



Matrizes cimentícias com o uso de resíduos de construção e demolição para redução do impacto ambiental de blocos de pavimentação

Giane Alves Mello

Professora Mestre, Escola Parobé, Brasil
arquitetagian@gmail.com

Suzana Frighetto Ferrarini

Professora Doutora, UERGS, Brasil
suzana-ferrarini@uergs.edu.br

Marcelo Oliveira Caetano

Professor, Doutor, Unisinos, Brasil
mocaetano@unisinos.br

Fernanda Pacheco

Professora, Doutora, Unisinos, Brasil
fernandapache@unisinos.br

Recebido: 30 de outubro de 2024

Aceito: 07 de novembro de 2024

Publicado online: 17 de novembro de 2024

DOI: 10.17271/23178604123720245240

<https://doi.org/10.17271/23178604123720245240>

Licença

Copyright (c) 2024 Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes



Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution 4.0 International License



Matrizes cimentícias com o uso de resíduos de construção e demolição para redução do impacto ambiental de blocos de pavimentação

RESUMO

A construção civil é responsável pelo consumo intensivo de recursos naturais e pela geração de grandes volumes de resíduos de construção e demolição (RCD), que muitas vezes são destinados de forma inadequada. Esta pesquisa desenvolveu blocos de concreto, utilizando agregados reciclados de RCD, promovendo sustentabilidade e economia circular, ao reaproveitar esses resíduos na infraestrutura urbana. Foram coletados resíduos de uma usina, ao longo de cinco meses, selecionando-se Brita 1, Brita 0 e Pó de Brita para compor os traços de concreto. Ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica foram realizados, e blocos e corpos de prova foram moldados com 100% de substituição de agregados naturais por RCD. Os testes de resistência à compressão foram realizados aos 14 e 28 dias, enquanto o teste de abrasão foi conduzido apenas aos 28 dias. Técnicas de Fluorescência de Raios-x (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram aplicadas, para caracterizar os produtos. Os resultados indicaram uma resistência à compressão de 34,3 MPa aos 28 dias, próxima ao valor mínimo exigido pela norma (35 MPa). A análise por FRX mostrou predominância de óxidos de SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃ e K₂O, todos dentro dos limites normativos. Testes de lixiviação e solubilização, realizados conforme as NBR 10005 e NBR 10006, classificaram o resíduo como Não Perigoso e Não Inerte. A pesquisa demonstra que o uso de RCD na produção de blocos de concreto é uma alternativa viável e sustentável, contribuindo para a redução de resíduos, o aproveitamento de materiais e o desenvolvimento de infraestrutura urbana sustentável.

PALAVRA-CHAVE: Resíduos de construção e demolição. Blocos de pavimentação, Redução de impacto ambiental.

Cementitious matrices using construction and demolition waste to reduce the environmental impact of paving blocks

ABSTRACT

The construction industry is responsible for the intensive consumption of natural resources and the generation of large volumes of construction and demolition waste (CDW), which are often disposed of improperly. This research developed concrete blocks using recycled CDW aggregates, promoting sustainability and circular economy by reusing these materials in urban infrastructure. Waste was collected from a recycling plant over five months, selecting Brita 1, Brita 0, and Pó de Brita to compose the concrete mixes. Particle size distribution, bulk density, and specific gravity tests were performed, and blocks and specimens were molded with 100% replacement of natural aggregates by CDW. The compressive strength tests were carried out at 14 and 28 days, while the abrasion test was performed only at 28 days. X-ray fluorescence (XRF) and Scanning electron microscopy (SEM) were used to characterize the products. The results indicated a compressive strength of 34.3 MPa at 28 days, close to the minimum required by the standard (35 MPa). XRF analysis showed a predominance of SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃, and K₂O oxides, all within normative limits. Leaching and solubilization tests, conducted according to NBR 10005 and NBR 10006, classified the waste as non-hazardous and non-inert. This study demonstrates that using CDW in concrete block production is a viable and sustainable alternative, contributing to waste reduction, material reuse, and the development of sustainable urban infrastructure.

KEYWORDS: Construction and demolition waste. Paving blocks. Environmental impact reduction.

Matrices cementicias que utilizan residuos de construcción y demolición para reducir el impacto ambiental de bloques de pavimentación

RESUMEN

La industria de la construcción es responsable del consumo intensivo de recursos naturales y de la generación de grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD), que a menudo se eliminan de manera inadecuada. Esta investigación desarrolló bloques de concreto utilizando agregados reciclados de RCD, promoviendo la sostenibilidad y la



economía circular mediante la reutilización de estos materiales en la infraestructura urbana. Se recolectaron residuos de una planta de reciclaje durante cinco meses, seleccionando Brita 1, Brita 0 y Polvo de Brita para componer las mezclas de concreto. Se realizaron ensayos de granulometría, densidad aparente y masa específica, y se moldearon bloques y probetas con un 100% de sustitución de agregados naturales por RCD. Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron a los 14 y 28 días, mientras que la prueba de abrasión se llevó a cabo solo a los 28 días. Se utilizaron técnicas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para caracterizar los productos. Los resultados indicaron una resistencia a la compresión de 34,3 MPa a los 28 días, cerca del mínimo requerido por la norma (35 MPa). El análisis por FRX mostró una predominancia de los óxidos SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 y K_2O , todos dentro de los límites normativos. Las pruebas de lixiviación y solubilización, realizadas según las NBR 10005 y NBR 10006, clasificaron los residuos como no peligrosos y no inertes. Este estudio demuestra que el uso de RCD en la producción de bloques de concreto es una alternativa viable y sostenible, que contribuye a la reducción de residuos, al aprovechamiento de materiales y al desarrollo de infraestructura urbana sostenible.

PALABRAS CLAVE: Residuos de construcción y demolición. Bloques de pavimentación. Reducción del impacto Ambiental.



1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e gera grandes volumes de resíduos de construção e demolição (RCD), com impacto significativo no meio ambiente (NEVILLE, 2011; SILVA et al. 2019). No Brasil, cerca de 48 milhões de toneladas de RCD foram coletadas, em 2021, mas apenas uma pequena parte foi reciclada, revelando desafios na gestão e reaproveitamento desses resíduos (ABRELPE, 2022). A destinação inadequada dos RCD contribui para problemas ambientais e ocupa espaço em aterros.

A reciclagem desses resíduos enfrenta obstáculos, como a falta de inventários, falhas na segregação e inviabilidades técnicas e econômicas de sua reutilização in situ (CAETANO; LAMBIASE; GOMES, 2016; CAETANO; SELBACH; GOMES, 2016; KERN et al. 2015). No entanto, novas aplicações têm sido exploradas, como a incorporação dos RCD em camadas de solo para saneamento básico (CAETANO et al. 2022), painéis pré-fabricados, ligantes alternativos e materiais cimentícios mistos (BAGARIĆ; PEČUR; BOJAN, 2020; PETROV; ZAHARIEVA, 2020; BERNARDES et al. 2024). Estudos indicam que a incorporação desses resíduos como agregados reciclados em concreto pode reduzir o consumo de recursos naturais e o descarte inadequado (KOU & POON, 2012; RAHAL, 2007). No entanto, a heterogeneidade e porosidade dos agregados exigem dosagens e controle de qualidade precisos, para garantir o desempenho do concreto (BERNUCCI et al. 2022).

Nesse contexto, o presente estudo investiga a viabilidade de produzir blocos de pavimentação com 100% de agregados reciclados, em alinhamento com os princípios da economia circular e infraestrutura sustentável. Os produtos foram submetidos a ensaios mecânicos e ambientais, segundo as normas NBR 9781 e NBR 10004, buscando validar sua aplicação e contribuir para políticas públicas de gestão de resíduos sólidos, demonstrando que o uso de RCD pode reduzir impactos ambientais e promover inovação no setor da construção civil.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

2.1.1 Origem

Os materiais utilizados neste estudo foram obtidos em uma usina de reciclagem de RCD, na região metropolitana de Porto Alegre, RS. A usina recebe resíduos, por meio de ecopontos, coleta de descartes clandestinos, caçambas e Pontos de Entrega Voluntária (PEV), que são segregados e beneficiados. Os RCD da Classe A (CONAMA 307/2002) passam por britagem e peneiramento, gerando agregados reutilizáveis na construção civil. Para este estudo, foram selecionados Brita 1 (RCD_{B1}), Brita 0 (RCD_{B0}) e Pó de Brita (RCD_{PB}).



Figura 1 – RCD (agregados) utilizados no estudo.



Onde: A - RCD_{B1}; B - RCD_{B0}; C - RCD_{PB}. Fonte: Autor, 2024.

2.1.2 Coleta

As amostras foram coletadas por quarteamento, selecionando-se de 5 a 8 kg de cada parte, totalizando cerca de 30 kg por material. A coleta ocorreu entre julho e novembro de 2021, e as amostras foram secas em estufa a 105 ± 5 °C por 48 horas antes dos ensaios. Os agregados reciclados foram classificados como grãos (RCD_{B0} e RCD_{B1}) e miúdos (RCD_{PB}). Os grãos foram avaliados quanto à granulometria, massa unitária, massa específica aparente, massa específica e perda de massa por abrasão, enquanto o miúdo foi analisado em relação à granulometria e massa específica, garantindo conformidade técnica para aplicação em concreto e pavimentação.

2.1.3 Caracterização química, morfológica e ambiental

A caracterização química, morfológica e ambiental das amostras foi realizada por Fluorescência de Raios-x (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP OES). As análises de FRX utilizaram os equipamentos EDX 720 e EDX 7000 (Shimadzu), com tubo de 3 kW e alvo de ródio, e foram conduzidas em amostras moídas e peneiradas em 250 µm. A avaliação morfológica por MEV empregou um XL 30 Philips, com amostras igualmente peneiradas e submetidas à metalização. Os extratos dos testes de lixiviação e solubilização, preparados conforme as normas NBR 10005 e NBR 10006, foram analisados no ICP OES iCAP 7400 Duo (Thermo Fischer Scientific).

2.1.4 Ensaios de Resistência Mecânica

Realizaram-se dois ensaios de resistência mecânica: **Ensaio 1 (E₀₁)**: Foram confeccionados 36 corpos de prova (CP) com quatro diferentes traços de concreto. Nove CP moldados com um traço de referência, e os 27 restantes incorporaram os três tipos de RCD estudados (Tabela 1). **Ensaio 2 (E₀₂)**: Neste ensaio, confeccionou-se blocos de concreto (BC) para pavimentação, utilizando dois traços: um de referência e outro substituindo a areia natural pelo RCD Pó de Brita, selecionado com base nos resultados do E₀₁ (Tabela 2).



Tabela 1 – Composição dos traços utilizados no E₀₁.

Traço	Cimento (Kg)	Areia Natural (Kg)	Brita Natural (Kg)	RCD (Kg)	a/c ^d (L)	Aditivo (%)	Abatimento (mm)
T1 – Referência	6	20	20	0	0,6	1,03	10
T2 - 100%AM RCD _{PB} ^a	6	0	20	20	0,6	1,03	4,5
T3 - 100%AG RCD _{B1} ^b	6	20	0	20	0,6	0,51	5
T4 - 100%AG RCD _{B0} ^c	6	20	0	20	0,6	0,51	5

AM – Agregado Miúdo RCD_{PB}; ^bAG – Agregado Graúdo RCD_{B1}; ^cAgregado Graúdo – RCD_{B0}; ^da/c – relação água/cimento.

Tabela 2 – Composição dos traços utilizados no E₀₂.

Traço	Cimento (Kg)	Areia Natural (kg)	Brita Natural (kg)	RCD (kg)	a/c ^b (L)	Aditivo (%)	Abatimento (mm)
T1 – Referência	3.333	10	10	0	0,6	0,6%	8
T2 – 100%AM RCD _{PB} ^a	3.333	0	10	10	0,6	0,6%	8

^aAM – Agregado Miúdo RCD_{PB}; ^ba/c – relação água/cimento.

No E₀₁, utilizou-se cimento CP IV Z-32, indicado para agregados reativos em ambientes ácidos e com sulfatos. No E₀₂, foi aplicado o CP V-ARI, conhecido por seu alto calor de hidratação e pega rápida. Os agregados graúdos incluíram brita de basalto (2,4–12,5 mm e 9,5–25 mm) e RCD. Os parâmetros avaliados para estes materiais estão descritos no item 2.1.2. A água utilizada foi proveniente da rede pública de São Leopoldo, RS, em conformidade com a NBR 15900-1:2009.

2.1.4.1 Caracterização mecânica dos CP

Considerando a necessidade de uma resistência à compressão mínima de 35 MPa, conforme a NBR 9781, os traços dos CP foram baseados no estudo de Silva (2005), com a incorporação de RCD. A moldagem dos CP seguiu os requisitos da NBR 5738, com adaptações nas dimensões das formas (240x100x60 mm) para pavimentação. A cura dos CP foi realizada, conforme a NBR 5739, permanecendo em câmara úmida por 14 e 28 dias antes dos testes de compressão (NBR 5739) e abrasão (NBR 16974).

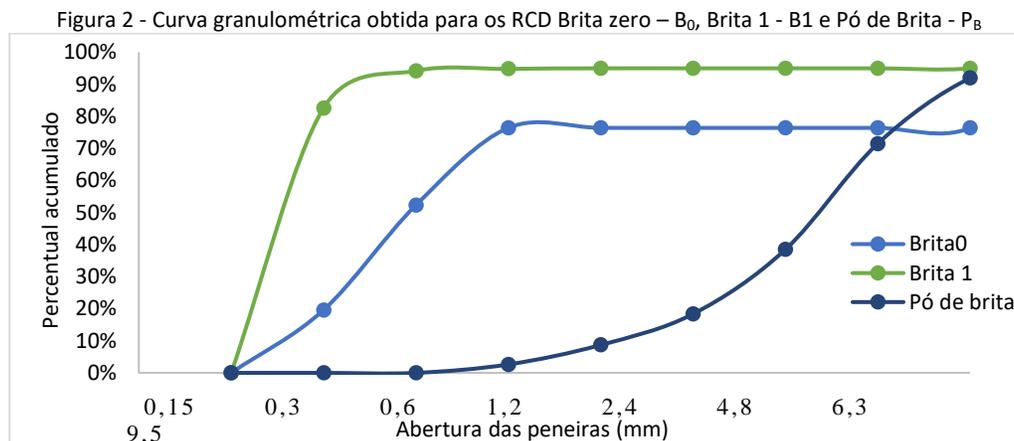
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização física dos produtos naturais e dos produtos gerados a partir dos RCD

3.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados reciclados (Figura 2) revela diferenças significativas. As partículas da Brita 0 concentram-se entre 4,8 mm e 12,5 mm, com predominância em 6,3 mm, enquanto a Brita 1 tem mais de 50% do material retido em 12,5 mm. O Pó de Brita apresenta retenção predominante em 0,3 mm.

Segundo Neville (2011), uma distribuição granulométrica contínua melhora a resistência, durabilidade e eficiência do concreto ao reduzir vazios e aumentar a coesão da matriz cimentícia. Nos concretos com RCD, essa técnica mitiga os efeitos da porosidade residual, tornando os agregados reciclados viáveis para aplicações estruturais de alta performance. Silva et al. (2019) reforçam que a granulometria influencia a trabalhabilidade do concreto, exigindo ajustes na dosagem de água e aditivos, para garantir conformidade com normas técnicas. Assim, a otimização da granulometria é essencial para aumentar a viabilidade e aceitação dos RCD na construção civil.



Fonte: Autora, 2024.

3.1.2 Massa unitária e massa específica

Os testes de massa unitária dos agregados reciclados revelaram valores de $0,96 \pm 0,26 \text{ g/cm}^3$ para o Pó de Brita (RCD_{PB}), $0,87 \pm 0,30 \text{ g/cm}^3$ para a Brita 0 (RCD_{B0}) e $1,01 \pm 0,26 \text{ g/cm}^3$ para a Brita 1 (RCD_{B1}), inferiores aos agregados naturais, que normalmente variam entre 1,2 e 1,75 g/cm^3 a depender do grau de compactação e da granulometria do material (NEVILLE, 2011). Isso sugere maior porosidade e heterogeneidade nos RCD, afetando a densidade e o desempenho mecânico do concreto.

Nos testes de massa específica, os valores foram de 2,40 g/cm^3 para o RCD Pó de Brita, 2,17 g/cm^3 para a Brita 0 e 2,00 g/cm^3 para a Brita 1. Estudos como Roh et al. (2020) indicam que a



presença de partículas cerâmicas e argamassa residual nos agregados reciclados reduz sua densidade, influenciando negativamente propriedades como trabalhabilidade e resistência mecânica, o que é consistente com as observações de McNeil e Kang (2013). Silva et al. (2019) reforçam que essas diferenças exigem ajustes na dosagem de água e aditivos, para garantir a densidade final e a resistência à compressão desejada.

3.2 Ensaio de resistência nos CPs de concreto gerados

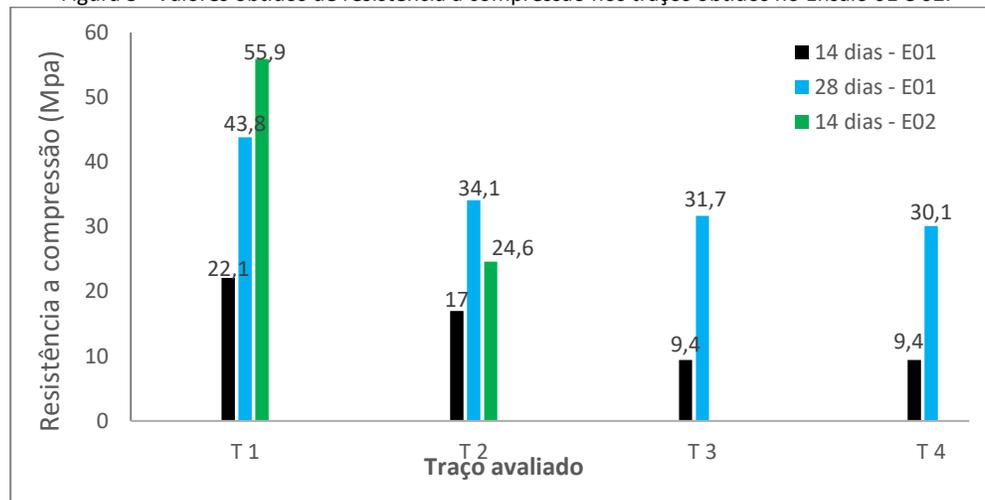
Os resultados apresentados neste tópico caracterizam mecanicamente os concretos gerados no Ensaio 1 – E_{01} .

3.2.1 Ensaio de resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão do E_{01} (coloração preta e azul) e E_{02} (coloração verde) estão na Figura 3. No E_{01} , houve uma redução gradual com o uso de agregados reciclados. A menor queda ocorreu com a substituição do agregado miúdo (RCD_{PB}), que alcançou 34,1 MPa, 22% inferior ao traço de referência (43,8 MPa) após 28 dias. Nos traços com agregados graúdos, a resistência caiu 27% (31,7 MPa) para Brita 1 e 31% (30,1 MPa) para Brita 0, possivelmente devido à descontinuidade granulométrica, que prejudica o empacotamento das partículas. Estudos como os de Rahal (2007) e McNeil e Kang (2013) mostram que a substituição do agregado miúdo tem menor impacto na resistência em comparação aos agregados graúdos, devido à distribuição mais uniforme das partículas e menor argamassa residual.

O traço de melhor desempenho (34,1 MPa) se aproxima do valor mínimo exigido pela NBR 9781/13 (≥ 35 MPa) para pavimentação, indicando a viabilidade do uso de RCD. Ajustes na composição, como cimentos de maior finura, podem melhorar a resistência. Assim, o RCD do traço 2 (Pó de Brita) foi selecionado para a segunda fase (E_{02}), cuja aplicação em calçamento será discutida no item 3.3.

Figura 3 - Valores obtidos de resistência à compressão nos traços obtidos no Ensaio 01 e 02.



Fonte: Autora, 2024.

3.2.2 Ensaio de resistência à abrasão - "Los Angeles"

Bernucci et al. (2022) destacam que a escolha dos agregados e o controle rigoroso da granulometria são essenciais para a durabilidade e desempenho dos pavimentos, especialmente na resistência à abrasão. Os traços 2 e 3 (com RCD Pó de Brita e Brita 1) apresentaram desempenho aceitável (desgaste entre 40 e 55%), confirmando a viabilidade dos agregados reciclados para pavimentação, especialmente quando a granulometria é bem controlada e a argamassa residual minimizada, como apontado por Bai et al. (2024). O estudo sugere que, com ajustes no processo de produção, a resistência à abrasão pode ser equiparada à dos agregados naturais.

Em contraste, o Traço 4 (RCD Brita 0) apresentou perda de 82%, muito acima do limite, possivelmente devido à presença de microfissuras e argamassa aderente, que comprometem a estrutura do agregado, conforme Bai et al. (2024). Esses resultados indicam a necessidade de ajustes na formulação e controle de qualidade dos agregados, para garantir o desempenho adequado em aplicações mais exigentes.

3.3 Aplicação do RCD em calçamento

3.3.1 Ensaio de resistência à compressão (Ensaio E02)

Ao voltarmos para a Figura 3, já apresentada (coloração verde), observam-se também os resultados de resistência à compressão dos blocos de pavimentação com RCD aos 28 dias no Ensaio E02. A substituição integral do agregado miúdo reduziu a resistência de 55,9 MPa (traço de referência, T1) para 24,6 MPa (traço com 100% de RCD Pó de Brita, T2). Essa perda é atribuída à



maior quantidade de vazios e menor densidade de empacotamento nos agregados reciclados, além de fatores, como a finura do cimento, teor de argamassa residual e formato dos agregados.

Mehta e Monteiro (2006) apontam que ajustar o teor de argamassa e o consumo de cimento é essencial para melhorar a resistência em misturas com agregados reciclados. A relação água/cimento (0,6), considerada alta, também pode ter influenciado os resultados. No Ensaio E₀₁, foi usado o CP IV-Z-32, com adições pozolânicas que favorecem resistência gradual e durabilidade. Cimentos pozolânicos, segundo Tayeh et al. (2022), reduzem a porosidade e aumentam a resistência a ataques químicos. No Ensaio E₀₂, o CPV-ARI, que proporciona rápido ganho de resistência, pode ter acentuado as descontinuidades nos agregados reciclados, resultando na queda significativa da resistência. Esses resultados ressaltam a necessidade de ajustes na formulação e compatibilização dos traços, para garantir a viabilidade dos blocos de pavimentação com RCD.

3.4 Caracterização química, ambiental e morfológica

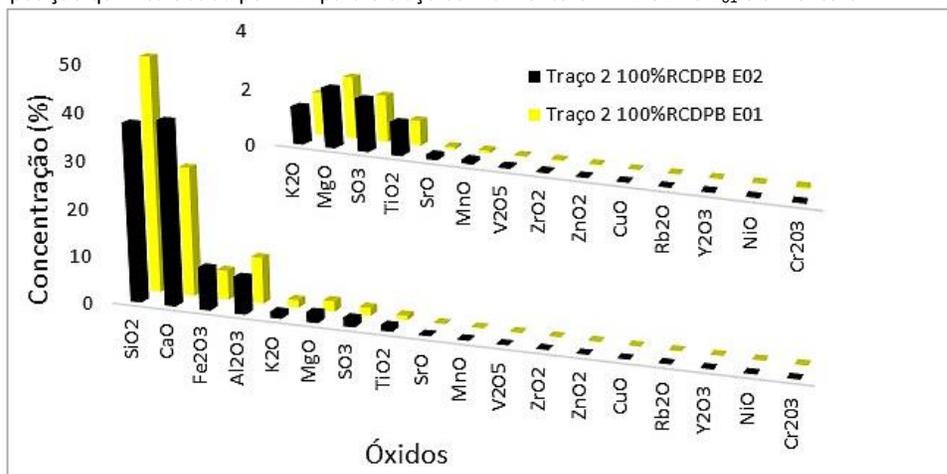
3.4.1 Caracterização por FRX

Inicialmente, foi realizada uma avaliação semi-quantitativa, para identificar as concentrações dos elementos nos RCD coletados em 2021 e nos quatro traços do Ensaio 1 (E₀₁). Os resultados indicaram que os elementos predominantes (5 a 50%) foram silício (Si), cálcio (Ca), alumínio (Al) e ferro (Fe), comuns na crosta terrestre e em concretos convencionais. Silva, de Brito e Dhir (2014) destacam que a composição dos agregados reciclados é similar à dos naturais, quando as impurezas são controladas, permitindo a reutilização desses resíduos sem comprometer as propriedades do concreto.

Na faixa abaixo de 5%, os elementos predominantes foram potássio (K), magnésio (Mg), titânio (Ti), enxofre (S), bário (Ba), zircônio (Zr), manganês (Mn), estrôncio (Sr), zinco (Zn), rubídio (Rb) e ítrio (Y), além de pequenas quantidades de cobre (Cu) e de chumbo (Pb).

Dado o melhor desempenho mecânico, o Traço 2 foi repetido no E₀₂ com um cimento diferente. A análise quantitativa por FRX revelou que a substituição do agregado natural pelo Pó de Brita reduziu a concentração de SiO₂ de 46% para 38% e aumentou a de CaO de 33% para 39%. As variações nos demais óxidos foram mínimas, indicando que a adição de RCD não comprometeu significativamente a constituição do material. No entanto, testes de lixiviação e solubilização são necessários para avaliar a periculosidade desses resíduos. Para uma comparação completa entre os traços e os cimentos, os dados foram plotados em um gráfico e esses resultados são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Composição química obtida por FRX para o traço com cimento CP IV Z-32 no E₀₁ e cimento CP V – ARI no E₀₂.



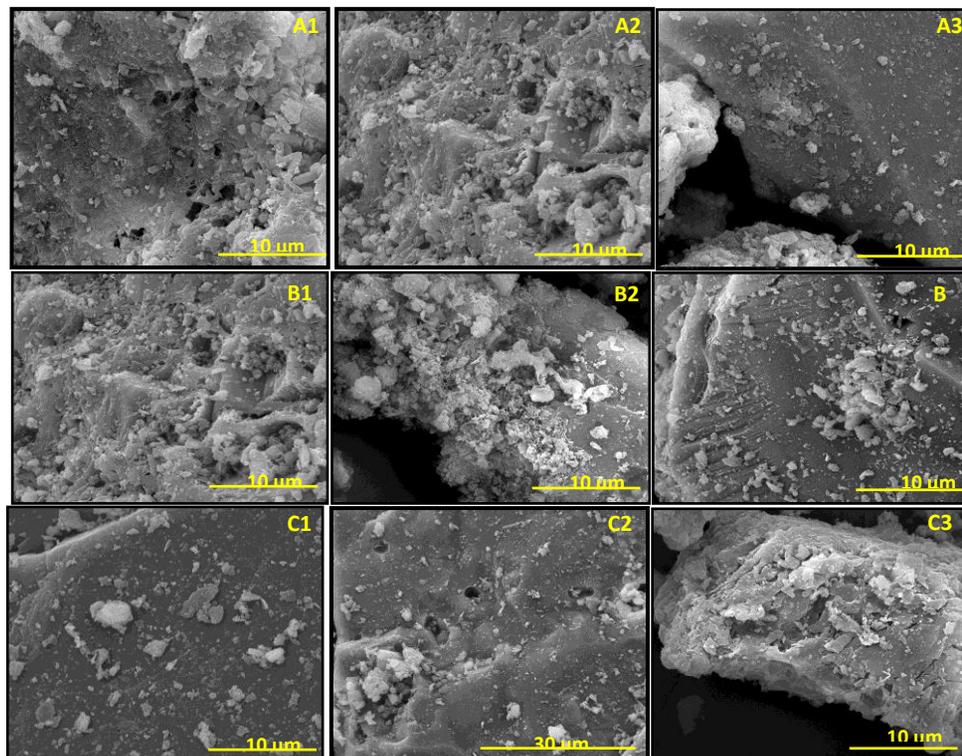
Fonte: Autora, 2024.

No E₀₁, utilizou-se o cimento CP IV Z-32, enquanto, no E₀₂, foi aplicado o CP V – ARI. Nos traços com CP IV Z-32, predominam óxidos de Si, Al, K e Mg, enquanto no traço com CP V – ARI, destacam-se os óxidos de Ca e Fe. A ficha técnica indica que o CP V – ARI contém de 95 a 100% de clínquer e gesso, enquanto no CP IV Z-32 esse percentual varia entre 45 e 85%, justificando a maior concentração de Ca no CP V – ARI. Ambos os cimentos incluem até 5% de calcário. O maior teor de Si no CP IV Z-32 se deve à presença de material pozzolânico em proporções de 15 a 50%, explicando por que Si e Ca juntos compõem mais de 75% do traço (BORGES, MELO NETO E MENDONÇA, 2021; ABCP, 2010).

3.4.2 Caracterização por MEV

A Figura 5 apresenta os resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para os RCD analisados, em 2021, revelando diferenças morfológicas entre o Pó de Brita, Brita 0 e Brita 1. As micrografias do Pó de Brita (A1, A2, A3) mostram superfícies irregulares e porosas, com microcavidades e fragmentos finos aderidos, indicando material cimentício residual. As amostras de julho e agosto exibem maior quantidade de partículas finas e adesão entre as partículas, enquanto a de novembro possui superfície mais polida, possivelmente devido a fatores sazonais, como umidade e temperatura.

Figura 5 - Microscopia obtidas na caracterização dos RCD (10.000 x de magnificação) em diferentes períodos do ano de 2021: A – RCD_{PB}; B – RCD_{B0}; C – RCD_{B1}. Os índices 1, 2 e 3 referem-se as coletas realizadas nos meses de julho, agosto e novembro, respectivamente.



Fonte: Autora, 2024.

As micrografias da Brita 0 (B1, B2, B3) mostram menor porosidade em relação ao Pó de Brita, mas com fragmentos aderidos e rugosidade que pode afetar a adesão no concreto. A amostra B3 apresenta uma superfície mais compacta, embora ainda rugosa. Na Brita 1 (C1, C2, C3), observa-se maior tamanho de partículas e superfícies mais lisas. A amostra C2 exibe maior porosidade, possivelmente devido à presença de microtrincas, e C3 mostra acúmulo de partículas menores, sugerindo reações químicas com o ambiente ou maior exposição à umidade.

Agregados reciclados possuem superfícies irregulares e rugosas, com argamassa aderida resultante dos processos anteriores de hidratação do cimento, o que aumenta a aderência mecânica com a matriz cimentícia. Porém também contribui para uma maior porosidade, o que pode prejudicar a resistência e durabilidade do concreto (SILVA, DE BRITO E DHIR 2014; EVANGELISTA; DE BRITO, 2010). Os RCD apresentam formas angulosas, em contraste com os agregados naturais mais arredondados, afetando a trabalhabilidade do concreto fresco, tornando-o menos fluido, mas, em contrapartida, podem favorecer a aderência entre os componentes (PACHECO-TORGAL et al. 2014).

A presença de microfissuras evidenciada nos RCD aumenta a absorção de água e reduz a densidade aparente, comprometendo suas propriedades mecânicas. Portanto, tratamentos prévios,

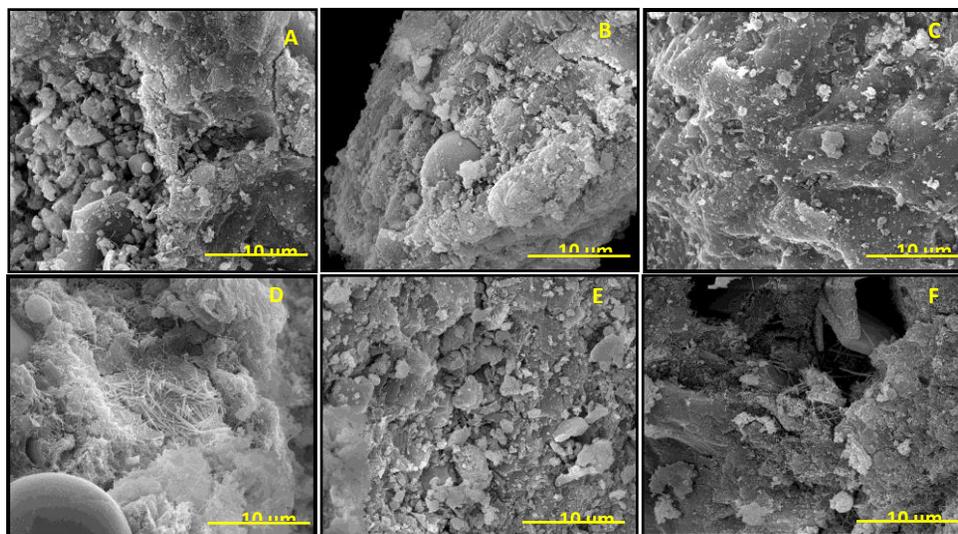


como a remoção de argamassa ou o uso de aditivos, podem melhorar seu desempenho (Silva, de Brito e Dhir, 2014; Kou; Poon, 2012). As variações morfológicas ao longo do ano sugerem que umidade e temperatura influenciam a coesão dos RCD, destacando a importância de considerar esses fatores na formulação de concretos reciclados para otimizar seu desempenho.

3.4.3 Caracterização Morfológica dos traços gerados usando os RCD

A Figura 6 apresenta a caracterização morfológica dos traços obtidos nas duas concretagens com RCD, revelando diferenças entre agregados naturais e reciclados. Nos traços de referência (A e E), as superfícies são densas e compactas, com baixa porosidade e boa coesão, independentemente do tipo de cimento utilizado (CP IV Z-32 ou CP V-ARI). Já os traços com RCD (B, C, D e F) mostram superfícies rugosas, irregulares e porosas, com fragmentos de argamassa aderida, comprometendo a durabilidade e resistência do concreto. O traço com RCD Pó de Brita (F), na segunda concretagem, apresentou melhora na coesão em comparação à primeira (B), sugerindo que o cimento CP V-ARI pode mitigar os efeitos negativos da porosidade e microfissuras nos RCD.

Figura 6. Microscopia dos corpos de prova de concreto para os diferentes traços testados. Onde: A - T1 - traço referência; B - T2 traço com RCD_{PB}; C - T3 - traço com RCD_{B1}; D - T4 - traço com RCD_{B0}; E - T1 - traço referência (E_{O2}); F - T2 - traço com RCD_{PB} (E_{O2}).



Fonte: Autora, 2024

Esses resultados confirmam estudos anteriores, que destacam a maior porosidade e fragmentação dos RCD, comprometendo suas propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (SILVA, DE BRITO E DHIR, 2014; KOU; POON, 2012). A melhoria observada com o CP V-ARI corrobora com estudos de Pacheco-Torgal et al. (2014), indicando que cimentos de alta resistência inicial



favorecem a coesão dos agregados reciclados, mitigando os efeitos negativos da porosidade. As agulhas de etringita, visíveis nas imagens D e F, são típicas da hidratação do cimento em presença de sulfatos e foram favorecidas pelo uso do cimento do tipo CP V-ARI que promoveu um rápido ganho de resistência. Embora inicialmente melhorem a durabilidade, sua formação excessiva pode causar expansão interna e microfissuras, comprometendo a integridade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

As imagens 6B e 6D destacam a zona de transição entre os agregados reciclados e a matriz cimentícia. Essa região, caracterizada pela interface entre a superfície porosa dos agregados e a argamassa, é um ponto crítico no concreto, em que microfissuras e porosidade podem surgir devido à adesão imperfeita entre o agregado reciclado e a matriz de cimento, o que compromete a resistência e durabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

3.4.4 Ensaios de Lixiviação

O ensaio de lixiviação, realizado segundo a NBR 10005 (ABNT, 2004), avalia a transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas para uma solução extratora, classificando resíduos como Classe I (perigosos) ou Classe II (não perigosos) de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004). Esse teste é essencial para garantir a segurança ambiental de materiais reciclados na construção civil.

Neste estudo, todas as amostras dos traços de concreto das duas concretagens foram submetidas ao teste. Dos elementos inorgânicos monitorados (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Se e Pb), apenas o bário (Ba) foi detectado, mas em níveis abaixo do limite de 70 mg/L, indicando que os traços de concreto com RCD estão em conformidade com os padrões normativos. Os demais elementos apresentaram concentrações abaixo do Limite de Detecção (LD), reforçando a segurança ambiental desses materiais.

Estudos, como o de Diotti et al. (2020), confirmam que RCD, geralmente, contêm baixos níveis de metais tóxicos, com muitos deles abaixo dos limites detectáveis. Contaminantes, como sulfatos e metais, podem ser controlados por monitoramento adequado, garantindo o uso seguro dos agregados reciclados e alinhando-se aos princípios da economia circular, ao reduzir resíduos destinados a aterros.

Com base nos resultados, os concretos com RCD são classificados como resíduos não perigosos, confirmando sua segurança e viabilidade para aplicações na construção civil.

3.4.5 Ensaios de Solubilização

Os resultados do teste de solubilização, realizado conforme a NBR 10006 (ABNT, 2004) e comparado aos limites do Anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004), monitoraram os elementos Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu e Fe. Apenas o alumínio (Al), bário (Ba) e ferro (Fe) apresentaram concentrações detectáveis, sendo que o Ba ficou abaixo do limite de 0,7 mg/L, enquanto Al e Fe excederam os



limites normativos de 0,2 mg/L e 0,3 mg/L, respectivamente. Como resultado, os traços de concreto com RCD foram classificados como Resíduos Classe II A – Não Inertes, de acordo com a NBR 10004.

Esses achados são consistentes com Lima e Cabral (2013), que também observaram resíduos de construção classificados como não perigosos no teste de lixiviação, mas não inertes no teste de solubilização, devido a concentrações excedentes dos elementos Cr, Pb, Cd e SO_4^{2-} . Esses resultados destacam a importância de monitorar cuidadosamente os resíduos reciclados, especialmente quanto ao comportamento químico na fase de solubilização.

4 CONCLUSÕES

Este estudo confirmou a viabilidade técnica e ambiental do uso de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de blocos de pavimentação, destacando seu potencial para promover a economia circular no setor da construção civil. A substituição integral do agregado miúdo por agregados reciclados apresentou resultados satisfatórios, com resistência à compressão próxima aos requisitos normativos estabelecidos pela NBR 9781, especialmente após a otimização da composição com o uso de cimento CP V-ARI.

A análise morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciou superfícies rugosas e porosas nos agregados reciclados, além de zonas de transição críticas na interface com a matriz cimentícia. Esses achados ressaltam a importância de um controle rigoroso da qualidade dos RCD e sugerem que estratégias como o uso de cimentos de alta resistência podem mitigar os efeitos negativos da porosidade e microfissuração.

Os ensaios ambientais de lixiviação e solubilização demonstraram que os blocos de pavimentação com RCD são não perigosos, segundo os critérios da NBR 10004. No entanto, a classificação como resíduos não inertes no teste de solubilização para alumínio e ferro reforça a necessidade de monitoramento contínuo, para garantir a segurança em aplicações futuras.

A relevância social e ambiental do trabalho reside na redução de resíduos enviados a aterros, na diminuição da extração de recursos naturais e na valorização dos resíduos como insumos para novas aplicações. A adoção de RCD em blocos de pavimentação não só oferece uma alternativa sustentável para o setor, mas também contribui para a implementação de políticas públicas de gestão de resíduos sólidos e infraestrutura urbana sustentável.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se o aperfeiçoamento dos processos de beneficiamento dos RCD e o desenvolvimento de aditivos que potencializem a coesão e a durabilidade das misturas. Este estudo, assim, reafirma a importância do uso de agregados reciclados na construção civil, promovendo um futuro mais sustentável e alinhado aos princípios da economia circular.



5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimento intertravado**. São Paulo: ABCP, 2010.

ABNT. **Normas técnicas para concreto e resíduos sólidos: NBR 9781, NBR 10004, NBR 10005, NBR 10006, NBR 15900-1, NBR 16974, NBR 5738 e NBR 5739**. Rio de Janeiro: ABNT, [diversas edições].

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

BAGARIĆ, M.; BANJAD PEČUR, I.; MILOVANOVIĆ, B. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste – A case study. *Energy and Buildings*, v. 206, p. 109573, 2020.

BAI, X.; ZHOU, H.; BIAN, X.; CHEN, X.; REN, C. Compressive strength, permeability, and abrasion resistance of pervious concrete incorporating recycled aggregate. *Sustainability*, v. 16, p. 4063, 2024.

BERNARDES, L. de C. G.; FERREIRA, E. S.; PEDRO, P. D. T.; NUNES, G. H. Utilização de RCD para produção de concreto de 25 MPa. *RECET - Revista de Ciências Exatas e Tecnológicas*, [S. l.], v. 1, p. e012402, 2024.

BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022. 750 p. ISBN 9788569658023.

BORGES, A. K. de S. M.; MELO NETO, O. de M.; MENDONÇA, A. M. G. D. Análise química-mineralógica de cimentos Portland comerciais. *REUCP, Petrópolis*, v. 15, n. 1, p. 66-73, 2021. ISSN 2318-0692.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002.

CAETANO, M. O.; LAMBIASE, F. B.; GOMES, L. P. Composição dos RCD gerados em etapa de pós-obra originadas de correções patológicas em edificações verticais. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v. 9, n. 3, p. 331-348, dez. 2016.

CAETANO, M. O.; SCHUCK, T. E.; CAMACHO, D. L. D.; GOMES, L. P. Liner para impermeabilização de aterros sanitários utilizando resíduos de construção e demolição. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, v. 15, p. 86-109, 2022.

CAETANO, M. O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCDs para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. *Ambiente Construído*, v. 16, n. 2, p. 51-67, abr./jun. 2016.

DIOTTI, A.; GALVIN, A. P.; PICCINALI, A.; PLIZZARI, G.; SORLINI, S. Chemical and leaching behavior of construction and demolition wastes and recycled aggregates. *Sustainability*, v. 12, p. 10326, 2020.



EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 9-14, 2010.

KERN, A. P.; DIAS, M. F.; KULAKOWSKI, M. P.; GOMES, L. P. Waste generated in high-rise buildings construction: A quantification model based on statistical multiple regression. **Waste Management**, v. 39, p. 35-44, maio 2015.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69-76, 2012.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 169-176, 2013.

MCNEIL, K.; KANG, T. H. K. Recycled concrete aggregates: a review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 1, p. 61-69, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2006.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Pearson Education Limited, 2011.

PACHECO-TORGAL, F.; CABEZA, L. F.; LABRINCHA, J. A.; DE MAGALHÃES, A. **Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies**. Woodhead Publishing, n. 49, 2014. ISBN 9780857097675.

PETROV, B. Y.; ZAHARIEVA, R. A. **Recycling of concrete construction and demolition waste in alternative binders: Part 1 – Technical study**. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 951, p. 012008, 2020.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 407-415, 2007.

ROH, S.; KIM, R.; PARK, W. J.; BAN, H. Environmental evaluation of concrete containing recycled and by-product aggregates based on life cycle assessment. **Applied Sciences**, v. 10, n. 21, p. 7503, 2020.

SILVA, G. A.; SANTOS, R. P.; DE BRITO, J. Self-compacting concrete with recycled aggregates—a literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 22, p. 349-371, 2019.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.



Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes
Technical and Scientific Journal Green Cities

ISSN 2317-8604 Suporte Online / Online Support

Edição em Português e Inglês / Edition in Portuguese and English - Vol. 12, N. 37, 2024

TAYEH, B. A.; HAMADA, H. M.; ALMESHAL, I.; ABU BAKAR, B. H. **Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review.** *Case Studies in Construction Materials*, 2024.