagem de vazios entre 15 a 35%, o que permite a passagem de água pelo seu interior, mitigando as inundações (WEI *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2022).

Paralelamente a essa problemática ambiental e a necessidade de diminuir as emissões do dióxido de carbono (CO_2), um dos principais responsáveis pelo efeito estufa e alterações climáticas, alguns autores buscam estimar o potencial de captura de CO_2 por materiais cimentícios, como argamassas (FONTOLAN; GAVA; POSSAN, 2022; RIGO, 2019) e pavimentos (J. ALSAAD; S.AL-ATTAR; S. ALSHATHR, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2020), visto que são aplicados em camadas de pequena espessura e em grandes áreas de exposição.

Nesse sentido, considerando que, as aplicações comuns para concreto permeável são estacionamentos, calçadas, e pavimentos de baixo tráfegos, e as características favoráveis a difusão do CO_2 na estrutura do pavimento permeável que são a elevada porosidade e maior área superficial e a captura do CO_2 através da reação química do gás com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (FELIX; POSSAN, 2018; POSSAN, 2019; POSSAN *et al.*, 2012), tem-se como objetivo analisar a difusibilidade de CO_2 em concretos permeáveis com diferentes teores de agregado reciclado misto (AR).

2 METODOLOGIA

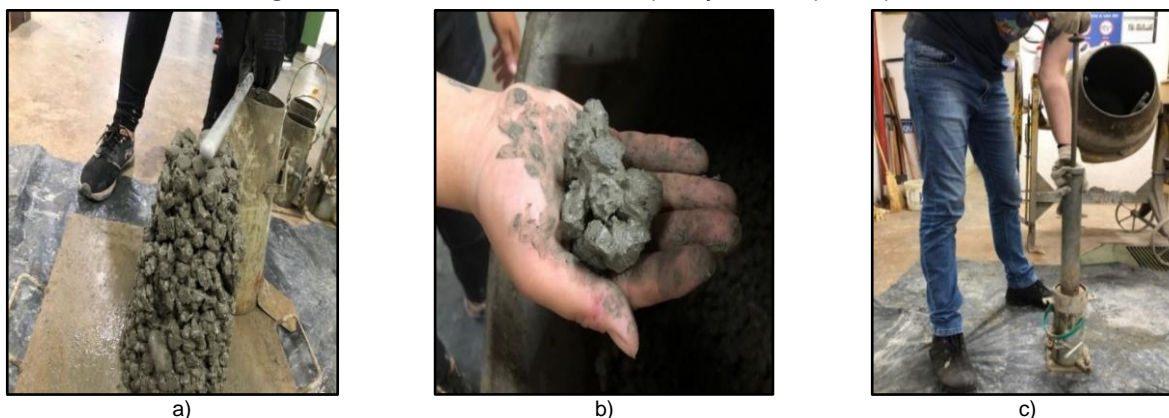
2.1 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS

Para a produção dos concretos permeáveis utilizou-se o cimento Portland do tipo CP II Z 32, o agregado natural (AN) de rocha basáltica, o agregado graúdo reciclado do tipo misto (AR), composto principalmente por materiais cerâmicos e cimentícios e obtido em usina de reciclagem em Foz do Iguaçu-PR e água da rede pública de abastecimento. Por meio do peneiramento manual, padronizou-se a granulometria dos agregados graúdos em uniforme e tamanho dos grãos em 12,5 mm.

Foi adotado o traço em massa de 1:3,5:0,30 (cimento: agregado graúdo: água/cimento), como referência (sem agregado reciclado). Também foram produzidas outras três misturas de concreto permeável com a substituição em massa do agregado natural por agregado reciclado misto nos teores 15, 30 e 45%. O procedimento de mistura seguiu a metodologia sugerida por Sandoval (2014), e consistiu em adicionar na betoneira, a brita e metade da água (misturar por 2 minutos), na sequência colocar o cimento (misturar por 1 minuto) e por fim, adicionar o restante da água (misturar por 2 minutos). Cabe ressaltar que os agregados reciclados foram utilizados na condição saturada superfície seca.

A consistência dos concretos foi avaliada de duas maneiras, pelo abatimento do tronco de cone (Figura 1 a) através da NBR 16889 (ABNT, 2020) e pelo teste visual (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004) (Figura 1 b). Todas as misturas apresentaram abatimento igual a zero e não apresentaram excesso de pasta ou segregação na palma da mão. Na sequência fez-se a moldagem dos concretos no moldes cilíndricos de 100 x 200 mm, com a aplicação de 50 golpes com o Proctor de 2,5 kg por (RISSON *et al.*, 2021) (Figura 1 c).

Figura 1: Ensaios no estado fresco e compactação dos corpos de prova



Fonte: Autores (2023)

Após as 24 horas de moldagem, os corpos de prova foram colocados em cura submersa conforme NBR 5738 (ABNT, 2015a) e com a idade de 28 dias, os corpos de prova foram caracterizados e enviados para o ensaio de carbonatação acelerada.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

A porcentagem de vazios foi avaliada a partir da obtenção do peso seco e peso submerso dos corpos de prova em balança hidrostática (Equação 1) (BATEZINI, 2013).

$$\phi = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w Vol}\right) \times 100 \quad (1)$$

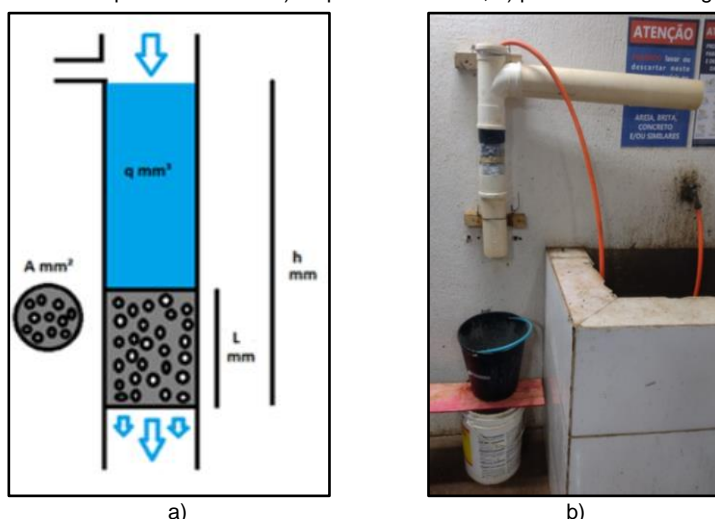
Onde: ϕ : Porcentagem de vazios; W_1 : Peso submerso do corpo de prova (kg); W_2 : Peso seco do corpo de prova (kg); Vol : volume do corpo de prova (m^3) e ρ_w : massa específica da água (kg/m^3).

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, utilizou-se o permeâmetro a carga constante (SANDOVAL et al., 2017), onde o corpo de prova foi envolto lateralmente em filme de PVC e coberto com fita adesiva, colocado no permeâmetro e medido o tempo em que a coluna de água passava pela amostra, conforme Figura 2a. O coeficiente de permeabilidade, baseado na Lei de Darcy, foi calculado pela Equação 2.

$$k = \frac{q L}{A h t} \quad (2)$$

Onde: k : Coeficiente de permeabilidade (cm/s); q : Volume de água que passa pelo corpo de prova (cm^3); L : Comprimento do corpo de prova (cm); A : Área do corpo de prova (m^2); h : Altura da lâmina de água sobre o corpo de prova (cm) e t : Tempo para coletar o volume de água (s), adotado igual a 30 segundos. O permeâmetro a carga constante pode ser observado na Figura 2b.

Figura 2: Ensaio de permeabilidade: a) esquema do ensaio; b) permeâmetro a carga constante



Fonte: Autores (2023)

A resistência à compressão ($F_{c,28}$) e à tração por compressão diametral ($F_{ct,28}$) aos 28 dias dos concretos foram avaliados conforme respectivamente a NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7222 (ABNT, 2011). Os corpos de prova foram retificados e rompidos em prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas.

A análise estatística dos resultados foi feita pelo software BioEstat 5.0 (MANUEL AYREES et al., 2007) aplicando-se a análise de variância (ANOVA) e o Teste de Tukey, com um nível de significância igual a 0,05.

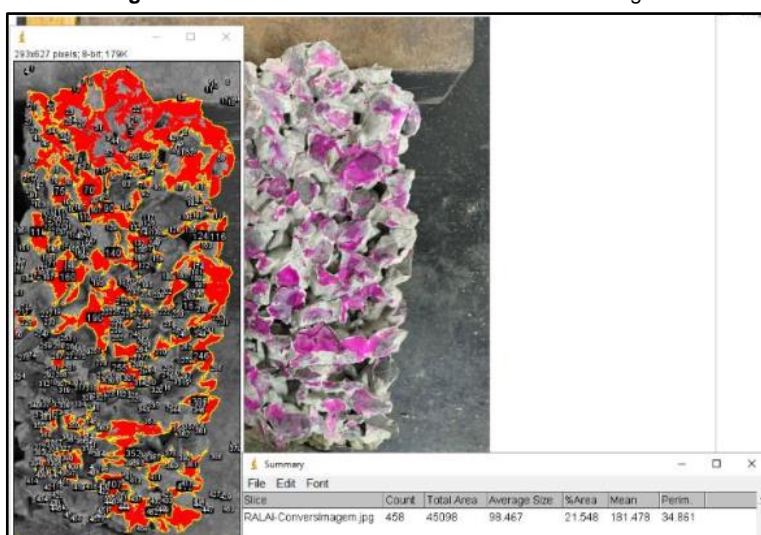
2.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA

A difusão de CO_2 através dos concretos permeáveis foi avaliada no modo acelerado, em câmara climatizada da marca BASS, modelo UUC-RH-STD-CO2-1000/2016 nas condições 23 ± 2 °C, taxa de CO_2 de 5% (50.000 ppm) e umidade relativa de $60 \pm 10\%$ (PAULETTI; DAL MOLIN; POSSAN, 2007; RIGO, 2019), com duas repetições.

Após a determinação corpos de prova secos em estufa a $100\pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas, foram inseridos na câmara por 48 horas (sazonamento) para equilíbrio da umidade entre o concreto e a câmara (PAULETTI; DAL MOLIN; POSSAN, 2007) e posterior injeção de CO_2 .

Por fim, para verificar (visualmente) a reação de carbonatação nos concretos permeáveis em função do uso dos agregados reciclados, dois corpos de prova de cada mistura foram retirados da câmara, abertos longitudinalmente e aspergidos com o indicador químico, a fenolftaleína a 1%. Posteriormente fez-se o registro fotográfico das seções transversais de cada fatia e a imagem gerada foi analisada através do software Image J (DIAS, 2008) para a análise da difusão do CO_2 (Figura 3), calculada considerando a porcentagem de área carbonatada da face do longitudinal do corpo de prova.

Figura 3: Área carbonatada analisada no software Image J

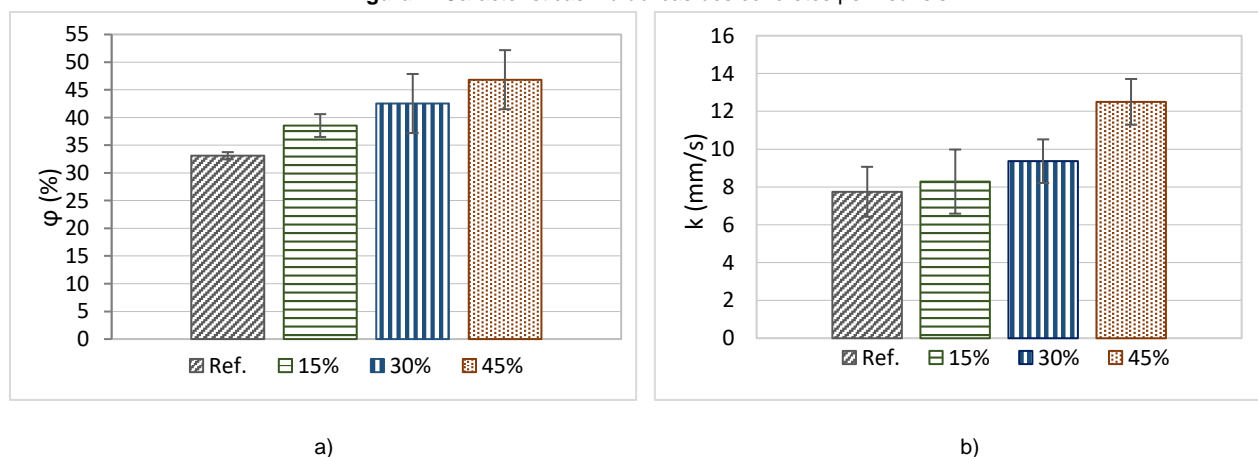


Fonte: Autores (2023)

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados da porcentagem de vazios (ϕ) e da permeabilidade (k) para os concretos permeáveis são mostrados na Figura 4. Verifica-se (Figura 4 a), que foram produzidos concretos permeáveis com porosidade (ϕ) entre 38,56 e 46,84%, superiores ao concreto com agregado natural (basalto) e aos valores da literatura, cerca de 15 a 30% (HUANG et al., 2021; PENG; YIN; SONG, 2018; PUTMAN; NEPTUNE, 2011). De acordo com RIZVI et al. (2010) a porosidade do agregado reciclado afeta no comportamento hidráulico do material, logo quanto maior a quantidade de agregado reciclado, maior tende a ser a porosidade do concreto permeável. Ainda, estatisticamente (p -valor $< 0,05$), o concreto referência tem porosidade igual ao concreto com 15% de AR.

Figura 4: Características hidráulicas dos concretos permeáveis



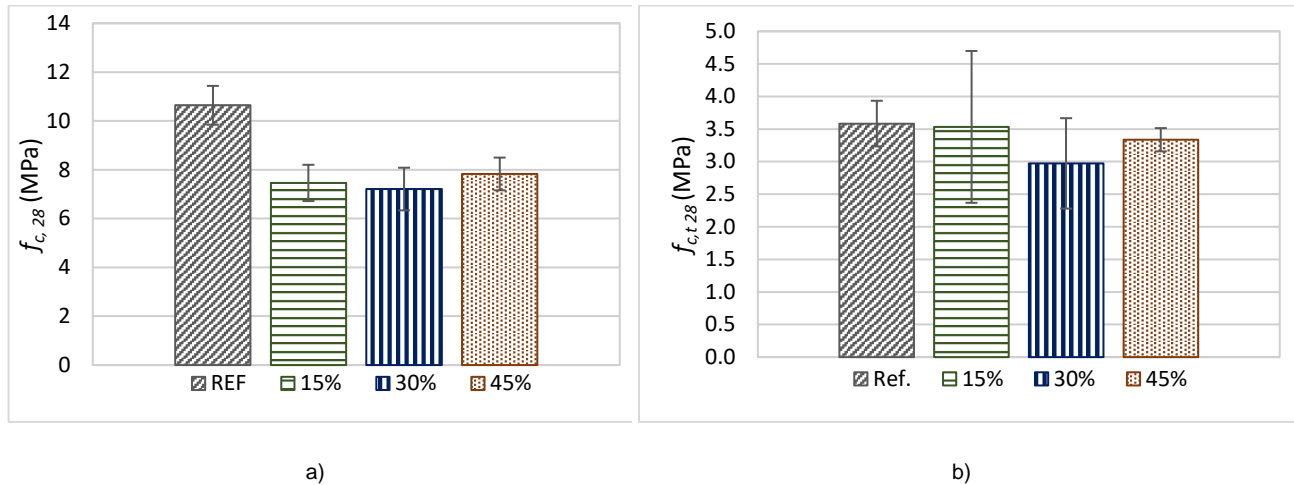
Fonte: Autores (2023)

O coeficiente de permeabilidade (k) variou de 8,29 a 12,5 mm/s (Figura 4 b), atendendo ao requisito mínimo (> 1 mm/s) da (ABNT, 2015b; ACI 522-R10, 2010), e similares os resultados de Sandoval et al. (2019) para

agregados reciclados de diferentes origens, que foi de 9 a 16 mm/s. Observou-se ainda, que os concretos com maior quantidade de agregados reciclados são mais permeáveis. Estatisticamente o uso de 15% e 30% não afetou significativamente essa propriedade (p -valor $< 0,05$).

As características mecânicas avaliadas para os concretos permeáveis podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5: Características mecânicas dos concretos permeáveis



Fonte: Autores (2023)

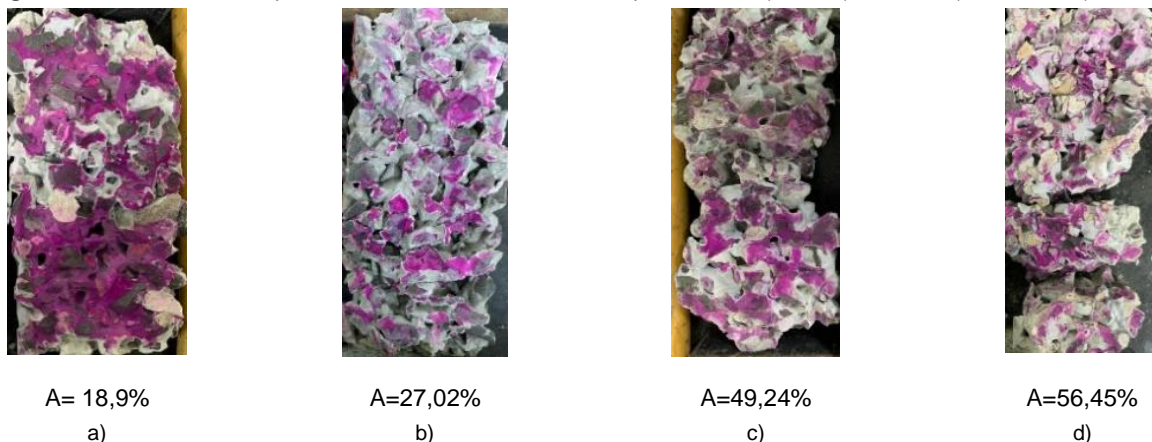
Com o uso do agregado reciclado verificou-se a diminuição da resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28}$), com variação de 7,46 a 7,83 MPa (Figura 5 a) e dentro da faixa de valores encontrados por outros autores para concretos com agregados reciclados que foi de 2,1 a 24,2 MPa (STRIEDER et al., 2022). Estatisticamente os concretos com agregados reciclados possuem a mesma resistência à compressão (p -valor $< 0,05$).

Pra a tração por compressão diametral aos 28 dias ($f_{c,t28}$), os concretos com AR obtiveram valores entre 3,53 a 3,34 MPa (Figura 5 b), mas considerados estatisticamente iguais ao concreto permeável de referência ($p=0,8910$).

3.1 DIFUSÃO DO CO_2

Na Figura 6, é possível verificar as faces dos concretos permeáveis em função do agregado após a aspersão da fenolftaleína, e a porcentagem da área (A) da face do corpo de prova onde não houve alteração na cor do concreto (indicativo da ocorrência da carbonatação). Considerando que a reação de carbonatação em materiais cimentícios é um processo físico-químico e depende da difusão de CO_2 através dos poros do concreto, mas também da sua reatividade com produtos de hidratação como hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e hidratos de silicato de cálcio (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004), há uma redução do pH do concreto (~ 8), por isso após a aspersão da fenolftaleína o concreto permanece com sua coloração, enquanto nas áreas não carbonatadas ficam na rosa carmim (pH mais elevado, $\sim 12,5$).

Figura 6: Análise visual da captura e difusão do CO_2 nos concretos permeáveis: a) Ref.; b) 15% AR; c) 30% AR e d) 45% AR



Fonte: Autores (2023)

Verifica-se (Figura 6) que o uso do agregado reciclado favoreceu a carbonatação dos concretos permeáveis, o que pode ser justificado pela maior quantidade de poros, responsável pela difusão do gás, combinado pela composição química dos resíduos que geralmente possuem SiO_2 , Al_2O_3 e CaO (ULSEN *et al.*, 2010) e que favorecem a reação química.

4 CONCLUSÃO

O uso de agregados reciclados misto em substituição em até 45% do agregado natural (basáltico) proporcionou maior desempenho hidráulico ao concreto permeável, cumprindo com os parâmetros mínimos exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015), no entanto diminui a resistência à compressão aos 28 dias na ordem 32,2%.

Por outro lado, a elevada porosidade (38,56 a 46,84%), combinado com a composição química dos agregados reciclados favoreceu a difusibilidade de CO_2 e a carbonatação do concreto permeável.

Considerando as aplicações em pavimento, considera-se o concreto permeável um material com potencial para compensar as emissões de carbono da indústria da construção, no entanto, estudos para mensurar a quantidade realmente capturada de CO_2 ainda precisam ser desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015a.

_____. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ACI 522-R10. **Report On Pervious Concrete (ACI 522-R10)**.

ANGULO, S. C.; OLIVEIRA, L. S.; MACHADO, L. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. ABRECON, 2022.

ANGULO, S. C.; MUELLER, A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 6, p. 739–748, 2009.

BATEZINI, R. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimentos de pavimentos para áreas de veículos leves. **Mestrado (Dissertação)**. p. 133, 2013.

CNI. **Economia Circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira**. Confederação Nacional da Indústria, Brasília, DF: 2018.

CONAMA. **RESOLUÇÃO N° 307, DE 5 DE JULHO DE 2002**. , 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1989_005.pdf>

FERNÁNDEZ BERTOS, M. et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO_2 . **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193–205, 2004.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. **Engineering Structures**, v. 157, n. September 2017, p. 224–234, 2018.

HUANG, J. et al. Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 290, p. 123228, 2021.

KHOURY, E. et al. Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 705–713, 2018.

- MANUEL AYREES; et al. **BioEstat 5.0 aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas**. Belém: IDSM, 2007.
- MATIAS, A. N. **Resíduos de construção e demolição à Luz da Política Nacional De Resíduos Sólidos**. Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPG ECI), 2020.
- OBLA, K. H. **Pervious concrete - An overview**. *Indian Concrete Journal*, 2010.
- PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D. C. C.; POSSAN, E. Carbonatação acelerada : estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7–20, 2007.
- PENG, H.; YIN, J.; SONG, W. Mechanical and hydraulic behaviors of eco-friendly pervious concrete incorporating fly ash and blast furnace slag. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 6, 2018.
- POSSAN, E. et al. Sequestro de CO₂ devido à carbonatação do concreto: potencialidades da Barragem de Itaipu. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 28–38, 2012.
- POSSAN, E. Captura de CO₂ em materiais cimentícios. **Concreto & Construções**, n. July, p. 72–78, 2019.
- PUTMAN, B. J.; NEPTUNE, A. I. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3480–3485, ago. 2011.
- RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. [s.l.] Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2019.
- RISSON, K. D. B. DE S. et al. Molding procedure for pervious concrete specimens by density control. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, n. July, 2021.
- RIZVI, R. et al. Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement. **Transportation Research Record**, n. 2164, p. 132–140, 2010.
- SANDOVAL, G. F. B. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis**. Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Edificações e Saneamento, 2014.
- SANDOVAL, G. F. B. et al. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, n. August, p. 317–328, 2017.
- SANDOVAL, G. F. B. et al. Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). **DYNA (Colombia)**, v. 86, n. 209, p. 151–159, abr. 2019.
- SANDOVAL, G. F. B. et al. Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00354, 2020.
- STRIEDER, H. L. et al. Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 315, 10 jan. 2022.
- TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**, 2004.
- ULSEN, C. et al. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo (Chemical composition of mixed construction and demolition recycled aggregates from the State of São Paulo). **Mineração**, v. 63, n. 2, p. 339–346, 2010.
- ZAETANG, Y. et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15–21, 2016.