ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

# CONCRETOS PERMEÁVEIS COM AGREGADOS RECICLADOS: AVALIAÇÃO DA DIFUSIBILIDADE DE $CO_2$

## Pervious concretes with recycled aggregate: evaluation of $CO_2$ 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 $CO_2$ 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 $CO_2$, 60% de umidade e temperatura de 23 ± 5 °C. Foi utilizado indicador químico fenolftaleína e o software ImageJ para análise da difusão de $CO_2$. 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 $CO_2$, conforme o aumento do teor de agregado reciclado empregado.*

**Palavras-chave:** Resíduo de construção e Demolição (RCD); Pavimento Perméavel; 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% $CO_2$, 60% humidity, and a temperature of 23 ± 5 °C. The analysis of $CO_2$ 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 $CO_2$ 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 perméavel 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 e*t 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

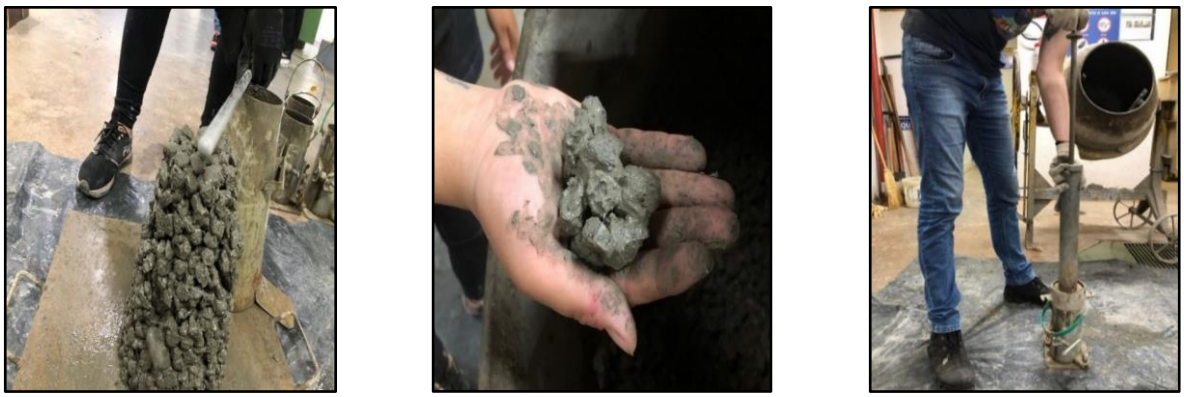
## 2.1 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS PERMÉAVEIS

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



a) b) c)

**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).

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

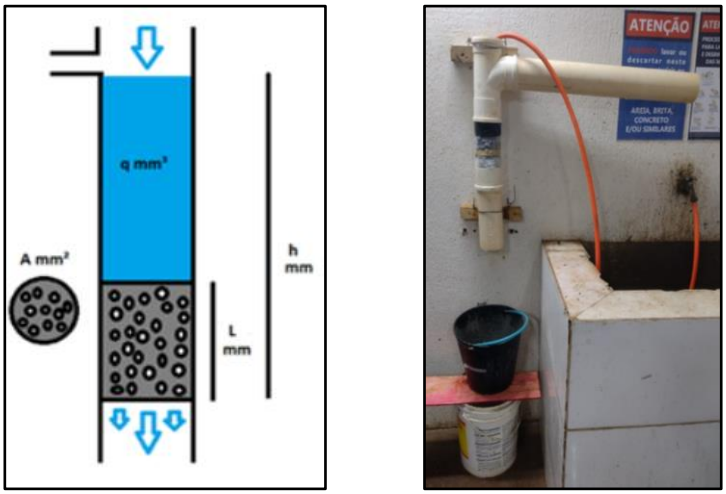
Onde: $\phi$: Porcentagem de vazios; $W_1$: Peso submerso do corpo de prova (kg); $W_2$: Peso seco do corpo de prova (kg); $Vol$: volume do corpo de prova (m³) e $\rho_W$: massa específica da água (kg/m³).

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 (cm³)**;** $L$**:** Comprimento do corpo de prova (cm); $A$: Área do corpo de prova (m²)**;** $h$: 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




a) b)

**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.

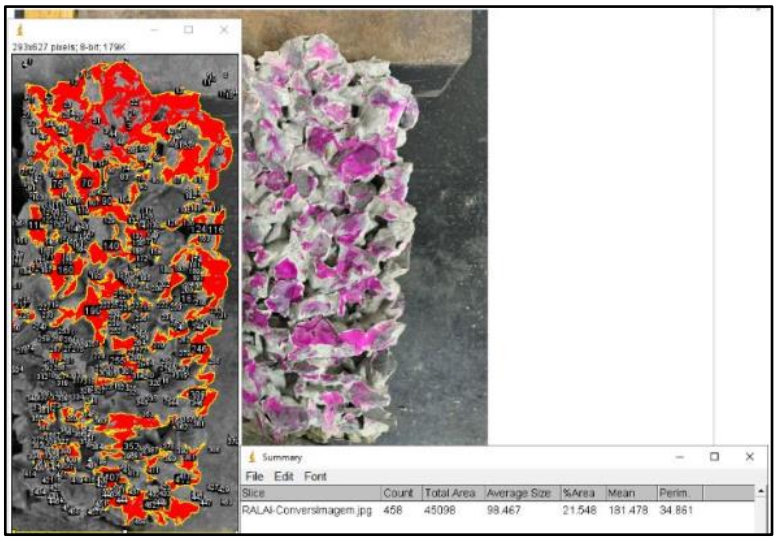
## 2.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA

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 ºC, taxa de $CO_2$ de 5% (50.000 ppm) e umidade relativa de 60±10% (PAULETTI; DAL MOLIN; POSSAN, 2007; RIGO, 2019), com duas repetições.

Após a determinação corpos de prova secos em estufa a 100±5ºC 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

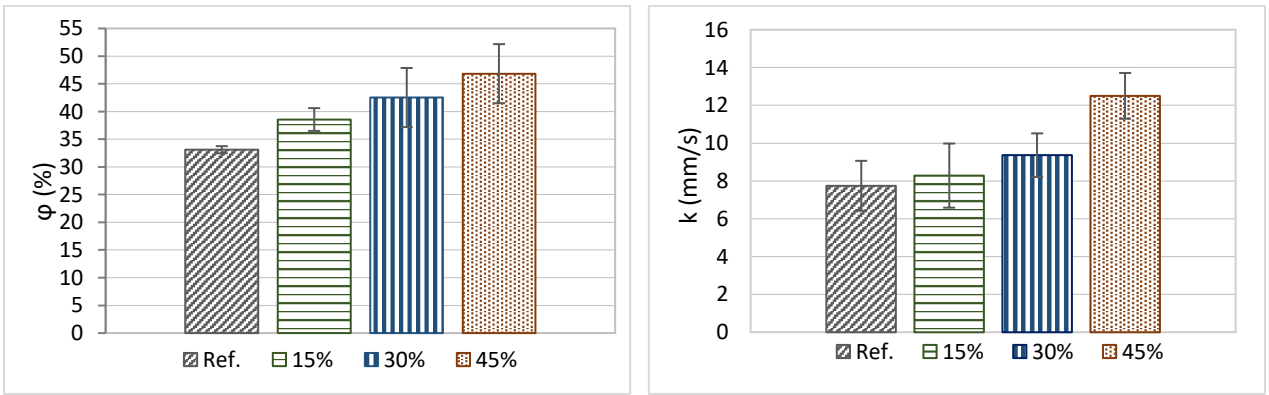



**Fonte**: Autores (2023)

## 3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados da porcentagem de vazios ($\phi$) 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 ($\phi$) 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




a) b)

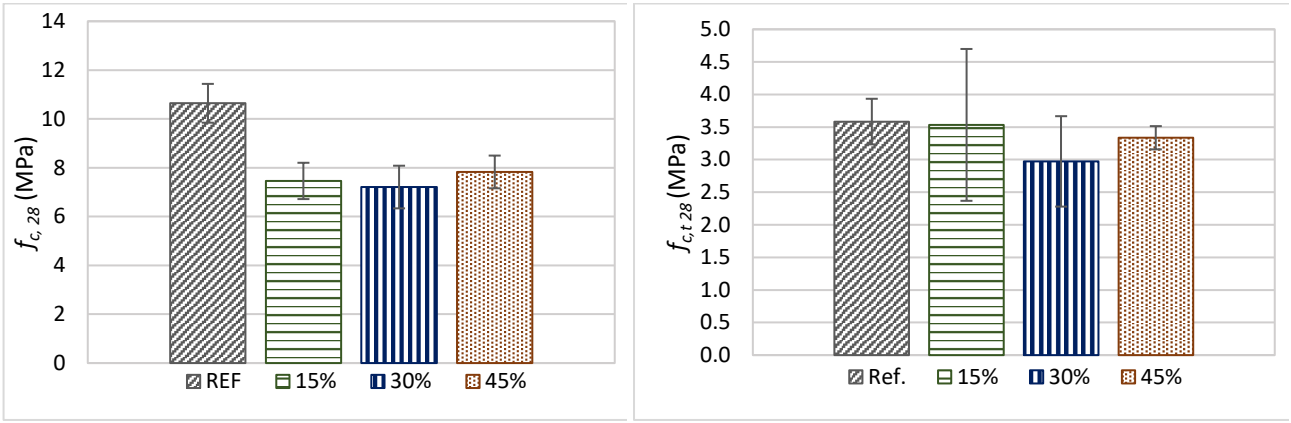
**Fonte**: Autores (2023)

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




a) b)

**Fonte**: Autores (2023)

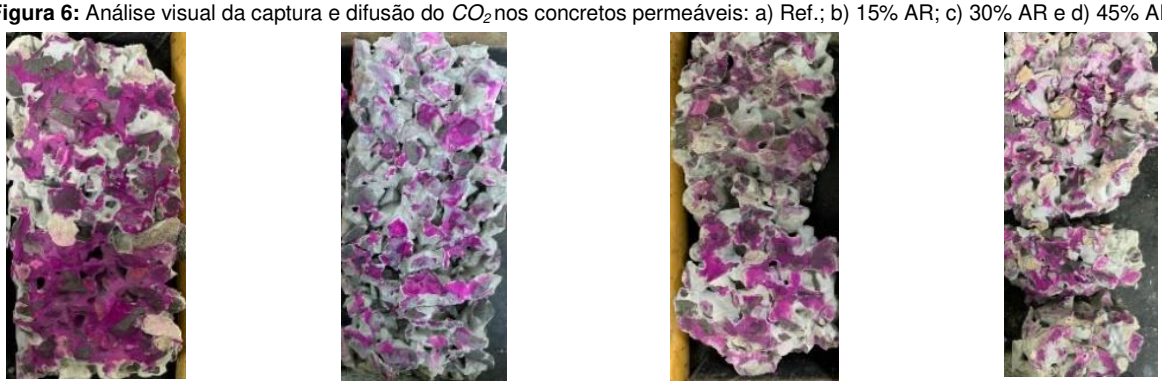
Com o uso do agregado reciclado verificou-se a diminuição da resistência à compressão aos 28 dias ($f_{c,28}$), com variação de 7,46 a 7,83 MPa (Figura 5 a) e dentro da faixa de valores encontrados por outros autores para concretos com agregados reciclados que foi de 2,1 a 24,2 MPa (STRIEDER et al.,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



A= 18,9% A=27,02% A=49,24% A=56,45%

a) b) c) d)

**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 Nº 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 CO2. **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 Construìdo**, 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 $CO_2$ 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.