



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

CARLOS PEREIRA NETO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS CERÂMICOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL
PARA FABRICAÇÃO DE *PAVERS***

SEROPÉDICA
2026





CARLOS PEREIRA NETO

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS CERÂMICOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL PARA FABRICAÇÃO DE *PAVERS*

Dissertação apresentada ao PPGCEMat da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Simone Pereira Taguchi Borges.

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício de Menezes Telo Sampaio.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P436a Pereira Neto, Carlos, 1960-
 Aproveitamento de resíduos cerâmicos da construção
 civil para fabricação de Pavers / Carlos Pereira Neto.
 - Seropédica, 2026.
 85 f.: il.

 Orientadora: Simone Pereira Taguchi Borges.
 Coorientador: Fabrício de Menezes Telo Sampaio.
 Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2026.

 1. Aproveitamento de resíduos da construção civil
 para fabricação de pavers. 2. Pavers permeáveis. 3.
 Piso drenante. 4. Economia circular. 5.
 Sustentabilidade. I. Borges, Simone Pereira Taguchi,
 1975-, orient. II. Sampaio, Fabrício de Menezes Telo,
 1979-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio
 de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciência e
 Engenharia de Materiais. IV. Título.

**O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEMAT

CARLOS PEREIRA NETO

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS CERÂMICOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL PARA FABRICAÇÃO DE *PAVERS*

Dissertação submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre no PPGCEMat,
Área de concentração em CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Dissertação aprovada em 21 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **SIMONE PEREIRA TAGUCHI BORGES**
Data: 30/08/2026 17:23:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Simone Pereira Taguchi Borges - Orientador – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **FABRICIO DE MENEZES TELO SAMPAIO**
Data: 30/08/2026 19:46:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fabício de Menezes Telo Sampaio - Coorientador – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **ROMULO CARDOSO VALADAO**
Data: 30/08/2026 21:53:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Romulo Cardoso Valadão - Membro interno – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **ROSELI MARINS BALESTRA**
Data: 30/08/2026 19:56:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Roseli Marins Balestra - Membro externo – UFSJ

Dedico este trabalho à minha família,
aos meus professores e a todas as
pessoas que, direta ou indiretamente,
contribuíram para a concretização desta
etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me acompanhar.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional e paciência.

Agradeço aos meus professores pela orientação e sabedoria compartilhadas.

Agradeço aos laboratórios (CSN, EEL/USP, Labtec e LNanoC₂) onde foram realizados os ensaios.

Agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram com incentivo e conhecimento para a concretização desta etapa.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq) - Processo nº 132657/2024-4. This study was financed in part by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq) – Proc. 132657/2024-4.

*“O céu é grande, mas cabe no olhar de
quem sonha. Sonha, planeja e
executa”*

(Autor desconhecido)

RESUMO

PEREIRA NETO, Carlos. **Título da Dissertação:** Aproveitamento de Resíduos Cerâmicos da Construção Civil para Fabricação de *Pavers*. 2026. 85 folhas. Trabalho Final de Curso, Dissertação em Mestrado - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

O acentuado processo de urbanização tem provocado substanciais alterações no meio urbano, especialmente devido à impermeabilização do solo e do aumento do escoamento superficial, fatores que contribuem diretamente para problemas de drenagem urbana, enchentes e degradação ambiental. Paralelamente, a indústria da construção civil destaca-se como uma das maiores consumidoras de recursos naturais e geradoras de resíduos sólidos, especialmente os resíduos da construção civil, cuja destinação inadequada ocasiona impactos ambientais, sociais e econômicos. Nesse contexto, torna-se necessária a adoção de soluções sustentáveis capazes de aliar desempenho técnico, reaproveitamento de resíduos e melhoria das condições de drenagem urbana. Dentre as alternativas disponíveis, os pavimentos permeáveis de concreto, especialmente os *pavers* intertravados com furos, apresentam elevado potencial de aplicação devido a sua alta permeabilidade, reduzindo o volume de escoamento superficial e favorecendo a recarga hídrica. Além disso, a incorporação de resíduos da construção civil na fabricação desses elementos contribui para a economia circular, reduzindo a extração de agregados naturais e minimizando a disposição de resíduos em aterros sanitários. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos cerâmicos provenientes da construção civil (RCC) na produção de *pavers* permeáveis de concreto com furos, avaliando a influência da substituição de agregados convencionais por resíduos cerâmicos da construção civil no desempenho físico, mecânico e hidráulico dos pavimentos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, análise de normas técnicas e realização de ensaios laboratoriais, considerando parâmetros relacionados à resistência à compressão, absorção de água e permeabilidade dos *pavers*. Os materiais empregados (areia, cimento e RCC), foram submetidos a ensaios de caracterização, incluindo picnometria, análise granulométrica e difração de raios X, permitindo a determinação de propriedades como densidade, distribuição granulométrica e composição mineralógica. Foram estudados diferentes traços de concreto, mantendo-se constante a relação água/cimento de 0,40, e adotando-se a proporção base de 1:2:3 para cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, conforme critérios estabelecidos

pela ABNT NBR 9781 — Peças de concreto para pavimentação. Foi realizado o ensaio de permeabilidade conforme a ABNT NBR 16416 — Pavimentos permeáveis de concreto, com o objetivo de determinar o coeficiente de infiltração do sistema e avaliar a influência da área vazada dos *pavers* associada a uma base drenante adequada. Verificou-se que os *pavers* produzidos com resíduos cerâmicos da construção civil apresentaram absorção de água < 6%, favorecendo a durabilidade das peças ao longo do uso. As resistências características à compressão variaram de 23,5 – 10,82 MPa, indicando aplicabilidades não estruturais como calçadas, paisagismo, e tráfego leve. O coeficiente de permeabilidade de todas as peças maciças foi de $k > 10^{-3}$ m/s (1,0 mm/s), e o modelo do *paver* com 7 furos apresentou maior capacidade de infiltração (11,94%), resultante da geometria dos furos combinada ao uso de rejunte drenante. A utilização de resíduos da construção civil em *pavers* permeáveis representa uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para a pavimentação urbana. Essa prática melhora a drenagem, reduz impactos ambientais e fortalece o desenvolvimento de construções alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Palavras-chave: pavimento permeável; drenagem urbana; sustentabilidade.

ABSTRACT

PEREIRA NETO, Carlos. Dissertation Title: Utilization of Ceramic Waste from Civil Construction for the Manufacture of Pavers. 2026. 85 pages. Final Course Project, Master's Dissertation - Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

The intense urbanization process has caused substantial changes in the urban environment, especially due to soil sealing and increased surface runoff, factors that directly contribute to urban drainage problems, flooding, and environmental degradation. In parallel, the civil construction industry stands out as one of the largest consumers of natural resources and generators of solid waste, particularly construction and demolition waste, whose inadequate disposal causes environmental, social, and economic impacts. In this context, it is necessary to adopt sustainable solutions capable of combining technical performance, waste reuse, and improved urban drainage conditions. Among the available alternatives, permeable concrete pavements, especially interlocking *pavers* with holes, present high application potential due to their ability to facilitate water infiltration into the soil, reducing surface runoff volume and favoring water recharge. Furthermore, the incorporation of civil construction waste into the manufacturing of these elements contributes to the circular economy by reducing the extraction of natural aggregates and minimizing waste disposal in landfills. This study aims to analyze the technical and environmental feasibility of using ceramic waste from civil construction in the production of permeable concrete *pavers* with holes, evaluating the influence of replacing conventional aggregates with ceramic construction waste on the physical, mechanical, and hydraulic performance of the pavements. The research was developed through a literature review, analysis of technical standards, and laboratory tests, considering parameters related to compressive strength, water absorption, permeability, and durability of the *pavers*. The materials used will be subjected to characterization tests, including pycnometry, granulometric analysis, and X-ray diffraction, allowing for the determination of properties such as density, particle size distribution, and mineralogical composition. Different concrete mixes will be studied, keeping the water/cement ratio constant and adopting the base ratio of 1:2:3 for cement, fine aggregate, and coarse aggregate, according to the criteria established by ABNT NBR 9781 — Concrete paving blocks — Specifications and test methods. In addition, a permeability test will be performed according to ABNT NBR 16416 — Permeable concrete pavements — Requirements and procedures,

with the objective of determining the infiltration coefficient of the system and evaluating the influence of the void area of the *pavers* associated with an adequate drainage base. It is expected that the *pavers* produced with ceramic civil construction waste will show technical performance compatible with or superior to conventional products, demonstrating hydraulic efficiency, satisfactory mechanical strength, and potential for application in pedestrian traffic areas. It is concluded that the use of civil construction waste in the manufacturing of permeable *pavers* represents a sustainable and technically viable alternative for urban paving, contributing to the reduction of environmental impacts caused by the construction industry, the improvement of urban drainage systems, and the development of construction practices aligned with the principles of sustainability and the circular economy.

Keywords: permeable pavement; urban drainage; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico: (a) antes da urbanização e (b) depois da urbanização.....	21
Figura 2 - Modificação do comportamento do escoamento superficial e vazões máximas em função da impermeabilização.....	21
Figura 3 - Resíduos da construção civil.....	23
Figura 4 - Fluxograma da Economia Linear e Circular.....	24
Figura 5 - Seção típica de pavimento intertravado.....	26
Figura 6 - Modelos de pavimento intertravado de concreto.....	27
Figura 7 - Revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável.....	28
Figura 8 - Relação entre área vazada e permeabilidade.....	30
Figura 9 - Fluxograma para fabricação de <i>pavers</i>	35
Figura 10 - Vibro prensa.....	36
Figura 11 - Execução do ensaio de infiltração <i>in situ</i> baseado na ASTM C1701 / NBR 16416.....	40
Figura 12 - Resistência alcançada (MPa), conforme o tempo (dias).....	42
Figura 13 - RCC antes e depois do processo de beneficiamento.....	44
Figura 14 - RCC ao final do processo de beneficiamento. (a) Pó de Pedra; (b) Brita 1; (c) Cascalho; (d) Mistura.....	44
Figura 15 – Picnômetro contendo água e amostra de RCC (à esquerda) e quadro dos valores de densidade para respectivas temperaturas de ensaio.....	46
Figura 16 – Agitador de peneiras para ensaio granulométrico (à esquerda) e RCC após peneiramento (à direita).....	47
Figura 17 - Peneira com abertura de 0,045mm (a); Almofariz de ágata com RCC sendo preparado (b).....	48
Figura 18 – Moldes e contramoldes para a conformação das peças hexagonais e cilíndricas.....	50
Figura 19 - Execução do Ensaio Tronco de Cone (<i>slump test</i>), e moldagem em forma cilíndrica, em forma sextavada, e sextavada com molde para furos.....	51
Figura 20 - Peças cilíndricas e sextavadas em processo de cura.....	52
Figura 21 - Corpos de prova sendo capeado para o ensaio de resistência à compressão (à esquerda), e máquina de ensaio mecânica durante a compressão do concreto.....	53
Figura 22 - <i>Pavers</i> em processo de secagem natural para obtenção da massa saturada (à esquerda), estufa para a secagem artificial (no centro) e pesagem (à direita).....	55

Figura 23 - Ensaio de permeabilidade dos <i>pavers</i> indicando as camadas de assentamento e nivelamento.....	56
Figura 24 – Confeção do anel de infiltração e aferição das medidas para ensaio de coeficiente de permeabilidade.....	57
Figura 25 - Processo de assentamento dos <i>pavers</i> , a fixação do anel de infiltração, e os círculos vermelhos evidenciando o posicionamento dos anéis no conjunto de 9 peças para executar triplicata no ensaio.....	57
Figura 26 – Desenho técnico do molde do <i>paver</i> com sete furos (à esquerda), e impressora 3D durante a confecção da peça (à direita).....	59
Figura 27 – Preparação das camadas para assentamento, instalação dos <i>pavers</i> e ensaio de permeabilidade.....	59
Figura 28 - Curva Granulométrica obtida por meio do ensaio de granulometria da Areia e do RCC (pó).....	62
Figura 29 - Curva Granulométrica obtida por meio do ensaio de granulometria da Brita 0 e RCC (gráúdo).....	63
Figura 30 – Fases cristalinas obtidas por difração de raios X do Cimento CPV, Areia e RCC.....	65
Figura 31 – Peças de concreto após as devidas conformações.....	66
Figura 32 - Gráfico da Resistência Característica à Compressão(fpi) das amostras T1, T2, T3 e T4, em MPa.....	67
Figura 33 - Resistências característica à compressão dos <i>pavers</i> T1 com 7 furos.....	69
Figura 34 - Gráfico de Absorção de Água das amostras T1, T2, T3 e T4 maciças.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença entre Economia Linear e Economia Circular.....	23
Tabela 2 - Resistência característica à compressão e critérios para resistência à abrasão.....	38
Tabela 3 – Proporções (em volume) utilizadas para confecção dos corpos de prova e dos <i>pavers</i> de concreto.....	48
Tabela 4 – Tipo, quantitativo e dimensões das amostras de concreto destinadas aos ensaios.....	50
Tabela 5 - Parâmetros de impressão 3D utilizados para fazer o molde do piso sextavado.....	58
Tabela 6 – Massa específica pelo método do Picnômetro para o Agregado Miúdo (areia).....	60
Tabela 7 - Densidade pelo método do Picnômetro para o RCC (pó).....	61
Tabela 8 - Características obtidas no ensaio de granulometria.....	62
Tabela 9 - Características obtidas no ensaio de granulometria (Brita 0 e RCC Graúdo).....	63
Tabela 10 - Resultados do Ensaio de Resistência Característica à Compressão para as amostras cilíndricas T1, T2, T3 e T4, de área superficial de 7853,97 mm ²	68
Tabela 11 – Resultados do Ensaio de Resistência Característica à Compressão para as amostras.....	70
Tabela 12 - Aplicabilidade para os <i>pavers</i> produzidos considerando os Ensaio de Resistência Característica à Compressão.....	70
Tabela 13 – Esboço de <i>pavers</i> vazados e respectivas capacidade de infiltração, considerando as áreas de rejuntas e furos.....	72
Tabela 14 - Coeficiente de Permeabilidade para as amostras T1, T2, T3 e T4 maciças e T1 com 7 furos.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Impacto da Urbanização e os Resíduos Cerâmicos da Construção Civil.....	20
2.2 Transição da Economia Linear para a Economia Circular.....	23
2.3 Engenharia de Pavimentação e Elementos Intertravados (<i>Pavers</i>).....	24
2.3.1 Evolução Histórica e Classificação Estrutural.....	24
2.3.2 Características Técnicas e Funcionais dos <i>Pavers</i>	26
2.3.3 Tecnologia de Pavimentos Permeáveis.....	27
2.3.3.1 Pavimentos Intertravados Permeáveis com Furo (Blocos Vazados).....	29
2.4 O Concreto e Seus Materiais Constituintes.....	30
2.4.1 Cimento Portland.....	31
2.4.2 Agregados.....	33
2.4.3 Água de Amassamento.....	33
2.4.4 Aditivos Químicos e Adições Minerais.....	34
2.5 Processo Industrial de Fabricação de <i>Pavers</i>	34
2.6 Ensaio Experimentais e Metodologias de Laboratório.....	36
2.6.1 Fundamentos dos Ensaio Experimentais em Laboratório.....	36
2.6.2 Caracterização Física, Microestrutural e Mineralógica dos Materiais.....	36
2.6.2.1 Determinação da Densidade por Picnometria.....	36
2.6.2.2 Análise Granulométrica por Peneiramento.....	37
2.6.2.3 Identificação de Fases Cristalinas por Difração de Raios X (DRX).....	37
2.6.3 Ensaio para Caracterização de Peças de Concreto para Pavimentação.....	37
2.6.3.1 Resistência Característica à Compressão (f_{pk}).....	38
2.6.3.2 Absorção de Água e Aspectos Visuais.....	38
2.6.3.3 Permeabilidade em Matrizes Cimentícias e Gestão Hidrológica Urbana.....	39

2.6.3.4 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade (<i>In Situ</i> e Laboratório).....	39
2.7 Viabilidade Econômica na Fabricação de <i>Pavers</i> com Resíduos da Construção Civil (RCC).....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 Materiais.....	42
3.1.1 Cimento.....	42
3.1.2 Areia.....	42
3.1.3 Brita 0.....	43
3.1.4 Resíduo de Construção Civil (RCC) – fração miúda (pó).....	43
3.1.5 Resíduo de Construção Civil (RCC) – fração graúda.....	43
3.1.6 Água.....	43
3.2 Processamento e Beneficiamento do RCC.....	43
3.3 Procedimento Experimental.....	44
3.3.1 Caracterização da Matéria Prima e RCC.....	45
3.3.1.1 Ensaio de Massa Específica.....	45
3.3.1.2 Ensaio de Análise Granulométrica.....	46
3.3.1.3 Ensaio de Difração de Raios X.....	47
3.3.2 Dosagem e Preparo dos Concretos.....	48
3.3.3 Moldagem e Cura.....	49
3.3.4 Ensaio de Resistência Característica à Compressão.....	52
3.3.5 Determinação da Absorção de Água.....	53
3.3.6 Ensaio de Permeabilidade.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1 Caracterização dos materiais precursores.....	60
4.1.1 Massa Específica	60

4.1.2Granulometria.....	61
4.1.3 Fases Cristalinas (DRX).....	63
4.2 Características Físicas dos Corpos de Prova e Caracterizações.....	66
4.2.1 Resistência à Compressão.....	66
4.2.2 Absorção de Água.....	71
4.2.3 Permeabilidade.....	72
5 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

A construção civil apresenta-se como um dos setores fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico e para o fortalecimento da infraestrutura urbana (Marques Neto, 2005; Gonçalves, 2014). No entanto, de forma antagônica, o segmento destaca-se como um dos maiores geradores de impactos ambientais devido ao elevado consumo de recursos naturais e a massiva produção de resíduos sólidos (Fernandes, 2011; Brito; Dias, 2008). No cenário brasileiro, o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, publicado em 2022 pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), apontou que foram gerados aproximadamente 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCC) no ano de 2021. Esse montante representa uma média expressiva de 227 quilos de entulho por habitante e um crescimento de 2,9% em comparação ao ano anterior.

Entre os materiais que compõem esses resíduos, destacam-se predominantemente os componentes cerâmicos, tais como tijolos, telhas, blocos de vedação e revestimentos. Quando descartados de maneira inadequada e sem triagem prévia, esses materiais reduzem drasticamente a vida útil de aterros sanitários e desencadeiam severos passivos ambientais, incluindo a degradação e poluição do solo, o assoreamento de corpos hídricos e a contaminação de águas superficiais e subterrâneas (Marques Neto, 2005).

Frente a esse desafio socioambiental, a vigente Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fixou as diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos sólidos no país. A legislação adota princípios rigorosos de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos, além de impor a erradicação de lixões e o estabelecimento da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos entre cidadãos, empresas e o poder público. A referida lei também atua no fomento a sistemas de logística reversa e no incentivo à inclusão produtiva de catadores de materiais recicláveis.

Em consonância com os pilares legais da PNRS e com os fundamentos conceituais da economia circular, o reaproveitamento de resíduos cerâmicos surge como uma alternativa de elevado valor técnico, econômico e ecológico. A reinserção desses subprodutos na cadeia produtiva atenua a saturação das áreas de disposição final e reduz sensivelmente a demanda por extração de matérias-primas virgens, cuja atividade extrativista tradicional gera severas modificações antrópicas na paisagem e no ecossistema local (NBR 15116, 2004; Gonçalves,

2007; Brito; Dias, 2008).

O adensamento demográfico acelerado e a expansão urbana desordenada têm gerado a impermeabilização massiva do solo nos centros urbanos, um dos principais vetores de alteração do ciclo hidrológico natural. Esse cenário acarreta a redução drástica da recarga de aquíferos, a sobrecarga das redes de drenagem convencional e o incremento do escoamento superficial (*runoff*), culminando em episódios recorrentes de alagamentos e inundações (Antonino; Póvoas; Moura, 2024; Silva et al., 2025).

Como resposta a essa problemática, os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) consolidaram-se como premissa essencial no planejamento urbano contemporâneo, priorizando o manejo das águas pluviais diretamente na fonte por meio de mecanismos de infiltração, retenção e amortecimento (Carvalho, 2023). Dentre as tecnologias que integram os SUDS, os pavimentos permeáveis — com destaque para os blocos intertravados (*pavers*) — despontam como soluções de alta eficiência. Essas estruturas aliam a capacidade de suporte mecânico para tráfego ao desempenho hidráulico de percolação, mitigando os picos de vazão a jusante e viabilizando, quando associados a agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), a simbiose entre drenagem sustentável e economia circular na construção civil (Lima et al., 2025; Carvalho, 2023).

Nesse contexto, os *pavers* (também conhecidos como blocos intertravados de concreto) configuram-se como peças pré-fabricadas amplamente utilizadas para o revestimento de áreas externas, como calçadas, vias urbanas de tráfego leve, estacionamentos, praças e áreas de lazer (Fernandes, 2011). A NBR 9781 (2013) define o pavimento intertravado como uma estrutura de caráter flexível cuja camada de revestimento é constituída por peças de concreto justapostas sobre uma camada de assentamento, com juntas preenchidas por material de rejuntamento, garantindo o intertravamento pelo sistema de contenção lateral e pelo atrito gerado entre as faces dos pisos.

Convencionalmente, a matriz cimentícia utilizada na produção dessas peças é composta por cimento Portland, água e agregados minerais naturais (como areia e brita 0), exigindo processos específicos de dosagem, mistura, moldagem, adensamento, cura e ensaios normativos laboratoriais para verificar a resistência à compressão e o índice de absorção de água (NBR 9781, 2013; Senço, 2001). Como solução avançada para o manejo hidrológico, destacam-se os *pavers* com furos ou vazios geométricos projetados. Diferente do concreto poroso tradicional, onde a água percola pelos interstícios da massa cimentícia, os *pavers* vazados representam uma solução híbrida e multifuncional. Neles, a capacidade de infiltração é controlada diretamente pelas aberturas geométricas vazadas na estrutura do piso (ACI,

2010).

Esses furos podem ser preenchidos com agregados graúdos de alta permeabilidade (como pedriscos) ou com solo e vegetação (grama), o que confere apelo estético e auxilia no conforto térmico urbano ao reduzir o efeito de ilhas de calor. Embora a presença das aberturas reduza a área de seção transversal, o artefato exige um desenho geométrico planejado para garantir a correta transferência de cargas e o atrito lateral entre os pisos, essa configuração otimiza consideravelmente a eficiência hidráulica de infiltração. Por essa razão, tornam-se soluções ideais para calçadas, áreas de lazer, estacionamentos e vias de tráfego leve, onde a demanda por drenagem imediata é crítica (Balbo, 2020).

A substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados reciclados de resíduo de construção e demolição (RCC) apresenta-se como uma abordagem inovadora para a fabricação desses componentes (Brito; Dias, 2008), promovendo um aumento na permeabilidade do material a depender da granulometria e da taxa de substituição adotada (Monteiro, 2010; Finocchiaro; Girardi, 2017). Essa propriedade é considerada altamente desejável para potencializar a capacidade drenante das peças (Alencar, 2013). Porém, devido às características físicas particulares, como a maior porosidade e a menor densidade em comparação ao agregado natural, os resíduos cerâmicos que constituem uma fração específica, composta por tijolos, telhas e revestimentos presentes nos RCC podem com a sua introdução na mistura alterar as propriedades reológicas e mecânicas do concreto.

O uso desse material impõe desafios complexos à engenharia civil. O potencial incremento de permeabilidade exige um monitoramento rigoroso e o ajuste minucioso do traço de concreto para que o ganho em desempenho hidráulico não resulte em perdas severas de resistência mecânica e durabilidade (Alencar, 2013). Embora o arcabouço normativo brasileiro conte com a ABNT NBR 9781: 2013 para orientar os requisitos de blocos de concreto convencionais, com a ABNT NBR 15116: 2004 regulamentando os agregados reciclados para pavimentação e com a ABNT NBR 16416: 2015 direcionando as diretrizes para pavimentos permeáveis, as metodologias específicas de dosagem, mistura, moldagem e adensamento para concretos com agregados reciclados associados à alta permeabilidade ainda não se encontram plenamente consolidadas na literatura técnica (Batezine, 2013). A marcante heterogeneidade na composição química e física do RCC remete à necessidade constante de pesquisas científicas direcionadas à otimização microestrutural e à melhoria do desempenho dos novos materiais obtidos (Batezine, 2013).

Diante do cenário exposto, este trabalho tem como objetivo central propor e investigar as vantagens técnicas e os obstáculos práticos relacionados a utilização de resíduos cerâmicos

da construção civil (triturados e peneirados) como agregados na formulação de pisos intertravados (*pavers*) permeáveis desenvolvidos à base de concreto, visando obter peças com características compatíveis para aplicação como revestimento drenante em áreas externas com tráfego leve a moderado, tais como calçamento de ruas em condomínios, áreas de estacionamento e paisagismo.

Para alcançar esse intuito, esta pesquisa desdobra-se em objetivos específicos que consistem em: a) elaborar diferentes composições para a matriz de concreto dos *pavers*, variando as proporções de substituição dos agregados convencionais pelo resíduo cerâmico (RCC); b) desenvolver a geometria dos *pavers* permeáveis com furos, avaliando a viabilidade técnica de moldagem; c) avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas das peças, especificamente a resistência à compressão, a absorção de água e a taxa de permeabilidade (tanto do material em si quanto através dos furos integrados); d) confrontar os valores encontrados com os requisitos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 9781: 2013 (Peças de concreto para pavimentação) e ABNT NBR 16416: 2015 (Pavimentos permeáveis de concreto); e) identificar, por meio dos resultados experimentais, as condições ideais em que a utilização de resíduos cerâmicos se consolida como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para a fabricação desses pavimentos drenantes.

As referências técnicas citadas, como a ABNT NBR 7211, indicam que os materiais sejam coletados e preparados seguindo rigorosamente os requisitos de qualidade e procedimentos de ensaios estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Por meio do estudo de novas formulações e do desenvolvimento de técnicas acessíveis de manipulação e preparo, buscou-se avaliar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das peças resultantes, validando a viabilidade técnica e econômica dessa prática como indutora do desenvolvimento urbano sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica deste trabalho está estruturada de forma a correlacionar os impactos da urbanização com a necessidade de soluções sustentáveis na engenharia civil. Para tanto, abordam-se o panorama dos resíduos cerâmicos e os preceitos da economia circular, seguidos pelos conceitos de pavimentação, com ênfase nos pavimentos intertravados convencionais e permeáveis. Por fim, detalham-se os materiais constituintes do concreto convencional e reciclado, bem como os processos fabris e os métodos de ensaios laboratoriais normatizados, indispensáveis para a caracterização tecnológica das peças.

2.1 Impacto da Urbanização e os Resíduos Cerâmicos da Construção Civil

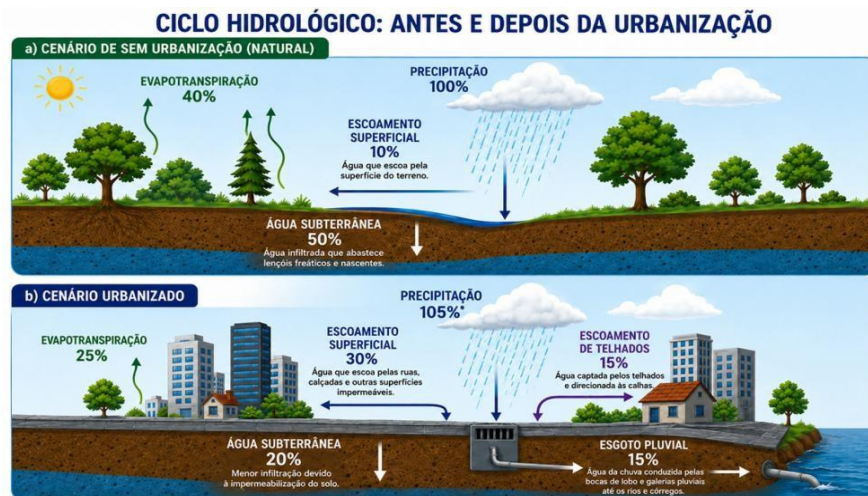
O crescimento populacional acelerado e a consequente concentração nos centros urbanos têm provocado transformações profundas no uso do solo, resultando na proliferação de extensas áreas pavimentadas e impermeáveis. Como apontam Finocchiaro e Girardi (2017) e Pereira e Barbosa (2015), essa escassez de superfícies permeáveis altera drasticamente o ciclo hidrológico local, gerando um aumento substancial nos volumes escoados e nas vazões de pico. O modelo tradicional de drenagem urbana baseia-se na premissa do rápido afastamento das águas pluviais; contudo, essa abordagem sobrecarrega as redes públicas, elevando a intensidade e a frequência de alagamentos e inundações que geram graves problemas de infraestrutura.

A análise comparativa do balanço hidrológico em cenários pré e pós-urbanização, conforme a Figura 1 e a Figura 2, evidencia que as interferências antrópicas reduzem a infiltração natural e a recarga do lençol freático, enquanto maximizam o escoamento superficial (*runoff*). Conforme as premissas estabelecidas por Schueler (1987) e consolidadas nos estudos de hidrologia urbana de Tucci (2005) e Baptista et al. (2011), o processo de urbanização acelera as vazões de pico devido à impermeabilização do solo, tornando urgente o amortecimento hidráulico. Desse modo, faz-se necessária a adoção de técnicas compensatórias de drenagem e controle na fonte, a exemplo de pavimentos permeáveis e reservatórios de retenção, que reabilitem a capacidade de armazenamento natural do solo e mitiguem os impactos das cheias.

No cenário urbanizado, a precipitação é representada como 105% devido ao efeito da ilha de calor urbana. A substituição da vegetação por superfícies impermeáveis, como asfalto, concreto e telhados, aumenta a absorção e retenção de calor nas cidades. Esse aquecimento eleva a temperatura do ar, intensificando a circulação atmosférica e favorecendo a formação de

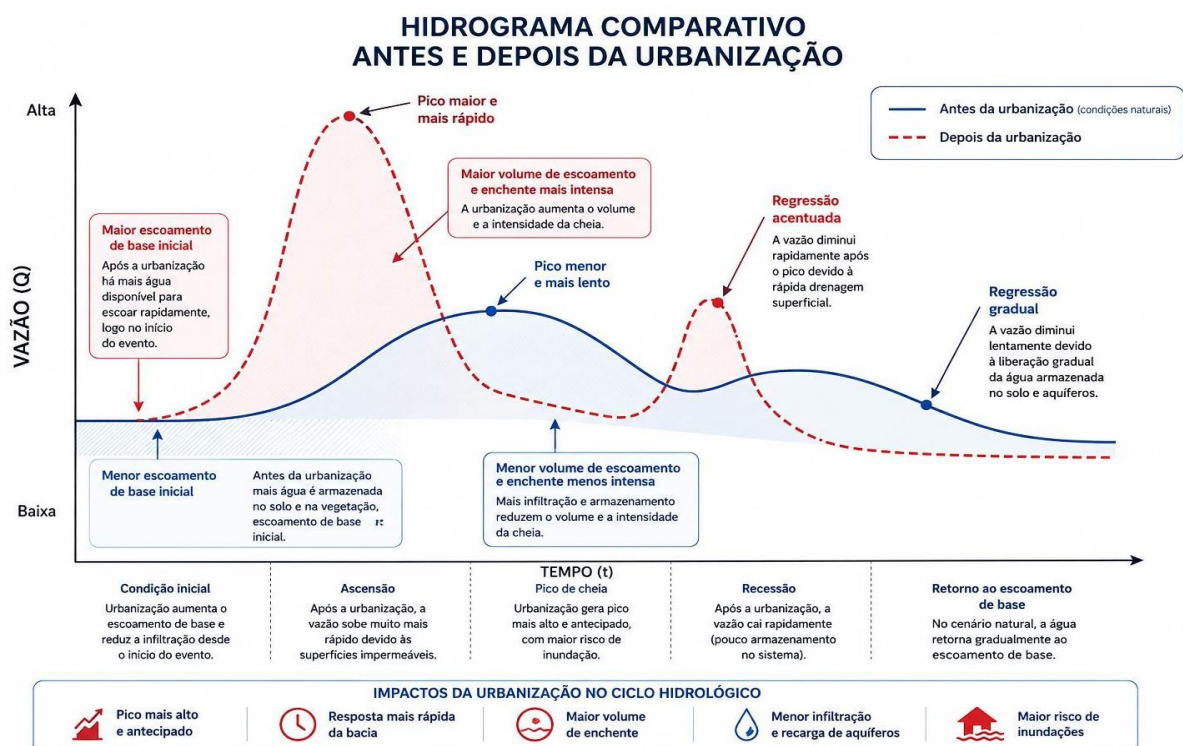
nuvens de chuva. Além disso, a poluição urbana libera partículas em suspensão que atuam como núcleos de condensação, contribuindo para a formação de gotas de água. Como resultado, áreas urbanizadas podem apresentar um pequeno aumento na intensidade ou frequência das precipitações em comparação ao ambiente natural (Tucci, 2007).

Figura 1 - Ciclo hidrológico: (a) antes da urbanização e (b) depois da urbanização.



Fonte: Adaptado de US EPA, 2011) / Baptista et al, 2011.

Figura 2 - Modificação do comportamento do escoamento superficial e vazões máximas em função da impermeabilização.



Fonte: Adaptado de Tucci, 2005 / Canto et al, 2019.

A análise do hidrograma (vazão x. tempo) demonstra que a urbanização, através da impermeabilização do solo, altera drasticamente o comportamento hidrológico local. O escoamento superficial ocorre de forma mais rápida e volumosa após a urbanização, com um pico de vazão mais elevado, visto que a capacidade de absorção do solo é comprometida. Em comparação, cenários não urbanizados apresentam picos de vazão menores e mais lentos, favorecidos pela infiltração. A Figura 1, sobre o ciclo hidrológico, ilustra este fenômeno, evidenciando a redução da infiltração de 50% para 20%, o que sobrecarrega o sistema de drenagem e aumenta o risco de inundações.

Simultaneamente à problemática hidrológica, a indústria da construção civil destaca-se como um dos setores que mais consomem recursos naturais e que mais geram resíduos sólidos em escala global. Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil indicam que aproximadamente 30% de todo o montante de resíduos produzidos no país provém diretamente deste setor, sendo comum o descarte irregular de parte dessas substâncias em áreas públicas, o que obstrui as redes de micro drenagem e potencializa enchentes. No âmbito macro ambiental, as atividades ligadas à construção exercem forte pressão sobre as mudanças climáticas: segundo dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2022); as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) decorrentes deste setor atingiram marcas recordes. Adicionalmente, relatórios da Agência Internacional de Energia (AIE, 2019) e da Organização das Nações Unidas (ONU, 2020) ratificam que o ciclo de vida da construção, englobando a extração, fabricação de insumos, operação e demolição, responde por cerca de 11% a 39% das emissões globais de gases de efeito estufa provocadas pelo homem.

No cenário nacional atual, embora o setor represente cerca de 10% do Produto Interno Bruto (PIB) e responda por mais de 15% dos empregos formais, ele é o maior vetor de degradação volumétrica devido aos Resíduos de Construção e Demolição (RCC). Os resíduos cerâmicos, perfazem uma fração volumétrica altamente significativa e de difícil degradação natural. O descarte inadequado desses materiais satura aterros e expõe o ambiente a riscos de contaminação do solo e de corpos d'água (ABRECON, 2020). Contudo, como preconizado por Angulo (2005) e corroborado pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2025), eles carregam um potencial intrínseco de aproveitamento e reciclagem. O aproveitamento do entulho cerâmico triturado como agregado reciclado em novas matrizes cimentícias define a busca por soluções ecoeficientes na engenharia civil contemporânea. A Figura 3 mostra alguns tipos de resíduos cerâmicos da construção civil

Figura 3 - Resíduos da construção civil.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.2 Transição da Economia Linear para a Economia Circular

A mitigação dos passivos ambientais urbanos passa obrigatoriamente pela ruptura com a chamada Economia Linear. Esse modelo econômico tradicional baseia-se na lógica sequencial do "extrair, produzir, usar e descartar", que pressupõe uma disponibilidade infinita de recursos naturais e uma capacidade ilimitada de absorção de rejeitos pelo planeta, culminando no esgotamento precoce de jazidas e na poluição de ecossistemas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

Em contraposição, a Economia Circular propõe uma abordagem focada na conservação e regeneração dos sistemas ecológicos. Fundamentada nos princípios estabelecidos pela *Ellen MacArthur Foundation* (2018), essa vertente busca eliminar o desperdício desde a etapa de projeto (*eco-design*), mantendo materiais e subprodutos em circulação contínua através do reparo, da reutilização e da reciclagem. No setor de infraestrutura, conforme discutido por Angulo *et al.* (2007) e Luz (2017), a substituição de materiais virgens por reciclados desacelera a exploração mineral e restringe a pegada de carbono industrial. A Tabela 1 detalha as divergências conceituais e operacionais entre as duas abordagens, cujos fluxos são esquematizados na Figura 4.

Tabela 1 - Diferença entre Economia Linear e Economia Circular.

Características	Economia Linear	Economia Circular
Foco	Extração, produção, descarte	Redução, reutilização, reparo, reciclagem
Impacto Ambiental	Desperdício, esgotamento de recursos, poluição	Minimiza resíduos, o uso de recursos naturais e a poluição
Sustentabilidade	Não sustentável a longo prazo	Sustentável e regenerativa
Cadeia de Valor	Linear, com a finalidade de descarte	Circular, com objetivo na reutilização e reciclagem

Fonte: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

Figura 4 - Fluxograma da Economia Linear e Circular.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor baseado em Ellen MacArthur Foundation, 2013.

No Brasil, o arcabouço normativo que baliza essa transição na construção civil tem como marco legal a Resolução CONAMA nº 307 de 2002, que estipula as diretrizes obrigatórias para a gestão e segregação dos resíduos na fonte geradora, classificando-os para viabilizar sua posterior reciclagem. Complementarmente, a norma ABNT NBR 15116: 2004 fixa os critérios para o emprego de agregados reciclados de RCD em camadas de pavimentação e no preparo de concretos não estruturais.

De acordo com dados da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2020; 2024), a capacidade instalada das usinas de agregados reciclados expandiu-se significativamente, somando centenas de unidades públicas e privadas no território nacional. A trituração de tijolos, argamassas e cimentícios para a transformação em brita, pedrisco e areia reciclada viabiliza a produção nacional de milhões de toneladas anuais de agregados sustentáveis. No Brasil, a produção nacional de agregados reciclados a partir do beneficiamento de Resíduos de Construção Civil gira em torno de 10 milhões de toneladas anuais (ABRECON, 2020). Estudos de Brito, Pereira e Correia (2005) alertam que, em escala mundial, países que negligenciam essas práticas, destinam mais de 95% de seus resíduos a aterros sanitários. Portanto, a consolidação de usinas de triagem aliada a políticas públicas eficientes e à conscientização setorial diminui o desperdício, gera emprego e reduz expressivamente os custos municipais com a remoção de entulhos.

2.3 Engenharia de Pavimentação e Elementos Intertravados (*Pavers*)

2.3.1 Evolução Histórica e Classificação Estrutural

A história da engenharia rodoviária e da pavimentação de vias públicas remonta a

civilizações antigas, como o Egito, que desenvolveu caminhos rígidos para o transporte de materiais pesados destinados à construção de monumentos, e o Império Romano, cuja célebre *Via Ápia* demonstrava uma engenharia empírica avançada no arranjo de blocos pétreos justapostos. Conforme explicam Bernucci *et al.* (2008), o avanço científico permitiu a evolução dessas técnicas primitivas para sistemas estruturais modernos, funcionais e mecanizados.

Tecnicamente, o processo de pavimentação consiste na execução de um sistema de camadas horizontais sobre um solo natural compactado ou base preparada, com a finalidade de proporcionar uma superfície de rolamento segura, resistente e durável sob a ação de cargas de tráfego e intempéries. De acordo com as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), os pavimentos são classificados em três grandes grupos em função de seu comportamento mecânico:

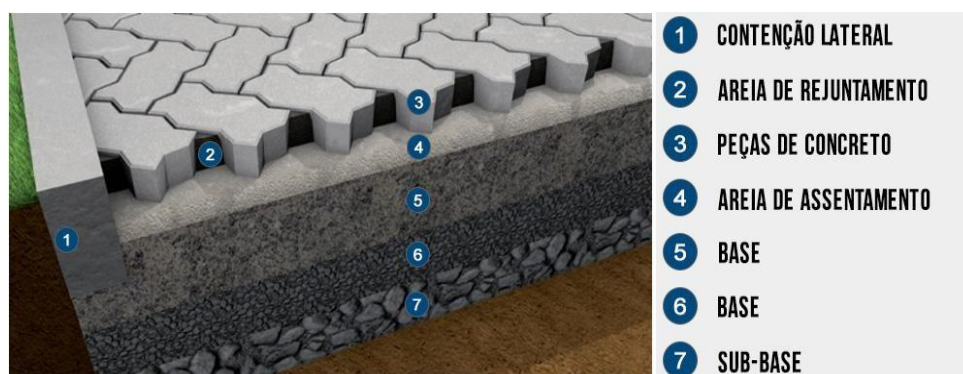
- a) pavimentos flexíveis: revestidos geralmente por misturas asfálticas, deformam-se elasticamente sob a ação de cargas e distribuem as tensões de maneira equilibrada nas camadas subjacentes;
- b) pavimentos rígidos: constituídos por placas de concreto de cimento Portland, possuem elevada rigidez flexional, absorvendo a maior parte das tensões e sendo indicados para suportar tráfego pesado e estático;
- c) pavimentos intertravados: compostos por blocos de concreto pré-moldados colocados justapostos sobre uma camada de areia, promovendo a transmissão de esforços por meio do atrito lateral entre as peças.

Estruturalmente, o sistema de pavimento intertravado convencional, de acordo com a Figura 5, distribui as cargas verticais por meio de um arranjo sequencial de camadas compactadas:

- a) subleito: camada natural do solo que serve de fundação e suporte ao pavimento, podendo requerer estabilização química ou mecânica;
- b) sub-base: camada granular complementar de suporte, executada quando a base não puder ser assentada diretamente sobre o subleito;
- c) base: camada de alta resistência encarregada de absorver o peso do fluxo de trânsito e distribuí-lo atenuadamente para as camadas inferiores;
- d) areia de assentamento: camada uniforme que serve de berço para o alinhamento das peças pré-moldadas;
- e) peças de concreto (*Pavers*): o revestimento superior que fica em contato direto com os pneus dos veículos, suportando a abrasão local;

- f) areia de rejuntamento: material granular fino introduzido nas juntas para garantir o travamento mecânico por atrito lateral;
- g) contenções laterais: estruturas rígidas periféricas indispensáveis para travar o conjunto e impedir o deslocamento horizontal dos blocos.

Figura 5 - Seção típica de pavimento intertravado.



Fonte: *Pavers* de Concreto – Jarfell //Sahara, 2022.

2.3.2 Características Técnicas e Funcionais dos *Pavers*

A pavimentação com peças pré-moldadas de concreto teve uma expansão significativa a partir de meados do século XX, impulsionada pelas necessidades de reconstrução da infraestrutura urbana europeia no pós-guerra e pela escassez de insumos asfálticos. O funcionamento mecânico do sistema baseia-se na união solidária das peças, que agem como um "quebra-cabeça" onde as juntas preenchidas garantem o intertravamento.

Conforme dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010), os *pavers* oferecem vantagens econômicas e operacionais de longo prazo quando comparados a pavimentos contínuos. Geram baixa manutenção e facilidade de reparo, e a substituição local de peças danificadas elimina a necessidade de demolições extensas e remendos estéticos. Apresentam alta resistência ao desgaste superficial e adaptam-se a pequenas acomodações do solo sem fissurar, podendo alcançar vida útil superior a 30 anos se instalados corretamente. Permite a remoção temporária das peças para intervenções em redes subterrâneas e o seu posterior reassentamento sem perda do material original. E a variedade de cores e paginações aumenta o aspecto visual e o valor de mercado das áreas pavimentadas.

O dimensionamento dessas estruturas baseia-se na determinação da capacidade de suporte de carga do subleito, obtida por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme a norma NBR 9896, confrontada com o volume e a magnitude das cargas de tráfego

previstas para o local (Carvalho, 1998). A geometria das peças é regulamentada pela ABNT NBR 9781: 2013, que as classifica em quatro tipologias distintas. A tipo I são peças com formato retangular ou próximo a este, cuja relação comprimento/largura é estritamente igual a dois, permitindo assentamento em fileiras retas ou em espinha de peixe. A tipo II são blocos com formato geométrico único e exclusivo, distintos do retangular, desenhados para encaixe em fileiras padronizadas. A tipo III são peças com arranjos geométricos característicos (como hexágonos, trapézios ou triedros), cuja massa individual ultrapassa 4 kg. E a tipo IV são conjuntos modulares de peças de múltiplos tamanhos ou peças únicas que simulam juntas falsas para compor padrões estéticos variados. A Figura 6 mostra alguns exemplos de pisos intertravados.

Figura 6 – Modelos de pavimento intertravado de concreto.



Fonte: Valguará, Pré Fabricados de Concreto, 2023.

A espessura nominal das peças varia usualmente de 6 cm (indicado para tráfego de pedestres e veículos leves) a 10 cm (especificado para pátios industriais e vias de tráfego pesado), conforme prescrito pelas diretrizes de controle tecnológico da NBR 9781 (2013).

2.3.3 Tecnologia de Pavimentos Permeáveis

Os pavimentos intertravados permeáveis representam uma evolução tecnológica e conceitual alinhada aos paradigmas modernos dos Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) e das Práticas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID - *Low Impact*

Development). Conforme apontam Monteiro (2010) e Finocchiaro e Girardi (2017), esses sistemas são projetados com uma estrutura de matriz porosa ou com juntas preenchidas por materiais granulares de alta permeabilidade, gerando uma rede de vazios interconectados que assegura taxas de infiltração hidráulica expressivamente superiores às observadas em pavimentos convencionais impermeáveis.

Do ponto de vista hidrodinâmico, essa tipologia mitiga o escoamento superficial direto (*runoff*) ao promover o armazenamento temporário do volume precipitado no interior das camadas granulares de base e sub-base (compostas tipicamente por britas graduadas ou reservatórios de brita limpa sem finos), as quais atuam funcionalmente como reservatórios subterrâneos de amortecimento. Esse mecanismo retarda o tempo de concentração da bacia hidrográfica urbana. Posteriormente, o volume acumulado é gradualmente reinfiltrado no subleito natural ou direcionado de maneira controlada (através de tubulações de descarga lenta) para a rede de microdrenagem pública, reduzindo expressivamente as vazões de pico das ondas de cheia e combatendo os efeitos nocivos da impermeabilização antrópica intensiva.

Complementarmente, no âmbito dos materiais de construção civil, Silva (2012) destaca que a infiltração da água pode ocorrer tanto pelas juntas alargadas quanto por meio do próprio corpo das peças pré-moldadas de concreto poroso — material este que abdica da fração de agregados miúdos graúdos tradicionais (areia) para garantir a macro porosidade necessária à circulação hidrodinâmica. A Figura 7 ilustra um revestimento constituído por placas de concreto permeável, evidenciando as zonas de infiltração direta.

Figura 7 - Revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável.



Fonte: Silva, 2012.

2.3.3.1 Pavimentos Intertravados Permeáveis com Furo (Blocos Vazados)

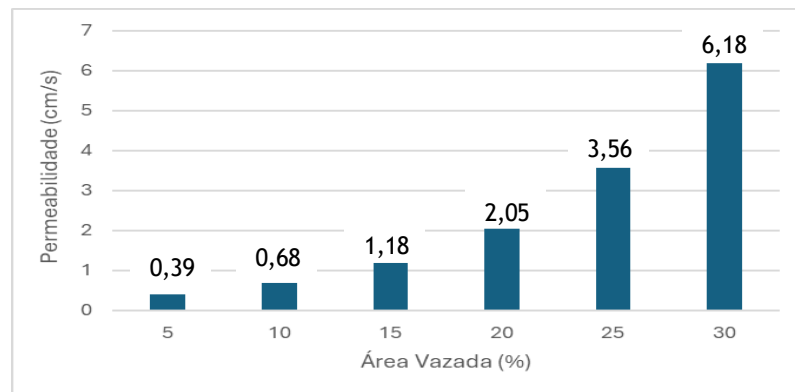
Dentre as variações de sistemas modulares permeáveis, os pavimentos intertravados com furo, frequentemente denominados blocos vazados ou grelhas de concreto, destacam-se como uma alternativa tecnológica de alta eficiência hidrológica. Diferente dos *pavers* porosos de concreto permeável contínuo, os blocos vazados possuem aberturas geométricas vazadas macroscopicamente em sua estrutura durante o processo de moldagem.

Conforme apontam Marchioni e Silva (2018), o princípio funcional desse sistema baseia-se na combinação da resistência mecânica do perímetro de concreto com a alta capacidade de infiltração fornecida pelas suas cavidades abertas. Essas aberturas vazadas ocupam, geralmente, entre 5% e 30% da área superficial total do bloco (SUSTAINABILITY, 2020) e são preenchidas por materiais de alta condutividade hidráulica, tais como:

- a) material granular (pedrisco/brita fina): o preenchimento com agregados graúdos limpos e sem finos cria um meio altamente poroso que acelera a percolação vertical da água pluvial em direção às camadas de base e sub-base, minimizando instantaneamente o escoamento superficial;
- b) solo vegetal e gramíneas: o preenchimento com solo e sementes de grama promove a integração paisagística da via (áreas verdes estruturadas), auxiliando na redução das ilhas de calor urbanas através da evapotranspiração da vegetação, embora apresente um coeficiente de permeabilidade ligeiramente inferior ao preenchimento puramente granular devido à compactação natural da terra.

Sob o aspecto normativo nacional, o dimensionamento, a paginação e as diretrizes de instalação desses sistemas seguem os preceitos gerais da ABNT NBR 16416 (Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e métodos de ensaio). A referida norma estipula que o coeficiente de permeabilidade mínimo para o sistema de pavimento permeável como um todo deve ser de 1 mm/s, garantindo que mesmo sob precipitações críticas de forte intensidade não ocorra o acúmulo de água na superfície. O gráfico da Figura 8 apresenta a relação entre área vazada e permeabilidade.

Figura 8 - Relação entre área vazada e permeabilidade.



Fonte: adaptado de SUSTAINABILITY (MDPI), 2020.

Do ponto de vista mecânico, Virgiliis (2009) adverte que a presença dos furos reduz a área de contato efetiva do bloco e altera a distribuição de tensões sob o tráfego. Por essa razão, o uso de blocos vazados é prioritariamente indicado para locais sujeitos a cargas leves e velocidades reduzidas, tais como estacionamentos de veículos residenciais e comerciais, caminhos de pedestres, parques, praças e vias de acesso local.

A durabilidade do sistema e a manutenção de seus índices originais de infiltração estão diretamente atreladas ao controle do fenômeno de colmatção (*clogging*). A colmatção consiste no entupimento progressivo dos vazios do material de preenchimento devido à deposição de partículas finas de solo, poeira urbana e sedimentos carregados pelo vento ou por escoamentos adjacentes (Prado *et al.*, 2020). Para mitigar essa perda de funcionalidade ao longo da vida útil da obra, o projeto deve prever rotinas periódicas de manutenção corretiva, utilizando sistemas de varrição mecanizada associada à aspiração de alta potência ou hidrojateamento sob pressão para desobstruir as aberturas e restabelecer a dinâmica hidrológica do pavimento.

2.4 O Concreto e Seus Materiais Constituintes

O concreto é um material compósito heterogêneo e multifuncional, cuja matriz básica é formada pela reação de um aglomerante hidráulico (cimento) com a água, unindo rigidamente uma fase dispersa de fragmentos minerais (agregados miúdos e graúdos). Segundo Helene (1992), suas propriedades mecânicas e de durabilidade o tornam o material estrutural mais consumido do planeta, com aplicações que abrangem desde estruturas hiperestáticas (edifícios, pontes) até pavimentos compactados e blocos pré-fabricados.

Segundo a NBR 9781 (2013) o concreto utilizado nas peças deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Existem vários tipos de categorias, cada um com aplicações e características específicas:

- a) concreto convencional: O tipo mais comum e utilizado em construções;
- b) concreto usinado (bombeado): Mais fluido e utilizado em obras de grande porte e em locais de difícil acesso;
- c) concreto armado: concreto com barras de aço em seu interior para aumentar a resistência à tração;
- d) concreto leve: concreto de menor densidade e utilizado em locais onde o peso é um item de extrema importância;
- e) concreto pesado: concreto de maior densidade e utilizado em casos como blindagem contra radiação;
- f) concreto autoadensável (CAA): concreto com fluidez, auto nivelante e fácil de aplicar;
- g) concreto compactado com rolo (CCR): concreto compactado com rolos vibratórios e aplicado em pavimentos e barragens;
- h) concreto submerso: concebido para ser usado em ambientes aquáticos.

No caso do concreto reciclado, substitui-se parcial ou totalmente o agregado mineral convencional por resíduos britados. A diferença fundamental entre o concreto convencional e o reciclado reside no parâmetro de porosidade. Enquanto os agregados naturais (provenientes de rochas ígneas estáveis) apresentam uma estrutura densa e com baixíssima absorção de água, os agregados reciclados, principalmente os de matriz cerâmica, possuem alta porosidade intrínseca e argamassa residual aderida em sua superfície. Consequentemente, conforme preconizado por Mehta e Monteiro (2008), o comportamento mecânico do concreto convencional é controlado primariamente pela relação água/cimento e porosidade da pasta de cimento hidratada; já no concreto com agregados reciclados, tais propriedades são fortemente condicionadas também pela porosidade e capacidade de absorção do próprio agregado inserido.

2.4.1 Cimento Portland

O cimento Portland atua como a fase ligante do sistema cimentício, desenvolvendo propriedades aglomerantes por meio de reações exotérmicas de hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio que compõem o clínquer. No Brasil, as especificações técnicas,

requisitos de composição e critérios físico-mecânicos para o recebimento de cimentos são unificados sob a égide da norma ABNT NBR 16697, que regulamenta as principais classes comerciais do mercado:

- a) cimento Portland comum (CP I e CP I-S): material de uso geral em obras que não demandam propriedades exclusivas. O tipo CP I pode conter até 5% de adições minerais além do gesso (regulador de pega), ao passo que a variante CP I-S permite a incorporação de até 10% de material carbonático (fíler). Regido historicamente pela NBR 5732;
- b) cimento Portland composto (CP II): é um cimento de uso geral altamente versátil e um dos mais consumidos no mercado, caracterizado por receber teores moderados de adições minerais que equilibram custo, sustentabilidade e desempenho. Divide-se em três variantes comerciais: o CP II-E, que contém adição de escória de alto-forno; o CP II-Z, com adição de material pozolânico; e o CP II-F, que leva material carbonático (fíler calcário) ideal para melhorar a trabalhabilidade e diminuir a exsudação. Regido historicamente pela NBR 11578 (e atualmente unificado pela NBR 16697);
- c) cimento Portland de alto forno (CP III): composto pela adição de 35% a 70% de escória granulada de alto forno. Destaca-se pelo baixo calor de hidratação, alta impermeabilidade a longo prazo e elevada resistência ao ataque por agentes químicos agressivos, como sulfatos e reações álcali-agregado. Regido historicamente pela NBR 5735;
- d) cimento Portland pozolânico (CP IV): contém adições de materiais pozolânicos que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio livre — gerado na hidratação do cimento —, convertendo-o em silicatos hidratados estáveis que refinam a estrutura de poros e aumentam a durabilidade química da matriz. Regido historicamente pela NBR 5736;
- e) cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI): caracteriza-se por uma moagem mais fina e uma dosagem diferenciada de compostos no clínquer, permitindo o rápido desenvolvimento de resistências mecânicas nas primeiras idades. É ideal para indústrias de pré-moldados e desformas rápidas. Não recebe adições minerais expressivas, limitando-se a no máximo 5% de fíler calcário. Regido historicamente pela NBR 5733.

2.4.2 Agregados

Os agregados compõem a fase inerte do concreto, sendo responsáveis por constituir o esqueleto granular que garante estabilidade volumétrica e reduz os efeitos de retração da pasta. A norma norteadora que fixa os parâmetros de aceitação desses materiais é a ABNT NBR 7211, subdividindo-os rigidamente em virtude de suas faixas granulométricas:

- a) agregado miúdo (areia): Partículas minerais com dimensões compreendidas na faixa de 0,075 mm a 4,75 mm. Conforme a NBR 7225, a areia classifica-se em três zonas principais que ditam sua trabalhabilidade na mistura. A areia grossa possui granulometria predominante entre 1,2 mm e 2,0 mm, indicada para elementos que suportam elevadas cargas estruturais por prover maior atrito mecânico; a areia média tem diâmetro entre 0,42 mm e 1,2 mm, apresentando versatilidade e balanço ideal entre demanda de água e resistência mecânica; a areia fina tem dimensões entre 0,075 mm e 0,42 mm, empregada predominantemente em argamassas de acabamento, rebocos e revestimentos lisos.
- b) agregado graúdo (brita): fragmentos de rochas com dimensões superiores a 4,75 mm. A distribuição granulométrica da brita determina o empacotamento ideal dos grãos na mistura. Suas frações comerciais são discriminadas conforme parâmetros da NBR 17054. A chamada brita 0 (pedrisco) costuma ser empregada em concretos de alta densidade de armadura e em peças pré-moldadas de paredes finas; a brita 1 tem faixa de 9,5 mm a 25 mm, consistindo no agregado mais utilizado para a concretagem de lajes, vigas e pilares comuns; a brita 2 tem intervalo de 19 mm a 31,5 mm, aplicada em concretos de maior volume e como subcamada de pavimentações; a brita 3 e brita 4 tem frações graúdas superiores (alcançando até 75 mm), selecionadas para lastros ferroviários, fossas, fundações.

2.4.3 Água de Amassamento

A água desempenha papel duplo, atua como agente reagente indispensável para deflagrar a hidratação das fases minerais do cimento e atua como lubrificante cinemático, conferindo trabalhabilidade ao concreto no estado fresco. A conformidade higiênica e química desse insumo é regulada pela ABNT NBR 15900-1.

A norma preconiza que águas oriundas de redes de abastecimento público são consideradas potáveis e aptas ao uso direto sem ensaios laboratoriais prévios. Contudo, fontes

alternativas, como poços artesianos, águas superficiais ou águas de reuso industrial, devem passar por ensaios químicos rigorosos para atestar limites seguros de pH e teores restritos de cloretos, sulfatos e sólidos suspensos, evitando manifestações patológicas como a corrosão de armaduras ou o retardamento excessivo do tempo de pega.

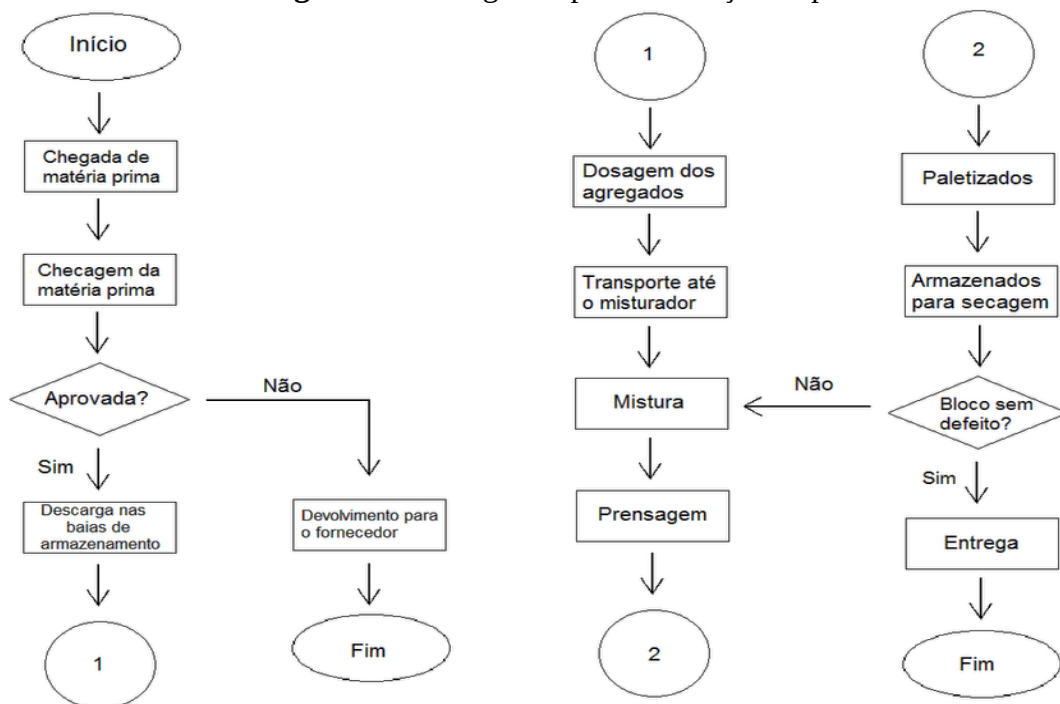
2.4.4 Aditivos Químicos e Adições Minerais

No contexto da tecnologia do concreto, a distinção entre aditivos e adições é fundamental, pois ambos modificam as propriedades do material, mas de formas diferentes:

- a) aditivos químicos: são substâncias introduzidas em pequenas proporções em relação à massa do cimento (geralmente) com o escopo de modificar propriedades do concreto em seus estados fresco ou endurecido. A ABNT NBR 11768 regulamenta esses insumos, classificando-os em plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega. Seu uso otimiza a dispersão dos grãos de cimento, viabilizando reduções expressivas na quantidade de água sem perda de consistência;
- b) adições minerais: são materiais finamente divididos (como sílica ativa, cinza volante e metacaulinita) introduzidos no concreto para atuar por efeito físico de preenchimento de vazios (fíler) ou por efeito químico pozolânico. Conforme discutido por Cunha (2014), as adições aumentam a compacidade do concreto, refinam a zona de transição entre o agregado e a pasta, e elevam a resistência mecânica a idades avançadas.

2.5 Processo Industrial de Fabricação de *Pavers*

A manufatura de blocos intertravados de concreto segue um fluxo de produção padronizado em usinas de pré-moldados para garantir homogeneidade estrutural. O processo, esquematizado no fluxograma da Figura 9, inicia-se com o recebimento e armazenamento segregado dos insumos minerais em baias cobertas para controle de umidade. Posteriormente, os materiais são dosados em proporções de massa ou volume previamente calculadas em estudos de traço.

Figura 9 - Fluxograma para fabricação de *pavers*.

Fonte: Rodrigues, 2015.

A mistura homogênea do cimento, agregados, aditivos e água ocorre em misturadores mecânicos de eixo vertical ou horizontal. A massa com consistência de "terra úmida" (*slump* zero) é transportada para a tremonha de alimentação de um equipamento automatizado denominado vibro-prensa, mostrada na Figura 10. Nesta etapa, o concreto é moldado sob a ação simultânea de vibração de alta frequência e compressão hidráulica severa. Esse procedimento elimina as bolhas de ar macroscópicas e garante elevados índices de compacidade e resistência geométrica imediata às peças (desmolde imediato).

Após a moldagem, os paletes contendo os blocos frescos são encaminhados para câmaras de cura, onde passam por processos de cura térmica a vapor ou cura úmida controlada para evitar a evaporação precoce da água e assegurar a hidratação completa do cimento nas primeiras idades. Decorrido o período inicial de endurecimento, as peças passam por triagem de controle de qualidade visual para identificação de fissuras ou defeitos geométricos; lotes aprovados são paletizados e estocados até atingirem a maturidade mecânica para expedição (Carvalho, 1998).

Figura 10 - Vibro prensa



Fonte: HIWSTON, Tecnologia, 2024.

2.6 Ensaios Experimentais e Metodologias de Laboratório

2.6.1 Fundamentos dos Ensaios Experimentais em Laboratório

Os ensaios experimentais em laboratório constituem metodologias controladas fundamentais para a validação de hipóteses e fenômenos científicos. Por meio da manipulação de variáveis independentes, observa-se de forma precisa o impacto gerado nas variáveis dependentes em um ambiente confinado e altamente acurado. No âmbito da engenharia e da química, tais ensaios têm como objetivo autenticar projetos, compreender comportamentos estruturais, caracterizar propriedades físicas de materiais e assegurar o estrito cumprimento de normas técnicas vigentes, simulando condições reais de serviço para atestar a durabilidade e a viabilidade de componentes (Atkins; De Paula, 2017).

2.6.2 Caracterização Física, Microestrutural e Mineralógica dos Materiais

2.6.2.1 Determinação da Densidade por Picnometria

A densidade é uma propriedade física intrínseca que estabelece a relação entre a massa de um corpo e o volume por ele ocupado, aferindo o nível de concentração da matéria em determinado espaço. Essa propriedade atua como uma assinatura digital do material, auxiliando na sua identificação e seleção para aplicações tecnológicas (Atkins; De Paula, 2017).

O ensaio de densidade por picnometria fundamenta-se no Princípio de Arquimedes, o qual postula que um corpo imerso em um fluido sofre a ação de uma força vertical de empuxo equivalente ao peso do volume de fluido deslocado. O picnômetro, um recipiente de volume calibrado dotado de tampa hermética, permite quantificar com alta precisão a variação

de massa e o volume deslocado por amostras sólidas ou líquidas inseridas de forma controlada.

2.6.2.2 Análise Granulométrica por Peneiramento

A distribuição granulométrica exerce influência direta sobre as propriedades físico-químicas e o comportamento mecânico dos materiais. A qualificação e quantificação do tamanho das partículas são indispensáveis para a otimização de processos industriais, eficiência e segurança em obras de infraestrutura civil (Camargo et al., 2009).

Conforme os preceitos da ABNT NBR 7181/ 2025, o ensaio de granulometria determina a distribuição dimensional das partículas através do método de peneiramento mecânico. O procedimento compreende secagem prévia da amostra em estufa; desagregação suave de torrões ou aglomerados; alocação do material em uma coluna de peneiras com malhas de aberturas decrescentes; agitação mecânica do conjunto, seguida da pesagem do material retido em cada fração para o cálculo das proporções retidas acumuladas.

2.6.2.3 Identificação de Fases Cristalinas por Difração de Raios X (DRX)

Os materiais sólidos podem se organizar na forma de fases cristalinas, arranjos atômicos tridimensionais periódicos e ordenados, ou apresentar estruturas amorfas, caracterizadas pela ausência de ordenamento de longo alcance. Um material pode se estruturar de maneira monofásica ou multifásica (Callister; Rethwisch, 2021).

Para a identificação dessas fases, emprega-se a técnica de Difração de Raios X (DRX). O princípio baseia-se na incidência de um feixe de raios X sobre a amostra. Ao interagir com os planos cristalinos ordenados, a radiação é espalhada de forma coerente, gerando fenômenos de interferência construtiva descritos por picos de difração específicos (Connolly, 2007; Moore; Reynolds, 1989). O difratograma resultante (padrão de picos) funciona como uma impressão digital da estrutura, sendo comparado com bancos de dados internacionais de referência, como o do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). A técnica quantifica fases em misturas, determina o grau de cristalinidade e caracteriza polimorfos e compostos em cerâmicas, minerais, ligas metálicas e polímeros (Silva, 2020).

2.6.3 Ensaios para Caracterização de Peças de Concreto para Pavimentação

A ABNT NBR 9781 estabelece os requisitos e métodos de ensaio para peças de concreto

destinadas à pavimentação intertravada (pisos de calçadas, vias e estacionamentos), visando assegurar o desempenho estrutural, a segurança viária e a durabilidade do pavimento. A norma apresenta os critérios para os ensaios de resistência característica à compressão, absorção de água e resistência à abrasão (sendo este último de caráter facultativo)

2.6.3.1 Resistência Característica à Compressão (f_{pk})

A determinação da resistência característica à compressão (f_{pk}) de peças de concreto é realizada por meio de análise estatística de dados amostrais. Conforme preconiza a ABNT NBR 9781/2013, o cálculo deve incorporar o Coeficiente de Student (t) para um nível de confiança de 80%. Este coeficiente permite ajustar a estimativa da resistência com base na dimensão da amostra, garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Os ensaios de resistência devem ser conduzidos em prensas hidráulicas devidamente calibradas. Os critérios de aceitação para a resistência à compressão, assim como os parâmetros para a resistência à abrasão, são definidos em função da severidade do tráfego ao qual o pavimento estará submetido, conforme sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistência característica à compressão e critérios para resistência à abrasão.

Solicitação	Resistência Característica à Compressão (f_{pk}) aos 28 dias (MPa)	Cavidade Máxima (mm)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.	≥ 35	≤ 23
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.	≥ 50	≤ 20

Fonte: ABNT NBR 9781/ 2013.

2.6.3.2 Absorção de Água e Aspectos Visuais

A matriz de concreto deve exibir propriedades limitadas de porosidade aberta para evitar a degradação precoce. Desse modo, o lote ensaiado deve apresentar taxa de absorção de água média menor ou igual a 6%, vedando-se qualquer resultado individual que ultrapasse o teto de 7%.

Visualmente, os lotes devem ser homogêneos, com arestas regulares, ângulos retos e isentos de defeitos superficiais limitantes, tais como rebarbas excessivas, delaminações, fissuras ou descamações. Variações sutis de coloração decorrentes da oscilação natural das matérias-primas são toleradas, desde que previamente acordadas entre fornecedor e comprador

2.6.3.3 Permeabilidade em Matrizes Cimentícias e Gestão Hidrológica Urbana

O concreto convencional destaca-se historicamente por sua reduzida permeabilidade, decorrente de uma matriz altamente densa com baixa porosidade capilar (Neville, 2016). Embora essa propriedade proteja as armaduras contra agentes agressivos em estruturas tradicionais, o concreto usado como piso causa a impermeabilização do solo em áreas urbanas e intensifica os picos de escoamento superficial (*runoff*).

Para mitigar esses impactos, surgem os concretos permeáveis (ou porosos) e os designs geométricos vazados. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a durabilidade e a competência mecânica dessas matrizes cimentícias estão diretamente condicionadas a dois pilares:

- a) fator água/cimento (a/c): o controle rigoroso dessa relação é vital para equilibrar a porosidade necessária ao escoamento e a resistência mecânica do esqueleto sólido;
- b) qualidade da execução: o controle tecnológico dos processos de mistura, lançamento e, notadamente, a cura hidráulica impedem manifestações patológicas precoces.

Diferente do concreto denso, o concreto permeável possui uma rede contínua de macro poros interconectados. De acordo com as diretrizes do ACI 522R (2010), essa configuração confere coeficientes de permeabilidade substancialmente superiores aos pavimentos tradicionais, propiciando o fluxo vertical livre da água.

Essa aptidão hidráulica atende diretamente aos preceitos dos Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS). Conforme Tucci (2005), a gestão moderna das águas pluviais visa romper com o antigo paradigma de higienização, focado no rápido afastamento das águas superficiais por galerias, priorizando estratégias ecológicas de infiltração local, promovendo a recarga natural do lençol freático; retenção temporária, mitigando as ondas de cheias na macrobacia; amortecimento do escoamento superficial (*runoff*), prevenindo fenômenos de erosão e inundações urbanas catastróficas.

2.6.3.4 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade (*In Situ* e Laboratório)

A determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis é normatizada pela ABNT NBR 16416, a qual prescreve procedimentos para avaliar o desempenho hidráulico do sistema em campo ou laboratório.

O ensaio delimita a condutividade hidráulica por meio de um aparato de infiltração (anel

cilíndrico metálico ou acrílico) de aproximadamente 300 mm de diâmetro sobre a área de teste. Deve ser feito a limpeza rigorosa da superfície do pavimento para desobstrução de sedimentos alojados nos poros e feito um pré-umedecimento da superfície com um volume controlado de água, registrando-se o tempo de percolação inicial. É então aplicado uma carga subsequente de água sob tempo cronometrado para avaliar o fluxo de absorção estável.

Com base nas razões de volume e tempo medidos, calcula-se o coeficiente de permeabilidade (K). Para que o pavimento atenda aos requisitos funcionais mínimos exigidos pela legislação nacional, a NBR 16416 estipula que o valor obtido deve ser superior a 10^{-3} m/s ($K > 10^{-3}$ m/s). A Figura 11 apresenta um piso composto por *pavers* em um ensaio para obter o coeficiente de permeabilidade.

Figura 11 - Execução do ensaio de infiltração *in situ* baseado na ASTM C1701 / NBR 16416.



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Cimento Portland (2010) e Acervo de pesquisa experimental, 2026.

2.7 Viabilidade Econômica na Fabricação de *Pavers* com Resíduos de Construção Civil (RCC)

A transição para a economia circular no setor da construção civil não se sustenta apenas por critérios ambientais. A viabilidade econômica é o vetor determinante para o incentivo às políticas de reciclagem em larga escala. A utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos cerâmicos e de concreto na fabricação de *pavers* apresenta um modelo de negócio que equilibra custos de insumos e ganhos de eficiência logística.

Conforme analisam Penteado (2009) e, mais recentemente, dados da ABRECON (2024), o custo de produção de blocos de concreto é fortemente influenciado pelo preço dos agregados virgens (areia e brita), cuja extração e transporte representam uma parcela significativa das despesas operacionais. A substituição parcial desses insumos por resíduos

processados oferece três vantagens competitivas principais:

- a) redução de custos com matéria-prima: a matéria-prima obtida do beneficiamento de RCC possui um custo de aquisição inferior ao dos agregados naturais extraídos de jazidas, uma vez que o processo de reciclagem elimina ou reduz significativamente as taxas de mineração e, frequentemente, permite a captação do resíduo a custos marginais em centros de triagem próximos ao local de produção;
- b) logística reversa e economia de escala: a proximidade entre os centros geradores de resíduos (obras) e as usinas de reciclagem diminui a distância de transporte, mitigando o frete, um dos componentes de maior peso no custo final do metro cúbico de agregado;
- c) mitigação de taxas de aterro: a destinação de resíduos para usinas de reciclagem evita os custos elevados de taxas de bota-fora e aterros sanitários, criando uma sinergia econômica onde o resíduo deixa de ser um passivo (custo de descarte) para tornar-se um ativo (insumo produtivo).

Contudo, é imperativo considerar que a viabilidade técnica deve ser rigorosamente testada, visto que, conforme observado por Silva e Oliveira (2020), o uso de agregados reciclados pode demandar uma dosagem maior de cimento para compensar a porosidade elevada desses materiais, o que altera a equação de custos final. Portanto, a viabilidade econômica deve ser avaliada por meio de uma análise de custo-benefício completa, que considere não apenas o custo direto da fabricação, mas também o aumento da vida útil e a redução dos encargos ambientais associados ao sistema de pavimentação.

A consolidação do mercado de *pavers* de RCC está diretamente ligada ao fortalecimento das normas técnicas, como a NBR 15116, que confere segurança jurídica e técnica para o uso do material reciclado em pavimentos, conferindo-lhe valor de mercado equivalente ao produto convencional.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

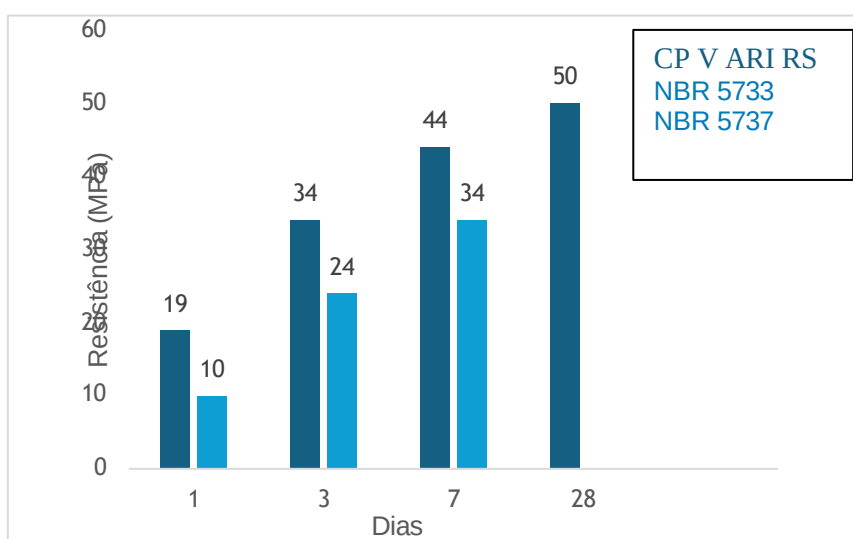
3.1 Materiais

Para a produção dos concretos e dos *pavers*, foram utilizados cimento, areia, brita 0, resíduo de construção civil na forma miúda e graúda e água.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos (CP V-ARI RS), produzido pela Companhia Nacional de Cimento (CNC), em conformidade com a NBR 16697 e a NBR 5733. Este aglomerante destaca-se pela alta reatividade, conferindo ganho rápido de resistência mecânica, o que favorece processos que exigem desforma precoce. Sua composição inclui clínquer de alta reatividade, escória de alto-forno, pozolana, gesso e material carbonático. A Figura 12 apresenta o comparativo de desempenho do referido cimento frente aos requisitos normativos.

Figura 12 - Resistência alcançada (MPa), conforme o tempo (dias).



Fonte: <https://cimentonacional.com.br/wp-content/uploads/2025/01/CP-V-ARI-RS-.pdf>.

3.1.2 Areia

Utilizou-se areia média lavada, extraída do Rio Guandu (município de Japeri/RJ). O material apresenta massa específica aproximada de 2,5 g/cm³ e dimensão máxima característica em torno de 1,2 mm. O insumo foi adquirido junto à empresa Arckom Minerais Ltda., que detém as licenças ambientais pertinentes para armazenamento e comercialização.

3.1.3 Brita 0

A brita 0 (zero) apresenta granulometria situada entre 4,8 mm e 9,5 mm. Este agregado graúdo foi empregado visando a produção de misturas com maior resistência, adequadas para a confecção de peças intertravadas. O material é proveniente da empresa Mineração J. Serrão Ltda (município de Japeri/RJ), com distribuição realizada pela empresa Arckom Minerais Ltda.

3.1.4 Resíduo de Construção Civil (RCC) – fração miúda (pó)

Define-se como a porção do RCC passante na peneira de 4 mm. Este material, em conformidade com as diretrizes da NBR 7225 para agregados reciclados, foi processado pela empresa ESM Locações (Saquarema/RJ). O beneficiamento permite a sua aplicação como agregado miúdo em concretos e argamassas, promovendo a circularidade e sustentabilidade na construção civil.

3.1.5 Resíduo de Construção Civil (RCC) – fração graúda

Corresponde à parcela do material retida na peneira de 4 mm, com diâmetro máximo de 10 mm. Este agregado foi submetido ao mesmo rigoroso processo de triagem e britagem que a fração miúda, garantindo a qualidade necessária para a composição da matriz cimentícia e está em conformidade com as diretrizes da NBR 7225 para agregados reciclados, foi processado pela empresa ESM Locações (Saquarema/RJ).

3.1.6 Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento público de Seropédica, sem a presença de impurezas aparentes.

3.2 Processamento e Beneficiamento do RCC

O beneficiamento dos resíduos foi conduzido nas instalações da ESM Locações, seguindo um protocolo criterioso para garantir a homogeneidade e a limpeza dos agregados. O processo iniciou-se com a coleta e transporte dos resíduos, seguidos por etapas sucessivas de triagem:

- a) Armazenamento e triagem primária: Remoção de contaminantes grosseiros (materiais não aproveitáveis);

- b) Triagem dimensional: Separação de peças com dimensões adequadas ao processamento mecânico;
- c) Triagem manual: Realizada em esteira de alimentação para o controle final dos tipos de materiais antes da britagem.

A fragmentação foi executada em britador de mandíbulas, com abertura de descarga regulada para 1 polegada (25,4 mm), garantindo a limitação da dimensão máxima dos agregados. Posteriormente, o material foi submetido a um processo de peneiramento mecânico em quatro estágios (malhas de 32 mm, 22 mm, 10 mm e 4 mm), resultando nas seguintes frações granulométricas: cascalho > 32 mm; brita 2 é de 22 mm a 32 mm; brita 1 de 10 mm a 22 mm; brita 0 de 4 mm a 10 mm; pó de pedra (reciclado) < 4 mm.

Na Figura 13 são apresentadas os RCC antes de serem beneficiados e durante o processo de manufatura. A imagem do material após o beneficiamento, com sua respectiva faixa granulométrica, encontra-se na Figura 14.

Figura 13 - RCC antes e depois do processo de beneficiamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 14 - RCC ao final do processo de beneficiamento. (a) Pó de Pedra; (b) Brita 1; (c) Cascalho; (d) Mistura.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3 Procedimento Experimental

O processamento da matéria prima, a produção dos concretos e as caracterizações foram conduzidas nas dependências do laboratório LNanoC₂ (Laboratório de Nanotecnologia,

Cerâmicas e Compósitos – DEQ/IT/UFRRJ) e do Laboratório de Materiais do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU/IT/UFRRJ), ambos vinculados ao Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; e nas instalações do Laboratório do Terminal Marechal Hermes de Marechal Hermes (RJ), pertencente à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Os ensaios de caracterização física e mecânica, abrangendo determinação de densidade, análise granulométrica, identificação de fases cristalinas, resistência à compressão, absorção de água e permeabilidade seguiram rigorosamente as normas técnicas vigentes, assegurando a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados.

3.3.1 Caracterização da matéria prima e RCC

3.3.1.1 Ensaio de Massa Específica

Os ensaios de picnometria foram conduzidos conforme a ABNT NBR 16972/2021, em triplicata, para as amostras de areia e RCC (pó). A caracterização física consiste em utilizar um picnômetro com tampa hermética, balança calibrada e termômetro. Para se iniciar o ensaio da areia e o ensaio do RCC (pó), foi pesada a amostra seca, e sua massa chamada M1. Em seguida, foi verificada a massa do conjunto composto pelo picnômetro e termômetro e a água. Para tal, o termômetro e a tampa hermética foram removidos do picnômetro, que então foi preenchido com o líquido de referência, a água destilada, tomando-se cuidado para não criar bolhas nas paredes do vidro. O conjunto, agora contendo o líquido de referência, foi novamente pesado na balança calibrada, sendo registrado o valor (M2), e a temperatura indicada no termômetro. Com esse dado, consultou-se uma tabela para determinar o valor da densidade do líquido de referência para a temperatura verificada.

A amostra seca foi transferida para o picnômetro, que já contém o líquido de referência, novamente com cuidado para evitar a formação de bolhas. É importante aguardar a completa decantação da amostra no fundo do picnômetro antes de recolocar o termômetro e a tampa hermética. O conjunto, agora com o líquido e a amostra foi pesado, e o valor, M3, foi registrado.

Ao final do procedimento, o conteúdo do picnômetro foi descartado. O conjunto foi lavado com água corrente e, em seguida, aplicado álcool em seu interior. Após a remoção do álcool, o picnômetro foi deixado para secar à temperatura ambiente. Com todos os dados coletados (M1, M2, M3), a massa específica da amostra pôde ser calculada. É fundamental ressaltar que a escolha do líquido de referência foi executada com cautela, assegurando que ele fosse imiscível, não reagisse quimicamente com a amostra e tivesse uma densidade conhecida.

O cálculo de densidade pelo método de picnometria foi realizado através da Equação 1, conforme ABNT NBR 16916/2021.

$$D = \frac{M1}{(M1 + M2 - M3)} \times \left(\frac{1}{D_{lr}} \right) \quad (1)$$

Onde

D é a densidade da amostra.

M1 é a massa da amostra seca

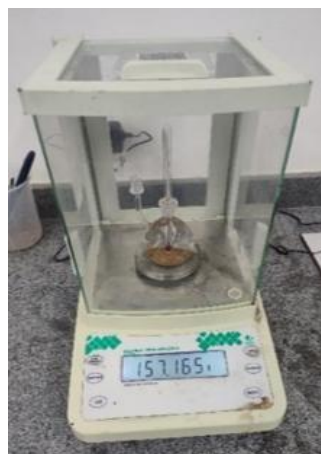
M2 é a massa do conjunto (picnômetro + termômetro) mais o líquido de referência contido no picnômetro.

M3 é a massa do conjunto (picnômetro + termômetro) mais o líquido de referência + amostra, contidos no picnômetro.

D_{lr} é a densidade do líquido de referência para a temperatura encontrada no termômetro.

A Figura 15 apresenta o picnômetro contendo água e aproximadamente 2 gramas de amostra de RCC e o quadro das densidades, com as respectivas temperaturas.

Figura 15 – Picnômetro contendo água e amostra de RCC (à esquerda) e quadro dos valores de densidade para respectivas temperaturas de ensaio.



Temperatura (°C)	Densidade (g/cm³)
0	0,99984
5	0,99996
10	0,99970
15	0,99910
20	0,99820
25	0,99705
30	0,99565
35	0,99403
40	0,99222
45	0,99021

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.1.2 Ensaio de Análise Granulométrica

A norma NBR 17054:2022 especifica os métodos para a realização do ensaio de granulometria (caracterização física), e a determinação da composição granulométrica.

O processo iniciou-se com a secagem da amostra (areia, RCC miúdo, brita 0 e RCC gráúdo) em estufa até que a umidade se aproxime da umidade higroscópica, garantindo sua uniformidade. Durante esse passo, foi crucial desfazer os torrões e descartar qualquer material com tamanho superior a 76,2 mm, sem quebrar os grãos, para que a amostra não fosse descaracterizada.

Em seguida, o material foi separado em um conjunto de peneiras, montado em ordem decrescente de abertura de malha em um agitador mecânico. A amostra foi então colocada sobre a peneira de maior abertura, e o agitador foi ligado por 30 minutos, para que a separação das partículas por tamanho fosse concluída.

Para o ensaio de granulometria da areia e do RCC miúdo foram utilizados as séries de peneiras de 4,75; 2,36; 1,18; 0,600; 0,300 e 0,150 mm. Para o ensaio de granulometria da brita

0 e do RCC graúdo, empregou-se a sequência 12,5; 9,5; 6,3; 4,75; 2,36 e 0,5 mm. Com base nas massas retidas, determinou-se o Módulo de Finura pela soma das porcentagens acumuladas dividida por 100. O Diâmetro Máximo foi identificado pela abertura da peneira com 95% de material passante, enquanto o Diâmetro Médio (D50) foi obtido graficamente pela interseção da curva granulométrica com a linha de 50% de material passante.

Após o peneiramento, a massa retida em cada peneira foi anotada, e calculou-se a porcentagem acumulada de material passante, e construídas as curvas granulométricas da areia, do RCC (pó), e da brita 0 e do RCC (graúdo). O gráfico representa a distribuição dos tamanhos das partículas de um material granular, mostrando a porcentagem retida acumulada em função da abertura da peneira em escala logarítmica.

Os ensaios de granulometria foram realizados no Laboratório de Tecnologia dos Materiais (LABTEC) do DAU/IT/UFRRJ. A Figura 16 mostra à esquerda o agitador de peneiras vibratório utilizado para realizar o ensaio de análise granulométrica, e à direita a ilustração da fração retirada de cada peneira para o RCC.

Figura 16 - Agitador de peneiras para ensaio granulométrico (à esquerda) e RCC após peneiramento (à direita).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.1.3 Ensaio de Difração de Raios X

A Difração de Raios X (DRX) foi executada nas amostras de cimento, areia e RCC (pó),

para identificação das estruturas cristalinas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Catálise do DEQ/IT/UFRRJ. Para tal, o material (RCC) foi moído em meio de acetona, com a utilização de almofariz e pistilo de ágata, e posteriormente peneirado em peneira com abertura de 0,045 mm (Figura 17).

Figura 17 - Peneira com abertura de 0,045mm (a); Almofariz de ágata com RCC sendo preparado (b)..



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.2 Dosagem e Preparo dos Concretos

O programa experimental compreende o preparo de quatro traços distintos de concreto (T1 a T4), com proporção volumétrica fixa de 1:2:3 de cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, respectivamente. A relação água/cimento (a/c) foi mantida constante em 0,40. Foi realizado a substituição do agregado convencional (areia) por Resíduos de Construção Civil (RCC), conforme o planejamento mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Proporções (em volume) utilizadas para confecção dos corpos de prova e dos *pavers* de concreto.

Nomenclatura do Concreto	Cimento	Areia	RCC (Pó)	Brita 0	RCC (Graúdo)
T1	1	2	0	3	0
T2	1	2	0	0	3
T3	1	0	2	3	0
T4	1	0	2	0	3

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para tal foi tomou-se as seguintes considerações:

- a) ponto de partida (Baseline): por ser uma proporção consagrada, ele serve como uma

- b) referência sólida para comparar a eficácia da substituição por agregados reciclados (RCC). Ao manter 1:2:3 constantes em todos os traços, isola-se a variável "tipo de agregado", permitindo identificar com clareza se o resíduo está melhorando ou prejudicando a matriz;
- c) balanceamento de Fases: esta proporção tende a fornecer uma quantidade adequada de pasta (cimento + água) para envolver os agregados miúdos (areia) e preencher os vazios entre os agregados graúdos (brita), resultando em um concreto com trabalhabilidade razoável e resistência mecânica equilibrada;
- d) facilidade de execução: em ambiente de laboratório, essa proporção volumétrica facilita a dosagem inicial e a comparação direta entre os quatro cenários experimentais propostos.

A relação a/c é o parâmetro mais crítico, regido pela Lei de Abrams, que estabelece que, para materiais e condições de cura semelhantes, a resistência do concreto é inversamente proporcional à relação a/c.

A definição das relações água/cimento (a/c) entre 0,40 e 0,65 fundamenta-se na necessidade de investigar a influência da densidade da pasta no desempenho mecânico e na durabilidade dos *pavers*. O limite inferior (a/c = 0,40) visa conferir alta resistência e baixa porosidade, minimizando a rede de canais capilares para reduzir a permeabilidade e a penetração de agentes agressivos. Por outro lado, o limite superior (a/c = 0,65) é adotado para garantir a trabalhabilidade necessária ao adensamento das peças, visto que a porosidade intrínseca do Resíduo de Construção Civil (RCC), especialmente na fração de pó, reduz a fluidez da mistura em comparação aos traços convencionais. Assim, a variação estabelecida permite explorar o equilíbrio ideal entre a compacidade da matriz cimentícia e a viabilidade de moldagem, prevenindo patologias decorrentes de uma má compactação ou de uma porosidade excessiva que seria deletéria aos ensaios de absorção de água.

O traço 1:2:3 (em volume) é uma proporção clássica e empírica utilizada frequentemente em dosagens experimentais iniciais. Sua escolha justifica-se por razões práticas e técnicas (Helene; Terzian, 1992; Neville, 2016).

3.3.3 Moldagem e Cura

Os corpos de prova foram moldados em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR 5738/2008. O processo de moldagem assegurou a homogeneidade da mistura, utilizando moldes de material inerte previamente lubrificados com Desmol, para facilitar a desmoldagem.

O adensamento do concreto foi realizado manualmente, via haste metálica, com o número de camadas e golpes ajustado conforme a consistência da mistura (*slump test*), atendendo aos requisitos normativos. A Tabela 4 mostra a o tipo de amostra, quantidade produzida e dimensões, destinadas aos ensaios do concreto.

Os moldes cilíndricos e hexagonais utilizados são poliméricos e com paredes rígidas, para evitar deformidade nas peças. Foram moldados corpos de prova maciços para as composições T1, T2, T3 e T4, e peças vazadas com 7 furos passantes de 20 mm de diâmetro cada para a composição T1. O design diferenciado foi proposto para a composição de referência (T1) com o intuito de avaliar o impacto da geometria na performance do concreto.

A Figura 18 mostra o molde sextavado padrão utilizado, o molde cilíndrico feito de tubos de PVC (policloreto de vinila), o contramolde sextavado dotado de sete pinos feito por impressão 3D, e a adaptação do contramolde feita com pinos de madeira.

Tabela 4 – Tipo, quantitativo e dimensões das amostras de concreto destinadas aos ensaios.

	Resistência à compressão	Absorção de água	Permeabilidade
Nº de amostras maciças para cada composição (T1, T2, T3, T4)	6*	3	9
Nº de amostras vazadas para T1	6**	-	9
Formato	Cilíndrico*/Hexagonal**	Hexagonal	Hexagonal
Dimensão (mm)	$\varnothing = 100$, h= 60 250 x 250 x 60	250 x 250 x 60	250 x 250 x 60

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 18 – Moldes e contramoldes para a conformação das peças hexagonais e cilíndricas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 19 ilustra a execução do Ensaio Tronco de Cone (*slump test*), o processo de adensamento manual do concreto em forma cilíndrica, executado mediante o emprego de haste metálica, e a moldagem em forma sextavada maciça e com furo.

Figura 19 - Execução do Ensaio Tronco de Cone (*slump test*), e moldagem em forma cilíndrica, em forma sextavada, e sextavada com molde para furos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O número de camadas e a quantidade de golpes por camada foram definidos em conformidade com a consistência da mistura, avaliada pelo ensaio de abatimento (*slump test*), observando-se rigorosamente as prescrições normativas vigentes.

Após a desmoldagem, ocorrida 24 horas após a concretagem, as peças foram submetidas à cura submersa em tanque com água contendo solução saturada de hidróxido de cálcio. As condições ambientais de cura foram rigorosamente controladas, mantendo-se a temperatura em 25 °C, de modo a mitigar a perda de água por evaporação prematura e garantir a hidratação adequada da matriz cimentícia. A Figura 20 mostra as amostras devidamente identificadas e mergulhadas em água para o processo de cura.

Figura 20 - Peças cilíndricas e sextavadas em processo de cura.



3.3.4 Ensaio de Resistência Característica à Compressão

A caracterização do desempenho mecânico das peças foi realizada por meio da avaliação dimensional e do ensaio de resistência característica à compressão aos 28 dias de cura. Em conformidade com a NBR 9781:2013, adotou-se como requisito de aceitação que a resistência característica à compressão (f_{pk}) fosse superior ou igual a 35 MPa, valor estabelecido para pavimentos sujeitos ao tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha. O estudo visou determinar a influência dos diferentes agregados no desempenho estrutural do concreto. Para cada traço, foram submetidos a ensaios seis corpos de prova cilíndricos, com dimensões nominais de 100 mm de diâmetro e 60 mm de altura. Adicionalmente, foram ensaiados seis *pavers* sextavados (250 mm x 250 mm x 60 mm) com sete furos de diâmetro de 20 mm para o *paver*, referência (T1). Previamente ao ensaio, as peças foram submetidas a um processo de saturação em água a $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por, no mínimo, 24 horas. As faces de carregamento foram devidamente capeadas, garantindo-se o nivelamento e a ausência de irregularidades para assegurar o contato plano e uniforme com os pratos da prensa.

Os ensaios foram conduzidos em máquina universal de ensaios, devidamente calibrada conforme a ABNT NBR ISO 7500-1 (Equipamento: PCE100/TEMP241025; Site ID: BR0155-M01; capacidade de 1000 KN em compressão), do laboratório do Terminal Marechal Hermes (CSN).

As amostras foram centralizadas no eixo da prensa, aplicando-se uma carga contínua a uma taxa de (550 ± 200) kPa/s até a ruptura completa. Para a aplicação da carga, utilizaram-se placas auxiliares de aço circulares (diâmetro de $85 \pm 0,5$ mm; espessura mínima de 20 mm) com dureza superficial superior a 60 RC e planicidade rigorosa (desvio máximo de 0,01 mm em 85 mm). O capeamento dos corpos de prova e a máquina de ensaio de compressão são

mostrados na Figura 21.

Figura 21 - Corpos de prova sendo capeado para o ensaio de resistência à compressão (à esquerda), e máquina de ensaio mecânica durante a compressão do concreto.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A resistência individual de cada peça foi determinada pela razão entre a força máxima de ruptura e a área da seção transversal. A resistência característica à compressão estimada ($f_{pk,est}$) foi calculada a partir da Equação 2, com valor de desvio padrão (S) calculado a partir da Equação 3.

$$f_{pk, est} = \bar{f}_p - t \times S \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_p - f_{pi})^2 / (n - 1)} \quad (3)$$

Onde

$\bar{f}_p$, est é a resistência média das peças, expressa em MPa;

f_{pi} é a resistência individual das peças, em MPa;

$f_{pk, est}$ é a resistência característica estimada à compressão, expressa em MPa; n é o número de peças da amostra;

S é o desvio-padrão da amostra, expresso em MPa;

t é o coeficiente de Student em função do número de amostra (n).

3.3.5 Determinação da Absorção de Água

Na determinação da absorção de água das amostras (etapa integrante da caracterização de desempenho), foram realizadas, segundo a NBR 9781:2013, três conformações sextavadas

para cada traço, cada uma com dimensões de 250 mm x 250 mm x 60 mm. Os corpos de prova foram submetidos a um processo de saturação com água potável, sendo que a diferença entre as duas massas indica a quantidade de água absorvida. Então foi medida a massa do corpo-de-prova seco e a massa após a absorção de água. A absorção foi expressa em porcentagem e comparada aos limites definidos pela norma para garantir que o material seja adequado para uso em pavimentação.

Foram removidos todo o pó e partículas soltas dos corpos de prova, utilizando-se de uma escova de cerdas suaves. Logo em seguida, os corpos de prova foram imergidos em um tanque com água potável e termômetro com resolução de 1 °C por 24 horas. Cada corpo de prova foi pesado em uma balança com resolução de 0,1 g na condição de saturado com superfície seca, estado este obtido após a drenagem da peça sobre tela metálica com suporte, durante um minuto removendo-se a água superficial visível com um pano úmido e anotou-se o valor encontrado. Em seguida, foi repetida esta metodologia a cada duas horas, até que em duas disposições sucessivas não fosse registrada diferença de massa superior a 0,5 % em relação ao valor anterior, anotando-se a sua massa saturada.

No processo de secagem, os corpos de prova saturados foram levados à estufa ventilada com temperatura a (110 ± 5) °C, por 24 horas, verificando-se a massa de cada corpo de prova seco em estufa, anotando-se o valor encontrado, repetindo-se o procedimento a cada 2 horas, até que em dois resultados sucessivos não se registrasse para o corpo de prova uma diferença de massa superior a 0,5 % em relação ao valor anterior, anotando-se sua massa seca. A execução de pesagem e registro do valor foi de no máximo 10 minutos, com o corpo de prova fora da estufa. A Equação 4 foi utilizada para a determinação de absorção de água.

$$A = \frac{[(M_2 - M_1) \times 100]}{M_1} \quad (4)$$

Onde

A é a absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%).

M₁ é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g).

M₂ é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

Para a realização desses ensaios foram utilizadas as instalações do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

O procedimento experimental envolveu basicamente estufa para secagem artificial, balança de precisão para a pesagem, tela metálica com suporte para a secagem natural e termômetro, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - *Pavers* em processo de secagem natural para obtenção da massa saturada (à esquerda), estufa para a secagem artificial (no centro) e pesagem (à direita)..



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.6 Ensaio de Permeabilidade

O ensaio utilizado para verificar a permeabilidade de pavimentos com *pavers* permeáveis é descrito pela norma ABNT NBR 16416/2015 - Pavimentos permeáveis de concreto — Requisitos e procedimentos. O método determina o coeficiente de permeabilidade do pavimento, medindo a capacidade de infiltração da água no local.

Os ensaios foram realizados com nove corpos de prova para cada traço, nas instalações do DAU/IT/UFRRJ. A Figura 23 ilustra o procedimento de preparação das camadas de assentamento dos *pavers*, bem como o processo de nivelamento da superfície.

O coeficiente de permeabilidade (K) de pavimentos permeáveis de concreto foi determinado conforme ensaios e a Equação 5. Esta equação é derivada da Lei de Darcy, adaptada para as condições do ensaio de permeabilidade em laboratório ou em campo.

O ensaio é fundamental para quantificar a capacidade de percolação da água através do revestimento, permitindo verificar a eficácia do sistema em mitigar o escoamento superficial.

A aparelhagem utilizada para a realização do ensaio foi rigorosamente calibrada e disposta de modo a garantir a precisão da medição da taxa de infiltração. Os componentes básicos empregados no ensaio foram anel de infiltração, cronômetro, régua, e selante para vedar a interface entre o anel e o pavimento.

$$K = \frac{C \times m}{d^2 \times t} \quad (5)$$

Onde:

K é o coeficiente de permeabilidade, em m/s.

C é o fator de conversão, com valor igual a 4 583 666 000.

m é a massa de água infiltrada, expressa em quilogramas (Kg).

d é o diâmetro interno do cilindro de infiltração, expresso em milímetros (mm).

t é o tempo necessário para a água percolar no pavimento, expresso em segundos (s).

Figura 23 - Ensaio de permeabilidade dos *pavers* indicando as camadas de assentamento e nivelamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O procedimento visou simular as condições de precipitação para avaliar o comportamento hidráulico sob carga d'água constante. Para tal, o anel de infiltração foi posicionado e devidamente vedado sobre a superfície do pavimento intertravado para garantir que a água percole exclusivamente através da estrutura do pavimento (juntas e componentes), minimizando erros experimentais. Antes da medição final, o sistema passou por uma etapa de pré-saturação para assegurar que o fluxo de água se torne estável através da estrutura, refletindo a taxa de infiltração real do sistema. A medição da taxa de infiltração consistiu em registrar o decaimento do nível da água em intervalos de tempo pré-estabelecidos até a estabilização, permitindo calcular a velocidade de infiltração, expressa geralmente em unidades de velocidade (por exemplo, mm/h ou m/s). A Figura 24 apresenta a confecção do anel de infiltração, acompanhado da devida verificação de suas dimensões técnicas.

O processo de assentamento dos *pavers* é detalhado na Figura 25, destacando-se o nivelamento e a uniformidade do espaçamento entre as peças, assegurada pela aplicação de espaçadores de 10 mm. O preenchimento das juntas foi realizado com Resíduo de Construção e Demolição (RCC), utilizando-se primeiramente a fração graúda, seguida pela fração miúda. Foram assentados 9 *pavers* para que pudesse ser feito o ensaio em triplicata, conforme mostrado o posicionamento nas linhas pontilhadas em vermelho, representando a medida de K_1 , K_2 e K_3 , para o cálculo da média do coeficiente de permeabilidade.

Figura 24 – Confeção do anel de infiltração e aferição das medidas para ensaio de coeficiente de permeabilidade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 25 - Processo de assentamento dos *pavers*, a fixação do anel de infiltração, e os círculos vermelhos evidenciando o posicionamento dos anéis no conjunto de 9 peças para executar triplicata no ensaio.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os ensaios para a determinação do coeficiente de permeabilidade de *pavers* dotados de orifícios foram conduzidos seguindo rigorosamente os mesmos protocolos experimentais aplicados aos *pavers* convencionais (maciços), assegurando, assim, a comparabilidade dos dados obtidos entre as diferentes tipologias de peças.

Foram desenvolvidos moldes feitos por impressão 3D, pelo processo de FDM (Fused Deposition Modeling) que é uma tecnologia de impressão 3D que constrói objetos camada por camada a partir de filamentos termoplásticos fundidos. Os moldes foram usados para moldar pisos sextavados com 7 furos de 2 cm de diâmetro, com o intuito de produzir peças de concreto e observar a integridade física do produto. Para a impressão 3D foi utilizado impressora da marca SETHI3DS3X, do laboratório LNanoC₂, com auxílio técnico do grupo de pesquisa GPEMAC.

O filamento utilizado foi de poliláctico (PLA), por ser um poliéster biodegradável, e oriundo de fontes renováveis como amido de milho e cana de açúcar.

O molde foi modelado em 3D utilizando o software CAD Autodesk Inventor, da Autodesk, e a impressão 3D foi utilizado o software Simplify3D para o fatiamento dos modelos. Foi utilizado o preenchimento com estrutura em formato de “honeycomb” para a maioria das partes, e superfícies sólidas para adquirir maior resistência e ao mesmo tempo menor gasto de material. A Tabela 5 mostra os parâmetros de impressão 3D utilizados para imprimir o molde para o piso sextavado de concreto.

Tabela 5 - Parâmetros de impressão 3D utilizados para fazer o molde do piso sextavado.

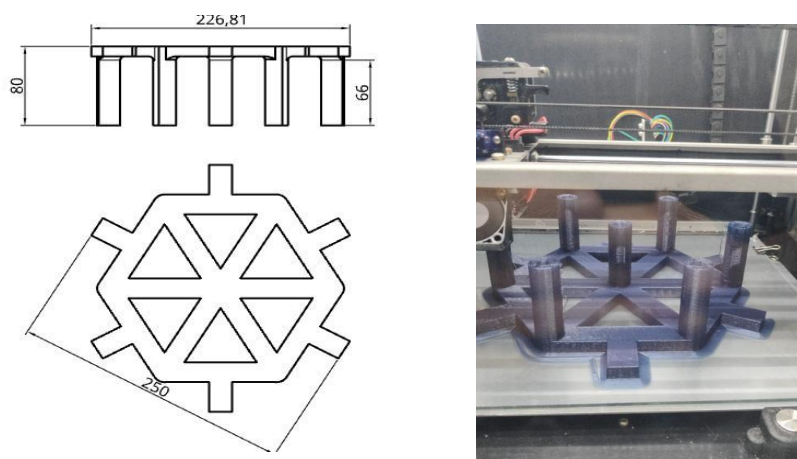
Parâmetros	Valores
Velocidade de impressão (mm/min)	2700
Altura da camada (mm)	0,25
Perímetro	4
Distância de retração (mm)	5
Velocidade de retração (mm/min)	4500
Temperatura do bico (C°)	200
% de preenchimento “honeycomb”	50
Temperatura da mesa (C°)	60
Superfícies superior e inferior	4
Velocidade máx. nos eixos X e Y (mm/min)	9000

Fonte: Pereira Neto et al., 2026.

A Figura 26 ilustra o detalhamento técnico do molde projetado para a fabricação dos *pavers* permeáveis perfurados, contendo as respectivas especificações dimensionais, e a ilustração da impressora 3D utilizada para imprimir o molde.

O procedimento de execução do assentamento dos *pavers* com furos é mostrado na Figura 27, desde a preparação da base, o posicionamento das peças e a inserção dos espaçadores de piso, dimensionados com 10 mm de espessura. Após rejunte entre peças e dos furos com RCC, foi realizado o ensaio de permeabilidade em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 16416.

Figura 26 – Desenho técnico do molde do *paver* com sete furos (à esquerda), e impressora 3D durante a confecção da peça (à direita).



Fonte: Pereira Neto, 2026.

Figura 27 – Preparação das camadas para assentamento, instalação dos pavers e ensaio de permeabilidade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aproveitamento de resíduos cerâmicos da construção civil na fabricação de *pavers* pode acarretar na diminuição da necessidade de extração de recursos como areia e brita, conservando as reservas naturais. É possível estimar uma economia potencial de 20% a 40%, ou mais, considerando a redução de custos de matéria-prima e a menor necessidade de extração de recursos naturais. A economia pode aumentar quanto maior for a proporção de resíduos cerâmicos utilizados em substituição aos agregados naturais. Também é importante se considerar o custo para coletar, triturar e preparar os resíduos para uso na produção de *pavers*, que impacta diretamente no cálculo, alinhando-se aos princípios da economia circular.

O incentivo à economia circular pode levar ao desenvolvimento de novas técnicas e processos para o reaproveitamento de resíduos cerâmicos, contribuindo para a inovação no setor da construção civil, potencializando a sua aplicação em larga escala.

Os resultados desta dissertação estão divididos nas seguintes partes: Caracterização dos materiais precursores; caracterização dos concretos estudados; e análise dos resultados.

4.1 Caracterização dos materiais precursores

4.1.1 Massa específica

As massas específicas da areia e do RCC (pó) foram calculadas a partir da Equação 1, e estão mostradas na Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente. A temperatura registrada durante o ensaio foi de 25°C, e a densidade da água nesta temperatura correspondendo a 0,997 g/cm³, conforme Kell, 1975.

Tabela 6 – Massa específica pelo método do Picnômetro para o Agregado Miúdo (areia).

Nº Ensaio	1	2	3
M1 = Massa da amostra seca (g)	2,002	2,008	2,007
M2 = massa do picnômetro + água (g)	157,865	157,891	157,885
M3 = massa do picnômetro + água + amostra (g)	159,074	159,117	159,092
Densidade da amostra (g/cm ³)	2,532	2,576	2,516
Densidade Média e desvio padrão (g/cm ³)	2,541 ± 0,031 g/cm ³		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A massa específica do resíduo de construção civil RCC (pó) e da areia são parâmetros essenciais para o ajuste da dosagem do concreto, pois a densidade dos agregados afeta

diretamente o volume que eles ocupam na mistura, impactando a proporção entre os materiais, no custo da mistura e nas propriedades finais do concreto, como trabalhabilidade e resistência (Silva; Santos, 2011).

Tabela 7 - Densidade pelo método do Picnômetro para o RCC (pó).

Nº Ensaio	1	2	3
M1 = Massa da amostra seca (g)	2,006	2,008	2,006
M2 = massa do picnômetro + água (g)	157,625	157,782	157,633
M3 = massa do picnômetro + água + amostra (g)	158,654	158,803	158,665
Densidade da amostra (g/cm ³)	2,059	2,041	2,516
Densidade Média e desvio padrão (g/cm ³)	2,055 ± 0,011		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

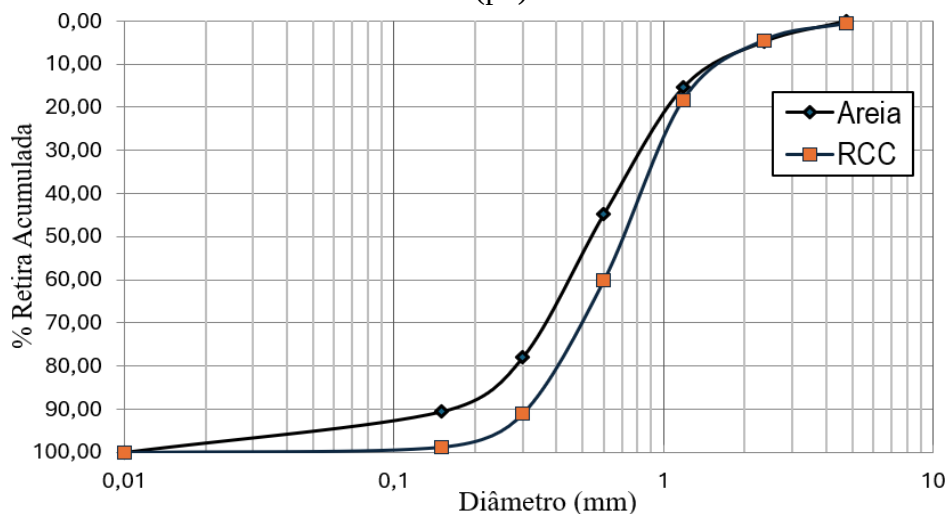
O RCC (pó) apresentou uma massa específica menor que a areia devido à sua composição heterogênea, que inclui materiais mais leves e menos compactos, e também pela maior porosidade das partículas, contrastando com os grãos de areia que são mais uniformes e densos. O RCC não tem em sua composição apenas um tipo de material, mas por uma mistura de entulhos como concreto, tijolos, blocos cerâmicos, e outros materiais de demolição e esses materiais possuem diferentes densidades (Vasconcelos; Lemos, 2015).

Quando se transforma em pó, os resíduos mantêm uma estrutura não compactada, com maior quantidade de espaços vazios entre as partículas. A areia, por outro lado, apresenta-se mais uniforme em suas partículas, que se encaixam melhor umas nas outras, minimizando os espaços vazios e ocupando um volume menor para o mesmo peso (Silva; Santos, 2011).

4.1.2 Granulometria

Foram realizados os ensaios de granulometria para a areia média lavada e o RCC (pó) sendo obtidos os resultados apresentados na Figura 28. A curva compara a granulometria da areia e do RCC (pó), indicando que, apesar serem de materiais diferentes, suas distribuições granulométricas são bastante semelhantes, o que pode constituir uma consistência semelhante para argamassas produzidas com esses dois materiais. A Tabela 8 representa a Dimensão Máxima e o Módulo de Finura das amostras.

Figura 28 - Curva Granulométrica obtida por meio do ensaio de granulometria da Areia e do RCC (pó).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

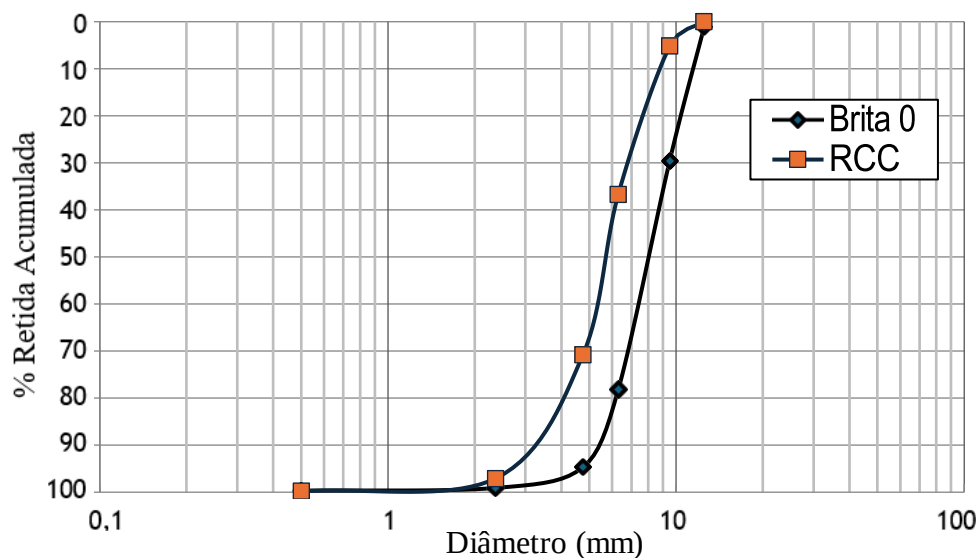
Tabela 8 - Características obtidas no ensaio de granulometria.

Características aferidas	Areia	RCC (pó)
Dimensão Máxima (mm)	4,75	2,36
Módulo de Finura	2,73	2,33
Diâmetro Médio (mm)	0,63	0,539

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise granulométrica obtida por meio do ensaio de peneiramento comparou a distribuição de tamanhos das partículas da Brita 0 e do RCC (gráúdo). O gráfico da Figura 29 demonstra que, embora possuam origens distintas, ambos os materiais apresentam perfis de distribuição granulométrica próximos, indicando que foi escolhido a fração de tamanho adequada do material reciclado. A proximidade da granulometria do RCC gráúdo e da brita 0 sugere um comportamento mecânico e de empacotamento comparável quando aplicados em misturas de concreto. A Tabela 9 sintetiza os principais parâmetros obtidos a partir das curvas. A análise dos dados revela que, para a fração gráúda, a Brita 0 e o RCC mantêm a dimensão máxima característica, garantindo uma base comum para o cálculo do traço. Observa-se que o Módulo de Finura e o Diâmetro Médio do RCC são ligeiramente inferiores aos da Brita 0, indicando que, embora possuam o mesmo limite superior de tamanho, o RCC apresenta uma proporção ligeiramente maior de partículas menores dentro da sua faixa de composição. Essa semelhança granulométrica corrobora a possibilidade de utilização do RCC como agregado reciclado em substituição parcial ou total à brita natural, com potencialidade de manter as propriedades de consistência e trabalhabilidade similares.

Figura 29 - Curva Granulométrica obtida por meio do ensaio de granulometria da Brita 0 e RCC (graúdo).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 9 - Características obtidas no ensaio de granulometria (Brita 0 e RCC Graúdo).

Características aferidas	Brita 0	RCC (graúdo)
Dimensão Máxima (mm)	12,5	12,5
Módulo de Finura	6,35	5,95
Diâmetro Médio (mm)	7,12	6,24

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.3 Fases cristalinas (DRX)

As fases cristalinas obtidas por Difração de Raios X (DRX) para as amostras de Cimento Portland (CPV), Areia natural e Resíduo de Construção e Demolição (RCC) está mostrado na Figura 30. A técnica de DRX é fundamental para a caracterização cristalográfica dos materiais precursores, permitindo identificar natureza química e o potencial reativo de componentes essenciais em misturas cimentícias, através da análise dos picos de intensidade em função do ângulo 2θ . O difratograma do CPV apresentou elevada complexidade, típica de materiais projetados para alta performance. Identificaram-se picos intensos de Silicatos de Cálcio, especificamente a Alita (Ca_3SiO_5) — responsável pela resistência inicial — e a Belita ($\beta\text{-C}_2\text{SiO}_4$), que confere ganho de resistência a longo prazo. A presença de Portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], Ferrita ($\text{C}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$), Aluminato (C_3A) e Calcita (CaCO_3) corrobora a natureza reativa deste

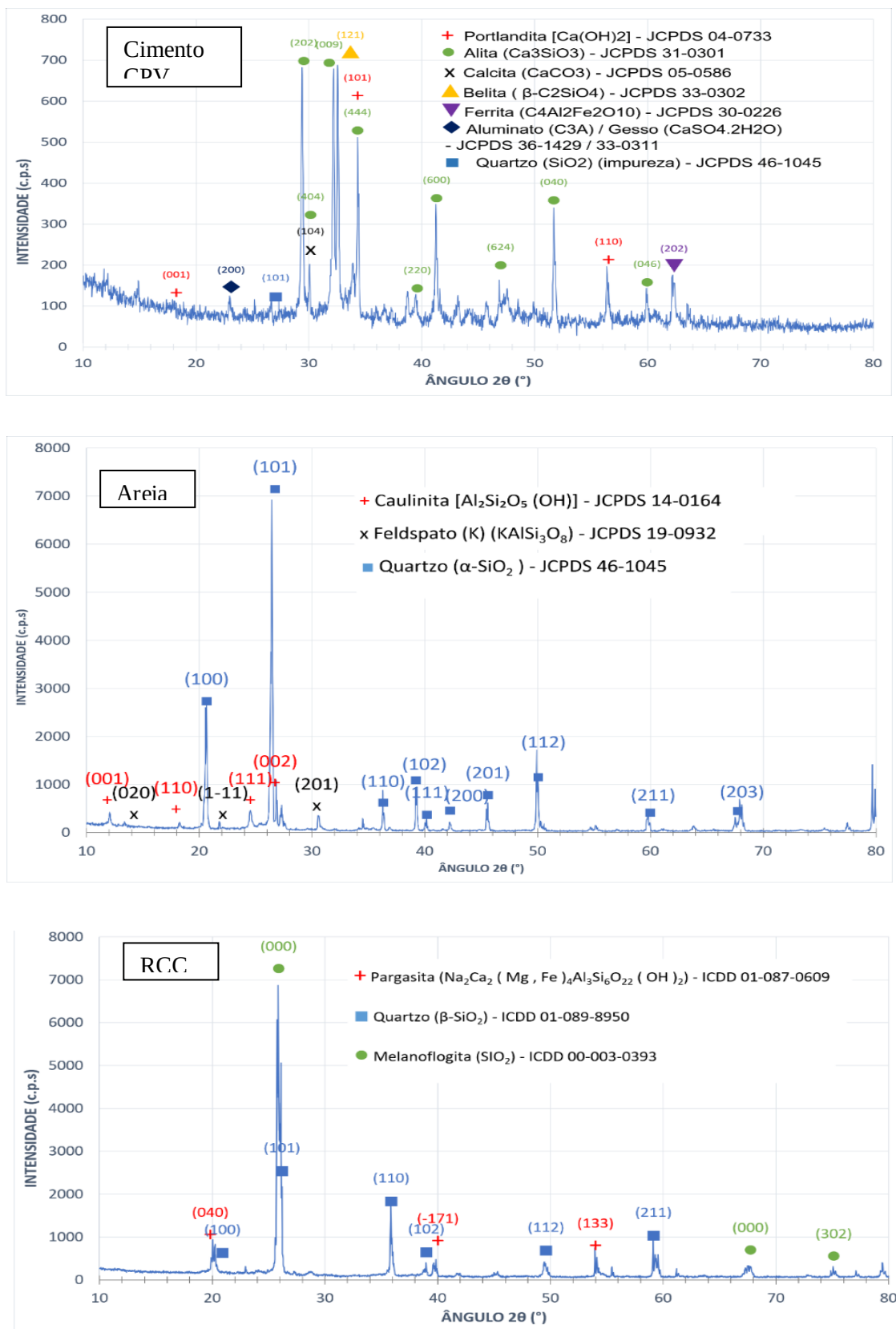
material. Este perfil mineralógico assegura a formação eficiente de produtos de hidratação (como C-S-H e etringita), essenciais para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto (Taylor, 1997; Mehta & Monteiro, 2008).

Em contraste, a areia apresentou um difratograma de alta seletividade, dominado quase exclusivamente pelo Quartzo (α -SiO₂). Este alto grau de pureza mineralógica caracteriza a areia como um material inerte, cujo papel primário na matriz cimentícia é atuar como esqueleto granular estável. A presença residual de minerais acessórios, como Caulinita e Feldspato, é desprezível e não altera sua estabilidade química intrínseca (Neville, 2016).

O RCC exibiu uma heterogeneidade mineralógica acentuada, reflexo direto de sua origem em processos de demolição e reciclagem. Diferentemente da areia, observou-se a presença de múltiplos polimorfos de sílica, incluindo Quartzo e Melanoflogita, além de Silicatos Complexos (como a Pargasita). A presença desses minerais, possivelmente oriundos de rochas ígneas/metamórficas ou de pastas de cimento carbonatadas aderidas, confere ao RCC um caráter de "agregado ativo". Diferente do inerte quartzo, o RCC possui fases que podem interagir com a química da hidratação (Silva et al., 2017; Lothenbach et al., 2011).

A comparação dos difratogramas permitiu estabelecer uma hierarquia funcional: enquanto o CPV fornece a reatividade necessária e a areia garante a estabilidade inerte, o RCC introduz uma variabilidade mineralógica que exige atenção técnica.

Figura 30 – Fases cristalinas obtidas por difração de raios X do Cimento CPV, Areia e RCC.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Do ponto de vista estrutural, a substituição de agregados naturais por RCC apresenta desafios específicos devido à sua maior porosidade e natureza quimicamente ativa. O sucesso na utilização deste resíduo depende da capacidade de compensar sua diversidade mineralógica e absorção de água através de ajustes precisos no traço do concreto.

4.2 Características físicas dos corpos de prova e caracterizações

No que diz respeito a trabalhabilidade do concreto, a interferência dos resíduos de construção e demolição (RCC) ocorre principalmente devido à alta porosidade e maior absorção de água desses materiais, que exigem maior quantidade de água na mistura para manter a mesma trabalhabilidade do concreto de referência, resultando numa perda da trabalhabilidade se não houver um ajuste na quantidade de água ou no uso de aditivos (Leite, 2001).

A Figura 31 ilustra as peças produzidas após a etapa de cura. Observa-se grande quantidade de porosidade superficial e na sessão transversal, com potencial para produto permeável. As peças não apresentaram fraturas de borda ou desmoronamento dos furos internos, indicando processo de conformação adequado. Pode-se identificar, a olho nu, a presença dos agregados graúdos distribuídos pela massa cimentícia de forma homogênea.

Figura 31 – Peças de concreto após as devidas conformações.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

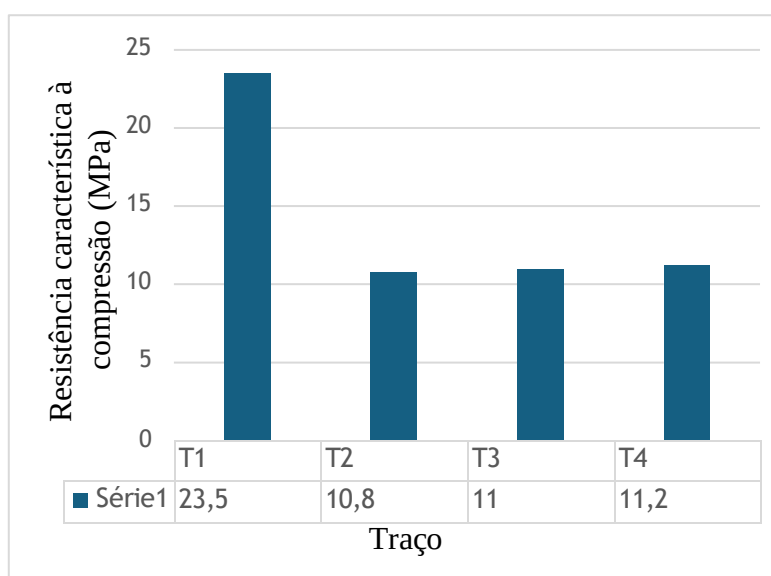
4.2.1 Resistência à compressão

A seguir será apresentada uma análise técnica que aborda os resultados de resistência característica à compressão (f_{pk}) apresentados para os quatro diferentes traços (T1, T2, T3 e T4) de *pavers* convencionais (maciços) de concreto para pavimentação, contextualizando-os conforme a norma brasileira ABNT NBR 9781/2013 (Peça de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio). A Figura 32 mostra o gráfico com a média dos resultados do ensaio de Resistência Característica à Compressão, e a Tabela 10 apresenta a carga média, f_{pi} e f_{pk} obtidos por meio do ensaio.

Os valores de resistência à compressão média (f_{pi}) das amostras T1 são praticamente o dobro das demais amostras que contém RCC (T2, T3 e T4), que apresentaram um desempenho médio muito similar entre si, com uma variação de apenas 0,4 MPa entre o menor (10,82) e o maior (11,25) valor. Isso sugeriu que T2, T3 e T4 compartilham propriedades mecânicas próximas.

A ABNT NBR 9781 estabelece requisitos mínimos de resistência para peças de concreto, visando garantir a durabilidade e a segurança sob solicitações de carga. A norma exige que a resistência característica à compressão (f_{pk}) não seja inferior a 35 MPa para o valor médio para a classe de resistência padrão utilizada em tráfego de veículos.

Figura 32 - Gráfico da Resistência Característica à Compressão(f_{pi}) das amostras T1, T2, T3 e T4, em MPa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O Traço T1 embora seja o mais resistente do grupo, não atendeu ao requisito normativo de 35 MPa para pavimentação sujeita a tráfego de veículos. Os Traços T2, T3 e T4, estão significativamente abaixo do patamar de 35 MPa, não sendo adequados para qualquer aplicação estrutural de pavimentação urbana ou de tráfego de veículos.

Considerando que os resultados apresentados estão abaixo dos limites exigidos para pavimentação de vias, a aplicação desses materiais deve ser restrita a locais com solicitações mecânicas baixas como praças, calçadas, paisagismo, dentre outros.

A classificação de uso proposto, fundamenta-se nas diretrizes da ABNT NBR 9781/2013 e nas recomendações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010),

as quais estabelecem a correlação entre a resistência característica à compressão (f_{pk}) e a respectiva classe de sollicitação, compreendendo desde o tráfego de pedestres até o tráfego de veículos de passeio.

Conforme Fernandes (2011), em sua obra dedicada à produção e ao controle de qualidade de blocos e *pavers*, o desempenho das peças de concreto é classificado em função da resistência à compressão e da sollicitação de tráfego. O autor argumenta que peças com resistências inferiores a 25 MPa apresentam desempenho restrito, sendo tecnicamente recomendadas apenas para áreas de tráfego exclusivo de pedestres ou tráfego leve.

Tabela 10 - Resultados do Ensaio de Resistência Característica à Compressão para as amostras cilíndricas T1, T2, T3 e T4, de área superficial de 7853,97 mm².

Registro	Carga (N)	f_{pi} (MPa)	Carga média (N)	f_{pi} médio* (MPa)	Desvio Padrão	f_{pk} (MPa)
T1	143230	24,0	140477	23,5	6,16	17,85
	163720	27,4				
	164010	27,5				
	180540	30,2				
	99750	16,7				
	91610	15,3				
T2	58540	9,8	64638	10,82	1,04	9,86
	60840	10,2				
	75540	12,6				
	66620	11,2				
	66280	11,1				
	60010	10,0				
T3	83600	14,0	65857	11,00	5,07	6,34
	20290	3,4				
	98930	16,6				
	38460	6,4				
	70990	11,9				
	82870	13,9				
T4	68170	11,4	67150	11,25	0,9	10,41
	61390	10,3				
	65220	10,9				
	61460	10,3				
	73400	12,3				
	73260	12,3				

* considerando fator multiplicador $p = 0,95$; Área de carregamento da célula de carga = 5674,5 mm²

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O Manual de Pavimentação Intertravada da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010 micro drenagem micro drenagem) constitui referência técnica fundamental sobre o

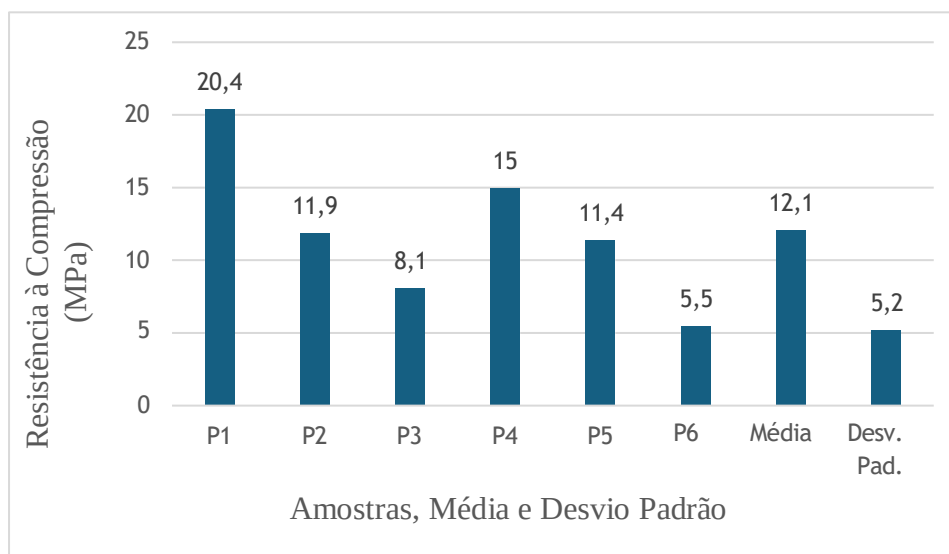
tema no contexto brasileiro. O documento estabelece a correlação entre a resistência à compressão e a classe de solicitação de tráfego, determinando que, para áreas de tráfego de pedestres, como calçadas e jardins, admitem-se valores menores de resistência por se tratar de esforços predominantemente estáticos. Em contrapartida, para áreas destinadas a veículos de passeio, como garagens e vias locais, o manual preconiza resistências intermediárias, superiores a 20-25 MPa, a fim de garantir a integridade estrutural frente aos esforços dinâmicos de frenagem e aceleração.

A Figura 33 apresenta os resultados das resistências à compressão individuais de seis *pavers*, bem como, a média dos resultados obtidos nos ensaios e o desvio padrão. Na Tabela 11 é introduzido o resultado completo dos ensaios.

Os resultados indicaram uma ausência de rigor no controle de qualidade durante o processo de fabricação (Neville, 2016). Essa alta dispersão, provavelmente oriunda de falhas na homogeneização da mistura, variações na umidade, ou inconsistência na compactação/vibração das peças, penaliza severamente o cálculo da resistência característica, rebaixando o valor de 12,1 MPa (média) para um f_{pk} de apenas 7,32 MPa.

A geometria sextavada do *paver* (250 mm x 250 mm x 60 mm), aliada à presença de 7 furos de 20 mm de diâmetro, reduz significativamente a área líquida resistente da peça. Os furos criam concentradores de tensão que justificam, em parte, a baixa resistência à compressão alcançada. A espessura de 60 mm é tradicionalmente destinada a tráfego leve, mas exige resistências normativas de 35 MPa.

Figura 33 - Resistências característica à compressão dos *pavers* T1 com 7 furos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 11 – Resultados do Ensaio de Resistência Característica à Compressão para as amostras cilíndricas T1 com 7 furos.

Registro	Carga (N)	f_{pi} (MPa)	Carga média (N)	f_{pi} médio* (MPa)	Desvio Padrão	f_{pk} (MPa)
T1	121810	20,4	72012	12,1	5,2	7,32
	70860	11,9				
	48330	8,1				
	89670	15,0				
	68330	11,4				
	33070	5,5				

* considerando fator multiplicador $p = 0,95$; Área de carregamento da célula de carga = 5674,5 mm²

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Devido à baixa resistência e à presença dos 7 furos (que conferem características de permeabilidade ou espaço para crescimento de vegetação), o uso destas peças deve ser estritamente restrito a aplicações não estruturais e de caráter paisagístico. As peças podem ser utilizadas como pisogramas (concregramas) em jardins, canteiros e calçadas de baixíssimo fluxo (exclusivo para pedestres), ou como elementos de proteção superficial de taludes (controle de erosão). Nessas aplicações, a solicitação mecânica é mínima e a peça atua apenas como revestimento estético e de contenção superficial, não sofrendo tensões de cisalhamento oriundas de manobras de veículos (Mehta & Monteiro, 2008).

A Tabela 12 mostra algumas aplicações sugeridas para os *pavers* produzidos com os respectivos traços (T1, T2, T3 e T4 maciços, e T1 com 7 furos), respeitando as normas e a literatura técnica apresentada. É importante ressaltar que para qualquer projeto que envolva a utilização destes materiais em via pública, é fundamental realizar uma reavaliação do traço (aumentar o fator cimento ou melhorar a qualidade dos agregados) para atingir os patamares de resistência estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras, evitando manifestações patológicas prematuras e riscos de falha estrutural do pavimento.

Tabela 12 - Aplicabilidade para os *pavers* produzidos considerando os Ensaio de Resistência Característica à Compressão.

Faixa de Resistência (f_{pk})	Aplicação Recomendada
Abaixo de 15 MPa (Composições T2, T3 e T4 maciços e T1 com 7 furos)	Áreas exclusivamente para pedestres: Calçadas residenciais, passeios públicos, caminhos em jardins, áreas de lazer, contorno de canteiros e quintais onde não há tráfego de veículos, onde a função principal é estética ou de delimitação de espaço.
Entre 15 MPa e 25 MPa (Composição T1 maciço)	Tráfego leve: Vias residenciais de tráfego muito baixo, acesso de garagem para carros de passeio, ciclovias e áreas de circulação humana mais intensa.

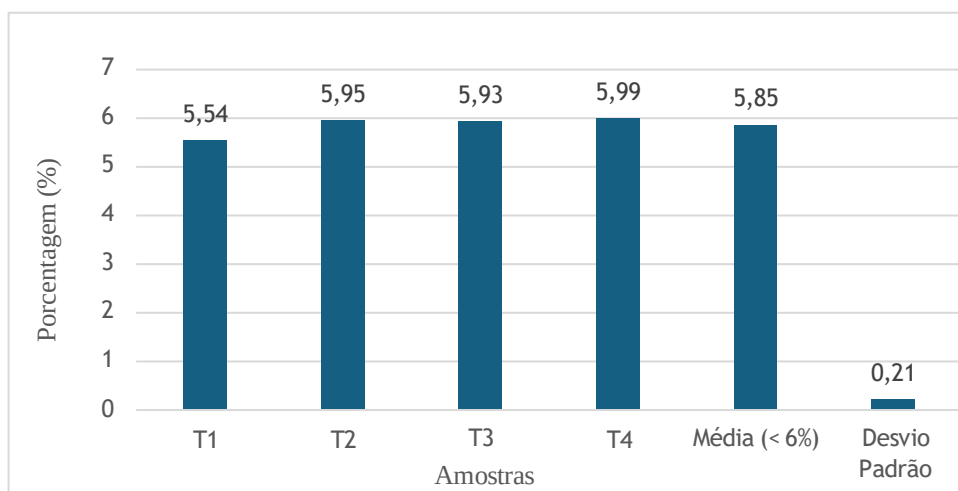
Fonte: ABNT NBR 9781/ 2013; ABCP, 2022; Fernandes, 2011.

4.2.2 Absorção de água

A Figura 34 mostra a proporção de absorção de água das amostras T1, T2, T3 e T4 maciças. Os valores individuais apresentaram uma variação estreita, oscilando entre um mínimo de 5,54% (T1) e um máximo de 5,99% (T4). O valor da média (5,85%) está abaixo do limite de 6% estabelecido pela NBR 9781 indicando que, em média, o material atendeu a este critério de desempenho específico. O desvio padrão de aproximadamente 0,21 indicou uma baixa dispersão dos dados em relação à média. Embora todos os valores estejam abaixo de 6%, observou-se que o T1 apresenta a menor absorção (5,54%) comparado às demais composições, mas essa diferença não é significativa, podendo-se considerar que todos os valores são iguais estatisticamente.

A absorção de água é um parâmetro fundamental para avaliar a porosidade aberta de materiais porosos. Valores mais altos geralmente indicam uma rede de poros interconectados maior, o que pode facilitar a entrada de agentes agressivos (cloretos, sulfatos, dióxido de carbono), comprometendo a durabilidade da estrutura ao longo do tempo. Por outro lado, a absorção de água está diretamente ligada à permeabilidade do material, e pode favorecer a sistemas drenantes em pavimentações.

Figura 34 - Gráfico de Absorção de Água das amostras T1, T2, T3 e T4 maciças.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados indicaram que os quatro traços analisados possuem propriedades de absorção de água muito próximas e estão dentro do limite de aceitação estabelecido para o projeto e norma técnica de referência (< 6%). A consistência dos resultados (baixa dispersão) mostra que as variações nos traços não alteraram significativamente a microestrutura interna do material em termos de porosidade.

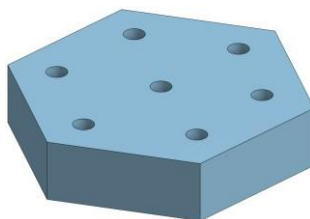
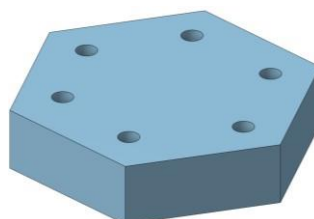
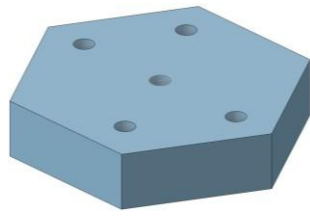
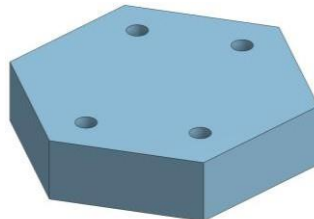
4.2.3 Permeabilidade

Previamente foi feito um estudo do design do *paver* para idealizar a capacidade de infiltração para 4, 5, 6 e 7 furos. Na Tabela 13 tem-se o esboço, em três dimensões, de *pavers* com sete, seis, cinco e quatro furos, suas respectivas proporcionalidades de área vazadas e capacidade de infiltração, considerando 1 cm de rejunte entre peças (rejunte lateral).

Para o cálculo da proporcionalidade da capacidade de infiltração foi considerando *pavers* com furos de 2 cm de diâmetro. A borda entre o furo e a aresta da peça deve ter, no mínimo, 25 mm a 30 mm. Para pavimentação de calçadas, recomenda-se *paver* com espessura mínima de 6 cm, conforme NBR 9781. A área permeável de rejunte entre peças é a metade da área total de rejunte lateral, devido ao compartilhamento com *pavers* vizinhos. O cálculo da proporcionalidade de rejunte entre peças foi realizado conforme a Equação 6.

$$\% \text{ rejunte entre peças} = [A(\text{metade do rejunte lateral}) / A((\text{total}))] \cdot 100 \quad (6)$$

Tabela 13 – Esboço de *pavers* vazados e respectivas capacidade de infiltração, considerando as áreas de rejuntos e furos.

<i>Pavers</i> com 25 x 25 x 6 cm L = 14 cm D(furo) = 2 cm A(paver + furo) = 509,20 cm² A(cada furo) = 3,14 cm² E(rejunte entre peças para tráfego leve) = 1 cm A(rejunte entre peças) = 84 cm² A(peça com furo + rejunte lateral) = 509,20 + 84/2* = 551,20 cm² %A(rejunte lateral) = 7,62 %		
	Área Vazada = 4,32 % Cap. Infiltração = 11,94%	Área Vazada = 3,70 % Cap. Infiltração = 11,32 %
		
	Área Vazada = 3,09 % Cap. Infiltração = 10,71 %	Área Vazada = 2,47 % Cap. Infiltração = 10,09 %

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A configuração geométrica de sete furos estabeleceu maior percentual de vazios de (4,32 %), e por esse motivo foi escolhido este design para produzir os *pavers* de concreto com furos. O desvio padrão de 0,48 mm/s sugeriu uma baixa dispersão entre as medições, o que conferiu maior confiabilidade técnica aos resultados experimentais.

O comportamento hidráulico das amostras maciças (T1, T2, T3 e T4) e de T1 com 7

furos foi analisado pelos ensaios de permeabilidade, fundamentada nos parâmetros da norma ABNT NBR 16416 (Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos), e mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Coeficiente de Permeabilidade para as amostras T1, T2, T3 e T4 maciças e T1 com 7 furos. $*(1 \text{ mm/s} = 10^{-3} \text{ m/s})$

Amostras	t (s)	K (mm/s)	Kmédio ± Desvio Padrão (mm/s) *
T1	52,7	0,97	0,97 ± 0,02
	53,5	0,95	
	51,3	0,99	
T2	33,5	1,51	1,50 ± 0,07
	35,5	1,43	
	32,7	1,56	
T3	30,4	1,67	1,67 ± 0,03
	31,0	1,64	
	30,0	1,70	
T4	27,0	1,88	1,95 ± 0,06
	26,0	1,96	
	25,4	2,00	
T1 (com 7 furos)	10,14	5,02	5,54 ± 0,48
	9,01	5,65	
	8,55	5,96	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O coeficiente de permeabilidade (K) representa a velocidade com que a água atravessa o material por unidade de tempo e área. Os dados mostraram uma tendência clara de aumento de permeabilidade à medida que evoluímos de T1 para T4 maciços, devido à redução significativa do tempo de percolação da água (t).

A norma NBR 16416 estabelece critérios rigorosos para garantir que o pavimento não apenas infiltre, mas mantenha sua funcionalidade ao longo da vida útil. A literatura técnica e a aplicação da NBR 16416 indicam, frequentemente, um valor mínimo de 10^{-3} m/s para considerar um revestimento permeável.

As amostras T2, T3 e T4 atendem plenamente ao requisito mínimo de $1,00 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, e T1 está ligeiramente abaixo deste limite normativo de referência. O Desvio Padrão (variando entre 0,02 e 0,07 mm/s) é pequeno em todos os grupos. Isso denotou que foi realizado um alto rigor experimental e homogeneidade na confecção dos corpos de prova. Todos os valores de coeficiente de permeabilidade estão na ordem de grandeza de 10^{-3} m/s , indicando que os pisos estudados podem ser considerados permeáveis.

A composição T4 é a mais eficiente para a drenagem, sendo ideal para áreas de maior

índice pluviométrico ou locais que demandam escoamento imediato. O aumento da permeabilidade (de T1 para T4) geralmente está associado a uma redução no volume de argamassa ou na quantidade de finos na mistura, o que pode impactar a resistência mecânica. É fundamental que, em um projeto para pavimentação, os dados de permeabilidade sejam cruzados com os de Resistência à Compressão, para garantir que seja o sistema seja drenante e ainda cumpra aos requisitos de tráfego.

Os resultados do coeficiente de permeabilidade dos *pavers* com 7 furos mostram um sistema de drenagem superficial maior ($5,54 \pm 0,48$ mm/s) que as amostras maciças, indicando um desempenho hidráulico consistente para a amostra analisada.

Comparativamente aos pavimentos convencionais, que apresentam valores de permeabilidade baixos, os dados obtidos confirmaram que a geometria proposta atende à função de um pavimento permeável, permitindo o escoamento rápido de volumes pluviais.

A NBR 9781 define requisitos para a fabricação de *pavers*, como arestas regulares, aparência homogênea, e ausência de defeitos, sendo essencial para garantir a qualidade do produto. Entretanto, a norma não se intensifica nas especificidades do uso de concreto com agregados reciclados (RCC), ou seja, Resíduos de Construção Civil, que é onde a literatura técnica se torna indispensável. A comparação entre os ensaios da norma e os estudos da literatura para *pavers* com RCC são de extrema importância para verificar a aplicabilidade das normas e maximizar o processo produtivo, assegurando que a qualidade e a durabilidade dos *pavers* fabricados com RCC atendam aos padrões e sejam adequados para uso em vias e áreas de lazer.

5 CONCLUSÕES

A incorporação de resíduos cerâmicos na produção de blocos intertravados (*pavers*) configurou-se como uma alternativa tecnicamente viável e economicamente vantajosa frente aos insumos convencionais. A aplicação deste material não apenas mitiga impactos ambientais significativos, como a poluição do solo e da água, reduzindo a extração de recursos naturais virgens e desviando resíduos de aterros sanitários. Com isso, atuando como um vetor para a economia circular. Ao reintroduzir tais resíduos no ciclo produtivo, promove-se uma gestão de materiais mais sustentável e alinhada às demandas por infraestrutura urbana de baixo impacto.

No que tange ao desempenho hidráulico, a análise dos *pavers* com furos evidenciou um alto potencial para aplicação em pavimentos permeáveis destinados a áreas de tráfego leve. O modelo avaliado, caracterizado por uma configuração de sete furos, alcançou um coeficiente de permeabilidade $K > 10^{-3}$ m/s (1,0 mm/s), atendendo rigorosamente aos parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR 16416. Com uma capacidade de infiltração de 11,94%, resultante da geometria dos furos combinada ao uso de rejunte drenante, esta solução técnica mostrou-se eficaz na redução do escoamento superficial e no favorecimento da recarga do lençol freático, consolidando-se como uma estratégia robusta para a sustentabilidade e resiliência urbana.

Todos os concretos estudados apresentaram absorção de água menores que 6%, sendo favorável a boa durabilidade das peças ao longo do uso. Contudo, os valores de resistência característica à compressão variaram de 23,5 – 10,82 MPa, indicando aplicabilidades não estruturais como calçadas, paisagismo, e tráfego leve, patamares semelhantes aos reportados por autores como Pinto et al. (2012) e Silva et al. (2017) ao estudarem matrizes cimentícias com substituição parcial por resíduos cerâmicos.

Por fim, o presente trabalho contribui para o avanço científico ao validar a durabilidade e a funcionalidade de *pavers* fabricados com subprodutos cerâmicos. As perspectivas futuras incluem a otimização dos processos de reciclagem e a expansão do desenvolvimento de novos produtos, reforçando a relevância do estudo para a engenharia de materiais e o planejamento urbano sustentável.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). **Global Status Report 2019 for Buildings and Construction**. Paris, 2019.
- ALENCAR, R. S. **Concreto permeável: influência do tipo de agregado e da relação água/cimento nas propriedades no estado fresco e endurecido**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete**. Farmington Hills, 2010.
- ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo: PCC/EPUSP, 2007.
- ANTONINO, José Mário Torres; PÓVOAS, Yêda Vieira; MOURA, Micaella Raíssa Falcão de. **O uso de pavimentos permeáveis como mitigação de alagamentos em grandes centros urbanos**. Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, v. 12, n. 38, p. 5465, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/23178604123820245465>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de pavimento intertravado: passeio público**. São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). **Resíduos cerâmicos na construção civil: impactos e desafios**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://abes-dn.org.br>. Acesso em: 05 jul. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5732: Cimento Portland comum – Especificação**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais – Terminologia. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9896**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em obras de infraestrutura – Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15819**: Sistemas de pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15900-1**: Água de amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16886**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**: Agregados Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16973**: Agregados Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17054**: Agregados

Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 7500-1: Materiais metálicos – Calibração e verificação de máquinas de ensaio uniaxial. Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão – Calibração e verificação do sistema de medição.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Pesquisa setorial ABRECON.** São Paulo, 2020.

ATKINS, P. W.; DE PAULA, J. **Química física.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente.** São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BAPTISTA, M.; BARRETTO, M.; NASCIMENTO, N. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABRH / Lidel, 2011.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. Cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, C. G. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 761-790.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. v. 1.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2008.

BRAGA, M. C. B.; DIAS, N. C. **Gestão de resíduos sólidos urbanos.** Curitiba, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

BRITO, J.; DIAS, J. L. **Gestão ambiental de resíduos na construção civil.** São Paulo: Editora Pini, 2008.

BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. **Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates**. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 4, p. 429–433, 2005.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CAMARGO, O. A. et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: IAC, 2009.

CANTO, M. A. et al. **Hidrologia urbana e manejo de águas pluviais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

CARVALHO, M. D. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. 4. ed. São Paulo: ABCP, 1998.

CARVALHO, T. S.; PAULA JUNIOR, C. A. de. **Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SUDS) e infraestrutura verde na gestão de águas pluviais**. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Urbano*, v. 15, n. 2, p. 112-128, 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE CIMENTO (CNC). **Ficha técnica do cimento CP V – ARI RS**. Disponível em: <https://cimentonacional.com.br/wp-content/uploads/2025/01/CP-V-ARI-RS-.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2026.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=98303>. Acesso em: 05 jul. 2026.

CONNOLLY, J. R. **Introdução à difração de pó de raios X**. Primavera, 2007.

CUNHA, F. B. **Aditivos e adições para concreto**. AECweb, 2014. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/aditivos-melhoram-propriedades-e-aplicacoes-do-concreto/14428>. Acesso em: 05 jul. 2026.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE (DNIT). **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: uma**

abordagem exploratória inicial. 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt>. Acesso em: 03 set. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição.** 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt>. Acesso em: 03 set. 2025.

FERNANDES, I. D. **Blocos e pavers: produção e controle de qualidade.** 2. ed. Jaraguá do Sul: Treino, 2011.

FERNANDES, R. B. A. et al. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012.

FINOCCHIARO, P. S.; GIRARDI, R. **Concreto permeável produzido com agregado reciclado.** Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana, n. 5, p. 19-26, 2017.

FIORITI, C.; INO, A.; AKASAKI, J. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha.** 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242363320>. Acesso em: 05 jul. 2026.

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H. **Pavimentos permeáveis e sua influência sobre a drenagem.** São Paulo: EP-USP, 2014.

GONÇALVES, J. P. **Utilização de resíduos cerâmicos como aglutinantes alternativos.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2007.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: PINI, 1992.

HIWSTON TECNOLOGIA. **Vibroprensas: Soluções em blocos e pavers.** Disponível em: <https://hiwston.com.br>. Acesso em: 6 jul. 2026.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE (ICPI). **Permeable Interlocking Concrete Pavements Manual.** Washington, DC, 2011.

JARFEL // SAHARA. **Pavers de concreto.** Mogi das Cruzes: Jarfel, 2022. Disponível em: <https://www.jarfel.com.br/en/informative/concrete-pavers-and-blocks/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, R. et al. **Utilização de agregados reciclados de RCD em pavimentos permeáveis: simbiose entre drenagem e economia circular**. Construção & Sustentabilidade, v. 18, n. 1, p. 45-60, 2025.

LOTTHENBACH, B. et al. **Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, p. 1244-1263, 2011.

LUZ, B. (Org.). **Economia circular: do Brasil à teoria à prática**. Rio de Janeiro: Exchange 4 Change Brasil, 2017.

MARCHIONI, M. L. **Pavimento permeável com peças de concreto: benefícios e limitações**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MARCHIONI, M.; SILVA, A. P. **Sistemas de pavimentação permeável: análise de desempenho de blocos com cavidades abertas**. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2018.

MARQUES NETO, J. **Resíduos de construção e demolição: desafios e perspectivas**. 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br>. Acesso em: 05 jul. 2026.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTEIRO, A. In: CABRAL, G. S. **Análise de diferentes materiais porosos para concreto permeável**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br>. Acesso em: 24 set. 2025.

MONTEIRO, S. N. **Materiais de construção e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **Difração de raios X e a identificação e análise de minerais de argila**. Oxford: Oxford University Press, 1989.

NEITHALATH, N.; SAKLICH, J.; SUMANASOORIYA, M. S. **A combined**

fracture mechanics and statistical approach to the tensile strength of pervious concretes. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 10, p. 1531-1540, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatórios sobre sustentabilidade na construção civil**. 2020.

PENTEADO, C. S. **Custos e orçamentos na construção civil**. São Paulo: Editora Pini, 2009.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. **Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil**. In: V ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 2015. Campinas, 2015.

PEREIRA NETO, C. et al. **Design of permeable pavers: technical analysis and use in urban pavement**. In: 12º ERGOTRIPDESIGN, 2026. São Paulo, 2026.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed. São Paulo, 2002.

PINTO, J. et al. **Durability and mechanical performance of concrete containing ceramic wastes**. Construction and Building Materials, v. 30, p. 300-308, 2012.

PRADO, M. A. et al. **Colmatção e manutenção em sistemas de pavimentação permeável: mecanismos e métodos de reabilitação**. Revista de Engenharia Urbana e Infraestrutura, v. 15, n. 1, p. 88-102, 2020.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Global Status Reportfor Buildings and Construction 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.unep.org>. Acesso em: 05 jul. 2026.

RODRIGUES, C. V.; ROSA, A. F. P. **Avaliação da capacidade do processo produtivo de blocos de concreto por meio de análises estatísticas**. In: XXII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Bauru, 2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Brasil produz 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição**. Portal de Educação Ambiental, São Paulo, 13 nov. 2024. Disponível em:

<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/brasil-produz-48-milhoes-de-toneladas-de-residuos-de-construcao-e-demolicao/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

SCHROEDER, A. B. et al. **The ImageJ ecosystem:** open-source software for image visualization, processing, and analysis. *Protein Science*, v. 30, n. 1, p. 234-249, 2021.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban best management practices.** Washington: Department of Environmental Programs, 1987.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** São Paulo: PINI, 2001. v. 2.

SILVA, A. M. et al. **Impactos da impermeabilização urbana e desafios na mitigação de inundações em metrópoles contemporâneas.** *Revista de Engenharia Civil e Hidrologia*, v. 22, n. 1, p. 89-104, 2025.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, B. C. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso de agregados reciclados de construção e demolição em pavimentação.** *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2020.

SILVA, F. B. **Pavimentos de concreto permeável.** *Revista Técnica*, São Paulo, n. 190, 2012. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br>. Acesso em: 20 set. 2025.

SILVA, J. A. **Concreto permeável e pavimentos intertravados: propriedades e aplicações em infraestrutura urbana.** Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, M. S. **Materiais de Construção Sustentáveis e Pavimentação.** São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2020.

SILVA, M. C.; SANTOS, G. O. **Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados.** Fortaleza: IFCE, 2011.

SILVA, R. **A difração de raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais.** *Revista Processos Químicos*, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020.

SILVA, R. V. et al. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 201-213, 2017.

SILVA, R. V. et al. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** Construction and Building Materials, v. 147, p. 201-213, 2017.

SUMANASOORIYA, M. S.; NEITHALATH, N. **Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their influences on water permeability.** Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 6, p. 639-648, 2011.

SUSTAINABILITY (MDPI). **Relationships between functional properties of pervious concrete.** Sustainability, v. 12, n. 16, 2020.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. **Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 83-90, 2016.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana.** Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997.

US EPA. U.S. **Environmental Protection Agency.** Low Impact Development (LID): a literature review. Washington: EPA, 2014.

VALGUARÁ. **Produtos: Pisos.** Disponível em: <https://www.valguara.com.br/produtos>. Acesso em: 6 jul. 2025.

VASCONCELOS, K. B.; LEMOS, C. F. **Densidade aparente dos resíduos da construção civil em Belo Horizonte – MG.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 6. 2015, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: IPA, 2015.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.