

ESTUDO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE ROCHA CALCÁRIA EM BLOCOS DE CONCRETO PERMEÁVEIS.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTS OF INCORPORATING LIMESTONE MINING WASTE INTO PERMEABLE CONCRETE BLOCKS.

Bianca Roberta Barreto de Sousa¹
Leonete Cristina de Araújo Ferreira Medeiros Silva²
Jennef Carlos Tavares³

RESUMO:

O crescimento acelerado da urbanização tem intensificado os problemas relacionados à impermeabilização do solo e à gestão das águas pluviais, contribuindo para alagamentos, sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana e impactos ambientais. Diante desse cenário, torna-se necessária a adoção de soluções construtivas sustentáveis, como os pavimentos permeáveis associados ao reaproveitamento de resíduos industriais. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da incorporação do resíduo proveniente da mineração de rocha calcária, na forma de pó, como substituição parcial do cimento na produção de blocos intertravados de concreto permeável, analisando seu desempenho físico, mecânico e hidráulico. Para isso, foram produzidos blocos intertravados com cinco diferentes teores de substituição do cimento pelo resíduo de calcário: 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os blocos foram submetidos a ensaios laboratoriais de resistência à compressão, permeabilidade e secagem, realizados conforme as normas técnicas brasileiras vigentes. Os resultados indicaram que o traço com 10% de resíduo apresentou o melhor desempenho mecânico entre as composições analisadas. Entretanto, nenhum dos blocos atingiu a resistência mínima de 20 MPa exigida pela ABNT NBR 9781 para aplicação em pavimentação intertravada. Em contrapartida, todos os traços apresentaram coeficientes de permeabilidade superiores ao limite normativo, evidenciando elevada capacidade de infiltração de água. O modelo de Henderson apresentou bom ajuste às curvas de secagem. Conclui-se que a incorporação do resíduo de calcário é promissora sob os aspectos hidráulico e ambiental, porém requer ajustes no traço produtivo para atender às exigências mecânicas normativas.

Palavras-chave: concreto permeável; bloco sustentável; bloco com resíduo.

ABSTRACT:

The rapid growth of urbanization has intensified problems related to soil impermeability and stormwater management, contributing to flooding, overloading of urban drainage systems, and environmental impacts. Given this scenario, the adoption of sustainable construction solutions, such as permeable pavements associated with the reuse of industrial waste, becomes necessary. This work aimed to evaluate the effects of incorporating waste from limestone mining, in powder form, as a partial replacement for cement in the production of permeable concrete interlocking blocks, analyzing their physical, mechanical, and hydraulic performance. To this end, interlocking blocks were produced with five different levels of cement replacement by limestone waste: 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The blocks were subjected to laboratory tests of compressive strength, permeability, and drying, carried out according to current Brazilian technical standards. The results indicated that the mix with 10% waste presented the best mechanical performance among the compositions analyzed. However, none of the blocks reached the minimum resistance of 20 MPa required by ABNT NBR 9781 for application in interlocking paving. Conversely, all mixes showed permeability coefficients exceeding the normative limit, demonstrating a high water infiltration capacity. The Henderson model showed a good fit to the drying curves. It is concluded that the incorporation of limestone residue is promising from both hydraulic and environmental perspectives, but requires adjustments to the production mix to meet the normative mechanical requirements.

Key words: Permeable concrete; sustainable block; block with recycled material.

¹ Graduanda em Engenharia Civil, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: bbarreto962@gmail.com

² Professora orientadora, Departamento de Engenharias, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: leonete.cristina@ufersa.edu.br

³ Professor coorientadora, Departamento de Engenharias, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: jennef.carlos@ufersa.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O pavimento intertravado surgiu na Grécia por volta de 2500 a.C., onde pedras eram assentadas sobre camadas de areia, que serviam para acomodá-las e mantê-las firmes na formação dos caminhos (Leal, 2018). Esse método tradicional já demonstrava que, mesmo sem o conhecimento técnico disponível hoje, as civilizações daquela época entendiam a necessidade de assegurar a estabilidade e uma boa drenagem das vias de passagem.

Essa preocupação com a interação entre pavimento e solo torna-se ainda mais relevante no contexto contemporâneo. Conforme observa Moura (2005), a urbanização acelerada tem promovido profundas alterações no uso e ocupação do solo, substituindo áreas naturais por superfícies impermeáveis, como pavimentos e edificações. Esse processo reduz a infiltração da água no solo e intensifica o escoamento superficial, contribuindo para alagamentos, sobrecarga dos sistemas de drenagem e degradação ambiental.

Diante desse cenário, tornou-se fundamental desenvolver pesquisas que busquem alternativas capazes de minimizar o escoamento superficial nas áreas urbanas, considerado um dos principais problemas resultantes da impermeabilização do solo. Os pavimentos permeáveis surgem como uma das soluções mais eficiente para o controle do escoamento superficial, permitindo a infiltração da água no próprio local de precipitação. Dentre esses sistemas, destacam-se os pavimentos intertravados de concreto permeável, compostos por peças pré-moldadas com vazios interconectados que possibilitam a percolação da água (ABNT, 2015).

Esse pavimento tem ganhado ampla utilização devido ao seu caráter moderno e às vantagens tanto econômicas quanto ambientais que oferece, além da possibilidade de incorporar diferentes materiais recicláveis ou reaproveitados (Silva, 2013). Esse tipo de pavimentação vem se destacando por combinar praticidade, estética e benefícios sustentáveis, sendo aplicado com frequência em calçadas, estacionamentos, vias de baixo volume de tráfego e espaços destinados ao lazer.

Paralelamente aos desafios relacionados à drenagem urbana, a indústria da mineração enfrenta problemas ambientais associados à geração e ao descarte de grandes volumes de resíduos. A mineração de rocha calcária, amplamente utilizada na produção de cimento e agregados para a construção civil, gera quantidades significativas de rejeitos durante as etapas de extração e beneficiamento. Esses resíduos, quando descartados de forma inadequada, podem ocasionar impactos ambientais relevantes, como a ocupação de áreas para disposição, emissão de poeira e contaminação do solo e de corpos d'água (BOLZAN, 2025).

O reaproveitamento do resíduo da mineração de calcário em materiais cimentícios tem sido objeto de diversos estudos, por representar uma alternativa viável para a redução do consumo de cimento Portland, material cuja produção é altamente intensiva em energia e responsável por elevadas emissões de dióxido de carbono. Pesquisas indicam que a incorporação desse resíduo como substituição parcial do cimento pode influenciar as propriedades físicas e mecânicas do concreto, além de contribuir para a melhoria do desempenho ambiental do material (WANG et al., 2024).

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo avaliar os efeitos da incorporação do resíduo da mineração de rocha calcária como substituição parcial do cimento na produção de blocos intertravados de concreto permeável, analisando seu desempenho mecânico, hidráulico e comportamento de secagem. Busca-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis, aliando o reaproveitamento de resíduos da mineração ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o presente trabalho é uma pesquisa experimental e quantitativa, com o intuito de estudar a influência da adição do resíduo do calcário (agregado artificial) em diferentes proporções no bloco intertravado permeável produzidos em laboratório. Busca-se analisar como o resíduo influencia nas propriedades física e mecânica, identificando a formulação que consegue o melhor equilíbrio entre resistência, permeabilidade e secagem.

2.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados na confecção dos blocos intertravados de concreto permeável foram o cimento Portland CP V-ARI, da marca MIZU, caracterizado por apresentar elevada resistência mecânica nas idades iniciais; o agregado graúdo do tipo brita zero (pedrisco); o resíduo proveniente da mineração de rocha calcária, caracterizado como um material pulverulento, conforme ilustrado na Figura 1; água potável; e aditivo plastificante concentrado da marca VEDALIT, empregado com a finalidade de melhorar a trabalhabilidade da mistura sem aumento do teor de água.

Figura 1: Resíduo da mineração da rocha calcária.



Fonte: Autoria própria, (2025).

2.2 Produção dos blocos intertravados permeáveis

2.2.1 Determinação do traço

O traço padrão foi definido com base em pesquisas sobre os principais métodos de produção de blocos intertravados de concreto drenante. A partir dessa análise, selecionaram-se composições que apresentaram melhorias significativas nas propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido.

Para a etapa experimental, foram adotados os seguintes traços para o ensaio 1:3 (cimento; pedrisco), 1:3,5 (cimento; pedrisco) e 1:4 (cimento; pedrisco). A seleção dessas proporções fundamentou-se na frequência de sua aplicação em estudos técnicos e científicos sobre concreto permeável, nos quais tais traços apresentam desempenho adequado quanto às propriedades mecânicas e hidráulicas. Assim, essas composições foram submetidas a ensaios preliminares, visando à avaliação do comportamento do material e à definição do traço de referência para o desenvolvimento do estudo.

A escolha considerou simultaneamente a necessidade de garantir resistência mecânica adequada e manter níveis satisfatórios de permeabilidade, características essenciais para o bom funcionamento de pavimentos drenantes. (Souza et al., 2022; Faria et al., 2019). Com base nos ensaios executados de compressão e permeabilidade, definiu-se o traço padrão 1:3 (cimento; pedrisco) como a composição de referência para o estudo.

Para o traço adotado neste estudo, 1:3 (cimento; pedrisco), foi utilizada uma relação água/cimento de 0,4. Esse valor é considerado adequado para a produção de blocos de concreto permeável, pois fornece um equilíbrio entre coesão e rigidez da mistura. Em pavimentos drenantes, é essencial manter a mistura relativamente seca, de modo que os agregados se unam sem formar excesso de pasta, permitindo a criação de vazios interconectados responsáveis pela permeabilidade. Assim, a relação a/c de 0,4 contribui para garantir resistência satisfatória, boa estabilidade dimensional e, ao mesmo tempo, preservar a capacidade drenante do material.

2.2.2 Determinação das porcentagens do resíduo

Após a dosagem do concreto, definiu-se quatro porcentagens de resíduo da mineração do calcário que seriam adicionadas nos blocos para substituir uma porcentagem parcial do cimento. As proporções utilizadas foram as seguintes:

- 0% de resíduo do calcário no bloco permeável;
- 5% de resíduo do calcário no bloco permeável;
- 10% de resíduo do calcário no bloco permeável;
- 15% de resíduo do calcário no bloco permeável;
- 20% de resíduo do calcário no bloco permeável.

Percentuais mais reduzidos de substituição são geralmente recomendados em situações em que não há uso de aditivos ou quando o agregado reciclado não passou por qualquer processo de tratamento prévio. Nesses casos, teores menores tendem a garantir maior estabilidade e melhor desempenho do compósito, conforme apontam Silva Filho (2023) e Souza et al. (2022).

Desse modo, calculou-se o 2º, 3º, 4º e 5º traço mais uma vez, incorporando-se o agregado artificial proveniente do resíduo da mineração de rocha calcária como substituição parcial do cimento Portland. A Tabela 1 abaixo apresenta a quantidade de cada material usado para os 5 diferentes traços para confecção dos blocos.

Tabela 1: Quantidade de materiais de cada traço.

Materiais	BL00	BL05	BL10	BL15	BL20
Cimento (Kg)	2,4	2,28	2,16	2,04	1,92
Resíduo (Kg)	0	0,12	0,24	0,36	0,48
Brita 0 (Kg)	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19
Água (Kg)	0,96	0,91	0,86	0,82	0,77
Aditivo (Kg)	0,012	0,0114	0,0108	0,0102	0,0096

Fonte: Autoria própria, (2025).

2.2.3 Fabricação do bloco permeável

Após a realização dos ensaios que permitiram definir o traço adequado, iniciou-se o processo de produção dos blocos intertravados de concreto drenante. As misturas foram preparadas em uma betoneira, seguindo a mesma sequência de dosagem para garantir a uniformidade do material. Os blocos foram moldados conforme as proporções apresentadas na Tabela 1, visando à avaliação do comportamento e do desempenho frente às diferentes composições analisadas.

A moldagem do material foi realizada em uma forma retangular com dimensões de 20 cm × 10 cm × 6 cm (comprimento, largura e altura) e em moldes cilíndricos, previamente lubrificados para facilitar o processo de desmoldagem. Para cada traço produzido, confeccionou-se um bloco permeável e três corpos de provas cilíndricos. Após a moldagem, as peças permaneceram em repouso por 24 horas para permitir a secagem inicial e o ganho de rigidez necessários ao desmolde. Em seguida, os blocos e corpos de prova foram desmoldados e encaminhados ao processo de cura, garantindo o desenvolvimento adequado das propriedades do material.

2.2.4 Cura

Mota (2014) comparou três diferentes procedimentos de cura com a finalidade de identificar aquele que proporciona o melhor desempenho em termos de resistência mecânica. Foram analisadas a cura úmida por aspersão, a cura ao ar livre em ambiente protegido e a cura por imersão em solução saturada de cal. Entre esses métodos, a cura por imersão apresentou os resultados mais expressivos, seguida pela cura por aspersão, enquanto a cura ao ar livre obteve o menor ganho resistente.

Com base nessas evidências, este estudo adotou a cura por imersão em solução de cal, buscando maximizar a resistência à compressão dos blocos ao final do processo e assegurar condições adequadas de hidratação durante o período de cura.

2.3 Ensaios

2.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão característica é o principal indicador de qualidade dos blocos de concreto utilizados em pavimentação. No presente estudo, tanto o traço de referência quanto os traços com adição de resíduo de calcário foram submetidos ao ensaio de compressão aos 14

dias, escolha justificada pelo uso do cimento CP V – ARI, que apresenta alta resistência inicial. Esse tipo de cimento é projetado para atingir uma parcela significativa da sua resistência final já nos primeiros dias de cura, graças à sua composição com maior teor de silicato tricálcico (C_3S). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Processos Construtivos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Caraúbas.

Cada traço possui 3 corpos de provas, para a realização do ensaio, o bloco deve permanecer submerso em água por pelo menos 24 horas antes do teste, garantindo sua completa saturação. Além disso, é necessário que a superfície destinada ao carregamento esteja devidamente retificada. Durante o procedimento, a carga deve ser aplicada de forma contínua até que ocorra a ruptura total da peça.

A resistência à compressão deve ainda atender às seguintes especificações, detalhada no Quadro 1:

Quadro 1: Resistência característica à compressão.

Solicitação	Resistência característica à compressão (f_{pk}), aos 28 dias	Método de ensaio
Tráfego de pedestres e tráfego leve	Maior ou igual a 20	ABNT NBR 16416
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	Maior ou igual a 35	ABNT NBR 9781
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	Maior ou igual a 50	ABNT NBR 9781

Fonte: NBR 9781 (2013).

2.3.3 Permeabilidade

O método utilizado para determinar o coeficiente de permeabilidade foi o ASTM C1701 – *Standard Test Method for Infiltration Rate of In-Place Pervious Concrete*, que corresponde ao procedimento de ensaio in situ para medir a taxa de infiltração em concretos permeáveis. Esse método foi incorporado pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que trata dos requisitos e procedimentos aplicáveis aos pavimentos permeáveis de concreto.

A avaliação do coeficiente de permeabilidade também pode ser realizada em ambiente laboratorial, restringindo-se à análise da camada de revestimento. Para esse fim, a NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece, em seu Anexo A, o procedimento específico a ser seguido durante o ensaio.

Dessa forma, conforme estabelece a Tabela 7 do item 6.7.1 da NBR 16416 (ABNT, 2015), o pavimento permeável deve apresentar um coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} m/s para atender às exigências da norma.

2.3.4 Secagem

O ensaio de secagem teve como objetivo avaliar o comportamento de secagem dos blocos de concreto permeável, bem como a variação do teor de umidade ao longo do tempo. Inicialmente, os blocos foram moldados conforme os procedimentos descritos nos tópicos anteriores. Em seguida, a balança utilizada no ensaio foi devidamente calibrada, a fim de assegurar a confiabilidade e a precisão das medições de massa.

Após a moldagem, as amostras foram submetidas à secagem ao ar livre por um período de seis horas, etapa durante a qual foram realizadas pesagens periódicas para o acompanhamento da perda de umidade. As medições de massa foram registradas a cada 5 minutos nos primeiros 30 minutos, a cada 10 minutos ao longo da 1 hora e 30 minutos subsequentes, a cada 30 minutos durante a hora seguinte e, posteriormente, em intervalos de 1 hora ao longo das três horas finais desse período. Em cada pesagem, o corpo de prova foi cuidadosamente posicionado sobre a balança, de modo a evitar danos ao material e interferências nos resultados.

Concluída a etapa de secagem ao ar livre, os blocos foram desmoldados e acondicionados em estufa elétrica, onde permaneceram por 48 horas, com o objetivo de se obter a massa seca do material. Após esse período, novas pesagens foram realizadas aos 24 e 48 horas, possibilitando o acompanhamento da variação de massa até a obtenção da condição de equilíbrio higroscópico, necessária para a determinação dos parâmetros de umidade do concreto permeável.

Após a realização do ensaio, foi possível determinar os seguintes parâmetros: o conteúdo de umidade em base seca (X_{bs}), calculado em relação à massa seca do produto, e o conteúdo de umidade em base úmida (X_{bu}), determinado em relação à massa total do material. Esses parâmetros foram obtidos por meio das Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (1)$$

$$X_{bu} = 100 \cdot \frac{m_{H_2O}}{m_t} = 100 \cdot \frac{m_{H_2O}}{(m_{H_2O} + m_s)} \quad (2)$$

$$U_r = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} \text{ Total}} \quad (3)$$

Onde:

m_{H_2O} é massa de água em relação ao tempo;

m_t é a massa total do bloco;

m_s é a massa seca do bloco;

$m_{H_2O} \text{ Total}$ é a massa total de água;

U_r é a umidade relativa.

Os modelos empíricos disponíveis na literatura foram utilizados para representar a curva de secagem ao ar livre do bloco permeável, destacando-se os modelos de Page, Henderson e Midili, os quais estão descritos nas Equações 4, 5 e 6, respectivamente, conforme apresentado por Ramaj, Schockand e Müller (2021).

$$X_{bs} = e^{-kt^n}, \text{ no que } k \text{ e } n \text{ são parâmetros do modelo} \quad (4)$$

$$X_{bs} = ae^{-kt}, \text{ no que } a \text{ e } k \text{ são parâmetros do modelo} \quad (5)$$

$$X_{bs} = ae^{-kt^n} + bt, \text{ na qual } a, k, n \text{ e } t \text{ são parâmetros do modelo} \quad (6)$$

Os parâmetros dos modelos foram determinados exclusivamente com o auxílio da ferramenta do Microsoft Excel, sendo utilizados como estimativas iniciais para proporcionar maior precisão no ajuste das curvas. O procedimento metodológico consistiu na organização dos dados experimentais, na construção do gráfico de dispersão dos valores de X_{bs} em função do tempo e na aplicação do ajuste não linear por meio da inserção das equações dos modelos empíricos no próprio Excel. Após a realização dos cálculos, foram obtidos os valores finais dos parâmetros de cada modelo, bem como seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), possibilitando a avaliação da qualidade dos ajustes realizados.

3. RESULTADOS

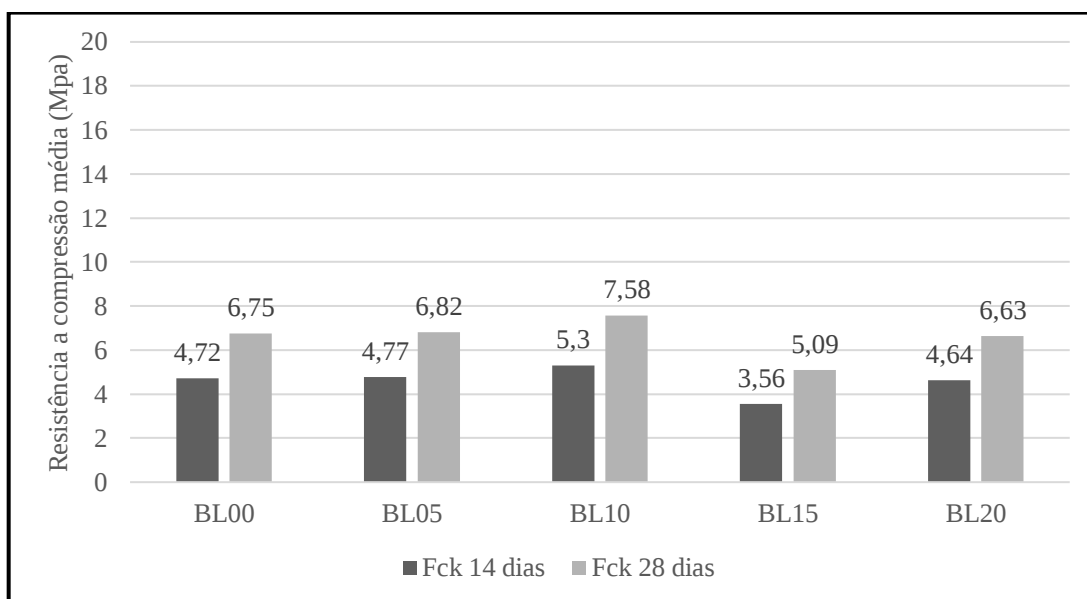
São apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados com os blocos intertravados de concreto permeável produzidos com diferentes teores de resíduo de

mineração de rocha calcária como substituição parcial do cimento, correspondentes a 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. A análise tem como objetivo avaliar a influência da incorporação do resíduo nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos blocos, possibilitando a comparação do desempenho entre as diferentes dosagens e a identificação do teor mais adequado para a aplicação proposta.

3.1 Resistência à compressão dos blocos

A partir dos valores de carga máxima suportados pelos blocos durante o ensaio de compressão, determinou-se a resistência característica à compressão média aos 14 dias de idade. Assumindo que o bloco atingiu 70% da resistência prevista aos 28 dias, foi estabelecida a resistência à compressão dos blocos para fins de verificação à NBR 9781 (2013). Para cada um dos cinco traços adotados neste estudo, foi feito o cálculo de compressão para os 14 dias e 28 dias uma estimativa, os quais são apresentados os resultados na Figura 2.

Figura 2: Resistência à compressão característica dos blocos.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos resultados apresentados na Figura 2, observa-se que o ensaio de compressão revelou comportamentos distintos entre os blocos intertravados em função do teor de resíduo de calcário incorporado às misturas. De modo geral, os valores de resistência característica média aos 14 dias variaram entre 3,56 MPa e 5,30 MPa, indicando que a substituição parcial do cimento pelo resíduo influenciou diretamente o desempenho mecânico dos blocos. Entretanto, apesar das variações observadas entre os traços, nenhum dos blocos avaliados

atingiu a resistência mínima à compressão de 20 MPa aos 28 dias, exigida pela NBR 9781 (2013) para blocos destinados à pavimentação.

O traço de referência (BL00) apresentaram resistência média aos 14 dias de 4,72 MPa, com resistência estimada aos 28 dias de 6,75 MPa, servindo como base de comparação para avaliar os efeitos da substituição do cimento. Em relação a esse traço, percebe-se que teores moderados de resíduo (como no BL05 e BL10) não comprometeram a resistência do bloco.

O traço BL10 apresentou o melhor desempenho mecânico, com resistência média aos 14 dias de 5,30 MPa e resistência estimada aos 28 dias de 7,58 MPa, evidenciando que a adição de 10% de resíduo de calcário contribuiu positivamente para a resistência à compressão. Esse comportamento pode estar associado ao efeito fíler do resíduo, que promove um melhor empacotamento das partículas, reduzindo vazios e favorecendo a matriz cimentícia.

Por outro lado, os traços BL15 e BL20, quando comparados ao traço de referência (BL00), apresentaram resistências médias inferiores ao valor padrão. Esse resultado indica que teores mais elevados de substituição tendem a prejudicar a resistência à compressão, possivelmente devido à redução do teor de material cimentante efetivo, comprometendo a coesão e a capacidade resistente do bloco.

De forma geral, os resultados indicam que a incorporação do resíduo de calcário é tecnicamente viável até determinados teores, destacando-se o traço BL10 como o mais eficiente do ponto de vista da resistência à compressão. Esses resultados são relevantes para a verificação conforme a NBR 9781 e demonstram o potencial de uso do resíduo como material alternativo, desde que adotadas proporções adequadas.

Em resumo, nas condições estudadas, nenhum dos blocos intertravados produzidos apresentou resistência suficiente para aplicação em pavimentação, conforme os critérios da NBR 9781. Os resultados indicam a necessidade de ajustes no traço, no teor de cimento, no processo de fabricação ou nas condições de cura, caso se pretenda viabilizar tecnicamente o uso do resíduo de calcário na produção de blocos para pavimentação.

3.2 Coeficiente de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade dos blocos foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16416, que trata dos requisitos e métodos de ensaio para pavimentos permeáveis de concreto. A partir do ensaio, foi possível determinar o coeficiente de permeabilidade dos diferentes traços analisados, considerando o tempo de percolação da água através dos corpos de prova. Os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade, expressos

em mm/h e m/s, encontram-se apresentados na Tabela 2, evidenciando o desempenho hidráulico dos blocos e permitindo a comparação entre os diferentes teores de adição de resíduo de calcário empregados neste estudo.

Tabela 2: Coeficiente de permeabilidade.

Blocos	Coeficiente de permeabilidade (mm/h)	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	Conformidade com a NBR 16416
BL00	24842,10	6,90E-03	Conforme
BL05	27100,48	7,53E-03	Conforme
BL10	23848,42	6,62E-03	Conforme
BL15	26149,58	7,26E-03	Conforme
BL20	30574,90	8,49E-03	Conforme

Fonte: Autoria própria, (2025).

Conforme observado na Tabela 2, todos os blocos produzidos com o resíduo do calcário apresentaram elevado grau de permeabilidade, com valores do coeficiente variando entre 6,62 e 8,49 m/s. Dentre os traços analisados, o único traço que ficou inferior ao traço padrão foi o traço com 10% de adição de resíduo, o qual apresentou o menor valor dentre as composições avaliadas, já os outros traços foram todos superiores ao padrão, e também todos foram superiores ao limite mínimo estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que é de 0,001 m/s.

Os elevados valores de permeabilidade podem ser atribuídos à ausência de areia (agregado miúdo) na composição do concreto permeável, o que favoreceu a formação de uma estrutura com maior volume de vazios interconectados, facilitando o escoamento da água através do material. A redução da quantidade de agregado miúdo ou sua completa eliminação, como adotado no presente estudo, tende a promover o aumento da porosidade do material, em decorrência do maior número de vazios formados na matriz (Batezini, 2013). Dessa forma, no que se refere à determinação do índice de vazios, já eram esperados valores elevados, os quais estão associados à descontinuidade da massa provocada pelas características dos materiais empregados neste estudo.

De maneira geral, a incorporação do resíduo de calcário influenciou diretamente o comportamento hidráulico dos blocos, favorecendo o aumento da permeabilidade à medida que se elevou o teor de resíduo. Esses resultados demonstram que, embora os blocos não tenham atingido a resistência mínima exigida pela ABNT NBR 9781 para pavimentação de pedestres, apresentam desempenho satisfatório quanto à capacidade de infiltração, o que os torna

promissores para aplicações onde a permeabilidade é um requisito prioritário, como drenagem superficial, áreas sem tráfego e soluções sustentáveis de manejo de águas pluviais.

3.3 Secagem dos blocos

O ensaio de secagem ao ar livre foi monitorado ao longo de um período de 6 horas. A partir dos dados obtidos, foi possível determinar as umidades necessárias para a construção da curva de secagem do material, conforme apresentado na Tabela 3. Após a conclusão das medições em condições ambientais, o material foi transferido para uma estufa. Decorridas 24 horas, realizou-se a primeira pesagem e, após mais 24 horas de secagem, efetuou-se uma nova pesagem, permitindo o acompanhamento da variação de massa do material ao longo do processo.

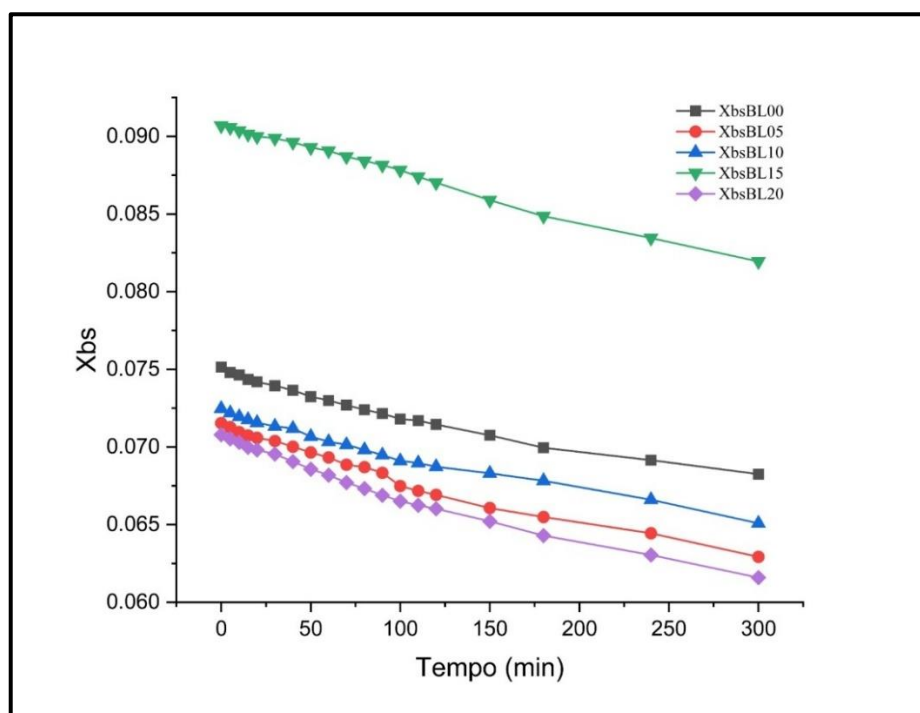
Tabela 3: Dados experimentais das curvas de secagem do bloco fabricado com resíduo do calcário.

Tempo (min)	XbsBL00	XbsBL05	XbsBL10	XbsBL15	XbsBL20
0	7,51%	7,15%	7,25%	9,07%	7,08%
5	7,48%	7,13%	7,22%	9,06%	7,05%
10	7,46%	7,10%	7,19%	9,04%	7,03%
15	7,43%	7,07%	7,18%	9,01%	7,00%
20	7,42%	7,06%	7,16%	9,00%	6,98%
30	7,39%	7,04%	7,13%	8,99%	6,95%
40	7,36%	7,00%	7,12%	8,96%	6,91%
50	7,32%	6,96%	7,07%	8,93%	6,86%
60	7,30%	6,93%	7,03%	8,91%	6,82%
70	7,27%	6,89%	7,01%	8,87%	6,77%
80	7,24%	6,87%	6,98%	8,84%	6,73%
90	7,21%	6,83%	6,95%	8,82%	6,69%
100	7,18%	6,75%	6,91%	8,78%	6,65%
110	7,17%	6,72%	6,90%	8,74%	6,62%
120	7,14%	6,69%	6,87%	8,70%	6,60%
150	7,07%	6,61%	6,83%	8,59%	6,52%
180	6,99%	6,55%	6,78%	8,49%	6,43%
240	6,91%	6,44%	6,66%	8,35%	6,30%
300	6,83%	6,29%	6,51%	8,19%	6,16%

Fonte: Autoria própria, (2025).

A interpretação da curva de secagem pode ser realizada a partir de diferentes combinações das variáveis calculadas com base nos dados experimentais. Neste estudo, seguindo a metodologia proposta por Silva et al. (2022), optou-se pela representação gráfica que relaciona o conteúdo de umidade em base seca com a variação do tempo. Dessa forma, considerou-se o intervalo desde a moldagem do bloco até as 6 horas em que o material permaneceu em processo de secagem ao ar livre.

Figura 3: Curvas de secagens.



Fonte: Autoria própria, (2025).

A Figura 3 apresenta as curvas de secagem do material, expressas pelo conteúdo de umidade em base seca (X_{bs}) em função do tempo, para as diferentes composições analisadas (XbsBL00, XbsBL05, XbsBL10, XbsBL15 e XbsBL20). Observa-se que, independentemente da composição, todas as amostras apresentaram comportamento semelhante, caracterizado pela redução progressiva do teor de umidade ao longo do tempo de secagem ao ar livre.

Nos instantes iniciais, verifica-se uma maior taxa de perda de umidade, associada à evaporação da água livre presente na superfície do material. Com o avanço do tempo, essa taxa tende a diminuir, indicando a predominância da difusão da umidade do interior para a superfície, comportamento típico de processos de secagem em materiais porosos. As diferenças

observadas entre as curvas estão relacionadas às distintas composições do material, que influenciam diretamente a retenção de água e a estrutura interna dos poros.

Baseado nos dados experimentais já apresentados na Tabela 3 e nos diversos modelos matemáticos de secagem validados na literatura, foi possível estabelecer apenas o ajuste da curva de secagem ao Modelo de Henderson. Os demais não foram possíveis de serem ajustados aos dados experimentais, indicando que não atendem aos comportamentos descritos nesses modelos teóricos. O Quadro 2 traz os coeficientes do modelo de Henderson e coeficiente de determinação (R^2) para todos os blocos.

Quadro 2: Parâmetros do modelo de Henderson.

Amostra	Parâmetro		R^2
	a	k	
BL00	0,07459	3,30E+01	0.97401
BL05	0,7114	4,42E+01	0.97841
BL10	0,07202	3,49E+01	0.98173
BL15	0,09077	3,48E+01	0.99553
BL20	0,07031	4,80E+01	0.97994

Fonte: Autoria própria, (2025).

O Quadro 2 apresenta os parâmetros a e k do modelo de Henderson, bem como o coeficiente de determinação (R^2) para as amostras BL00 a BL20. De modo geral, observa-se que os valores de R^2 são elevados (entre 0,97 e 0,99), indicando excelente ajuste do modelo de Henderson aos dados experimentais para todas as amostras analisadas.

O parâmetro a apresentou variações moderadas entre as amostras, com destaque para a BL15, que exibiu o maior valor, sugerindo uma maior influência desse parâmetro no comportamento do modelo para essa composição. Já o parâmetro k , relacionado à taxa do processo descrito pelo modelo, mostrou variações mais significativas, especialmente para as amostras BL05 e BL20, que apresentaram os maiores valores, indicando um processo mais intenso ou rápido em comparação às demais.

De forma geral, os resultados evidenciam que o modelo de Henderson é adequado para representar o fenômeno estudado, sendo capaz de descrever satisfatoriamente as diferenças de

comportamento entre as amostras, possivelmente associadas às variações de composição representadas pelos teores dos blocos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a incorporação do resíduo proveniente da mineração de rocha calcária, na forma pulverulenta, como substituição parcial do cimento na produção de blocos intertravados de concreto permeável. Os resultados evidenciaram que a adição do resíduo influenciou o desempenho mecânico, hidráulico e o comportamento de secagem dos blocos.

Em relação à resistência à compressão, o traço com 10% de resíduo apresentou o melhor desempenho entre as composições analisadas, possivelmente devido ao efeito filer do material. Contudo, nenhum dos blocos atingiu a resistência mínima de 20 MPa aos 28 dias, exigida pela ABNT NBR 9781 (2013), o que inviabiliza sua aplicação em pavimentação intertravada nas condições estudadas.

Por outro lado, todos os traços apresentaram coeficientes de permeabilidade superiores ao valor mínimo estabelecido pela ABNT NBR 16416 (2015), demonstrando elevado desempenho hidráulico, associado à elevada porosidade do concreto permeável. A análise da secagem mostrou comportamento típico de materiais porosos, sendo o modelo de Henderson o mais adequado para representar os dados experimentais, com elevados coeficientes de determinação.

De forma geral, conclui-se que a incorporação do resíduo de calcário mostrou-se promissora sob o ponto de vista hidráulico e ambiental, porém requer ajustes no traço e no processo produtivo para atender às exigências mecânicas normativas. Ainda assim, os blocos apresentam potencial para aplicações sem solicitação estrutural significativa, contribuindo para soluções sustentáveis de manejo de águas pluviais, além de contribuírem para a sustentabilidade ao promover o reaproveitamento de resíduos da mineração.

5. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16416:2015 – Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** 2015.

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

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

BOLZAN, M. V. **Estudo da utilização de resíduos da mineração de calcário na produção de blocos de concreto para construção civil.** 2025. Disponível em:
<https://repositorio.unipampa.edu.br/server/api/core/bitstreams/010d2e68-1efa-4665-ab4f-b7be1631a8d6/content>. Acesso em: 23 dez. 2025.

LEAL, C. E. F. **Peças para Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo de Viabilidade Técnica na Incorporação de Agregado Reciclado.** 2018. Disponível em:
<https://repositorio.ufscar.br/items/7c0a8cd0-f523-46f1-ab65-6e14f8cba5b5>. Acesso em: 20 set. 2025.

MOURA, T. A. M. **Estudo Experimental De Superfícies Permeáveis Para O Controle Do Escoamento Superficial Em Ambientes Urbanos.** Universidade de Brasília. Brasília. 2005.

RAMAJ, Iris; SCHOCK, Steffen; MÜLLER, Joachim. **Drying Kinetics of Wheat (*Triticum aestivum* L., cv. ‘Pionier’) during Thin-Layer Drying at Low Temperatures.** Applied Sciences, [S.L.], v. 11, n. 20, p. 9557, 14 out. 2021. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/app11209557>. Acesso em: 19 ago. 2025.

SILVA FILHO, A. I. **Incorporação De Resíduos Da Construção Civil Na Produção De Concreto: Revisão De Literatura.** 2023. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco - CAA, Caruaru, 2023. Disponível em:
<https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/54405/4/TCC%20Andr%c3%a9%20In%c3%a1cio%20da%20Silva%20Filho.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

SILVA, P. H. P. **Avaliação do Desempenho de Pavers Fabricados com Resíduos de Caulim.** 2013. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2013a. Disponível em:
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/12374/PEDRO%20HUGO%20PEREIRA%20DA%20SILVA%20-%20TCC%20-%20ENGENHARIA%20AMBIENTAL%202013.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2025.

SOUZA, B. C. G.; TRIGO, A. P. M.; FURINI, R. C. B.; SIMÕES, M. N.; ANONI, L. G. **Dosagem de pavers de concreto permeável com agregado reciclado misto.** Concreto & Construções, [S.L.], v., n. 108, p. 76-80, 2022. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2022.108.0005>. Acesso em: 19 ago. 2025.

WANG, D. et al. **Effect of limestone waste on the hydration and microstructural properties of cement-based materials.** Construction and Building Materials, v.443, 137784, 2024. Disponível em:
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182402926X?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 23 dez. 2025