

# Avaliação das propriedades mecânicas e de permeabilidade de peças de concreto permeável contendo resíduos de rocha ornamental

*Evaluation of the mechanical properties and permeability of permeable paver containing ornamental stone wastes*

Otávio Gaigher Simões   
Júlia Cordeiro Zanotelli   
Ronaldo Pilar   
Rudiele Aparecida Schankoski 

## Resumo

**S**ão geradas, anualmente no Brasil, grandes quantidades de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), em sua maioria destinados a aterros sanitários, formando um preocupante passivo ambiental. A fim de contribuir com soluções que minimizem o seu descarte e ainda agregar valor técnico a esse material, é proposto o uso desse resíduo para produção de pavimentos permeáveis. Para tanto, foram produzidos concretos permeáveis no formato de blocos intertravados (pavers), contendo teores de 0, 5, 10 e 15% de RBRO em substituição (em volume) ao cimento Portland. Ensaios de permeabilidade, porosidade e resistência mecânica foram conduzidos, de acordo com a NBR 16416:2015. Para os resultados de resistência mecânica, as peças com substituição de 5% e 10% alcançaram a resistência característica (f<sub>pk</sub>) mínima, enquanto o paver com 15% de substituição de cimento por RBRO não obteve um resultado satisfatório. Os resultados de porosidade e permeabilidade foram satisfatórios, com resultados acima de 16,6% e 5.000 milímetros por hora, respectivamente, para todas as misturas testadas.

**Palavras-chave:** Paver permeável. Bloco intertravado. Permeável. Resíduo de rochas ornamentais. Granito.

## Abstract

*In Brazil, large amounts of ornamental stone processing waste (OSPW) are generated annually, mainly destined for landfills, creating a worrying environmental liability. To contribute to solutions that minimize its disposal and add technical value to this material, this paper recommends using this waste to produce permeable paving. To this end, pervious concretes were produced in the shape of interlocking blocks (pavers), containing levels of 0, 5, 10, and 15% of OSPW in replacement (by volume) of Portland cement. Permeability, porosity, and mechanical strength tests were conducted based on the prescriptions of NBR 16416:2015. For the mechanical strength results, the pieces with 5% and 10% replacement reached the minimum characteristic strength (FPK). In comparison, the paver with 15% of cement replacement by OSPW did not obtain a satisfactory result. The results of porosity and permeability were satisfactory, with results above 16.6% and 5,000 millimeters per hour, respectively, for all mixtures tested.*

**Keywords:** Permeable paver. Interlocking block. Pervious. Ornamental stone waste. Granite.

<sup>1</sup>Otávio Gaigher Simões

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo  
Vila Velha - ES - Brasil

<sup>2</sup>Júlia Zanotelli

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre - RS - Brasil

<sup>3</sup>Ronaldo Pilar

<sup>3</sup>Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória - ES - Brasil

<sup>4</sup>Rudiele Schankoski

<sup>4</sup>Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória - ES - Brasil

Recebido em 15/12/22  
Aceito em 02/05/23

## Introdução

O Brasil ocupa o quinto lugar mundial na produção de lavra e exportação de rochas processadas com uma produção de 8,0 milhões de toneladas em 2018 (ABI..., 2019). Estima-se que os resíduos provenientes de rochas ornamentais podem chegar a 30% do bloco após a fase de corte (VAZZOLER *et al.*, 2018).

Na grande maioria dos casos as empresas que geram os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) encontram pouco ou nenhum destino para utilização desses materiais, sendo grande parte do volume gerado depositado em pátios e aterros, o que acaba formando um passivo ambiental. O seu descarte é complexo, o seu armazenamento gera custos, além do material poder contaminar o ar e a água devido à sua natureza extremamente fina (GALETAKIS; SOULTANA, 2016). Dessa forma, buscar soluções de reutilização desse subproduto possui importância ambiental, econômica e operacional. No que se refere aos materiais cimentícios convencionais (pastas, argamassas e concretos), pesquisas na área têm mostrado que o uso de RBRO na composição de misturas apresentam resultados promissores (CALMON *et al.*, 2007; BACARJI *et al.*, 2013; AREL, 2016; VAZZOLER *et al.*, 2018).

Dentro do contexto de sustentabilidade, buscando materiais alternativos que minimizem problemas ambientais devido ao crescimento das cidades, um tipo de concreto vem se destacando como alternativa, denominado concreto permeável. Ele é usado em pavimentação seja na forma de blocos, conhecidos como peças de concreto permeáveis ou blocos intertravados (pavers), ou como revestimento contínuo. Destaca-se que essa solução (concreto permeável) apresenta algumas vantagens que colaboram para a proteção do meio ambiente nos centros urbanos, tais como: possibilidade de infiltração das águas pluviais rapidamente para o solo, de modo que os recursos hídricos subterrâneos podem ser renovados, além de ser uma estratégia para o gerenciamento do escoamento de água pluviais; diminuição dos ruídos de veículos, devido à capacidade do concreto permeável de absorvê-los, o que cria um ambiente confortável ao usuário das vias do ponto de vista funcional; diminuição de derrapagem de veículos em dias chuvosos, aumentando a segurança viária; absorção de poluentes e filtragem de sólidos em suspensão, melhorando a qualidade do ar; e conforto térmico, pois os poros do concreto permeável podem ajustar a temperatura e a umidade do ambiente, diminuindo o fenômeno de ilha de calor (YANG; JIANG, 2003; IBRAHIM *et al.*, 2014). A Figura 1 apresenta a comparação entre paver tradicional e o permeável.

Considerando a busca por materiais mais sustentáveis, existem muitos estudos na literatura sobre o uso de materiais residuais em concreto permeável, objetivando o desenvolvimento de uma solução de infraestrutura verde. Cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escórias, lama vermelha, cinza da casca do arroz, casca de óleo de palma, resíduos de conchas, resíduos de construção e demolição, vidros triturados e borracha de pneu são alguns exemplos de materiais residuais avaliados nesse tipo de solução (CHEN *et al.*, 2019; LANG; DUAN; CHEN, 2019; LI *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2019; PECEÑO *et al.*, 2019).

Figura 1 - Comparação entre paver comum e paver permeável



Embora muitos desses estudos relatem um bom desempenho técnico do concreto permeável, no que se diz respeito à resistência à compressão, flexão e permeabilidade, suas propriedades físico-mecânicas variam consideravelmente em função do tipo de resíduo aplicado (TOGHROLI *et al.*, 2017). O RBRO é um resíduo produzido em larga escala no Brasil e pouco se conhece acerca de concretos permeáveis produzidos com esse material. Dessa forma, a presente pesquisa concentra-se na utilização do resíduo de beneficiamento da etapa de corte de rocha ornamental granítica como constituinte de concreto permeável, mais especificamente para fabricação de peças de concreto permeável, utilizados em pavimentação urbana.

## Método

Para o estudo foram produzidos blocos de concreto (pavers) permeáveis em escala industrial, em uma fábrica de pré-moldados.

Os materiais utilizados para fabricação dos pavers foram os seguintes:

- cimento Portland CPV-ARI, com caracterização disponibilizada pelo fabricante apresentada na Tabela 1 e massa específica igual a 3,17 kg/dm<sup>3</sup>; e
- agregados: agregado graúdo gnáissico 4,75/12,5 mm (Brita 0), e granilha gnáissica (dimensão máxima característica de 6,3 mm), com massas específicas iguais a 2,77 g/cm<sup>3</sup> e 2,75 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A distribuição granulométrica dos agregados pode ser observada na Figura 2.

O resíduo de beneficiamento de rocha ornamental (RBRO) granítico, proveniente do processo de corte via tear de fios diamantados, foi obtido em um aterro na forma de lama. Para caracterização e uso, foi realizada uma secagem em estufa a 100 °C por 24 horas, e, posteriormente, destorroamento e peneiramento em peneira de 150 µm. A massa específica do material foi de 2,73 kg/dm<sup>3</sup> e área superficial Blaine de 4.021,94 cm<sup>2</sup>/g. Na Figura 3 é apresentada a difração de raios X (DRX) do resíduo, realizado por meio de difratômetro D8 Advanced, da marca Bruker, por comparação com os padrões do banco de dados COD (Crystallography Open Database). Pode-se observar a estrutura cristalina do material, com picos nítidos além de uma linha de base horizontal. A grande presença de quartzo e mica na composição química do material estudado confere a este características típicas de rocha granítica.

Foi realizado ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o RBRO, com finalidade de observar a morfologia dos grãos, e ter maior entendimento se estes influenciariam nos resultados obtidos. A Figura 4 mostra as imagens a, b e c com diferentes aproximações. Observa-se que os grãos têm formas majoritariamente lamelares.

Tabela 1 - Laudo do cimento utilizado para as misturas

Ensaio químico				
Ensaio	Unidade	Média	Especif. NBR 16697/18	
PF 950 C	%	9,05	≤ 12,50	
SO <sub>3</sub>	%	3,11	≤ 4,50	
RI	%	2,41	≤ 7,50	
CaOI	%	1,41	não aplicável	
MgO	%	1,26	não aplicável	
Ensaio físico				
Ensaio	Unidade	Média	Especif. NBR 16697/18	
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	5159,00	não aplicável	
Ret. 75 mic	%	0,20	≤ 10,00	
Ret. 45 mic	%	0,60	não aplicável	
IP	min	139,00	≥ 60,00	
Espansib LeCh	mm	0,00	≤ 5,00	
FP	min	183,00	não aplicável	
Resistência à compressão				
Ensaio	Unidade	Desvio	Média	Especif. NBR 16697/18
Resist. Comp. 1D	MPa	0,69	22,6	não aplicável
Resist. Comp. 3D	MPa	1,11	30,5	≥ 15,00
Resist. Comp. 7D	MPa	0,74	36,5	≥ 25,00
Resist. Comp. 28D	MPa	0,23	43,3	≥ 40,00

Figura 2 - Análise granulométrica dos agregados

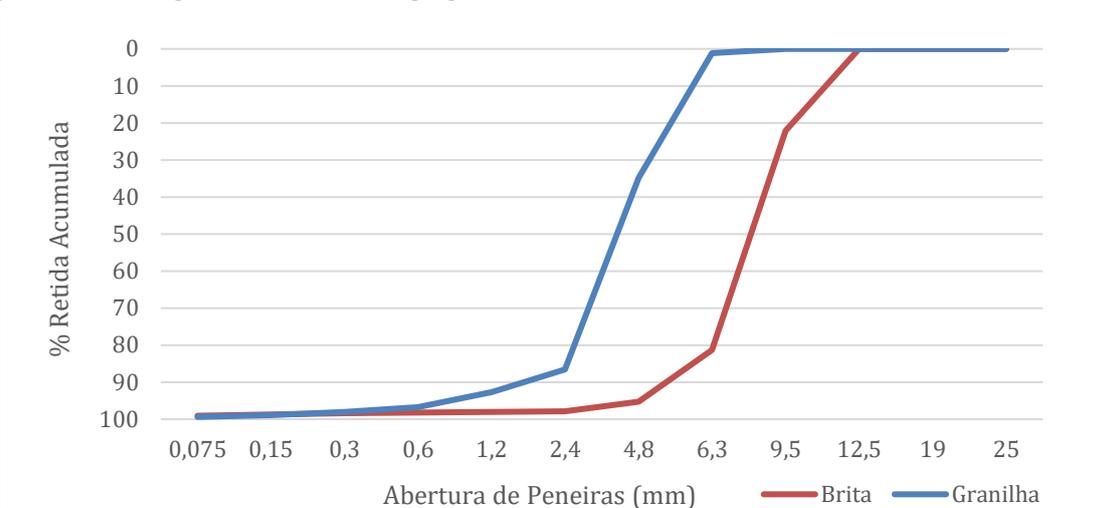


Figura 3 - Difratoograma do RBRO

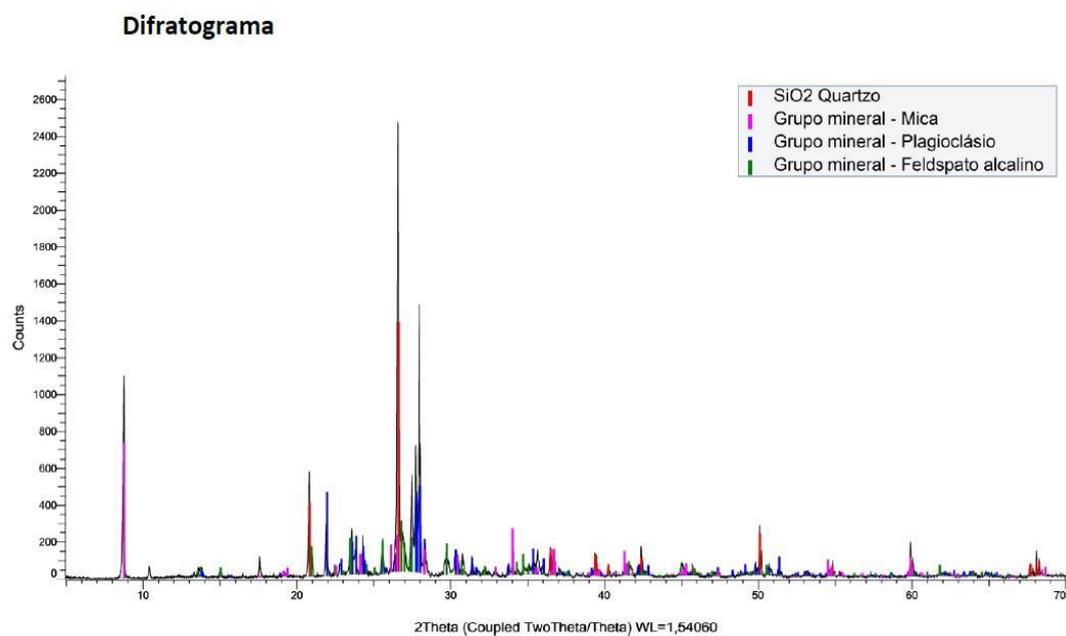
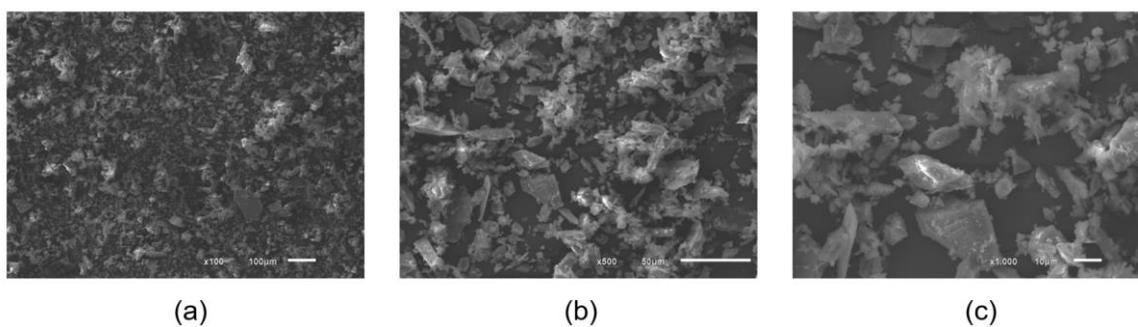


Figura 4 - Imagem de MEV do RBRO



## Proporcionamento das misturas

Inicialmente, foi realizado um estudo-piloto para a mistura referência, contendo apenas cimento, para definir um teor ótimo de agregado graúdo em função da composição granulométrica e índice de vazios (15 a 35%), seguindo as recomendações da ACI 522 (AMERICAN..., 2010). Para concreto permeável é usual dispensar o uso de agregados miúdos, uma vez que estes podem interferir fortemente nas suas características permeáveis, reduzindo a quantidade e o tamanho dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2014; CARMICHAEL *et al.*, 2021; ALSHAREEDAH, NASSIRI, 2021). Para definição do teor de água, verificou-se a umidade por meio de um procedimento empírico chamado “ponto de pelota”. O procedimento consiste em adicionar água gradualmente até que a mistura consiga ser moldada manualmente, mantendo a coesão (sem esfarelar), conforme metodologia apresentada por Matos *et al.* (2019).

Para a definição do consumo de cimento, buscou-se um fpk mínimo de 20,0 MPa, para adequação adequar à NBR 16416 (ABNT, 2015) (pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos). Para determinação da dosagem do concreto, estipulou-se um teor de ar incorporado na matriz de 20%.

Com isso pode-se obter o proporcionamento das misturas apresentado na Tabela 2. Foram produzidas 4 composições de pavers permeáveis, cada um contendo um teor de substituição (em volume) de cimento Portland pelo RBRO, a saber: 0, 5, 10 e 15%.

## Produção dos pavers

A fabricação dos pavers foi realizada em escala real, em fábrica de pré-moldados, por meio do processo de vibro prensagem “multicamadas”, máquina modelo FDA Evo (Figura 5), com um tempo de vibração/compactação médio de 10 segundos, produzindo pavers de 10,0 cm de largura, 20,0 cm de comprimento e 8,0 cm de altura (Figura 6). Todas as misturas foram executadas no mesmo dia, sob as mesmas condições da fábrica.

## Ensaio realizados

No estado fresco, foi realizada uma avaliação qualitativa da trabalhabilidade, baseada na capacidade de moldagem do equipamento durante a fabricação dos pavers. Já no estado endurecido, foram coletados 30 pavers, por traço fabricado, os quais foram submetidos aos ensaios de massa específica, porosidade (AMERICAN..., 2012), permeabilidade (ABNT, 2015) e resistência à compressão (ABNT, 2013).

Tabela 2 - Proporcionamento das misturas para produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto

Traço	Cimento (kg)	Brita 0 (kg)	Granilha (kg)	RBRO (kg)	Água (kg)
Referência	323	577	1154	0	67
5% RBRO	307			14	
10% RBRO	291			28	
15% RBRO	275			42	

Figura 5 - Vibro-prensas "multicamadas" EVO



Figura 6 - Rede de poros interconectados de uma peça de concreto permeável fabricada, contendo RBRO



### Massa específica aparente

A massa específica no estado fresco não pode ser realizada nos corpos de prova, pela impossibilidade de movimentação dos paovers logo após a mistura. Portanto, foi realizada no estado endurecido. Para cada concreto, 6 unidades foram medidas e pesadas, para cálculo da massa específica no estado endurecido.

### Porosidade

A porosidade do concreto permeável no estado endurecido foi determinada baseando-se na norma C1754 (AMERICAN..., 2012), com adaptações apresentadas por Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010).

O teste consiste em primeiramente pesar e registrar a massa do corpo de prova seco, depois cobri-lo com silicone acético com o intuito de vedar todos os poros periféricos. Todo o conjunto deve ser pesado novamente, registrando-se a massa. O objetivo do ensaio é aplicar um volume de água conhecido no concreto permeável, até que ele seja saturado com todos os poros preenchidos, o silicone acético evita que a água escape. Então, leva-se em consideração a diferença de peso da amostra seca e saturada, obtendo assim o volume de vazios do concreto permeável e, conseqüentemente, sua porosidade.

Originalmente, a vedação dos poros periféricos é feita para corpos de prova cilíndricos, por meio de filme PVC e um molde metálico. Entretanto, como os corpos de prova utilizados no trabalho são paralelepípedicos, foi necessário utilizar silicone acético como adaptação.

Para a realização do ensaio, 3 corpos de prova de cada mistura foram submetidos aos testes de porosidade, com cálculo da média e desvio padrão para determinação do resultado.

A Figura 7 apresenta um corpo de prova envolvido com silicone acético para a realização do ensaio.

### Permeabilidade

A avaliação da permeabilidade foi conduzida de acordo com as prescrições da NBR 16416 (ABNT, 2015), que trata dos procedimentos normativos para testes, fabricação e execução de pavimentos permeáveis. Para a realização desse ensaio, foram necessários os seguintes materiais:

- (a) anel cilíndrico de infiltração com 300 mm de diâmetro;
- (b) balança com resolução de 0,1 g;
- (c) recipiente com volume mínimo de 3,6 litros, que permita um derramamento controlado da água;
- (d) cronômetro com resolução de 0,1 segundos;
- (e) silicone; e
- (f) água limpa.

Para a realização do ensaio, foi construído um sistema de drenagem. Uma cava com aproximadamente 40 centímetros de profundidade foi escavada no solo, e preenchida com camadas de agregados graúdos com classificação granulométricas de 9,5/19,0 e 19,0/38,0, também chamados comercialmente de brita 1 e brita 2, respectivamente, formando a base e a sub-base. E por fim areia fina com módulo de finura de 1,74 para a camada de nivelamento. O sistema simulador de drenagem é mostrado nas Figuras 8 e 9.

Figura 7 - Execução do ensaio de porosidade com silicone acético



Figura 8 - Agregado graúdo utilizado para o sistema simulador de drenagem



Figura 9 - Sistema simulador de drenagem concluído



Para a realização do ensaio de permeabilidade, foram seguidas a orientação da NBR 16416 (ABNT, 2015). Para cada tipo de peça, o ensaio de permeabilidade foi realizado com três amostras diferentes, obtendo-se a média e desvio padrão. Dezesesseis (16) pavers, rejuntados com areia fina, foram dispostos com o intuito de simular um pavimento permeável. O anel cilíndrico, com duas marcações no seu interior, foi colado sobre os pavers com silicone acético, de modo que não permitisse vazamentos, exceto por dentro do pavimento permeável, conforme se observa na Figura 10.

Figura 10 - Anel cilíndrico para a execução do ensaio de permeabilidade



Com o sistema concluído, o teste foi executado. Este consiste em, primeiramente, executar uma pré-molhagem no sistema de 30 segundos. Após a pré-molhagem, despejar controladamente 3,6 litros de água e manter o seu nível dentro das marcações indicativas no interior do anel cilíndrico, marcando o tempo necessário para completa infiltração, com um cronômetro de resolução de 0,1 segundos.

O coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) se dá, conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015), pela Equação 1, em que é avaliada a relação entre a capacidade de permeabilidade do pavimento, pelo tempo necessário para a infiltração total da água.

$$K = \frac{C.m}{(d^2.t)} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

$k$  = coeficiente de permeabilidade (mm/h);

$C$  = fator de conversão de unidade, com valor igual a 4.583.666.000,00;

$m$  = massa de água infiltrada expressa em quilogramas (kg);

$t$  = tempo necessário para toda a água percolar expresso em segundos (s); e

$d$  = diâmetro interno do cilindro de infiltração expresso em milímetros (mm).

### Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio. Para esse ensaio, os pavers permeáveis testados (Figura 11) estavam saturados em água a  $23^\circ \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24 h e com superfícies retificadas. A máquina utilizada para os rompimentos foi a EMIC, modelo PC200C, e o fpk foi calculado posteriormente à obtenção dos resultados em MPa.

### Resultados e discussões

Os procedimentos de discussões realizados nos mais recentes estudos de concreto permeável levam em consideração um comparativo entre alguns dos resultados obtidos, no que se diz respeito às principais propriedades desse tipo de concreto: porosidade, permeabilidade e resistência à compressão (IBRAHIM *et al.*, 2020; ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2021; BATEZINI *et al.*, 2021).

Portanto, essa comparação foi desenvolvida neste trabalho, a fim de se entender a relação dessas grandezas com as propriedades intrínsecas de cada um dos materiais envolvidos na fabricação, além da percepção de como influenciarão no comportamento mecânico e hidráulico dos pavers permeáveis.

## Massa específica aparente

Na Tabela 3 é apresentada a massa específica média dos pavers confeccionados, e seu respectivo desvio padrão. Percebe-se que a incorporação de RBRO diminui a massa específica do paver, uma vez que o cimento (com massa específica de  $3,17 \text{ kg/dm}^3$ ) é substituído por RBRO (com massa específica de  $2,73 \text{ kg/dm}^3$ ). Além disso, houve aumento da porosidade da mistura com a incorporação de RBRO, que será abordada no próximo item.

## Porosidade x permeabilidade

A capacidade de drenagem (permeabilidade) de um concreto permeável é uma das propriedades mais importantes desse tipo de material, e está diretamente relacionado com o volume de vazios presente na matriz (porosidade).

A Figura 12 apresenta os resultados de permeabilidade e de porosidade dos blocos intertravados confeccionados. Em relação à porosidade, os resultados variaram entre 16,6 e 18,8%, estando no limite mais inferior dos valores de porosidade apontados em diversos estudos sobre esse tipo de concreto, entre 15 e 35% (ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2021; BATEZINI *et al.*, 2021; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A baixa porosidade dos blocos intertravados confeccionados pode ser justificada pela granulometria dos agregados graúdos utilizada. Embora estudos na área (AMERICAN..., 2010; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016) tenham utilizado e sugerido agregados com classificação 9,5/25 e 19/31,5 (brita 1 e 2, respectivamente), para este trabalho os pavers foram desenvolvidos com agregados 4,75/12,5 mm (brita 0) e granilha. A redução da faixa granulométrica tipicamente utilizada na literatura se deve ao fato de que os pavers, por serem artefatos de pequeno porte, são geralmente executados com agregados de menores dimensões.

Em relação à presença de RBRO, percebe-se que a porosidade aumentou com o aumento do teor de resíduo nas misturas. O concreto referência apresentou o menor valor de porosidade porque continha o maior consumo de cimento que, ao se hidratar, produz compostos que preenchem a matriz da pasta de forma mais compacta.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) e a ACI 522R (AMERICAN..., 2010) recomendam uma permeabilidade mínima de 3.600 mm/h ( $0,001 \text{ m/s}$ ) para pavimentos de peças de concretos permeáveis. A mistura referência apresentou uma permeabilidade muito superior à mínima exigida por norma, e como se pode observar na Figura 12, o aumento do volume de vazios das misturas com RBRO acarretou, naturalmente, em um aumento da capacidade drenante.

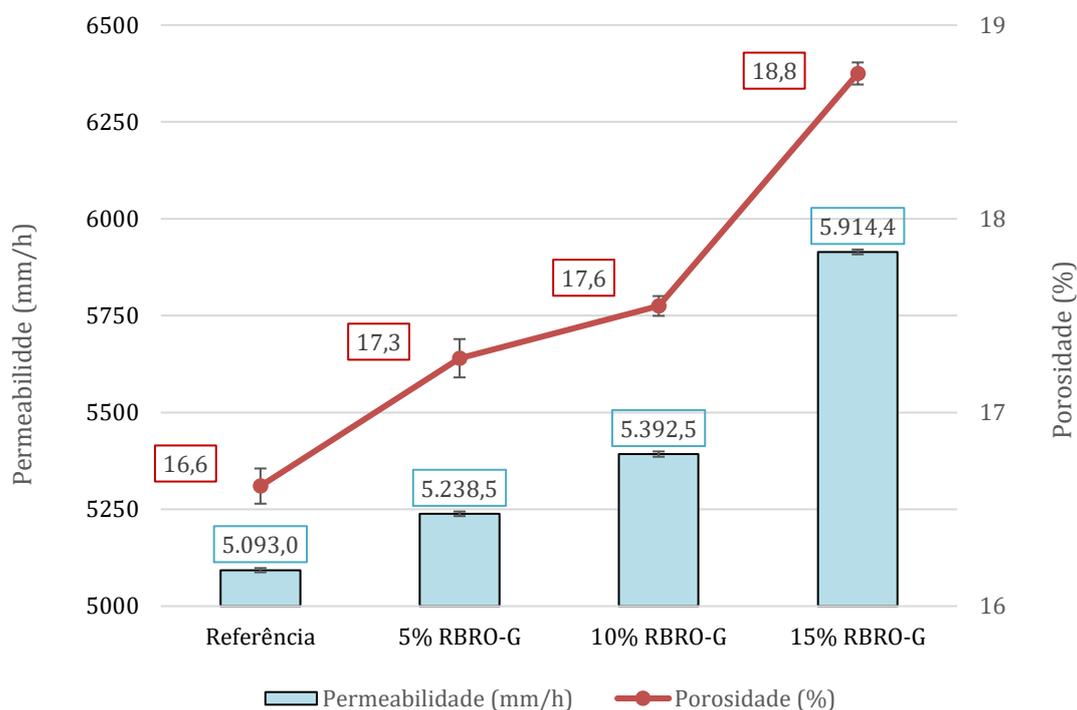
Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão



Tabela 3 - Massa específica aparente dos pavers confeccionados

Paver	Massa específica média ( $\text{kg/m}^3$ )	Desvio padrão ( $\text{kg/m}^3$ )
Referência	2233,8	22,8
5% RBRO	2215,0	23,6
10% RBRO	2209,4	14,9
15% RBRO	2156,3	18,8

Figura 12 - Permeabilidade e porosidade dos pavers



As médias dos resultados de porosidade e permeabilidade foram consideradas estatisticamente diferentes pela comparação de Tukey, com nível de significância de 5%, conforme pode ser observado na Tabela 4, confirmando que o aumento do teor de RBRO resultou em aumento nesses dois índices.

Percebe-se, portanto, que o material fino inerte (RBRO) não ocupa o macro espaço drenante dos blocos intertravados permeáveis, não comprometendo sua capacidade drenante. Alshareedah e Nassiri (2021) também observaram que, ao contrário dos agregados miúdos (areia) que reduzem significativamente os poros dos concretos permeáveis, materiais finos incorporados na mistura constituem a matriz da pasta, evitando impactos negativos na permeabilidade, mas podendo afetar a resistência mecânica.

Contudo, a capacidade de drenagem desse tipo de pavimento não está relacionada somente com a porosidade. Geralmente a permeabilidade de um concreto permeável é medida por meio de ensaios em corpo de prova individual, demonstrada pela C1701 (LEDERLE; SHEPARD; MEZA, 2020). Como este trabalho seguiu as orientações da NBR 16416 (ABNT, 2015), a permeabilidade foi mensurada em um sistema drenante construído. Então, entende-se que parte da água infiltrou-se pelas juntas existentes entre os pavers do sistema. Esse fator, sem dúvida, majorou a capacidade drenante, tornando-o extremamente eficiente no que se diz respeito à permeabilidade.

### Resistência à compressão

Na Figura 13 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos blocos intertravados com 7 e 28 dias. Como era de se esperar, houve uma diminuição gradativa da resistência à compressão com a inserção de RBRO, já que a substituição ocorreu no aglomerante. Como o RBRO é predominantemente cristalino (conforme DRX da Figura 3), a relação água/aglomerante aumentou à medida que se aumentava o teor de RBRO na mistura. Para o concreto referência a relação água/cimento foi de 0,207, sendo aumentada para 0,218, 0,230 e 0,244, para os concretos contendo 5, 10 e 15% de RBRO, respectivamente.

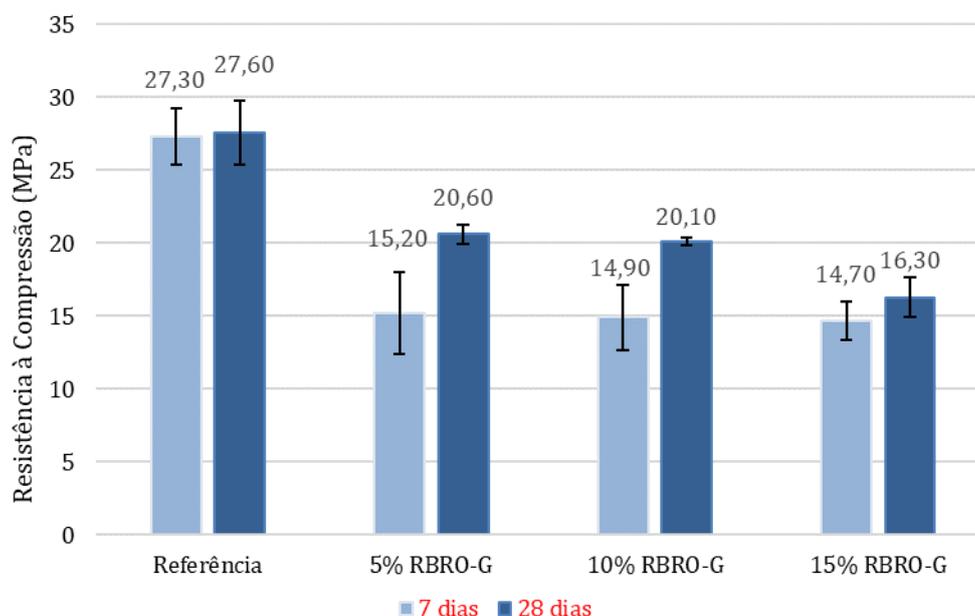
Os resultados de resistência à compressão também refletem os valores de porosidade dos pavers, sendo inversamente proporcionais. Esses resultados corroboram com estudos de Sonebi e Bassuoni (2013), Ibrahim *et al.* (2020) e Alshareedah e Nassiri (2021). Assim, ao substituir cimento por resíduos, o volume de pasta hidratada se tornou menor; isso ocasionou um aumento no índice de vazios e redução da resistência mecânica. Essa análise está de acordo com estudos de Sonebi e Bassuoni (2013), que também atribuíram a baixa porosidade ao menor volume de pasta.

Tabela 4 - Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para porosidade e permeabilidade

Teor de RBRO	Porosidade (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE <sup>1</sup> : 0,00897				Permeabilidade (valores p) $\alpha = 0,5$ - MSE <sup>1</sup> : 56,702				Agrupamento <sup>2</sup>
	{1}	{2}	{3}	{4}	{1}	{2}	{3}	{4}	
0		0,000325	0,000232	0,000231		0,000231	0,000231	0,000231	A
5%	0,000325		0,033518	0,000231	0,000231		0,000231	0,000231	B
10%	0,000232	0,033518		0,000231	0,000231	0,000231		0,000231	C
15%	0,000231	0,000231	0,000231		0,000231	0,000231	0,000231		D

Nota: 1: erro quadrático médio; e 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 13 - Resistência à compressão com 7 e 28 dias



Em relação à evolução de resistência à compressão nas idades de rompimento, percebe-se que houve pouca evolução na mistura referência, diferentemente das misturas contendo 5 e 10% de RBRO. Como a substituição ocorreu no cimento, a resistência nas primeiras idades sofreu maior impacto, visto que se tratava de um cimento CPV.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) prescreve a resistência mecânica característica mínima de 20 MPa para peças de concreto permeável de tráfego de pedestres e tráfego leve. Portanto, concretos permeáveis com até 10% de substituição de cimento por RBRO satisfazem esse requisito de norma, possuindo a vantagem de diluir o cimento da pasta aglutinante necessária para envolver e aderir os agregados.

A fim de ratificar as conclusões sobre a resistência à compressão dos pavers com 28 dias, a Tabela 5 mostra a comparação de Tukey, com nível de significância de 5%. Percebe-se que os valores p das amostras com 5 e 10% de RBRO são superiores a 0,5, o que indica homogeneidade de variância. A resistência à compressão dos demais pavers (com 0 e 15% de RBRO) são significativamente diferentes com 95% de confiabilidade. Dessa forma, percebe-se que não há diferença significativa entre a resistência dos concretos contendo 5 e 10% de RBRO.

Como as composições dosadas apresentaram diferentes consumos de cimento por metro cúbico, a Tabela 6 mostra o índice de cimento para cada um. Como a porosidade é um fator determinante em concretos permeáveis, os valores de resistência foram corrigidos levando em consideração a porosidade dos elementos. A correção foi baseada no trabalho de AlShareedah e Nassiri (2021), em relação à porosidade da mistura referência. Percebe-se que a mistura referência apresentou o menor índice, seguido da mistura 10% RBRO-G.

Tabela 5 - Agrupamento de informações pelo método de Tukey e 95% de confiança para os valores médios de resistência à compressão

Teor de RBRO	Resistência à compressão (valores $p$ ) $\alpha = 0,5$ - MSE <sup>1</sup> : 1,7964				Agrupamento <sup>2</sup>
	{1}	{2}	{3}	{4}	
0		0,000175	0,000175	0,000175	A
5%	0,000175		0,656205	0,000775	B
10%	0,000175	0,656205		0,009077	B
15%	0,000175	0,000775	0,009077		C

Nota: 1: erro quadrático médio; e 2: teores que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Tabela 6 - Índice de cimento dos concretos permeáveis confeccionados

Paver	Correção resistência	Resistência corrigida (MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Índice cimento kg/m <sup>3</sup> (MPa)
Referência	0	27,6	340,2	12,3
5% RBRO	+3%	21,18	320,9	15,1
10% RBRO	+4%	20,91	303,7	14,5
15% RBRO	+10%	17,89	280,4	15,7

## Conclusões

Com o estudo realizado, pode-se obter as seguintes conclusões:

- resíduos de rocha ornamental granítica, provenientes do processo de corte via tear de fios diamantados, quando incorporados em teores de 5 e 10% em substituição ao cimento (em volume), para a fabricação de peças de concretos permeáveis com os traços testados e sugeridos neste trabalho, atendem aos principais parâmetros que caracterizam um concreto permeável: porosidade, permeabilidade e resistência à compressão mínima, sendo que todos os traços com incorporação de RBRO tiveram aspecto drenante melhores que o traço referência. Como a resistência à compressão desses pavers não apresentou diferença significativa com 95% de confiabilidade, o teor de 10% de RBRO é o mais otimizado do ponto de vista técnico-econômico, embora ainda tenha apresentado resultados inferiores ao paver referência (sem incorporação de resíduo) em relação à resistência à compressão e, consequentemente, ao consumo de cimento por metro cúbico;
- para este mesmo estudo, entendeu-se que peças com incorporação de 15% de RBRO em substituição ao cimento não atendem aos requisitos mínimos de resistência à compressão orientados pela NBR 16416:2015, que exige um valor mínimo de 20,00 MPa. Embora os valores de porosidade e permeabilidade tenham sido satisfatórios, a resistência à compressão apontada foi de 16,30 MPa; e
- vale salientar que atualmente há um custo para que as empresas comercializadoras de rochas ornamentais (marmorarias) descartem esse tipo de resíduo, que geralmente são destinados a aterros. Portanto, utilizá-los como coproduto na fabricação de materiais de construção pode agregar valor a ele, viabilizando economicamente a sua utilização, uma vez que, além de não pagar pelo seu descarte, as indústrias geradoras poderão vendê-los.

## Referências

- ABI ROCHAS. **Relatório mármore e rochas no mundo 2019**: dossiê Brasil. Brasília: Carlo Montani, 2019.
- ALSHAREEDAH, O.; NASSIRI, S. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125095, 2021.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 522**: report on pervious concrete. Farmington Hills, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1754/C1754M**: standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. West Conshohocken, 2012.

- AREL, H. Ş. Recyclability of waste marble in concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 179-188, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASIELIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**: pavimentos permeáveis de concreto: requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASIELIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.
- BATEZINI, R. *et al.* Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 177-194, abr./jun. 2021.
- CALMON, J. L. *et al.* Estudo da viabilidade técnica da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler nas propriedades do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., Bento Gonçalves, 2007. **Anais [...]** Bento Gonçalves, 2007.
- CARMICHAEL, M. J. *et al.* Effect of partial replacement of cement with nano fly ash on permeable concrete: a strength study. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 2109-2116, jan. 2021.
- CHANDRAPPA, A.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material—research findings and future prospects: a state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262-274, 2016.
- CHEN, X. *et al.* Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117714, 2019.
- GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, 2016.
- IBRAHIM, A. *et al.* Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, 2014.
- IBRAHIM, H. A. *et al.* Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119251, 2020.
- LANG, L.; DUAN, H.; CHEN, B. Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 95-104, 2019.
- LEDERLE, R.; SHEPARD, T.; MEZA, V. De L. V. Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118339, 2020.
- LI, D. *et al.* Application of polymer, silica-fume and crushed rubber in the production of Pervious concrete. **Smart Structures and Systems**, v. 23, n. 2, p. 207-214, 2019.
- LU, J.-X. *et al.* Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1102-1112, 2019.
- MATOS, P. R. de *et al.* Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. **Journal of Environmental Management**, v. 244, p. 294-303, 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, n. 8, p. 802-813, 2010.
- PECEÑO, B. *et al.* Substitution of coarse aggregates with mollusk-shell waste in acoustic-absorbing concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 04019077, 2019.
- SONEBI, M.; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147-154, 2013.

TOGHROLI, A. *et al.* Investigation on composite polymer and silica fume–rubber aggregate pervious concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN CIVIL, STRUCTURAL AND MECHANICAL ENGINEERING, 5., Zurich, 2017. **Proceedings [...]** Zurich, 2017.

VAZZOLER, J. S. *et al.* Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 314-321, May 2018.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2003.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro, e à Cidade Engenharia pelo uso das instalações da empresa e suporte operacional, durante a realização deste trabalho.

### Otávio Gaigher Simões

Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Espírito Santo | Av. Doutor Jair de Andrade, Itapuã | Vila Velha - ES - Brasil | CEP 29060-370 | Tel.: (27) 99895-3196 | E-mail: otavio.talgs@hotmail.com

### Júlia Zanotelli

Curadoria de dados, Pesquisa.

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura | Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Av. Osvaldo Aranha, 99, Centro Histórico | Porto Alegre - RS - Brasil | CEP 90035-190 | Tel.: (27) 99865-9923 | E-mail: julia.zanotelli@ufrgs.br

### Ronaldo Pilar

Conceitualização, Supervisão.

Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico | Universidade Federal do Espírito Santo | Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Campus Goiabeiras | Vitória - ES - Brasil | CEP 29075-910 | Tel.: (27) 99296-6535 | E-mail: ronaldo.pilar@ufes.br

### Rudiele Schankoski

Conceitualização, Análise de dados, Supervisão, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico | Universidade Federal do Espírito Santo | Tel.: (27) 99607-6075 | E-mail: rudiele@gmail.com

Editor do artigo: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

### **Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

[www.scielo.br/ac](http://www.scielo.br/ac)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.