

PAVIMENTAÇÃO DRENANTE COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL PARA CENTROS URBANOS NA REGIÃO AMAZÔNICA

DRAINAGE PAVING WITH CONSTRUCTION WASTE FOR URBAN CENTERS IN THE AMAZON REGION

PAVIMENTOS PERMEABLES CON RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN PARA CENTROS URBANOS DE LA AMAZONÍA

Nállyton Tiago de Sales Braga¹

Euler Santos Arruda Junior²

Márcio Santos Barata³

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro⁴

RESUMO

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e ambiental de utilização de agregados reciclados de concreto (ARC) em pavimentos drenantes de concreto permeável para a realidade climática da região amazônica. Para isso, foram preparadas amostras de concreto permeável utilizando seixo, brita ou ARC, variando o teor de pasta de cimento e ajustando a relação a/c. Os corpos-de-prova foram testados quanto à resistência à tração na flexão e coeficiente de permeabilidade, determinado pelo método de carga variável, em idades iniciais e após 24 meses. Realizou-se, ainda, Análise de Ciclo de Vida (ACV), conduzida segundo diretrizes da ISO 14040/14044 e utilizando abordagem do tipo *cradle-to-gate*, para substituição de 100% dos agregados naturais por ARC nos concretos. Verificou-se redução da permeabilidade das amostras após 24 meses, sem diferença entre misturas com ARC ou agregados naturais. Observou-se que a substituição total de agregados naturais por reciclados não reduziu a demanda energética ou emissões de poluentes devido à necessária correção do teor de pasta em matrizes com agregados reciclados, o que resultou em maior consumo de cimento. Ressalta-se, no entanto, drástica redução no consumo de matérias-primas não renováveis em amostras com ARC. Conclui-se, desse modo, a necessidade de que sejam abordados parâmetros ambientais globais para utilização de agregados reciclados em concretos permeáveis.

¹ Universidade Federal do Pará | Instituto de Tecnologia | <https://orcid.org/0000-0001-5475-7453>
nallyton.tiago@gmail.com

² Universidade Federal do Pará | Instituto de Tecnologia | <https://orcid.org/0000-0003-4056-9018>
eulerarruda@ufpa.br

³ Universidade Federal do Pará | Instituto de Tecnologia | <https://orcid.org/0000-0002-0012-3778>
marciobarata@ufpa.br

⁴ Universidade Federal do Pará | Instituto de Tecnologia | <https://orcid.org/0000-0001-7931-4042>
lupcordeiroo@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: Concreto permeável; Agregado Reciclado de Concreto; Padrão de ruptura; Permeabilidade; Análise de ciclo de vida.

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the technical and environmental feasibility of using recycled concrete aggregates (RCA) in pervious concrete pavements under the climatic conditions of the Amazon region. For this purpose, pervious concrete samples were prepared using river gravel, crushed stone, or RCA, varying the cement paste content and adjusting the water-to-cement ratio. The specimens were tested for flexural tensile strength and permeability coefficient, determined using a variable-head method, at early ages and after 24 months. Additionally, a Life Cycle Assessment (LCA) was performed according to ISO 14040/14044 guidelines, adopting a cradle-to-gate approach, to assess the full replacement of natural aggregates with RCA in the concretes. A reduction in permeability was observed in all samples after 24 months, with no significant difference between mixtures containing RCA or natural aggregates. It was also observed that the total replacement of natural aggregates with recycled ones did not reduce energy demand or pollutant emissions, due to the necessary adjustment of paste content in mixtures with RCA, which resulted in higher cement consumption. However, a significant reduction in the consumption of non-renewable raw materials was achieved in samples containing RCA. Thus, the study highlights the need to consider global environmental parameters when incorporating recycled aggregates into pervious concretes.

KEYWORDS: Pervious concrete; Recycled Concrete Aggregate; Rupture pattern; Permeability; Life cycle analysis.

RESUMEN

Este estudio se desarrolló con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de agregados reciclados de concreto (ARC) en pavimentos drenantes de concreto permeable, considerando las condiciones climáticas de la región amazónica. Para ello, se prepararon muestras de concreto permeable utilizando canto rodado, grava triturada o ARC, variando el contenido de pasta de cemento y ajustando la relación agua/cemento. Los especímenes fueron ensayados para determinar la resistencia a la tracción por flexión y el coeficiente de permeabilidad, determinado mediante el método de carga variable, tanto a edades iniciales como después de 24 meses. Adicionalmente, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) siguiendo las directrices de las normas ISO 14040/14044, adoptando un enfoque cradle-to-gate, para evaluar la sustitución total de los agregados naturales por ARC en los concretos. Se observó una reducción de la permeabilidad en todas las muestras después de 24 meses, sin diferencias significativas entre las mezclas con ARC o con agregados naturales. También se constató que la sustitución total de agregados naturales por reciclados no redujo la demanda energética ni las emisiones de contaminantes, debido a la necesaria corrección del contenido de pasta en las mezclas con ARC, lo que resultó en un mayor consumo de cemento. Sin embargo, se logró una reducción significativa en el consumo de materias primas no renovables en las muestras con ARC. En consecuencia, el estudio resalta la necesidad de considerar parámetros ambientales globales al incorporar agregados reciclados en concretos permeables.

PALABRAS CLAVE: Hormigón permeable; Agregado Reciclado de Hormigón; Patrón de rotura; Permeabilidad; Análisis del ciclo de vida.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado à urbanização sem políticas públicas de saneamento adaptadas às demandas das comunidades e regiões, tem como consequência no aumento da geração de resíduos sem controle e sem tratamento adequados.

No âmbito da gestão de resíduos sólidos, a vulnerabilidade dos programas de saneamento ambiental urbano torna-se ainda mais evidente. Estima-se que a produção anual de resíduos sólidos na Europa seja de aproximadamente 900 milhões de toneladas (Sadati *et al.*, 2016), correspondendo entre 25% e 40% de todos os resíduos gerados no planeta (Yap *et al.*, 2018; Tam *et al.*, 2018). Menos da metade desse montante era reciclado até 2020, conforme dados do Eurostat (Euronews, 2023). No Brasil, apenas 13% dos resíduos sólidos gerados eram reciclados até a última década (Silva, 2017). No setor da construção, responsável por 81 milhões de toneladas de resíduos sólidos anualmente, apenas 16% a 21% do total é reciclado (Miranda, 2016; Abrelpe, 2022).

Na Amazônia, as condicionantes são ainda mais preocupantes. Baixos investimentos do setor público, grandes distâncias a percorrer, limitações logísticas e a exclusão da região de estratégias ou planos de ação nacionais estão entre os fatores que agravam as dificuldades no recolhimento e no tratamento de resíduos sólidos urbanos. Como consequência, os indicadores de coleta e reciclagem no Norte são muito inferiores àqueles observados no restante do país (Abrelpe, 2022).

Além dos impactos relacionados à gestão de resíduos, a expansão urbana sem planejamento adequado acarreta também desafios hídricos significativos, como a ocorrência de inundações e alagamentos. Quando combinadas com eventos climáticos extremos, deficiências nos sistemas de drenagem e falhas na gestão dos recursos hídricos, essas inundações impactam diretamente a qualidade de vida de populações em situação de vulnerabilidade social. Isso é especialmente crítico para comunidades que vivem próximas a bacias hidrográficas e sub-bacias canalizadas e urbanizadas, como ocorre frequentemente na região amazônica brasileira (Santos, 2017; Braga e Gouveia, 2020; Braga *et al.*, 2022).

Em escala global, destaca-se o exemplo do governo chinês, que em 2012 lançou um plano de integração entre tecnologias de drenagem tradicionais e inovadoras para o desenvolvimento das chamadas “cidades-esponja”. Essas cidades buscam adaptar-se às mudanças climáticas e ambientais, ao processo de urbanização e ao crescimento

populacional. O conceito de cidade-esponja associa-se diretamente a cidades resilientes, adaptativas e sustentáveis, equipadas com sistemas de drenagem capazes de receber, armazenar, purificar e reutilizar a água da chuva (Dong *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2018).

Nesse contexto, ganham destaque os pavimentos permeáveis, sobretudo o concreto permeável de alta porosidade. Esse tipo de pavimento é capaz de absorver águas superficiais e resistir a cargas de tráfego (ACI-522R, 2010; ABNT, 2015). Além disso, apresenta potencial para reduzir a formação de ilhas de calor e as emissões de gases de efeito estufa, bem como atenuar ruídos urbanos decorrentes do tráfego de veículos motorizados (Wang *et al.*, 2018; Meddah *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2022).

Diversos estudos têm avaliado o desempenho do concreto permeável em regiões de clima tropical, caracterizadas por regimes pluviométricos intensos e temperaturas elevadas, como na Amazônia brasileira (Braga *et al.*, 2022). Braga *et al.* (2022) demonstraram o potencial desse tipo de pavimento para absorver e direcionar águas superficiais em situações de chuvas intensas e prolongadas. Teixeira *et al.* (2021), por sua vez, investigaram o processo de colmatação de poros superficiais devido ao acúmulo de sujidades, com consequente perda do potencial permeável, utilizando matérias-primas comumente disponíveis na região amazônica.

Apesar dos avanços obtidos, ainda há escassez de estudos que avaliem o desempenho a longo prazo e os impactos ambientais associados à produção de concretos permeáveis com agregados reciclados, especialmente em contextos tropicais e amazônicos. Essa lacuna de conhecimento reforça a importância de investigações que integrem desempenho técnico e sustentabilidade ambiental.

As mudanças climáticas e a intensificação de fenômenos relacionados à frequência e ao regime de chuvas nas cidades tornam imprescindível a adoção de medidas de mitigação por parte do poder público e da sociedade civil. Isso inclui ações para reduzir os efeitos devastadores de inundações e alagamentos, especialmente em áreas densamente impermeabilizadas, e estratégias de reutilização e reaproveitamento de resíduos, levando em conta as particularidades de cada região.

Além dos aspectos técnicos e funcionais, torna-se essencial avaliar os impactos ambientais de materiais e processos empregados em soluções urbanas sustentáveis. Uma ferramenta comumente empregada para avaliar a viabilidade e os impactos ambientais de materiais e processos é a Análise de Ciclo de Vida (ACV). Por meio dela, é possível, por

exemplo, comparar a substituição de agregados graúdos em concretos permeáveis e avaliar os efeitos desse processo sobre o consumo de ligantes.

Diante disso, o presente estudo avaliou a resistência mecânica e o coeficiente de permeabilidade, em idades iniciais e após 24 meses, de concretos permeáveis produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos. O objetivo foi verificar a viabilidade técnica da substituição integral (100%) de agregados comumente utilizados para produção de concretos permeáveis na região por agregados reciclados. Realizou-se, adicionalmente, uma Análise de Ciclo de Vida dos concretos em função dos materiais utilizados, com o objetivo de avaliar a pegada de carbono e a demanda energética de concretos permeáveis com agregados convencionais, bem como a substituição destes por 100% de agregado reciclados, de modo a avaliar fontes alternativas para a produção de concreto permeável na região amazônica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais: Utilizou-se, como agregados graúdos, resíduos de concreto triturados e peneirados, obtidos a partir de amostras de concreto coletadas no entorno do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. As amostras foram recolhidas de corpos-de-prova descartadas ao longo dos anos, sem práticas de aproveitamento ou reciclagem bem definidas. As amostras foram recolhidas aleatoriamente, trituradas em um britador de mandíbula e peneiradas em malhas que possibilitassem emular a curva granulométrica normalmente utilizada para produção de concretos permeáveis na região, conforme será detalhado na seção de resultados.

Utilizou-se também de seixo e brita, agregados graúdos comumente utilizados como material base para produção de placas de concreto permeável para pavimentos de tráfego leve. Foi utilizado cimento Portland composto CP II-F, com massa específica de 3,1 g/cm³, que contém fíler calcário em sua composição, contribuindo para maior trabalhabilidade e melhor empacotamento das partículas.

Para a dosagem do concreto permeável, foram desenvolvidas misturas de concreto permeável com agregados graúdos comumente utilizados (seixo e brita) e uma mistura com agregados reciclados (Tabela 1). Adotou-se, para isso, o método de dosagem de Castro *et al.* (2009), que estabelece uma relação entre o consumo de cimento, a massa unitária do agregado graúdo e o índice de vazios do esqueleto granular. O método escolhido é

particularmente pertinente quando se adota o uso de agregados com grandes variações de massa unitária ou porosidade, uma vez que é possível equilibrar a elevada porosidade dos grãos reciclados, por exemplo, com um maior consumo de pasta de cimento (Braga *et al.*, 2022). Considerou-se como constantes o teor de vazios conectados e a relação água/cimento.

Tabela 1 – Dosagem das amostras de concreto

Mistura	Material	Agregado graúdo (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	A/c	Vazios concentrados na matriz do concreto
MS	Seixo de cava	1529	360	0,29	0,16
MB	Brita	1424	420	0,29	0,16
MR	Resíduo de construção	1184	450	0,29	0,16

Fonte: Braga *et al.* (2025)

Moldagem: corpos-de-prova prismáticos medindo 80 x 80 x 320 mm e corpos-de-prova cilíndricos medindo 100 x 200 mm foram preparados para cada mistura, para testar resistência à tração na flexão sob carga constante e permeabilidade, respectivamente. Antes do processo de mistura, os agregados naturais e reciclados foram imersos em água durante 1 hora e secos ao ar durante 1 hora para evitar que absorvessem a água de mistura. As misturas foram submetidas aos mesmos procedimentos de moldagem e cura. Um compactador vibratório pneumático foi utilizado para compactar as amostras. Após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados, pesados e curados em água por 28 dias (ABNT, 2015). Ainda no estado fresco, as amostras foram testadas quanto ao teor de ar aprisionado nas amostras, teste que permite verificar a porosidade das misturas, conforme procedimento detalhado em ABNT (2008). Após o processo de cura, as amostras foram testadas quanto à massa específica e massa unitária (ABNT, 2008; ABNT, 2006), permeabilidade (ABNT, 2015) e resistência à tração na flexão (ABNT, 2010).

O coeficiente de permeabilidade foi determinado por meio de permeâmetro de carga variável, método considerado adequado para materiais de elevada porosidade, como o concreto permeável. Esse procedimento permite medir com precisão o escoamento da água em condições de fluxo que simulam de forma mais realista a drenagem em pavimentos, já que a altura da lâmina d'água diminui progressivamente durante o ensaio. Além de oferecer resultados confiáveis e reproduzíveis, o método de carga variável apresenta simplicidade

operacional e requer menor volume de água em comparação ao ensaio de carga constante, o que o torna uma alternativa prática e eficaz para avaliação laboratorial.

As amostras de ARC e brita foram testadas novamente quanto à permeabilidade após 24 meses, a fim de avaliar a alteração na permeabilidade do concreto permeável exposto a um ambiente externo não controlado. Para isso, as amostras foram posicionadas em área externa ao laboratório, na qual não ficaram sujeitas à passagem e veículos ou pessoas, mas às intempéries da região, como elevada umidade e intenso regime pluviométrico, com eventual saturação de camadas drenantes.

Definiu-se, finalmente, Análise de ciclo de vida para as misturas com diferentes agregados. O impacto ambiental dos concretos permeáveis com agregados graúdos convencionais e agregados reciclados foi estabelecido através de resultados de emissões de gases poluentes e demanda energética durante o processo de obtenção e/ou fabricação dos materiais.

Preliminarmente, foram definidos o objetivo e o escopo da Análise de Ciclo de Vida (ACV) conduzida segundo diretrizes da ISO 14040/14044. O objetivo, conforme discutido na seção introdutória deste estudo, foi avaliar a pegada de carbono e a demanda energética de concretos permeáveis produzidos com agregados naturais, bem como daqueles com substituição integral (100%) por agregados reciclados. Embora os agregados reciclados tenham sido produzidos em escala laboratorial, a análise considerou um cenário de produção em larga escala, baseado em processos de coleta urbana de resíduos de concreto. Os dados do Inventário da Análise de Ciclo de Vida (IACV) foram obtidos a partir de bibliografia nacional e de fontes regionais.

O escopo do estudo incluiu a extração e a produção das matérias-primas, os materiais auxiliares e o consumo de energia elétrica. A análise contemplou as emissões de CO₂ e a demanda energética associadas às etapas de obtenção das matérias-primas e fabricação dos concretos permeáveis, adotando como fronteira o limite *cradle-to-gate*, ou seja, até a saída dos produtos na fábrica.

Os resultados da ACV foram comparados a nível de índice de ligante, IL (equação 1), (Kg de cimento/m³. MPa⁻¹) e índice de Carbono, IC (equação 2), (Kg CO₂/m³. MPa⁻¹). Esses indicadores ambientais foram propostos por Damineli (2013), e são utilizados para avaliar a

eficiência ambiental em relação ao consumo de ligante por m³ de concreto para cada MPa, bem como as emissões de CO₂ por m³ para cada MPa, respectivamente.

$$IL = \frac{L}{f_{28}} \quad 1$$

$$IC = \frac{C}{f_{28}} \quad 2$$

No qual L é o consumo total de ligante na mistura de concreto (kg/m³), C é a emissão de poluentes pela extração, fabricação e transporte dos materiais de base (kg/m³) e f₂₈ é a resistência característica dos concretos aos 28 dias. Neste estudo, as emissões totais foram associadas à extração/fabricação/transporte de agregados e do cimento de referência. Por último, realizou-se também avaliação do consumo de recursos naturais não renováveis (NR²), tomando em conta os insumos necessários para produção do cimento e obtenção dos agregados naturais, em toneladas para cada m³ de concreto produzido.

3 RESULTADOS

Ao analisar a distribuição granulométrica da brita normalmente utilizada em concretos permeáveis da região (ABNT, 2003), constatou-se que o material é composto por 70% de agregado passante na peneira 3/8" e retido na peneira 4", e 30% de agregado passante na peneira de 1/2" e retido na peneira de 3/8".

Para avaliar comparativamente o desempenho dos agregados reciclados com propriedades granulométricas semelhantes às dos agregados naturais, definiu-se experimentalmente a massa unitária (ABNT, 2006), massa específica (Leite, 2001; ABNT, 2003), índice de vazios e absorção de água (ABNT, 2003). Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 2. Os agregados reciclados possuem capacidade de absorção de água até 11 vezes maior que os agregados naturais, o que torna o agregado reciclado mais leve, com menor massa específica e menor massa unitária.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos agregados

Materiais	Massa Unitária (Kg/M ³)	Massa Específica (Kg/M ³)	Vazios Do Esqueleto Granular	Absorção De Água (%)
Seixo De Cava	1528,9	2616,5	41,42	1,91
Brita	1424,1	2611,8	45,48	0,75
ARC	1183,8	2493,8	47,47	8,45

Fonte: Braga *et al.* (2025)

Os resultados de caracterização das misturas, mecânicos e de permeabilidade foram resumidos na Tabela 3. A mistura de seixo (MS) apresentou maior percentual de ar aprisionado na matriz de concreto, e maior coeficiente de permeabilidade, devido à relação entre a porosidade total e o percentual de poros conectados já reportada em outros estudos (Xu *et al.*, 2018; Bhutta *et al.*, 2012). A NBR 16416 (2015) estabelece coeficiente de permeabilidade mínimo equivalente ou superior a $1,0 * 10^{-3}$ mm/s, enquanto a ACI 522R (2011) estabelece coeficiente mínimo como equivalente ou superior a $1,4 * 10^{-3}$ mm/s. Ressalta-se que todas as misturas apresentaram coeficientes de permeabilidade pelo menos 3 vezes superiores às recomendações normativas. No entanto, é importante destacar que as regulamentações para pavimentação drenante dificilmente tomam em consideração as particularidades climáticas de cada região.

Em estudo desenvolvido para a região amazônica, Braga *et al.* (2022) abordou o potencial uso de pavimentos de concreto permeável. Os autores submeteram placas de concreto a simulações contínuas de chuvas intensas, consistentes com o regime pluviométrico da região. Apesar de, assim como no presente estudo, todas as misturas terem apresentado coeficientes de permeabilidade muito acima das recomendações normativas, observou-se que a proporção, diâmetro e distribuição granulométrica dos agregados, bem como a relação a/c e o teor de pasta de cimento, influenciaram o desempenho das superfícies drenantes em relação à ocorrência de escoamento superficial após diversos eventos de chuva. Os autores verificaram ainda a perda de capacidade drenante após eventos de chuva muito próximos, ressaltando-se que o coeficiente de permeabilidade tende a diminuir a curto prazo pela saturação da camada drenante.

No presente estudo, a mistura com agregados reciclados de concreto (MR) apresentou o menor coeficiente de permeabilidade k , apesar do elevado percentual de ar aprisionado registrado experimentalmente. Esse comportamento pode ser atribuído à maior porosidade intrínseca dos agregados reciclados, que tende a reduzir a conectividade dos poros e dificultar o escoamento da água. Por outro lado, a mistura com brita apresentou o menor teor de ar aprisionado na matriz, resultado que se deve principalmente ao formato alongado e mais regular dos grãos, favorecendo maior empacotamento e menor volume de vazios internos.

Esses fatores são determinantes para o desempenho hidráulico de concretos permeáveis e podem influenciar a viabilidade de utilização das camadas drenantes em médio

e até curto prazo, garantindo escoamento adequado sem comprometer a durabilidade, como também foi observado por Braga *et al.* (2022). Além disso, esses resultados ressaltam a importância de considerar a natureza e a granulometria dos agregados reciclados na formulação de concretos permeáveis, de modo a otimizar tanto a permeabilidade quanto a resistência mecânica da matriz.

Tabela 3 – Propriedades físicas das misturas de concreto

Mistura	Ar aprisionado (%)	Coeficiente De Permeabilidade de K (Mm/S)	Massa Específica (Kg/Dm ³)	Massa Unitária (Kg/Dm ³)	Resistência À Tração Na Flexão (Mpa)	Vazios concentrados na matriz do concreto
MS	31,15	6,5	1,59	2,64	2,31	0,16
MB	21,67	4,9	1,59	2,59	3,68	0,16
MR	26,46	4,8	1,64	2,42	2,42	0,16

Fonte: Braga *et al.* (2025)

Em relação à resistência à tração na flexão, a normativa nacional recomenda, conforme abordado anteriormente, o mínimo de 1 MPa com 28 dias para vias de tráfego de pessoas, e de 2 MPa para o tráfego de veículos leves. A ACI 522R (2011), por sua vez, não estabelece resistência mecânica mínima, mas aborda que as resistências à tração na flexão podem variar de 1 a 3,8 MPa com 28 dias.

Observou-se que os corpos-de-prova com ARC apresentaram menor resistência à flexão, mesmo com o elevado consumo de pasta de cimento. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores, nos quais matrizes de concreto permeável com 100% de agregados reciclados apresentaram resistência mecânica inferior em comparação com misturas que incluem alguma proporção de agregados naturais (Ali *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2022). Tal comportamento está diretamente relacionado à elevada porosidade interna e à presença de microvazios isolados nos agregados reciclados, que reduzem a densidade da matriz, comprometem a transferência de tensões e, consequentemente, diminuem a resistência à flexão, sem contribuir significativamente para a permeabilidade do concreto.

Resultados similares foram reportados por Vieira *et al.* (2022), nos quais se observou diminuição da resistência mecânica e aumento do volume de vazios em concretos permeáveis à medida que a proporção de agregado reciclado aumentava. Por outro lado, a mistura com brita (MB) apresentou maior resistência, atribuída ao menor teor de ar aprisionado na matriz

de concreto e à melhor interação pasta-agregado proporcionada pelo formato e empacotamento dos grãos naturais (Xu *et al.*, 2018).

Além disso, os concretos produzidos com ARC exigiram cerca de 25% a mais de cimento para atingir a resistência mínima de tração na flexão recomendada para pavimentos de tráfego leve, conforme normativa nacional. Esse aumento reflete a necessidade de compensar a maior porosidade dos agregados reciclados, garantindo preenchimento dos vazios, melhor adesão da pasta ao agregado e densificação da matriz, fatores cruciais para alcançar o desempenho mecânico desejado. O aumento de aproximadamente 25% no consumo de cimento para concretos produzidos com agregados reciclados pode ser explicado principalmente pela maior porosidade e absorção de água dos agregados reciclados, características típicas desses materiais provenientes de concreto triturado. A elevada porosidade gera um aumento no volume de vazios na matriz do concreto, resultando em menor densidade e menor contato entre pasta e agregado, o que reduz a capacidade de transmissão de tensões e, consequentemente, a resistência à tração na flexão.

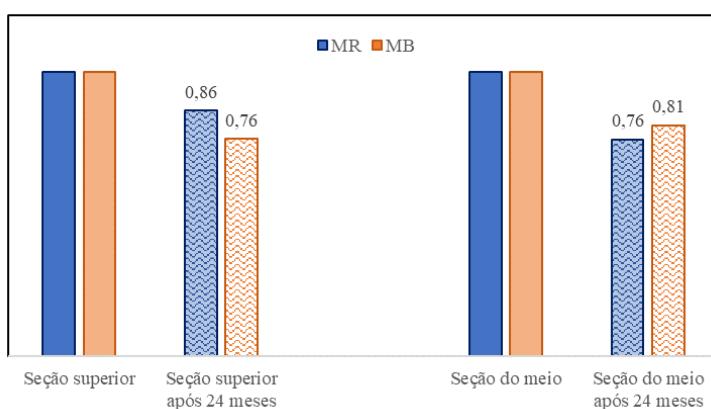
Além disso, os agregados reciclados podem apresentar textura superficial mais rugosa e microfissuras internas provenientes do concreto original, que atuam como pontos iniciadores de fissuração sob carga flexural. Para compensar essas limitações e atingir a resistência mínima exigida para pavimentos de tráfego leve (2,0 MPa, conforme normativa nacional), foi necessário aumentar o teor de cimento, garantindo maior quantidade de pasta para preencher vazios, melhorar a aderência e densificar a matriz.

Portanto, a necessidade de incremento no consumo de cimento está diretamente relacionada às características físicas e mecânicas intrínsecas dos agregados reciclados, que impactam o desempenho do concreto permeável, evidenciando a importância de ajustes na formulação quando se utiliza 100% de substituição de agregados naturais.

A comparação dos coeficientes de permeabilidade em cada face dos corpos-de-prova cilíndricos, imediatamente após a cura e após 24 meses, é mostrada na Figura 1. O coeficiente de permeabilidade diminuiu da primeira para a segunda medição, em ambas as seções testadas de cada amostra. Nas misturas com agregados reciclados, observou-se diminuição de 24% no coeficiente de permeabilidade na seção do meio e uma diminuição de 14% na seção superior. Em média, a matriz de concreto apresentou redução de 19% no coeficiente de permeabilidade. No MB, o coeficiente de permeabilidade diminuiu 19% na seção do meio e

24% na seção superior da amostra. Em média, a matriz de concreto com brita apresentou redução de 21% no coeficiente de permeabilidade. Os resultados são consistentes com observações feitas por Merten *et al.* (2022) em um estudo de colmatação em concreto permeável com agregados reciclados.

Figura 1 – Redução do coeficiente de permeabilidade para amostras MR e MB após cura e 24 meses de exposição



Fonte: Braga *et al.* (2025)

As diferenças no coeficiente de permeabilidade entre as camadas superior e inferior eram esperadas porque existe uma relação direta entre a distribuição vertical dos poros no concreto permeável e a altura de compactação, o que faz com que a superfície do pavimento tenha maior densidade e menor porosidade do que as camadas inferiores. Como o coeficiente de permeabilidade está diretamente relacionado com a porosidade da matriz do concreto, a metade inferior do concreto permeável é consequentemente mais permeável.

Assim, considerando o coeficiente de permeabilidade das misturas como sendo controlado pelas faces de menor permeabilidade, o coeficiente diminuiu de $4,82 \times 10^{-3}$ para $3,66 \times 10^{-3}$ mm/s para as misturas de MR e de $4,88 \times 10^{-3}$ a $3,71 \times 10^{-3}$ mm/s para as misturas MB. Tais resultados também foram observados no estudo desenvolvido por El-Hassan *et al.* (2019), no qual foi simulado o efeito da exposição de pavimentos permeáveis à ação de materiais obstruidores que pudessem resultar na colmatação de poros superficiais. Segundo os autores, houve uma redução de permeabilidade de aproximadamente 7% por ano de exposição, devido ao entupimento e à redução da conectividade entre os poros.

Como as amostras foram expostas a um ambiente externo não controlado, mas não foram utilizadas como camadas de pavimento, conclui-se que a redução do coeficiente de permeabilidade está relacionada às partículas sólidas carreadas na água da chuva, e à colmatação dos poros devido às reações tardias de hidratação e à transformação de hidróxido de cálcio em hidrato de cálcio hidratado, o que densifica a matriz do concreto e reduz a porcentagem de vazios (Bijen, 1996). Cabe ressaltar que apesar da redução da permeabilidade, as duas misturas testadas ainda apresentaram coeficiente de permeabilidade superior ao valor mínimo recomendado pelas normas nacionais e internacionais para validação de pavimentos drenantes (ACI522R-06, 2006; ABNT, 2015).

Realizou-se ACV das três misturas, conforme dados de cada material de entrada estabelecido na Tabela 4. Para simplificação da análise, considerou-se que não houve emissão de gases poluentes para a produção dos agregados reciclados, que foram obtidos a partir de resíduos de concreto de resistências variadas.

Tabela 4 – Dados para análise de ciclo de vida

Insumo	Energia Para Produção (Kj/Ton)	Emissão De CO_2 (Kj/Ton)
Brita	83000 (Hammond <i>et al.</i> , 2008)	5 (Hammond <i>et al.</i> , 2008)
Seixo De Cava	98580 (Silva e Maués, 2021)	6,15 (Silva e Maués, 2021)
Agregado Reciclado De Concreto	13464 (Coelho e Brito, 2013)	0 (Dobrovolski, 2022)
CP II F 32	4100000 (Belizario-Silva <i>et al.</i> , 2022)	760 (Belizario-Silva <i>et al.</i> , 2022)

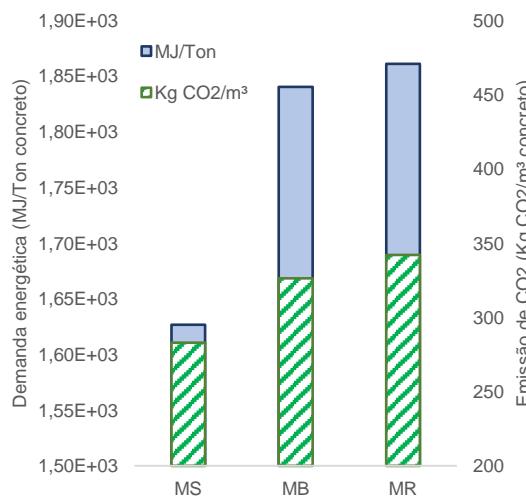
Fonte: Braga *et al.* (2025)

A partir dos dados de entrada, calculou-se o impacto ambiental relacionado à produção dos concretos permeáveis com cada tipo de agregado, relacionando-se a emissão de gases poluentes e a demanda energética associada, respectivamente (Fig. 2). Conforme os resultados, verifica-se que a substituição total de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto, em contexto em que se faça a correção da resistência da matriz de concreto através da incorporação de mais ligante, não é justificável por reduções em demanda energética ou menor emissão de poluentes. Isso ocorre porque o cimento responde por praticamente todo o impacto ambiental associado a esses dois parâmetros (Fig. 3). Mesmo em uma abordagem simplificada com emissão de poluentes igual a zero, na qual não são levados em consideração processos intermediários para obtenção dos agregados reciclados, as

emissões decorrentes do maior consumo de ligante são preponderantes para a viabilidade ambiental da matriz com 100% de substituição de agregados naturais.

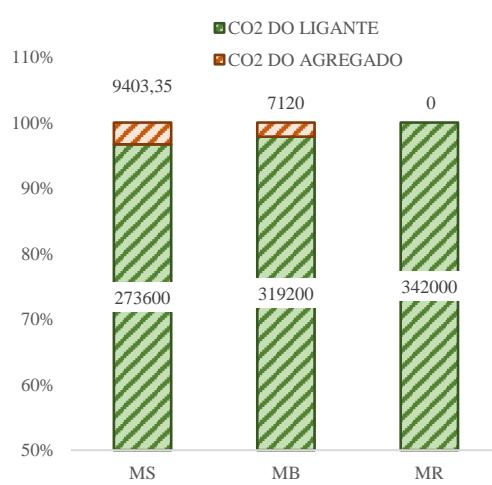
Assim, a produção de concreto permeável com seixo apresentou a menor demanda energética, com 1630 MJ/Ton de concreto permeável, em comparação a 1840 MJ/Ton com uso de brita e 1860 MJ/Ton pelo uso de agregado reciclado. Em relação à emissão de gases poluentes, o seixo também apresentou o menor resultado entre os três agregados graúdos considerados: 283 Kg de CO_2/m^3 de concreto, 13% a menos que a brita e 17% a menos que o ARC.

Figura 2 – Demanda energética x Emissão de CO_2



Fonte: Braga et al. (2025)

Figura 3 – Emissão de poluentes



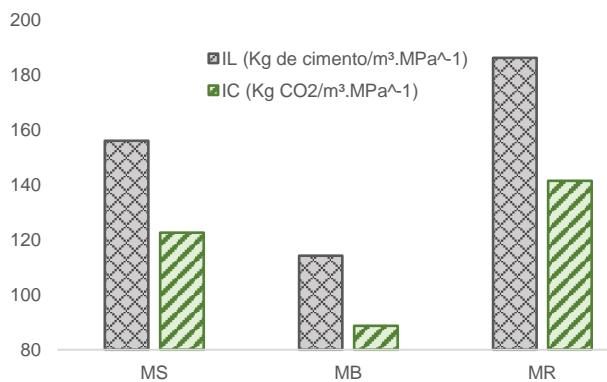
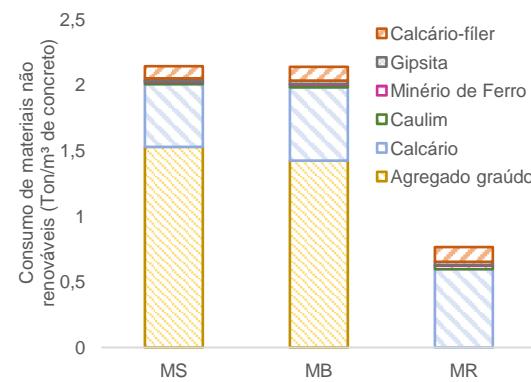
Fonte: Braga et al. (2025)

Naturalmente, quando são levados em conta o IL e o IC das misturas feitas, aquela com agregado reciclado apresentou maior índice de ligante por metro cúbico de concreto para cada MPa, bem como maior emissão de gases poluentes (Fig. 4). Mais uma vez, o resultado é correlacionado à incorporação de maior volume de ligante para compensar as baixas resistências apresentadas pelos agregados reciclados. A brita, por sua vez, por ter proporcionado concretos com maiores resistência mecânica, apresentou os menores valores entre os dois coeficientes.

Finalmente, considerando-se o consumo de materiais não renováveis para cada m^3 de concreto permeável, o impacto de extração de matérias-primas é 65% menor em concretos permeáveis com agregados reciclados (Fig. 5). Ou seja, mesmo com maior demanda

energética e emissão de gases poluentes associada à correção do teor de ligante da mistura, há significativa redução da demanda de materiais não renováveis, entre agregados naturais e insumos necessários para produção do cimento utilizado. Em média, os concretos permeáveis com agregados naturais demandaram mais de 2 toneladas de insumos para cada m³, enquanto o concreto produzido com agregados reciclados apresentou demanda inferior a 0,8 tonelada/m³ de concreto.

Figura 4 – Relação IL x IC

Fonte: Braga *et al.* (2025)Figura 5 – Consumo de matéria-prima não renovável (NR²)Fonte: Braga *et al.* (2025)

4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que é tecnicamente viável substituir 100% dos agregados convencionalmente utilizados pela indústria regional por agregados reciclados em concretos permeáveis para pavimentos de tráfego leve, mantendo resistência à tração na flexão e permeabilidade compatíveis com as normas.

Do ponto de vista ambiental, a substituição integral não apresenta vantagem em termos de emissões de gases de efeito estufa e demanda energética, devido ao aumento do consumo de cimento necessário para compensar a maior porosidade dos agregados reciclados, e especialmente em função do método de dosagem adotado, que corrige limitações de resistência através do teor de pasta das misturas. Por outro lado, houve redução significativa no consumo de matérias-primas não-renováveis, indicando potencial benefício em termos de sustentabilidade de recursos.

Portanto, embora a substituição integral de agregados naturais por reciclados seja tecnicamente viável, seus benefícios ambientais na região amazônica não são garantidos sem ajustes na mistura e gestão adequada do consumo de cimento. É essencial que decisões sobre o uso de agregados reciclados em concretos permeáveis considerem impactos ambientais globais e as particularidades da região, evitando práticas que aparentam ser sustentáveis, mas que podem aumentar emissões e consumo energético em uma região de recursos sensíveis e logística desafiadora.

5 AGRADECIMENTOS

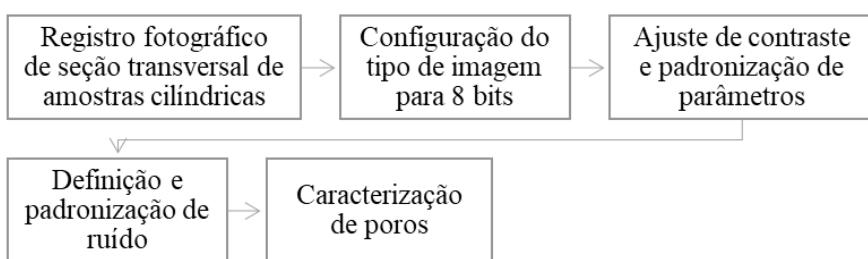
O presente estudo foi financiado pelo projeto universal do Conselho Nacional para Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq), número 432615/2016-4.

6 ANEXO A

Como estudo complementar, realizou-se análise de Processamento Digital de Imagens (PDI) e Avaliação do padrão de ruptura das amostras com agregados naturais e reciclados.

As características dos poros superficiais das amostras foram analisadas pela técnica de Processamento Digital de Imagens com o software Image J. Neste procedimento foram avaliadas as dimensões e distribuição dos poros nas matrizes de concreto através da análise dos perfis transversais dos corpos-de-prova cilíndricos de cada seção (superior e inferior). As etapas do PDI estão detalhadas na Figura 6. Este procedimento permite contar os poros e determinar o perímetro e a área de cada poro. O objetivo da análise foi determinar possíveis padrões de tamanho de poros superficiais que pudessem ser correlacionados com o coeficiente de permeabilidade.

Figura 6 – Método de Processamento Digital de Imagens



Fonte: Braga *et al.* (2025)

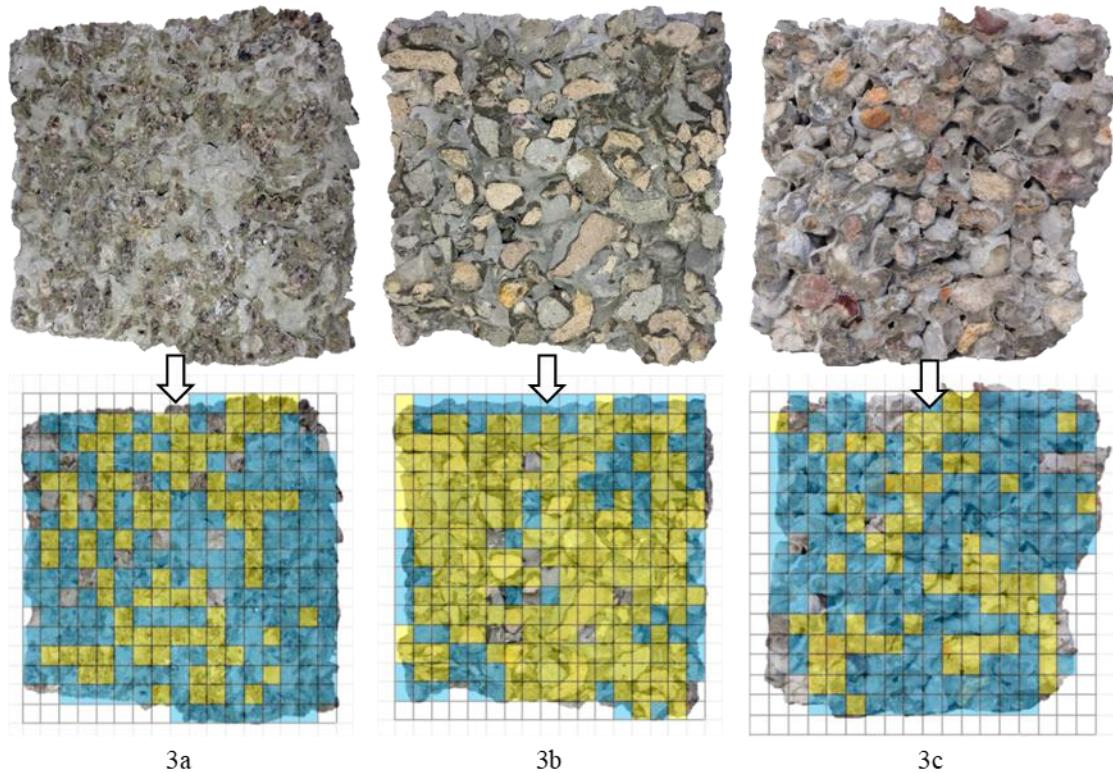
Um método estimativo para avaliar o padrão de ruptura das misturas foi adaptado de Torres *et al.* (2015), para definir visualmente a influência da pasta de cimento e da porosidade dos agregados graúdos no comportamento mecânico dos corpos-de-prova. Para definir os padrões de fratura dos corpos de prova, foi realizado um delineamento visual utilizando um conjunto de malhas quadradas nas dimensões características dos agregados graúdos predominantes - 4,8 x 4,8 mm. Uma vez definido o padrão de fratura de cada unidade de malha, foi determinado o modo de fratura para a área total da seção transversal de cada amostra.

As etapas do procedimento consistem em identificar um padrão de fratura predominante nas unidades de tela. Então, o percentual correspondente à fratura causada pelo colapso da pasta de cimento e o percentual correspondente à fratura causada pelo colapso dos agregados graúdos são relacionados à área total da seção transversal de cada amostra. Por se tratar de uma análise estritamente visual, a avaliação do padrão de fissura foi repetida três vezes para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

A partir da análise das malhas sobrepostas na seção transversal de cada corpo-de-prova (Fig.7), ficou evidente que o padrão de ruptura foi diferente para os agregados naturais e reciclados. As fraturas ocorridas nos agregados estão destacadas em amarelo. Nas misturas com ARC, foram observados diversos focos de fratura associados ao colapso dos grãos do agregado graúdo, conforme a Figura 7b. Isto se deve à alta porosidade e à consequente menor resistência mecânica dos agregados reciclados: A partir da análise da malha sobreposta à seção transversal das amostras de ARC, constatou-se que 79% das células apresentavam fratura de grãos. Outros estudos demonstraram que a menor resistência em concretos permeáveis com ARC está relacionada ao baixo teor de pasta nas misturas (Yap *et al.*, 2018; Barnhouse e Srubar, 2016; Sumanasooriya e Neithalath, 2011), mas neste caso, o teor de pasta das misturas com agregados naturais e reciclados, bem como a absorção de água pelos agregados utilizados, foi corrigida pelo método de dosagem adotado.

Nos agregados naturais, constatou-se que o padrão de fratura ocorreu frequentemente na junção entre a pasta de cimento e os contornos do agregado graúdo e não estava necessariamente associado ao colapso dos grãos: Nas misturas com brita (Fig. 7a), 36% das células da malha examinadas apresentaram fraturas nos grãos; por sua vez, nas amostras com seixo, o colapso dos agregados graúdos foi observado em 30% da área total da malha (Fig. 7c).

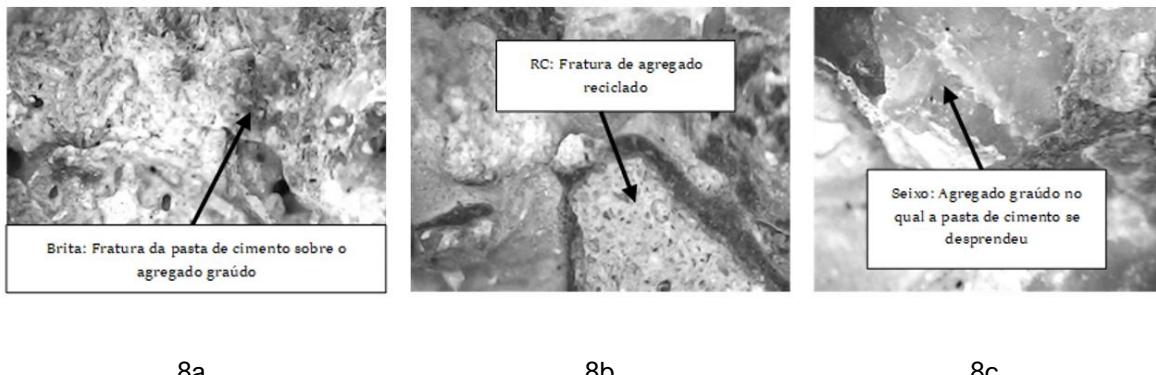
Figura 7 – Representação da malha com células de 4,8x4,8 mm para estimativa do padrão de ruptura nas amostras de concreto. Em amarelo destaca-se o colapso dos agregados graúdos e em azul a fratura da pasta de cimento. 3a) MB, 3b) MR, 3c) MS



Fonte: Braga *et al.* (2025)

Comparando o desempenho dos agregados naturais, as diferentes resistências observadas no estudo podem ser atribuídas ao grau de empacotamento e ao percentual de pasta de cimento, e consequentemente aos vazios em cada mistura, uma vez que as amostras apresentam diferenças na porosidade interna que podem afetar as resistências nas matrizes – 31,15% em MS, e 21,67% em MB, redução de 30% de misturas com brita para misturas com seixo. A mistura com brita apresentou 17% mais pasta de cimento do que aquela com seixo como agregado graúdo. Além disso, as misturas de seixos apresentaram baixa adesão da pasta de cimento aos grãos, conforme mostrado na Figura 8c.

Figura 8 – Detalhamento do modo de ruptura. 8a) MB, 8b) (centro) MR, 8c) MS



8a

8b

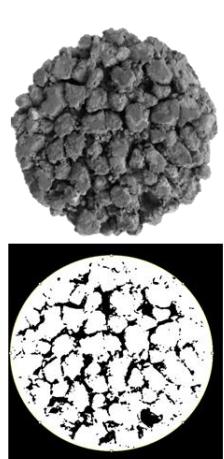
8c

Fonte: Braga *et al.* (2025)

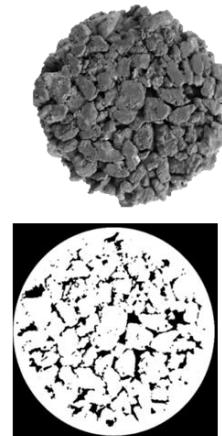
A análise de poros foi realizada em amostras com agregados naturais e reciclados, utilizando o método de PDI. Como todas as amostras com agregados naturais apresentaram resistência à tração na flexão suficiente para serem utilizadas como pavimento de tráfego leve, optou-se por analisar, em segundo momento, apenas amostras com menor coeficiente de permeabilidade inicial e maior consumo de ligante, ou seja, com maior risco de colmatação superficial de poros, na segunda fase dos testes. Dessa forma, foram avaliadas as relações entre a quantidade e as dimensões dos poros em cada superfície das amostras de ARC (Fig.9) e brita (Fig.10).

Figura 9 – Método PDI para análise de poros em amostras de MR

Figura 10 – Método PDI para análise de poros em amostras de MB



Fonte: Braga *et al.* (2025)



Fonte: Braga *et al.* (2025)

Os resultados da caracterização dos poros na seção superior e na seção do meio das amostras, respectivamente, estão resumidos na Tabela 5. Nas duas misturas, a seção do meio apresentou poros até três vezes maiores e em menor quantidade que os poros da seção superior. Observou-se também que as amostras MR apresentaram área total de poros menor que as amostras MB, apesar de números de poros semelhantes, o que pode ser explicado pelo maior percentual de pasta de cimento nas misturas com agregados reciclados.

Tabela 5 – Caracterização de poros das amostras

Amostra	Número De Poros	Área Total (Mm ²)	Diâmetro Médio (Mm)	Área De Poros (%)	Perímetro (Mm)
MB	516	2670,49	5,18	26,46	8,83
	299	2286,62	14,34	22,33	13,41
MR	519	903,31	1,74	8,44	3,99
	316	1361,55	4,31	14,23	8,02

Fonte: Braga *et al.* (2025)

7 REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 522R-10. *Report on pervious concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2010. 38 p. ISBN 978-0-87031-364-6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Índice de reciclagem no Brasil é de apenas 4%, diz ABRELPE*. 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe>. Acesso em: 24 mar. 2025.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16416:2015. Pavimento permeável de concreto — Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:2003. Agregados — Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45:2006.** *Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios.* Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:2003.** *Agregado graúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.* Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:2015.** *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.* Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833:2008.** *Concreto fresco — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.* Rio de Janeiro, 2008.

BARNHOUSE, P. W.; SRUBAR, W. V. *Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete.* Construction and Building Materials, v. 110, p. 89–97, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.014>.

BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L. A.; JOHN, V. M. *Relatório de coleta de dados para o sistema de informação do desempenho ambiental da construção – cimento.* São Paulo: SIDAC, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Cimento.pdf. Acesso em: 24 mar. 2025.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. *Evaluation of high-performance porous concrete properties.* Construction and Building Materials, v. 31, p. 67–73, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.024>.

BIJEN, J. *Benefits of slag and fly ash.* Construction and Building Materials, v. 10, n. 5, p. 309–314, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00014-3).

BRAGA, N. T. S.; ARRUDA JUNIOR, E. S.; CORDEIRO, L. N. P. *Performance and runoff coefficient of permeable concretes subjected to heavy rainfall simulations.* Revista Matéria, v. 27, n. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0216>.

BRAGA, N. T. S.; GOUVEIA, M. S. *Dialética da ocupação de áreas de várzea em Belém e propostas de drenagem compreensiva.* Novos Cadernos NAEA, v. 23, n. 1, p. 243–260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5801/ncn.v23i1.6724>.

<https://doi.org/10.20873/uft.am.2594-7494.nov2025-7>



CASTRO, J.; DE SOLMINIHAC, H.; VIDELA, C.; FERNÁNDEZ, B. *Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón*. Revista Ingeniería de Construcción, v. 24, n. 3, p. 271–284, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732009000300005>.

COELHO, A.; DE BRITO, J. *Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: energy consumption and CO₂ emissions*. Waste Management, v. 33, p. 1258–1267, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.025>.

DOBROVOLSKI, E. R. G. *Método numérico para análise de ciclo de vida com relação à pegada de carbono de agregado reciclado para pavimentação*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). 2022. Disponível em: <https://ri.uepg.br/monografias/handle/123456789/231>. Acesso em: 24 mar. 2025.

DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. *Enhancing future resilience in urban drainage system: green versus grey infrastructure*. Water Research, v. 124, p. 280–289, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOUI, S. *Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag*. Construction and Building Materials, v. 212, p. 164–175, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325>.

EURONEWS. *Itália, Bélgica, Letônia: quais os países europeus que mais reciclam?* 2023. Disponível em: <https://pt.euronews.com/green/2023/06/19/italia-belgica-letonia-quais-os-paises-europeus-que-mais-reciclam#:~:text=A%20taxa%20de%20reciclagem%20da,39%2C9%25%20na%20UE>. Acesso em: 24 mar. 2025.

HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. *Embodied energy and carbon in construction materials*. Energy, v. 161, n. 2, p. 87–98, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. 290 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/21839>. Acesso em: 24 mar. 2025.

LIMA, G. T. S.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. *Investigation of the properties of pervious concrete with a recycled aggregate designed with a new combination of admixture*. Construction and

<https://doi.org/10.20873/uft.am.2594-7494.nov2025-7>



Building Materials, v. 340, p. 127710, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127710>.

MERTEN, F. R. M.; DUTRA, V. F. P.; STRIEDER, H. L.; GRAEFF, A. G. *Clogging and maintenance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, v. 342, parte A, p. 127939, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127939>.

MIRANDA, L. F. R.; TORRES, L.; VOGT, V.; BROCARDO, F. L. M.; BARTOLI, H. *Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil*. In: **XVI National Meeting of Technology of the Built Environment (ENTAC)**, 2016.

PORTAL DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL. *Brasil produz 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição*. 2024. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/brasil-produz-48-milhoes-de-toneladas-de-residuos-de-construcao-e-demolicao/#:~:text=A%20abrecon%20aponta%20na%20pesquisa,Milhoes%20de%20toneladas%20no%20Brasil>. Acesso em: 24 mar. 2025.

RODRIGUES, P. C.; BRAGA, N. T. S.; ARRUDA JUNIOR, E. S.; CORDEIRO, L. N. P.; MELO, G. S. V. *Effect of pore characteristics on the sound absorption of pervious concretes*. Case Studies in Construction Materials, v. 17, p. e01302, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01302>.

SADATI, S.; AREZOUMANDI, M.; KHAYAT, K. H.; VOLZ, J. S. *Shear performance of reinforced concrete beams incorporating recycled concrete aggregate and high-volume fly ash*. Journal of Cleaner Production, v. 115, p. 284–293, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.017>.

SANTOS, C. M. S. *O uso da drenagem como método de avaliação de desempenho da ocupação urbana: uma reflexão sobre a Avenida Augusto Montenegro*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017. 135 p. Disponível em:

<https://ppgau.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2017/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Camila%20Madeira%20da%20Silva%20Santos.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2025.

<https://doi.org/10.20873/uft.am.2594-7494.nov2025-7>



SILVA, I. N.; MAUÉS, L. M. F. *Inventory of sand and pebble production for use in hot mix asphalt: a case study in Brazil*. Journal of Cleaner Production, v. 294, p. 126271, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126271>.

SILVA, S. P. *A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da economia solidária*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/b185859c-a4ab-47ad-8795-985026049e95/content>. Acesso em: 24 mar. 2025.

SUMANASOORIYA, M. S.; NEITHALATH, N. *Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction*. Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 8, p. 778–787, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002>.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. *A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)*. Construction and Building Materials, v. 172, p. 272–292, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.

TEIXEIRA, M. C.; ALVES, B. M. O.; CORDEIRO, L. N. P. *Study of clogging on pervious concrete applied on light traffic and pedestrian pavement*. Urban Water Journal, v. 19, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.2020299>.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. *The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete*. Construction and Building Materials, v. 95, p. 850–859, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187>.

VIEIRA, G. L.; SCHIAVON, J. Z.; BORGES, P. M.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. *Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures*. Journal of Cleaner Production, v. 271, p. 122665, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122665>.

WANG, Y.; LI, H.; ABDELHADY, A.; HARVEY, J. *Initial evaluation methodology and case studies for life cycle impact of permeability of permeable pavements*. International Journal of Transportation Science and Technology, v. 7, p. 169–178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.07.002>.

<https://doi.org/10.20873/uft.am.2594-7494.nov2025-7>



XU, G.; SHEN, W.; HUO, X.; YANG, Z.; WANG, J.; ZHANG, W.; JI, X. *Investigation on the properties of porous concrete as road base material*. Construction and Building Materials, v. 158, p. 141–148, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151>.

YAP, S. P.; CHEN, P. Z. C.; GOH, Y.; IBRAHIM, H. A.; MO, K. H.; YUEN, C. W. *Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates*. Journal of Cleaner Production, v. 181, p. 155–165, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.205>.

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C. *Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: a state-of-the-art and state-of-the-practice review*. Construction and Building Materials, v. 183, p. 544–553, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>.

Todos os(as) autores(as) declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

Recebido em: 24/03/2025 | **Revisado em:** 12/11/2025 | **Aceito em:** 13/11/2025