

# Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados

*Influence of the filler effect of marble powder on the production of concrete for interlocking pavements*

Aldo Ribeiro de Carvalho   
Gilber da Silva Júnior   
Wanna Carvalho Fontes   
Guilherme Jorge Brigolini Silva   
Leonardo Gonçalves Pedroti   
Thaís Mayra de Oliveira 

## Resumo

A produção de resíduos industriais causa impactos ambientais, por isso é importante reintroduzi-los no ciclo produtivo para promover um desenvolvimento mais sustentável. O presente estudo teve o objetivo de investigar o uso do pó de mármore residual como fíler e seus efeitos na produção de concreto para pavimentos intertravados. Para isso, a areia natural foi substituída em 15% e 25% pelo pó de mármore, percentuais pouco usados na literatura de reaproveitamento de resíduos de mármore. Foram avaliadas as propriedades físicas dos materiais utilizados e as características mecânicas e microestruturais dos concretos desenvolvidos. Notou-se que o pó de mármore melhora a trabalhabilidade da mistura e reduz a quantidade de vazios no concreto, resultando em um material mais resistente, denso e homogêneo. As resistências à compressão obtidas pelos concretos foram próximas de 40 MPa, o que atende à norma técnica brasileira para produção de pavimentos intertravados. Verificou-se que a inserção de resíduos no ciclo produtivo é benéfica por otimizar propriedades dos materiais, reduzir o consumo de matérias-primas e os impactos ambientais associados à sua extração.

**Palavras-chave:** Pó de mármore. Resíduo. Concreto. Fíler. Pavimentos intertravados.

## Abstract

*The industrial waste production causes environmental damage, so it is important to reintroduce them into the production cycle to promote a more sustainable development. The present study aims to investigate the use of residual marble powder as a filler and its effects on the production of concrete for interlocking pavements. For this purpose, natural sand was replaced by 15% and 25% marble powder, these percentages being scarce in the literature on the reuse of marble waste. The physical properties of the materials used were evaluated, and the mechanical and microstructural characteristics of the developed concrete were analyzed. It was observed that marble powder improves the workability of the mixture and reduces the quantity of empty spots in the concrete, resulting in a stronger, denser, and more homogeneous material. The axial compressive resistance achieved by the concrete was close to 40 MPa, meeting the Brazilian technical standard for interlocking pavement production. It was found that the integration of waste into the production cycle is beneficial for optimizing material properties, reducing the consumption of raw materials and the associated environmental impacts of their extraction.*

**Keywords:** Marble powder. Residue. Concrete. Filler. Pavers.

<sup>1</sup>Aldo Ribeiro de Carvalho  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto - MG - Brasil

<sup>2</sup>Gilber da Silva Júnior  
<sup>2</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora - MG - Brasil

<sup>3</sup>Wanna Carvalho Fontes  
<sup>3</sup>Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto - MG - Brasil

<sup>4</sup>Guilherme Jorge Brigolini Silva  
<sup>4</sup>Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto - MG - Brasil

<sup>5</sup>Leonardo Gonçalves Pedroti  
<sup>5</sup>Universidade Federal de Viçosa  
Viçosa - MG - Brasil

<sup>6</sup>Thaís Mayra de Oliveira  
<sup>6</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora - MG - Brasil

Recebido em 07/06/23  
Aceito em 30/06/23

## Introdução

A indústria da construção civil consome aproximadamente 30% das matérias-primas disponíveis globalmente e 25% da água em escala mundial, além de 17% de toda a água-doce existente (DIXT; CULP; FERNÁNDEZ-SOLIS, 2013; GIANNETTI *et al.*, 2018). Essa indústria causa impactos ambientais devido à ocupação extensiva do solo, à emissão de gases de efeito estufa (GEE) e à produção de resíduos sólidos, os quais prejudicam a qualidade de vida nas áreas urbanas e até representam riscos para a saúde da população (YILMAZ; BAKIS, 2015). Uma solução para destinação dos resíduos é reintegrá-los no ciclo produtivo, incorporando-os em argamassas e concretos por meio da substituição parcial ou total dos componentes não renováveis, os agregados naturais (YLINIEMI *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2022).

O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo. Os agregados correspondem de 60% a 75% do volume da mistura de concreto, e a qualidade desses componentes influencia nas características e propriedades do concreto produzido (DELSAUTE; STAQUET, 2020). No Brasil, a demanda por agregados na construção civil em 2021 foi superior a 660 milhões de toneladas, das quais 42% foram de brita e 58% de areia (ASSOCIAÇÃO NACIONAL..., 2022). A areia natural é o principal material utilizado como agregado miúdo e é oriunda de leitos de rios, várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, entre outros. Sua extração altera a paisagem e a calha de cursos d'água, pode gerar supressão da mata ciliar, instabilidade nas margens dos leitos e dos taludes (RENTIER; CAMMERAAT, 2022). Devido à ampla utilização desse recurso, sua disponibilidade na natureza está diminuindo, o que requer a extração da matéria-prima de regiões mais distantes, resultando em aumento nos custos da produção.

A reciclagem reduz o consumo de recursos naturais não renováveis, evitando impactos como a alteração da paisagem natural (PASCHOALIN FILHO; STOROPOLI; DUARTE, 2014), e diminui o volume de resíduos transportados e de áreas para aterro, além da emissão de GEE provenientes da queima de combustíveis (PASCHOALIN FILHO; STOROPOLI; DUARTE, 2014). Os resíduos reciclados podem ser insumos alternativos para a produção de equipamentos da administração pública, mobiliários urbanos, blocos intertravados para calçamento e pavimentação de tráfego leve, tijolos e blocos estruturais para habitações de baixo custo (GOMES JÚNIOR; OLIVEIRA; DIAS FILHO, 2021).

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo. Utiliza esse material para confecção de revestimentos de fachadas, placas de pisos, ladrilhos hidráulicos e argamassas de pisos cimentícios (GOMES *et al.*, 2020). Os resíduos provenientes da extração e utilização de rochas ornamentais representam cerca de 2 a 2,5 milhões de toneladas anuais no país (ZULCÃO *et al.*, 2020). Esse montante se deve principalmente à falta de investimento em estudos geológicos, que abranjam desde o conhecimento da rocha até um plano de lavra, escassez de capacitação da mão de obra e dificuldades financeiras por parte de micro e pequenas empresas; conseqüentemente, menor acesso às inovações tecnológicas (GADIOLI *et al.*, 2021).

As rochas ornamentais carbonáticas têm elevada concentração de  $\text{CaCO}_3$  (BEZERRA, 2017) e foram responsáveis, no Brasil, por 4,2 milhões de dólares em exportação no primeiro semestre de 2023 relativos a 9,3 t comercializadas (ASSOCIAÇÃO..., 2023). A extração e o beneficiamento dessas rochas produzem um resíduo extremamente fino, o pó de mármore, que representa 25% de todo o subproduto do setor (BARBOSA *et al.*, 2022). Esse resíduo é disposto nos pátios das marmorarias ou em aterros e podem ocasionar alteração das paisagens naturais, poluição visual e assoreamento de cursos d'água (BARBOSA *et al.*, 2022).

O pó de mármore é classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como material não perigoso de Classe II B - Inerte. De acordo com a ABNT (2004), um material inerte não se solubiliza a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água quando submetido ao contato dinâmico e estático com água deionizada ou destilada, em temperatura ambiente. Assim, é esperado que o emprego do pó de mármore em componentes construtivos não cause riscos ambientais, nem à saúde humana. O Quadro 1 reúne diversos estudos que versam sobre o reaproveitamento do pó de mármore.

Por meio do Quadro 1, é notável que o uso do pó de mármore tem se revelado como uma opção para melhorar o empacotamento dos grãos do concreto, em função do seu efeito fíler (materiais de granulometria média próximas ou inferiores à do cimento). Nesse aspecto, entende-se como empacotamento dos grãos os preenchimentos dos vazios maiores por partículas menores, cujos vazios deixados por estas serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020). O empacotamento dos grãos é apresentado na Figura 1. Esse processo resulta em uma matriz densa devido à redução do volume de vários grãos e à diminuição do tamanho dos poros e da conectividade entre eles. O empacotamento reduz a relação água/cimento, o que pode levar ao aumento da resistência e da durabilidade do concreto (KWAN; NG; HUEN, 2014).

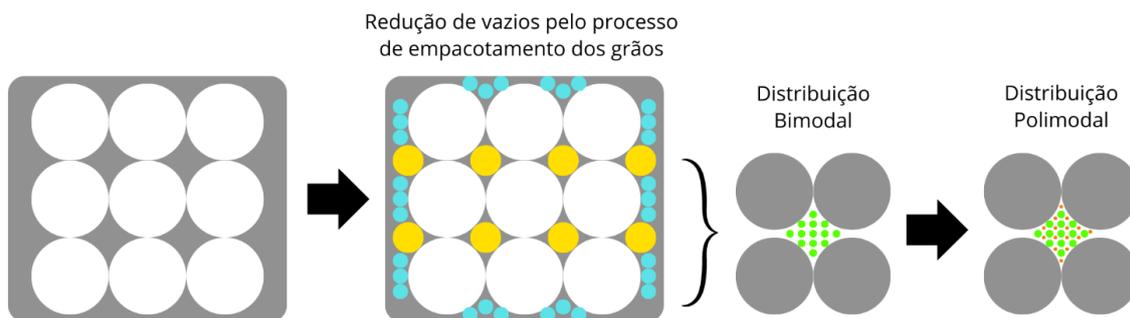
Quadro 1 - Aplicações de diversos resíduos de mármore no desenvolvimento de materiais (Continua)

Referência	Estudo desenvolvido	Resultados obtidos
Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010)	Analisaram o comportamento de argamassas com utilização de resíduo do corte de rochas ornamentais após submetê-las a uma temperatura de 700 °C.	Os valores de resistência à compressão e à flexão cresceram conforme aumentava o teor de RBCO. Quanto à porosidade da argamassa, o teor de 10% se mostrou o percentual ótimo de substituição por RBCO.
Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010)	Verificaram o comportamento de argamassas com substituição parcial do cimento e areia por pó de mármore.	Os autores notaram que houve acréscimo de resistência à compressão independente da porcentagem de agregado natural que fosse substituído pelo pó de mármore. Já a substituição do cimento pelo pó residual gerava decréscimo na resistência. No que tange à trabalhabilidade, observou-se que houve melhora para todos os teores em ambas as substituições.
Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010)	Analisaram o emprego de pó de mármore em substituição do cimento e da areia natural em argamassas.	Os autores observaram que houve queda de 20% na resistência à compressão das argamassas com a substituição do cimento pelo pó de mármore. Com relação à substituição da areia natural, houve decréscimo de 10% na resistência à compressão.
Moura e Leite (2011)	Avaliaram o uso de diferentes teores de RBCO em blocos de vedação.	As amostras apresentaram ótimo desempenho na absorção e na resistência à compressão, com aumento de cerca de 11% em relação à resistência de referência.
Santos, Lira e Ribeiro (2012)	Estudaram a substituição dos agregados por RBCO em argamassas.	Observaram melhoria no desempenho de argamassas e concretos com RBCO.
Dietrich (2015)	Empregou resíduos de corte de mármore e granito em concretos autoadensáveis.	Houve redução da absorção de água e retardamento do processo corrosivo do concreto, por consequência da redução do volume de vazios causada pela incorporação de agregados originários dos RBCO.
Nobrega <i>et al.</i> (2015)	Substituíram uma pequena fração de cimento por RBCO em argamassas.	Obtiveram diminuição no módulo de elasticidade e resistência à tração, mas asseguram que existe viabilidade da substituição parcial do cimento Portland para argamassas de regularização, em virtude da diminuição da absorção e do aumento de resistência à compressão.
Vardhan <i>et al.</i> (2015)	Avaliaram a trabalhabilidade, a resistência à compressão e a microestrutura de argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de mármore em teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.	Concluíram que a substituição só é viável até 10% do teor de cimento, pois até esse percentual houve melhora da trabalhabilidade, sem queda na resistência à compressão. Para os teores superiores a 10%, observou-se decréscimo considerável na resistência à compressão das argamassas, possivelmente explicada pela elevação da porosidade, indicada por análise microestrutural.
Vinco <i>et al.</i> (2017)	Avaliaram a incorporação de resíduos de rochas ornamentais em argamassas de revestimento.	Constatarem melhora nas propriedades do concreto fresco (retenção de água, plasticidade, adesão inicial, homogeneidade e trabalhabilidade) e verificaram que a incorporação do resíduo é uma técnica viável economicamente.
Araújo e Dourado (2019)	Substituíram parte do agregado miúdo por rejeitos gerados nos desdobramentos de rochas ornamentais em 5%, 10%, 15% e 20% aplicados a pavers.	Para os percentuais de 5% e 10%, a substituição não promoveu aumento significativo dos valores de resistência à compressão. Já para os percentuais de 15% e 20% se observaram aumentos substanciais de resistência em relação ao traço de referência, na ordem de 22% e 19% respectivamente.

Quadro 1 - Aplicações de diversos resíduos de mármore no desenvolvimento de materiais (continuação)

Referência	Estudo desenvolvido	Resultados obtidos
Pereira (2019)	Estudou a substituição total da areia natural por pó de mármore em concretos.	Notou que o concreto se tornou mais denso, durável e resistente. Houve acréscimo de massa específica de 6,58%, diminuição de 5,87% na absorção de água e aumento de 6,52% na resistência. Dessa forma, o autor certificou a viabilidade de emprego desse resíduo na produção de pisos de concreto intertravados.
Cruz <i>et al.</i> (2020)	Produziram <i>pavers</i> com substituição parcial do cimento por resíduo de corte de mármore e granito, nos teores de 10% e 20%.	Os resultados indicaram aumento da resistência à compressão de 1,05% para as amostras em que o cimento foi substituído na proporção de 10%, e diminuição de 0,94% para aquelas em que a substituição correspondeu a 20%. Além disso, as composições com substituição de resíduos apresentaram menor percentual de absorção de água e menores índices de vazios, quando comparadas à mistura sem adição de resíduo.
Almada, Santos e Souza (2022)	Desenvolveram argamassas com a substituição do cimento por resíduo de mármore e granito em 20%, adotando diversas relações água/cimento, sendo elas 0,5, 0,449 e 0,438.	Notou-se que a incorporação de resíduos de mármore e granito em argamassas produziu uma matriz menos porosa e mais homogênea. A mudança da relação água/cimento impactou a propriedade de resistência à compressão das argamassas. Foi observado que, quanto menor o fator água/cimento, maior o resultado de resistência à compressão. Por fim, salientam que não houve influência significativa no módulo de elasticidade das argamassas com resíduo.

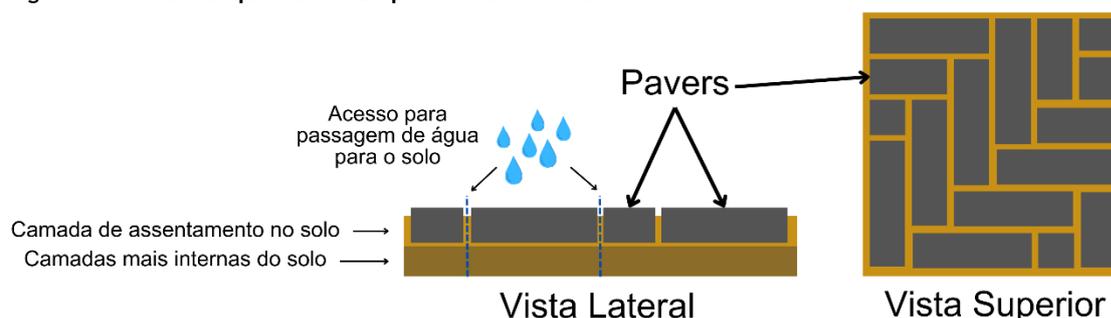
Figura 1 - Redução dos vazios do concreto pelo processo de empacotamento



O efeito filer, por sua vez, reduz a capilaridade nas misturas de concreto, diminuindo a percolação de água pela matriz (TOPÇU; BILIR; UYGUNOGLU, 2009). Além disso, o concreto apresenta maior resistência mecânica nas primeiras idades (MENDES; EFFTING; SCHACKOW, 2020) e efeito de nucleação mais intenso, o que aumenta sua durabilidade (SHI *et al.*, 2016). Os filers, como o pó de mármore, reduzem a exsudação e a segregação nas misturas de concreto, podendo aumentar a plasticidade e a trabalhabilidade sem elevar o consumo de água (BARDINI; KLINSKY; FERNANDES JUNIOR, 2013; ELYAMANY; ABD ELMOATY; MOHAMED, 2014).

Dadas a disponibilidade de resíduos de mármore em pó no Brasil e a falta de regulamentação específica para seu uso em concretos, o objetivo deste estudo foi investigar a utilização do pó de mármore como filer e seus efeitos na produção de concretos para pavimentos intertravados, os *pavers* (Figura 2). Para isso, a areia natural foi substituída em 15% e 25% pelo pó de mármore, percentuais com escassas referências na literatura de reaproveitamento de resíduos de mármore até este momento. Além disso, foram avaliadas as propriedades físicas e cristalinas dos materiais adotados e as características mecânicas e microestruturais dos concretos produzidos. A aplicação em pisos intertravados é justificada pelo apelo ambiental que esse componente possui, uma vez que não impermeabiliza o solo (Figura 2) e é passível de substituir o agregado natural pelo resíduo, favorecendo a reinserção do pó de mármore no ciclo produtivo.

Figura 2 - Modelo esquemático de pisos intertravados



## Materiais e procedimentos de caracterização

### Materiais

O cimento CP III-40-RS foi adotado em função de sua disponibilidade na região em que a pesquisa foi realizada. Suas especificações foram disponibilizadas pelo fornecedor e são apresentadas na Tabela 1.

Visando maior trabalhabilidade, foi utilizado o aditivo plastificante de pega normal SikaMent RM-300, cujas especificações comerciais fornecidas são densidade de  $1,18 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  e pH de  $6,0 \pm 1,0$ . Esse aditivo não apresenta problemas de compatibilidade com os demais materiais empregados neste estudo. Os agregados adotados foram a areia artificial (passante na peneira de 4,8 mm), brita 0 (passante na peneira de 12,5 mm) e brita 1 (passante na peneira de 25 mm), originários de uma pedreira de gnaiss da cidade de Juiz de Fora, MG. A areia natural (passante na peneira de 6,8 mm) é proveniente da extração do leito do Rio Preto, na região da cidade de Rio Preto, MG, enquanto o pó de mármore (passante na peneira de 0,42 mm) é oriundo do beneficiamento de rochas calcárias da cidade Mar de Espanha, MG, e sua coleta ocorreu imediatamente após o processo produtivo da empresa unifamiliar local. Os agregados utilizados e o pó de mármore são apresentados na Figura 3.

### Métodos

O fluxo metodológico adotado é apresentado na Figura 4 de forma resumida e detalhado nas seções a seguir.

#### Caracterização dos agregados e pó de mármore

A granulometria influencia na compacidade, na trabalhabilidade e na resistência a esforços mecânicos de argamassas e concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A composição granulométrica dos agregados foi determinada por meio das diretrizes estabelecidas na NBR 17054 (ABNT, 2022a), com uso das peneiras especificadas na NBR NM ISO 3310 (ABNT, 2010), que possuem abertura de malha de 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,80 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. Para melhor compreensão da granulometria dos agregados, foram traçadas as curvas granulométricas com base nos valores percentuais correspondentes ao material retido acumulado e comparado com os limites utilizáveis preconizados na NBR 7211 (ABNT, 2009). O pó de mármore foi submetido ao peneiramento nas malhas, tal qual os agregados, porém também foi analisado no equipamento CILAS 1064, no ensaio de granulometria a laser. De posse dos dados granulométricos, o módulo de finura foi obtido pela soma das percentagens retidas acumuladas, em massa, de todas as peneiras da série normal e dividido por 100 (ABNT, 2022a).

A massa específica dos materiais foi estabelecida na condição saturada com superfície seca, conforme preconizado na NBR 16916 (ABNT, 2021a) para as areias natural e artificial e para o pó de mármore; e de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021b) para as britas 0 e 1. Para esse ensaio se utilizou um molde troncocônico, haste de compactação, recipientes e peneiras. Salienta-se que o conhecimento da massa específica é fundamental para o cálculo de quantitativos de insumos para a dosagem do concreto (NEVILLE, 2016). Após esse ensaio, foi determinada a absorção de água dos materiais, que é uma grandeza detectada por meio de procedimentos também expressos na NBR 16916 (ABNT, 2021a) e NBR 16917 (ABNT, 2021b).

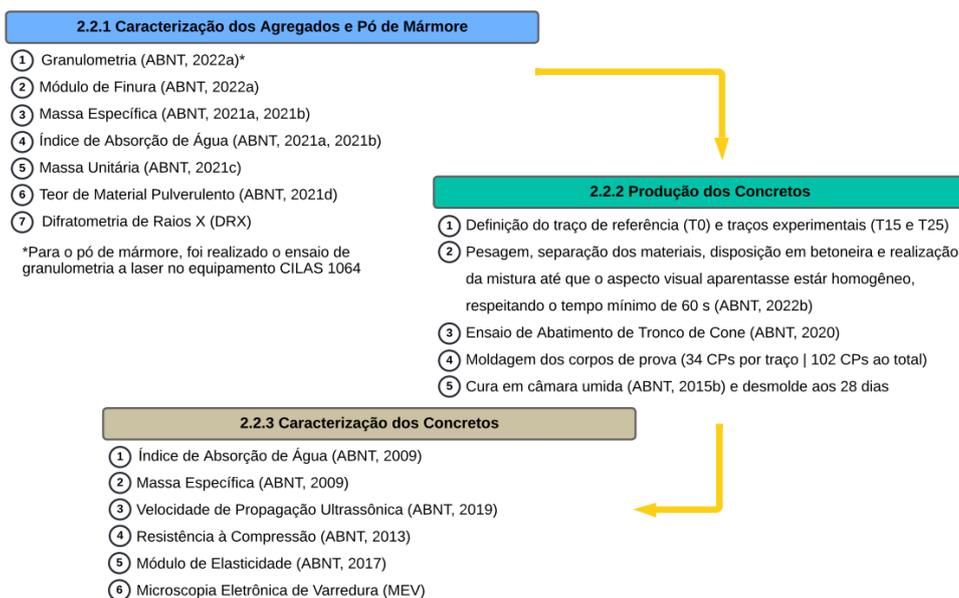
Tabela 1 - Especificações do cimento adotado

Análises físicas		Análises químicas	
Características	Resultados	Características	Resultados
Superfície específica (ABNT, 2015a)	4,659 cm <sup>2</sup> /g	Resíduo insolúvel	0,97%
Finura (Resíduo retido na peneira #400)	1,9%	pH	13
Tempo inicial de pega (ABNT, 2017)	198 min	Perda ao fogo	2,57%
		Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7,50%
Expansibilidade a quente (ABNT, 2016)	0 mm	Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	25,79%
		Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,95%
Solubilidade em Água	1,5 g/l	Óxido de cálcio (CaO)	54,53%
Resistência à compressão com 1 dia	13,0 MPa	Óxido de magnésio (MgO)	3,43%
Resistência à compressão aos 3 dias	25,9 MPa	Óxido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	1,67%
Resistência à compressão aos 7 dias	35,8 MPa	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0%
Resistência à compressão aos 28 dias	47,7 MPa	Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	0,69%

Figura 3 - Agregados e pó de mármore adotados



Figura 4 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Para o ensaio de massa unitária foi utilizada uma balança de precisão de 0,01 g, haste de adensamento, recipiente cilíndrico e concha para enchê-lo, além de uma placa de vidro para rasá-lo, em conformidade com as especificações e processos metodológicos da NBR 16972 (ABNT, 2021c). Assim como a massa específica, a massa unitária é utilizada no cálculo da dosagem do concreto e serve como parâmetro para transformar massa em volume ou vice-versa (NEVILLE, 2016).

O material pulverulento faz aumentar o consumo de água da mistura de concreto para uma mesma consistência, em função de sua maior superfície de contato, o que prejudica a resistência mecânica, a trabalhabilidade e a durabilidade do concreto produzido (NEVILLE, 2016). Assim, o teor de material pulverulento foi determinado de acordo com o peneiramento pelo método de lavagem do material, utilizando a peneira de malha 75  $\mu\text{m}$  (ABNT, 2021d), com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento da dosagem e para as análises do concreto.

Por fim, foi realizada a caracterização cristalográfica da areia natural, da areia artificial e do pó de mármore por meio de difratometria de raios X (DRX). Nesse ensaio foi utilizado o equipamento D8 Discover (DaVinci) com a faixa de varredura  $2\theta$  de 5-60°, passo de 0,018° e 8 rotações de *spinner* por segundo. A identificação das fases mineralógicas foi realizada com auxílio do software PANalytical X'pert HighScore Plus V3.0, com o banco de dados cristalográfico COD 2021 (Crystallography Open Database).

### Produção dos concretos

O traço de referência (T0) estipulado para o concreto não continha pó de mármore na composição. Assim, o T0 foi constituído da proporção, em massa, de 1:1,934:0,644:0,000:0,914:2,133 (cimento:areia natural:areia artificial:pó de mármore:brita 0:brita 1), com relação água/cimento de 0,52; e resistência à compressão média de 36,78 MPa. Os traços experimentais foram desenvolvidos mediante a substituição da areia pelo mármore. Para identificar os valores de substituição que seriam adotados nos traços experimentais, foram comparados os percentuais de pó de mármore passantes nas peneiras, da série normal, para cada substituição de 5% em 5%, entre 0% e 100%. Com esse propósito, foi utilizado modelo de cálculo de empacotamento de Andreassen modificado com as variáveis  $q = 0,37$ ,  $D_s = 0,075$  mm e  $D_L = 19$  mm. Assim, notou-se que a substituição nos teores de 15% e 25% permitia a análise do efeito filer sem que houvesse aumento considerável do percentual passante nas peneiras de malha de 0,3 mm, 0,6 mm, 1,2 mm e 2,4 mm. Um aumento considerável do material passante nessa faixa granulométrica poderia prejudicar o empacotamento dos grãos, visto que, no caso de substituições com percentuais maiores de pó de mármore, as curvas se afastariam mais da curva de Andreassen modificado, conforme apresentado na Tabela 2 e na Figura 5.

A produção dos concretos se iniciou com a pesagem dos materiais, seguida do uso de desmoldante nas formas (Figura 6a, b). Para que não houvesse perda da água dos traços, todas as ferramentas utilizadas no processo foram umedecidas. Então, os agregados foram colocados na condição saturada com superfície seca (Figura 6c). Feito isso, os materiais foram adicionados na betoneira na ordem agregados graúdos, cimento, 80% da água, agregados miúdos, aditivo e o restante da água, sempre os misturando em intervalos, à medida que eram acrescentados (Figura 6d). A mistura final foi feita conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022b), até que o aspecto do material estivesse visualmente homogêneo, respeitando o tempo de 60 s (Figura 6e).

Posto isso, a Tabela 3 apresenta detalhadamente todos os traços, em massa, produzidos nesta pesquisa.

Foi determinada a consistência das misturas de cada um dos traços (T0, T15 e T25), a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone preconizado na NBR 16889 (ABNT, 2020). Para esse método, o abatimento foi estipulado como uma variável controlada, fixada na faixa de  $210 \pm 20$  mm.

Com base na NBR 5738 (ABNT, 2015b), foram moldados 34 corpos de prova (CP) para cada um dos traços (T0, T15 e T25). Destes CP, 15 possuíam formato prismático, com dimensões de 200x100x80 mm, que são consideradas adequadas para blocos de pavimentação, conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013). Os outros 19 CP eram cilíndricos, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Assim, ao todo foram moldados 102 CP. A Figura 7 apresenta os CP moldados para um dos traços.

A cura dos CP foi realizada com o auxílio de panos constantemente umedecidos com água durante 5 dias (ABNT, 2015b). Em seguida, os CP foram desmoldados e transferidos para câmara úmida para completar 28 dias em relação ao dia de produção do traço de concreto. A Figura 8 exibe o aspecto dos CP ao final desse período. Em seguida, os CP cilíndricos tiveram sua superfície retificada com retificadora (Figura 9a), enquanto os CP prismáticos foram regularizados com aplicação de pasta de cimento com auxílio de um nível (Figura 9 b). Por fim, os CP foram submetidos aos ensaios de caracterização dos concretos produzidos.

Tabela 2 - Comparativo do empacotamento de grãos por Andreassen modificado

Abertura das peneiras (mm)	Empacotamento ótimo pelo método de Andreassen Modificado	Sem substituição (0% de pó de mármore)	Substituição de 15%	Substituição de 25%
25	100	100,000	100	100
19	100	99,059	99,0592	99,0592
9,5	74,0275	65,477	65,4769	65,4769
4,8	54,1972	46,276	46,2765	46,2765
2,4	38,255	37,365	38,4973	39,2523
1,2	26,2503	33,279	34,8743	35,9377
0,6	17,1594	24,552	26,6015	27,968
0,3	9,92684	17,367	18,0231	18,4604
0,15	4,33042	9,522	9,40606	9,3289

Figura 5 - Curva comparativa de percentuais passantes

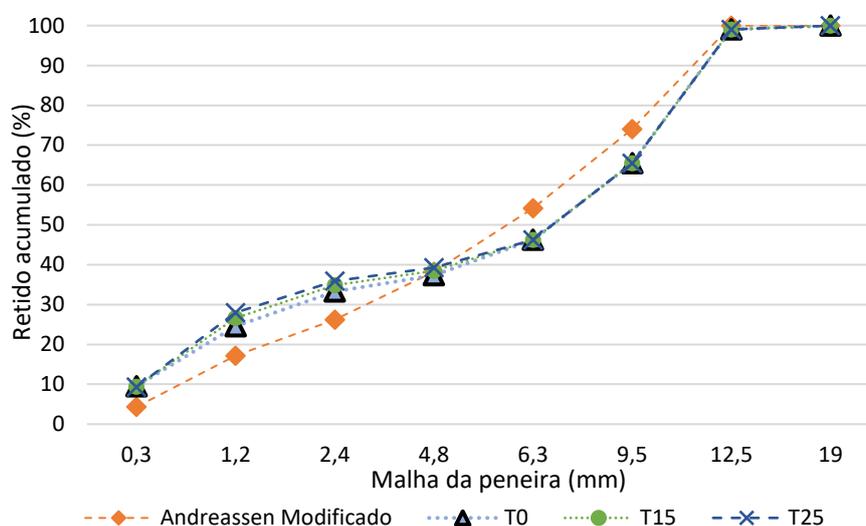


Tabela 3 - Traços, em massa, adotados para os concretos produzidos

Traço	Cimento	Areia natural	Areia artificial	Pó de mármore	Brita 0	Brita 1	Relação água/cimento	Aditivo plastificante
Referência (T0)	1,000	1,934	0,644	0,000	0,914	2,133	0,52	0,65
Experimental 01 (T15)	1,000	1,644	0,644	0,290	0,914	2,133	0,52	0,65
Experimental 02 (T25)	1,000	1,450	0,644	0,484	0,914	2,133	0,52	0,65

Figura 6 - Processo de produção dos concretos



a) Pesagem e separação dos materiais

b) Preparação das formas com desmoldante



c) Agregados na condição saturada com superfície seca



d) Disposição dos materiais na betoneira

e) Mistura final

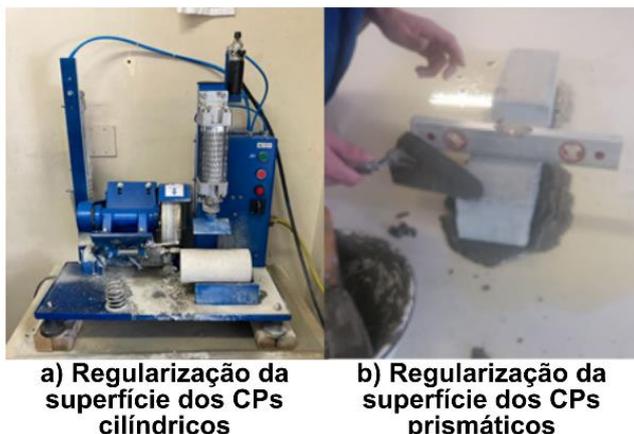
Figura 7 - Corpos de provas moldados para um dos traços



Figura 8 - Aspecto visual dos CP após o processo de cura



Figura 9 - Regularização da superfície dos corpos de prova



### Caracterização dos concretos

O índice de absorção e a massa específica dos CP foram determinados segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009), utilizando-se uma balança de precisão 0,01 g (Figura 10). A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto endurecido foi obtida conforme as orientações da NBR 8802 (ABNT, 2019), com o equipamento Procec Pundit Lab+ (Figura 10c).

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado na prensa hidráulica Contenco Pavitest (Figura 10d) e seguiu as diretrizes da NBR 9781 (ABNT, 2013). O módulo de elasticidade foi estipulado com aparelhos Strain Gauge (Figura 10e) durante a compressão dos CP. Para este ensaio foram obedecidas as prescrições da NBR 8522 (ABNT, 2017).

Por fim, usou-se o microscópio Quanta 250 (Figura 10f) para a realização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos concretos; suas especificações são:

- (a) fabricante FEI;
- (b) ano 2010;
- (c) resolução de 3 nm;
- (d) modo de detecção por elétrons secundários com 30 kV;
- (e) tensão da rede de 230 V com 50 a 60 Hz;
- (f) potência de até 3 kVA;
- (g) tensão de aceleração do feixe de 200 V a 30 kV; e
- (h) corrente do feixe de 2  $\mu$ A.

As amostras utilizadas neste ensaio são provenientes da região central dos CP rompidos.

A Tabela 4 exhibe o número de corpos de prova adotados em cada ensaio de caracterização do concreto. Os ensaios de índice de absorção de água, massa específica, velocidade de propagação ultrassônica, resistência à compressão e módulo de elasticidade têm seus resultados apresentados em valores médios. Para melhor

compreensão dos resultados dos ensaios de massa específica e módulo de elasticidade, optou-se por utilizar o método de análise de variância One-Way ANOVA no software GraphPad Prism 9.2.0. Esse método estatístico permite fazer comparações entre três ou mais grupos de amostras independentes e possibilita determinar se as diferenças amostrais observadas são reais, isto é, causadas por diferenças significativas, ou casuais, decorrentes da variabilidade amostral.

Figura 10 - Etapas de caracterização dos concretos produzidos

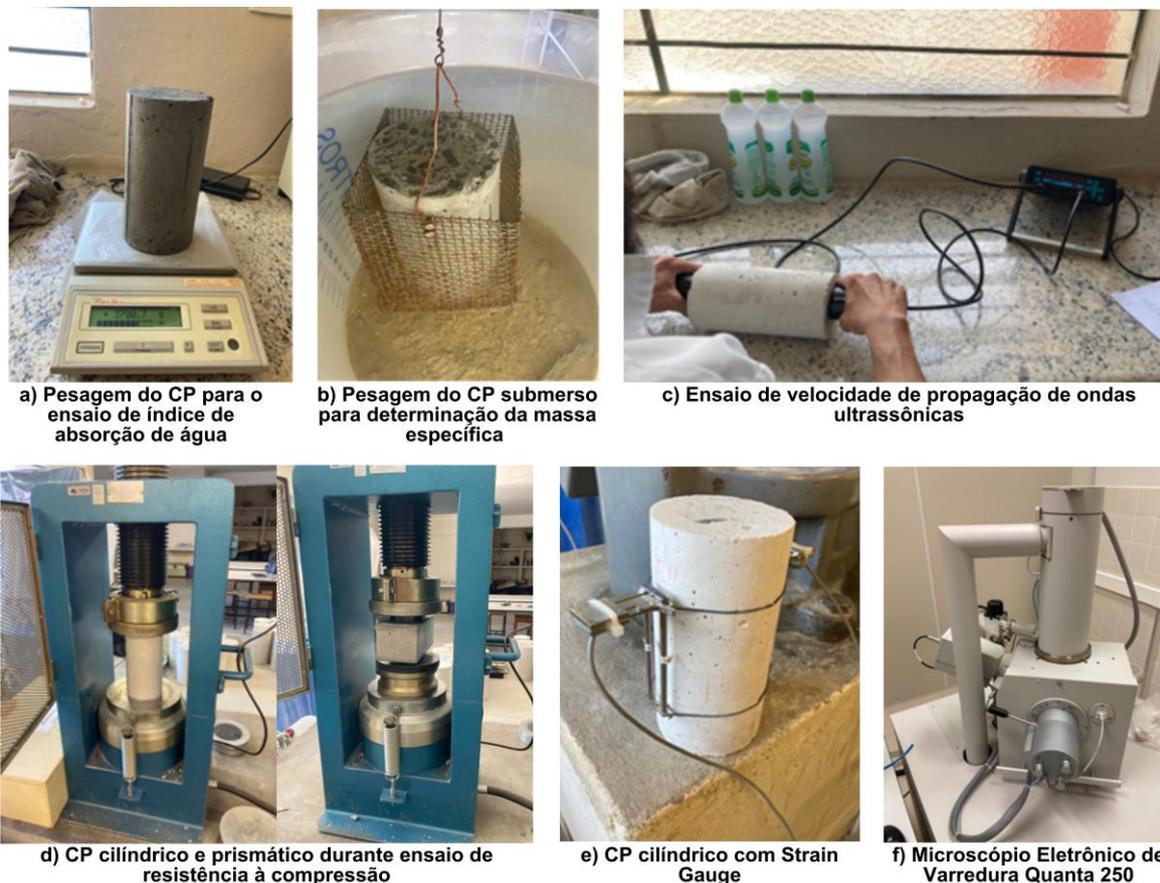


Tabela 4 - Relação de CP adotados por ensaio

Ensaio	Idade (Dias)	Número de CP ensaiados					
		T0		T15		T25	
		Prismático	Cilíndrico	Prismático	Cilíndrico	Prismático	Cilíndrico
Índice de absorção de água (NBR 9778:2009)	28	15	19	15	19	15	19
Massa específica (NBR 9778:2009)	28	15	19	15	19	15	19
Velocidade de propagação ultrassônica (NBR 8802:2019)	28	15	19	15	19	15	19
Resistência à compressão (NBR 8522:2017)	28	15	0	15	0	15	0
Módulo de elasticidade (NBR 8522:2017)	28	0	9	0	9	0	9
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	28	0	1	0	1	0	1

## Resultados

### Caracterização dos agregados e do pó de mármore

Por meio da granulometria dos agregados (Figura 10, 11 e 12) foi possível caracterizar o material segundo a classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009). Assim, a areia natural e a artificial zona se encontram na zona utilizável, portanto estão aptas para aplicação em concretos. O pó de mármore, inicialmente, se situa do lado externo da zona utilizável, logo não pode ser aplicado com a finalidade de agregado miúdo. Entretanto, ao analisar minuciosamente a granulometria do pó de mármore por meio da Figura 10, nota-se que esse material é extremamente fino e pode ser aplicado como fíler. É constatado na Figura 13 que os agregados graúdos estão dentro dos limites estipulados pela ABNT (2009), logo são materiais passíveis de utilização e classificados como brita 0 e brita 1, conforme preconizado pela metodologia.

Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos

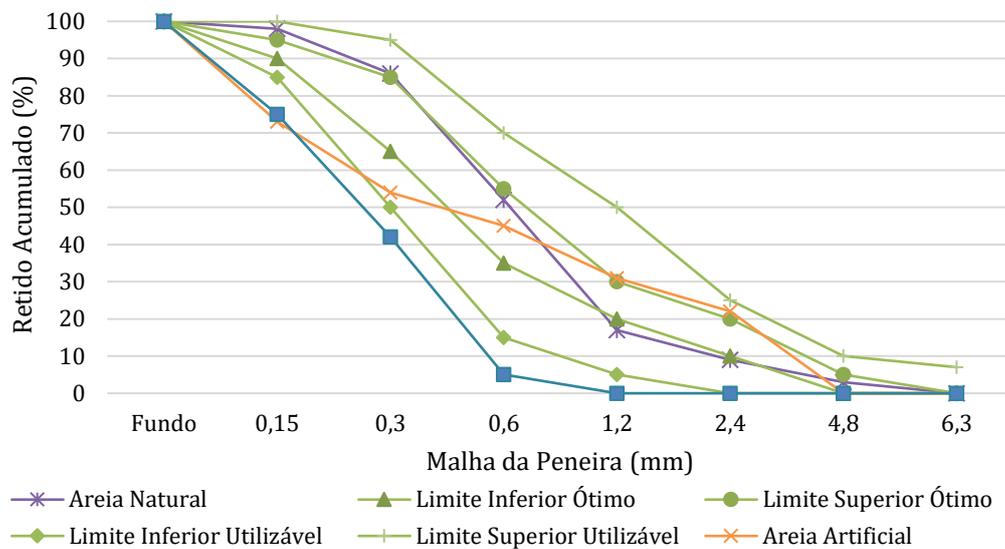


Figura 12 - Curva do pó de mármore obtida por meio da granulometria a laser

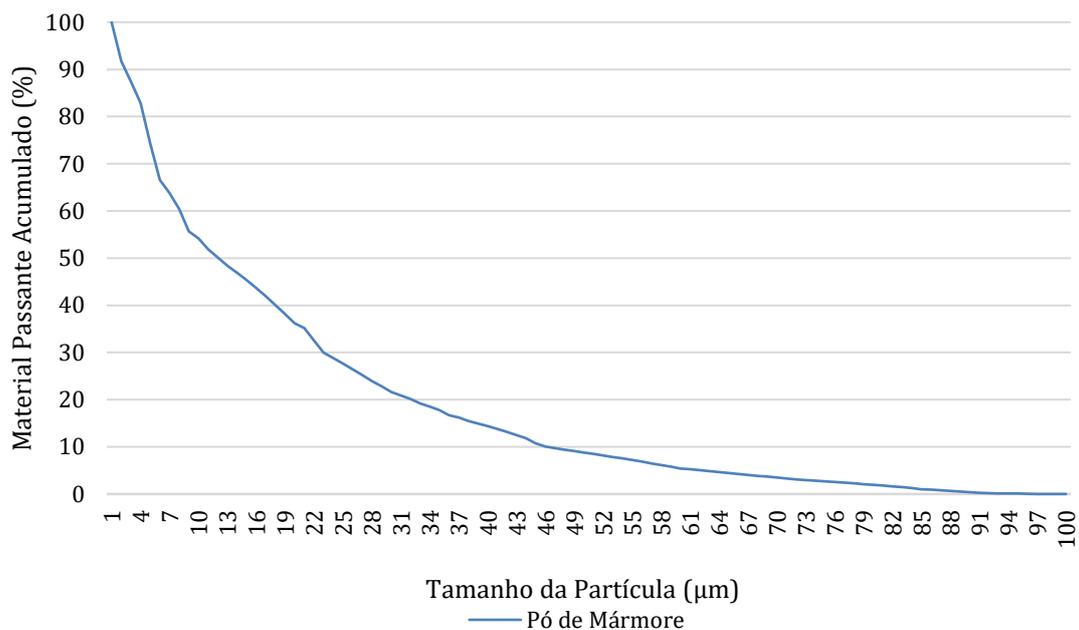
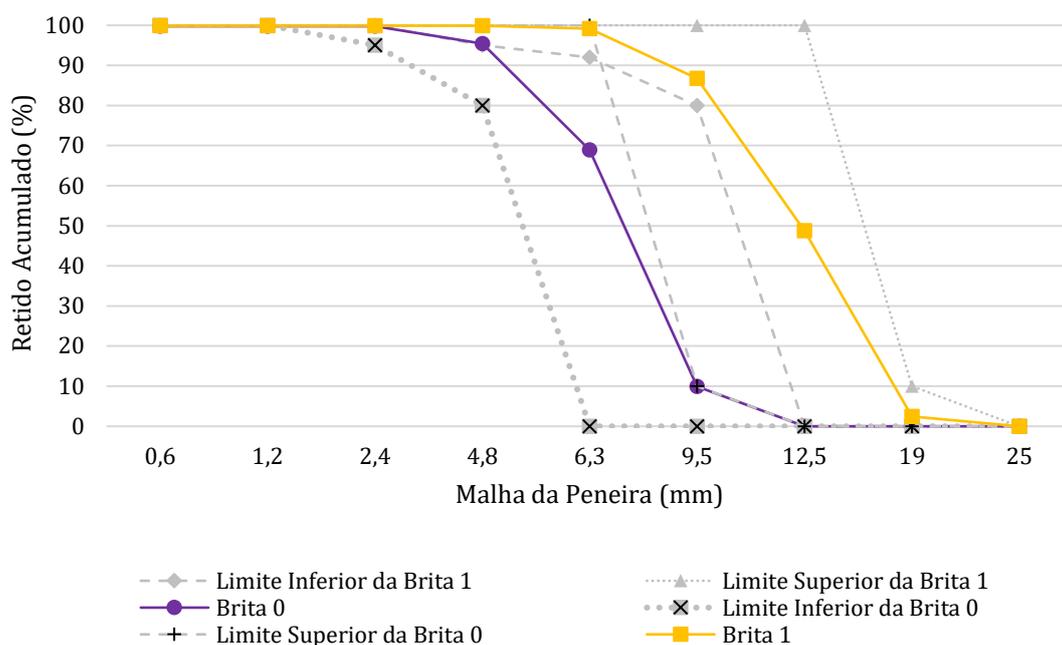


Figura 13 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos



A Tabela 5 apresenta a caracterização física dos materiais adotados. Nota-se que os agregados e o pó de mármore possuem massa específica elevada, o que confere reduzido número de poros internos a eles, tornando-os propícios para a produção de concreto. Os finos presentes na areia artificial e no pó de mármore podem atuar no preenchimento dos poros do concreto, o que aumenta sua resistência. O teor de absorção de água apresentado na Tabela 5 foi obtido como complemento aos ensaios de massa específica e massa unitária, visando dar suporte aos cálculos de quantitativo. Se o agregado utilizado nos ensaios estivesse úmido, os valores obtidos seriam diferentes dos alcançados com o agregado previamente seco, o que acarretaria erros de dosagem do concreto.

A NBR 7211 determina que o teor de materiais finos na composição da mistura de concreto deve ser inferior a 3% (ABNT, 2009). Esse percentual pode ser excedido no caso da adoção de materiais provenientes da britagem de rocha e com granulometria inferior a 75  $\mu\text{m}$ , desde que a quantidade utilizada não interfira nas propriedades do concreto. Com isso, e por meio da caracterização granulométrica apresentada nas Figuras 12 e 13, nota-se que os agregados e o pó de mármore podem ser utilizados para a confecção de concreto neste estudo.

A Figura 14 apresenta as fases cristalinas identificadas no DRX. Nota-se que ambas as areias são ricas em quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e contêm, em menor intensidade, mica ( $\text{KAl}_2(\text{SiAlO}_{10})(\text{OH},\text{F}_2)$ ) e zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Estes minerais estão presentes em silicatos e possuem em sua composição a estrutura tetraédrica  $\text{SiO}_4$ . O pó de mármore, por sua vez, tem maior intensidade de dolomita ( $\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Nota-se também a presença de aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ), minerais da classe dos carbonatos e com estrutura  $\text{CO}_3^{2-}$ . A presença de cálcio (Ca) na composição cristalina dos materiais pode gerar eflorescência, pois os íons  $\text{Ca}^{2+}$  possuem maior mobilidade (FERREIRA; BERGMANN, 2011), logo podem percolar pelo concreto produzido com mais facilidade, deixando vazios que podem ser utilizados por agentes agressivos para deteriorar o concreto. É possível aferir que o pó de mármore possui quartzo, tal qual as areias, o que é comum, visto que essa fase mineralógica é da classe dos silicatos e está disposta em toda a crosta terrestre. O quartzo é um mineral de grande rigidez elástica e dureza (DA LUZ; LINS, 2008), propriedades que podem influenciar na produção de concretos mais resistentes a esforços mecânicos.

## Caracterização dos concretos produzidos

A Tabela 6 apresenta a consistência dos concretos produzidos. Na Tabela 6 todos os dados estão em unidades de volume, sendo essa a razão para a relação água/cimento possuir valores distintos dos que foram apresentados na metodologia. Nota-se nas misturas T15 e T25, que tiveram a areia substituída parcialmente pelo pó de mármore, aumento no abatimento de 21,05%, o que significa que a substituição da areia natural

pelo material residual aumentou a trabalhabilidade da mistura de concreto e não ocasionou segregação dos materiais. Esse comportamento era esperado, por ser característico de materiais fílers, que aumentam a trabalhabilidade sem elevar o consumo de água da mistura (NEVILLE, 2016). A maior massa específica, a menor porosidade e a menor absorção de água do pó de mármore em relação à areia natural resulta em uma matriz menos porosa. Além disso, o pó de mármore não absorve parte da água de amassamento; consequentemente, a consistência do concreto tende a ser mais fluida, sem elevar o consumo de água (BARDINI; KLINSKY; FERNANDES JUNIOR, 2013).

Tabela 5 - Resultado da caracterização física dos agregados e pó de mármore

Ensaio	Material	Resultado
Massa específica (ABNT, 2021a, 2021b)	Areia natural	2,587 g/cm <sup>3</sup>
	Areia artificial	2,725 g/cm <sup>3</sup>
	Pó de mármore	2,849 g/cm <sup>3</sup>
	Brita 0	2,725 g/cm <sup>3</sup>
	Brita 1	2,849 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária (ABNT, 2021c)	Areia natural	1,526 g/cm <sup>3</sup>
	Areia artificial	1,777 g/cm <sup>3</sup>
	Pó de mármore	1,683 g/cm <sup>3</sup>
	Brita 0	1,428 g/cm <sup>3</sup>
	Brita 1	1,522 g/cm <sup>3</sup>
Teor de finos (ABNT, 2022a)	Areia natural	1,92%
	Areia artificial	20,02%
	Pó de mármore	14,46%
	Brita 0	0,25%
	Brita 1	0,30%
Absorção de água (ABNT, 2021a, 2021b)	Brita 0	0,95%
	Brita 1	0,46%

Figura 14 - Resultado da difração de raios X

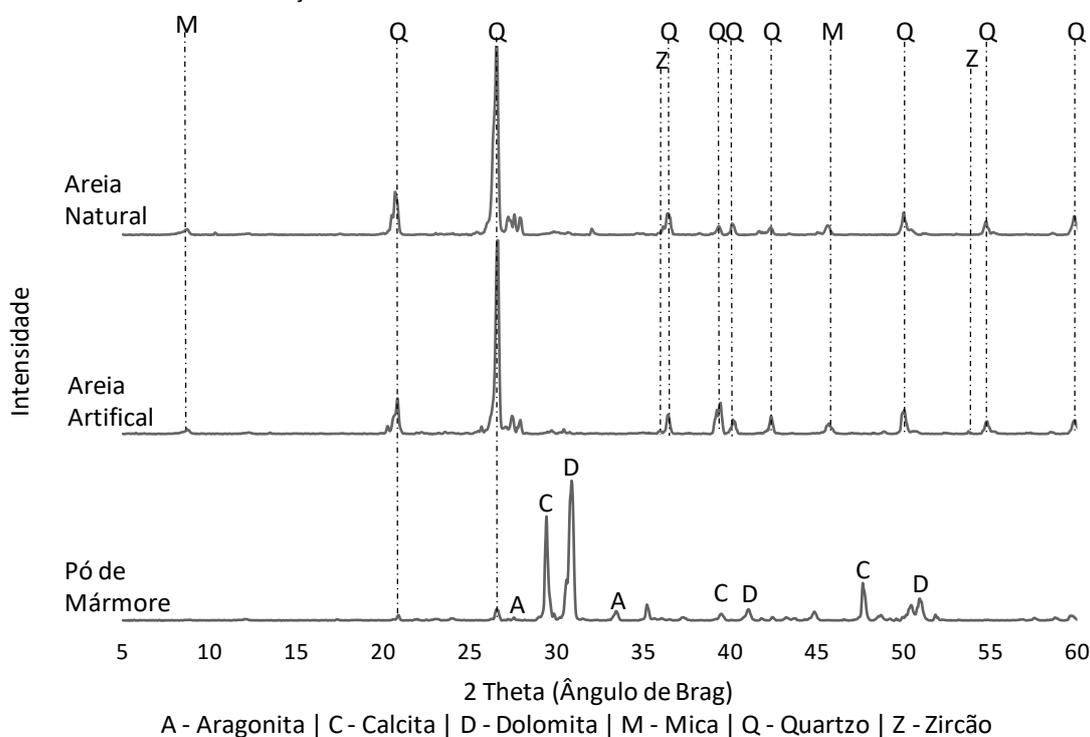


Tabela 6 - Consistência do concreto (ABNT, 2020)

Traço	Água de saturação agregados miúdos (ml)	Água de saturação agregados graúdos (ml)	Relação água/cimento (em volume)	Aditivo plastificante (ml)	Abatimento (mm)
T0	250	300	0,50	102	190
T15	250	300	0,48	102	230
T25	250	300	0,48	102	230

A Figura 15 apresenta o índice de absorção dos concretos desenvolvidos. Nota-se na Figura 15 que o índice de absorção de água do traço de referência (T0) é de 0,62% e que houve decréscimo para 0,53% ao substituir 15% da areia por pó de mármore. Ao analisar o traço T25, cuja substituição foi de 25%, o decréscimo foi superior, com absorção de água de 0,48%. Esse fenômeno ocorre em função do efeito filer, ocasionado pelo preenchimento dos vazios pelo pó de mármore, material que é fino, com grãos inferiores a 0,15 mm. Assim, pode-se aferir que os concretos de traços T15 e T25 têm melhor distribuição granulométrica no concreto, o que reduz a capilaridade e, conseqüentemente, diminui o coeficiente de absorção de água. Esse comportamento foi notado por Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009), Coura (2009), Elyamany, Abd Elmoaty e Mohamed (2014) e Dietrich (2015).

As massas específicas de cada um dos concretos produzidos são apresentadas na Figura 16, em que se nota que não existem diferenças relevantes entre os concretos. Essa análise é ratificada pelo método One-Way ANOVA, que também não identificou distinções reais entre os resultados obtidos pelos concretos de traços T0, T15 e T25. A massa específica dos materiais se encontra dentro dos parâmetros normalizados, de 2,200 g/cm<sup>3</sup> e 2,600 g/cm<sup>3</sup>. Os baixos valores de desvio padrão evidenciam a uniformidade no desenvolvimento dos CP. Como o traço T15 foi o que alcançou o menor desvio padrão de massa específica, pode-se inferir para esse critério que o concreto de traço T15 é o mais homogêneo entre os estudados.

Dado que o efeito filer tende a reduzir a porosidade da mistura de concreto, com a substituição de areia por pó de mármore na mistura, era esperado que houvesse aumento do valor da massa específica, conforme evidenciado por Coura (2009), Bardini, Klinsky e Fernandes Junior (2013) e Pereira (2019). Para este estudo, entretanto, o aumento de massa ocorrido foi praticamente imperceptível, o que converge para as constatações de Vinco *et al.* (2017), autores que não identificaram aumento real de massa específica na argamassa ao adicionar resíduos finos de rochas ornamentais. Assim como neste estudo, Vinco *et al.* (2017) adotaram a análise de variância ANOVA.

Na Figura 17 tem-se a média dos resultados da velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto endurecido. Os traços com 15% e 25% de pó de mármore foram respectivamente 3,58% e 5,20% maiores que o valor do traço de referência, 4.692 m/s. Coura (2009) e Elyamany, Abd Elmoaty e Mohamed (2014) apresentam que a diminuição do índice de vazios deixa a mistura de concreto mais densa e compacta, o que aumenta a velocidade de ultrassom. Assim, visto que as velocidades em T15 e T25 foram superiores à de T0, sugere-se que o concreto com material residual é mais homogêneo, compacto e com menor número de vazios que o concreto convencional, que contém areia.

Os dados de resistência à compressão são apresentados na Figura 18. Entre os traços estudados o T15 é o que alcançou o melhor resultado de resistência à compressão, 40,3 MPa, sendo 7,7% maior que o traço de referência, T0. O traço T25 também obteve acréscimo apreciável de resistência, de 7,47% em relação ao T0. Ao analisar os valores de desvio padrão, nota-se que o traço T25 foi o de menor dispersão dos resultados, logo seu resultado tem maior acurácia e previsibilidade que os valores obtidos pelos demais concretos. O acréscimo da resistência à compressão ocorre pela redução de vazios e aumento da densidade do concreto com a utilização do pó de mármore, tal qual é preconizado pelo efeito filer e evidenciado na literatura (COURA, 2009; TENNICH; KALLEL; QUEZDOU, 2015; NEVILLE, 2016).

A diferença entre a morfologia dos grãos da mistura pode influenciar no aumento da resistência em função do intertravamento das partículas e, com isso, sua melhor aderência à pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Nesse aspecto, a substituição de parte da areia pelo pó de mármore pode ter ocasionado esse efeito de intertravado dos grãos, um dos responsáveis pelo ganho de resistência nos traços T15 e T25.

A NBR 9781 (ABNT, 2013) determina que os pisos intertravados devem atender a uma resistência à compressão mínima de 35 MPa para fluxo de pedestres e de 50 MPa para tráfego pesado. Nesse aspecto, como as resistências à compressão dos traços desenvolvidos neste estudo foram próximas de 40 MPa (Figura 18), os concretos produzidos podem ser aplicados apenas para o fluxo de pedestres. O uso do cimento CP III-40 é

um dos fatores que fazem com que a resistência dos concretos seja de aproximadamente 40 MPa. Para produzir pavers passíveis de ser aplicados em tráfegos pesados, sugere-se a utilização de outro tipo de cimento, uma vez que, de forma geral, o aglomerante adotado influencia na resistência da matriz resultante. Dessa forma, para pavers de tráfego pesado, deve-se desenvolver um estudo que adote, por exemplo, o cimento CP-V, que se caracteriza por desenvolver matrizes cimentícias de elevada resistência (ABNT, 2018).

Figura 15 - Índice de absorção de água (ABNT, 2009)

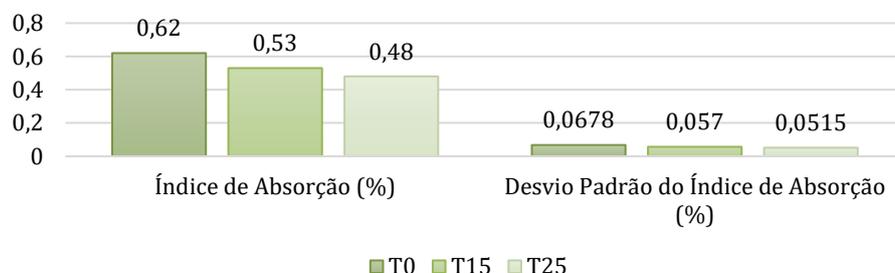


Figura 16 - Massa específica (ABNT, 2009)

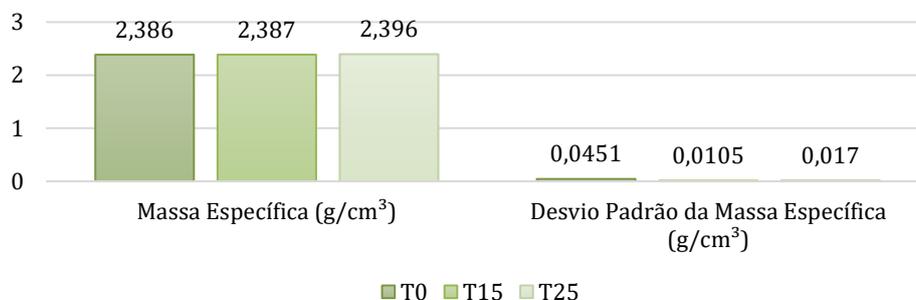


Figura 17 - Velocidade de ultrassom (ABNT, 2019)

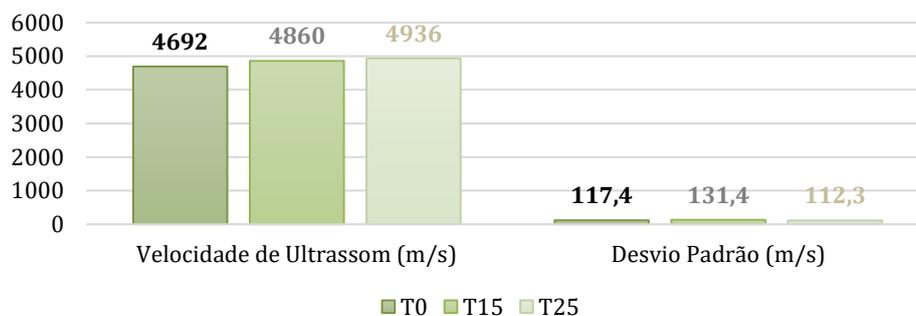


Figura 18 - Resistência à compressão (ABNT, 2013)

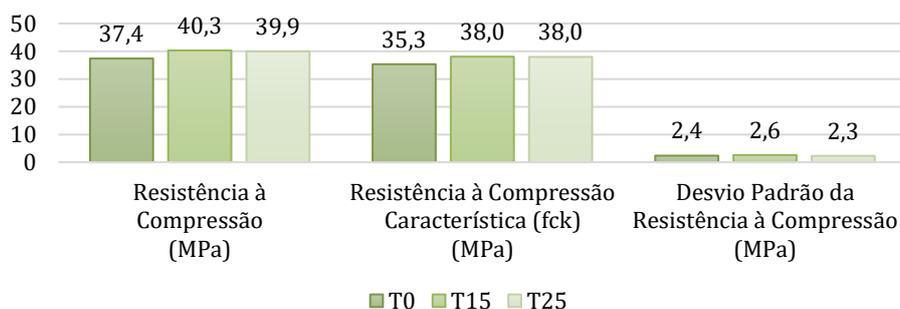


Figura 19 - Módulo de elasticidade (ABNT, 2017)

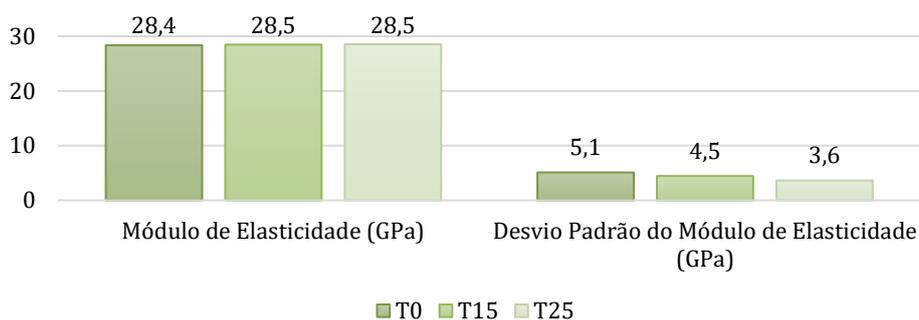
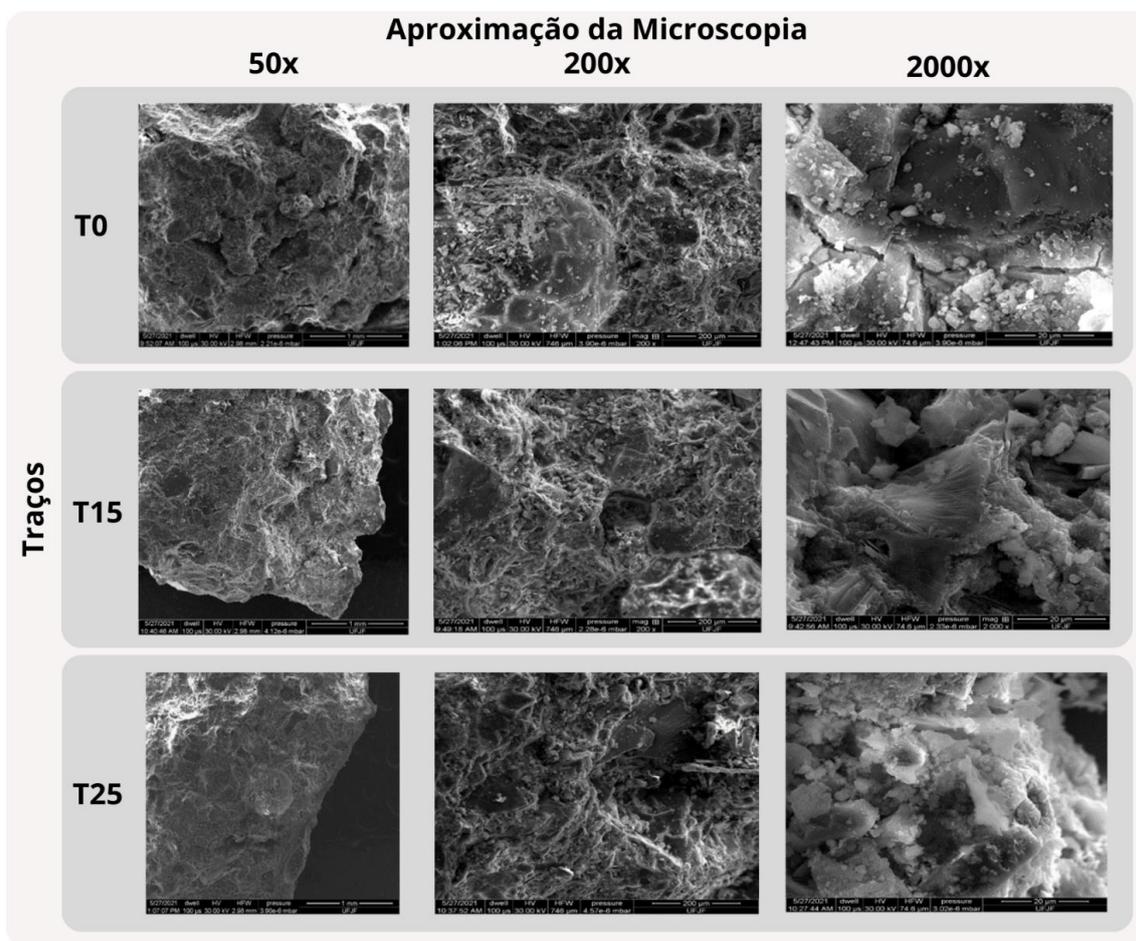


Figura 20 - Microscopia dos concretos produzidos



A Figura 19 apresenta o módulo de elasticidade alcançado pelos concretos T0, T15 e T25. Nota-se que os concretos T15 e T25 possuem módulo de elasticidade sutilmente superiores ao concreto de referência, T0, entretanto essa distinção não é significativa, conforme foi verificado no método One-Way ANOVA. Esse comportamento era esperado, dado que o módulo de elasticidade aumenta com a redução da porosidade do concreto (NEVILLE, 2016). Para essa propriedade, o T25 obteve o menor desvio padrão, sendo o traço de maior consistência entre os resultados alcançados.

Por meio das micrografias apresentadas na Figura 20, é possível notar a morfologia e as topografias das amostras que foram extraídas da região central dos CP. Na aproximação de 50x, constata-se a presença de poros em todos os traços, possuindo o T0, visivelmente, maior quantidade e magnitude de vazios que os traços T15 e T25. Microfissuras são identificadas no concreto T0 na microscopia de 200x. Com aproximação de

200x, não foi possível observar microfissuras em T15 e T25. Na aproximação de 2.000x, a microfissura de T0 é nítida, enquanto em T15 e T25 as microfissuras são praticamente imperceptíveis. Salienta-se que com 2.000x é possível notar alguns cristais na superfície das amostras utilizadas neste ensaio, sobretudo para T15 e T25.

As características dos concretos T15 e T25, como a reduzida quantidade e os diâmetros menores dos vazios, juntamente com a dificuldade de detectar microfissuras nesses materiais, são indicativos da produção de matrizes densas e uniformes. Essas matrizes, por sua vez, são resultantes da substituição parcial da areia natural por um material mais fino, o pó de mármore, o que converge para as verificações de Sadromtazi, Tahmouresi e Saradar (2018) e Ince *et al.* (2020).

## Conclusões

O objetivo proposto por este estudo foi o de investigar a utilização do pó de mármore como filler ao substituir a areia da composição de concreto nos teores de 15% (T15) e 25% (T25). Para isso, foram identificadas as propriedades físicas e cristalinas dos agregados e do pó de mármore que compuseram a mistura de concreto, bem como foram determinadas as propriedades mecânicas e microestruturais dos concretos produzidos.

Entre os principais resultados tem-se:

- (a) o pó de mármore possui reduzida granulometria, o que o caracteriza como material de efeito filler;
- (b) as fases cristalinas que compõem o pó de mármore são características de minerais como a dolomita, a calcita, a aragonita e o quartzo;
- (c) a utilização do pó de mármore melhorou a trabalhabilidade da mistura de concreto, sem a necessidade de aumentar a quantidade de água e sem causar segregação dos componentes;
- (d) o pó de mármore preencheu maior número de vazios do concreto quando comparado ao concreto de referência, gerando uma matriz mais densa e homogênea, conforme aferido no ensaio de velocidade de onda ultrassônica;
- (e) em função das características supracitadas, as matrizes T15 e T25, que foram desenvolvidas com pó de mármore, possuem maior resistência à compressão que o traço de referência de concreto convencional, T0, com uso apenas de areia. Nesse aspecto, o maior resultado de resistência à compressão obtido foi de 40,3 MPa, para o traço T15, mas os resultados de maior confiabilidade foram os do traço T25, em função de seu menor desvio padrão;
- (f) os valores obtidos para resistência à compressão dos concretos T15 e T25 atendem à NBR 16697 (ABNT, 2018) para a produção e a aplicação do concreto desenvolvido em pavers para fluxo de pedestres. Para tráfego pesado, pode ser efetiva a troca do cimento CP III-40 pelo CP-V, de alta resistência inicial. Essa sugestão é fundamentada no fato de que o tipo de aglomerante utilizado tem impacto direto na resistência à compressão das matrizes produzidas. Mesmo com o cimento CP-V sendo característico de concretos de elevada resistência, é necessário que se realizem estudos futuros comprovando sua aplicação e validando, ou não, o concreto desenvolvido como apto para a produção de pavers aplicáveis ao tráfego pesado; e
- (g) as imagens de microscopia eletrônica evidenciaram que as matrizes produzidas com incorporação de pó de mármore são mais densas, com reduzidos poros, de diâmetros menores do que os poros notados na matriz de concreto convencional.

Diante dessas considerações, o emprego do pó de mármore como substituto parcial da areia natural, tanto em 15% quanto em 25%, é uma técnica viável para a produção de blocos de pavimentação intertravados. Neste estudo não foi verificado o comportamento do material em idades superiores aos 28 dias, sendo isso, portanto, uma limitação desta pesquisa e uma sugestão para trabalhos futuros.

Um dos desafios de reintegrar materiais residuais no ciclo de produção é a escassa padronização da qualidade desses resíduos. Essa é uma das razões pelas quais a caracterização e a aplicação de resíduos, como o pó de mármore, devem sempre ser exploradas e incentivadas. Atualmente, são escassos na literatura estudos que avaliem o efeito filler do pó de mármore em substituição à areia natural nas misturas de concreto, tão pouco estudos, como este, que façam essas avaliações, com ensaios cristalográficos e microestruturais dos materiais. Nesse sentido, o presente trabalho agrega a literatura existente de reaproveitamento de resíduos de mármore, confirma comportamentos mecânicos identificados por alguns autores e se contrapõe a outros, como no caso de não ter sido identificado aumento significativo de massa específica do concreto com a substituição da areia

pelo resíduo. Além disso, a partir da confecção de pavers, este estudo apresenta uma aplicação prática do uso de resíduos na indústria da construção civil.

Por fim, espera-se que este trabalho incentive novas pesquisas e desenvolvimentos que busquem a reinserção de materiais residuais no ciclo produtivo, gradativamente apresentando ao mercado práticas mais sustentáveis e com potencial de transformar a economia e a indústria da construção civil. Salienta-se que, ao incorporar um resíduo no processo produtivo, ocorre a diminuição do consumo de matérias-primas, o que resulta na redução dos impactos ambientais relacionados à extração e beneficiamento dos recursos naturais.

## Referências

- AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2658-2663, 2010.
- ALMADA, B. S.; SANTOS, W. J. dos; SOUZA, S. R. Marble and granite waste as mineral addition in mortars with diferente water-cement ratios. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 7-22, out./dez. 2022.
- ARAUJO, T. C. B.; DOURADO, H. Avaliação de desempenho de pavers intertravado produzidos com rejeitos gerados nos desdobramentos de rochas ornamentais. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC**, v. 15, n. 2, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das exportações e importações de rochas no 1º trimestre de 2023**. 2023. Disponível em: [https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2023/06/Informe-01\\_2023-Balanc%CC%A7o-1o-trimestre-2023.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2023/06/Informe-01_2023-Balanc%CC%A7o-1o-trimestre-2023.pdf). Acesso em: 22 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: cimento Portland: determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2022b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: agregado graúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015b.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: versão corrigida: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310**: peneiras de ensaio: requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO. **Mercado de Agregados**: perspectivas para 2022. São Paulo, 2022. Disponível em: [https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivas-para-2022#:~:text=Em%202021%20o%20mercado%20de,anos%20de%202013%20e%202017](https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivas-para-2022#:~:text=Em%202021%20o%20mercado%20de,anos%20de%202013%20e%202017. Acesso em: 7 maio 2022). Acesso em: 7 maio 2022.
- BARBOSA, K. S. L. *et al.* Resíduos de mármore e granito em materiais compósitos: relação da granulometria nas propriedades mecânicas. **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 1319-1331, 2022.
- BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; FERNANDES JUNIOR, J. L. Influence of mineral filler on volumetric properties of hot mix asphalt. **Road Materials and Pavements Design**, v. 14, p. 15-27, 2013.
- BEZERRA, F. D. Rochas ornamentais: novas perspectivas de investimento. **Caderno Setorial ETENE**, v. 21, 2017.
- COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. **RILEM Proceedings Pro040**, v. 40, p. 580-589, 2010.
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113-117, 2010.
- COURA, C. V. G. **Análise experimental sobre a substituição do agregado miúdo por mármore triturado na confecção de concreto**. Niterói, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.
- CRUZ, A. C. F. *et al.* Caracterização do resíduo de corte de mármore e granito de marmoraria e análise da viabilidade de substituição parcial do cimento portland para produção de pavers. **Revista Univap**, v. 26, n. 51, p. 91-107, 2020.
- DA LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais**: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: Cetem-MCT, 2008.
- DELSAUTE; B.; STAQUET, S. Impacto f recycled sand and graves in concrete on volume change. **Construction and Building Materials**, v. 232, 2020.
- DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com a adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons de cloreto**. Vitória, 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- DIXIT, M. K.; CULP, C. H.; FERNÁNDEZ-SOLIS, J. L. System boundary for embodied energy in buildings: a conceptual model for definition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 153-164, 2013.
- ELYAMANY, H. E.; ABD ELMOATY M.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 2, p. 295-307, 2014.
- FERREIRA, C. C.; BERGMANN, C. P. Formação da eflorescência em cerâmica vermelha: fatores de influência no transporte dos íons SO<sub>4</sub>(<sup>2-</sup>) e Ca<sup>2+</sup>. **Cerâmica**, v. 57, p. 356-363, 2011.

- GADIOLI, M. C. B. *et al.* **Rochas aglomeradas: uma alternativa tecnológica e ambiental para a utilização dos resíduos de rochas ornamentais.** Rio de Janeiro: Cetem/MCTI, 2021.
- GIANNETTI, B. F. *et al.* Towards more sustainable social housing projects: recognizing the importance of using local resources. **Building and Environment**, v. 127, p. 187-203, 2018.
- GOMES JÚNIOR, P. G. B.; OLIVEIRA, S. R. C. de; DIAS FILHO, J. L. E. Avaliação do desempenho de compósito alternativo destinado aos sistemas urbanos e moradias de baixo custo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 255-272, jul./set. 2021.
- GOMES, V. R. *et al.* Ornamental stone wastes as an alternate raw material for soda-lime glass manufacturing. **Materials Letters**, v. 269, 2020.
- INCE, C. *et al.* Utilisation of waste marble dust for improved durability and cost efficiency of pozzolanic concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, 2020.
- KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, n. 61, p. 270-277, 2014.
- LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept. **Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais.** 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
- MENDES, G. A.; EFFTING, C.; SHACKOW, A. Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granitos: a propriedades físicas e mecânicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 403-418, jul./set. 2020.
- MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, 2011.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NOBREGA, A. K. C. *et al.* Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 13172-13179, 2015.
- PASCHOALIN FILHO, J. A.; STOROPOLI, J. H.; DUARTE, E. B. L. Viabilidade econômica da utilização de resíduos de demolição reciclados na execução do contrapiso de um edifício localizado na zona leste da cidade de São Paulo. **Gestão Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 928-943, 2014.
- PEREIRA, G. M. M. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore, como agregado miúdo, na produção de pisos intertravados.** Juiz de Fora, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.
- RENTIER, E. S.; CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Science of The Total Environment**, v. 838, 2022.
- SADRMOMTAZI, A.; TAHMOURESI, B.; SARADAR, A. Effects of sílica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 321-333, 2018.
- SANTOS, R. S.; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **Holos**, v. 5, p. 125-135, 2012.
- SHI, Z. *et al.* Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 60-72, 2016.
- TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. B. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 65-70, 2015.
- TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOGLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compaction concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1947-1953, 2009.
- VARDHAN, K. *et al.* Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015.

VINCO, L. G. F. *et al.* Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 165-182, out./dez. 2017.

WU, H. *et al.* Properties of green mortar blended with waste concrete-brick powder at various components, replacement ratios and particle sizes. **Construction and Building Materials**, v. 342, 2022.

YILMAZ, M.; BAKIS, A. Sustainability in construction sector. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2253-2262, 2015.

YLINIEMI, J. *et al.* Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymer aggregates in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 784-792, 2017.

ZULCÃO, R. *et al.* Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

## Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (PROPEC), à Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI-UFOP) e à Universidade Federal de Juiz de Fora. Agradecemos também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento de bolsa de doutorado de Aldo Ribeiro de Carvalho (Código de Financiamento 001), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

**Aldo Ribeiro de Carvalho**

Análise de dados, pesquisa, metodologia, redação do manuscrito original, redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de Ouro Preto | Rua Nove, s/n, Bauxita, Campus Morro do Cruzeiro | Ouro Preto - MG - Brasil | CEP 35402-163 | Tel.: (32) 2104-3411 e (22) 99862-6262 | E-mail: aldo.carvalho@engenharia.ufjf.br e aldo.carvalho@aluno.ufop.edu.br

**Gilber da Silva Júnior**

Análise de dados, pesquisa, metodologia.

Departamento de Construção Civil | Universidade Federal de Juiz de Fora | Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro | Juiz de Fora - MG - Brasil | CEP 36036-900 | Tel.: (32) 2102-3411 | E-mail: gilber.junior@engenharia.ufjf.br

**Wanna Carvalho Fontes**

Análise de dados, curadoria de dados.

Departamento de Engenharia Urbana | Universidade Federal de Ouro Preto | Tel.: (31) 3559-1156 | E-mail: wanna.fontes@ufop.edu.br

**Guilherme Jorge Brigolini Silva**

Análise de dados, curadoria de dados.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de Ouro Preto | Tel.: (31) 98466-4748 | E-mail: guilhermebrigolini@ufop.edu.br

**Leonardo Gonçalves Pedroti**

Supervisão, validação de dados e experimentos.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de Viçosa | Av. PH Rolfs, s/n, Centro | Viçosa - MG - Brasil | CEP 36570-900 | Tel.: (31) 3612-6120 | E-mail: leonardo.pedroti@ufv.br

**Thais Mayra de Oliveira**

Conceitualização, curadoria dos dados, administração do projeto, disponibilização de ferramentas, supervisão.

Departamento de Construção Civil | Universidade Federal de Juiz de Fora | Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro | Juiz de Fora - MG - Brasil | CEP 36036-900 | Tel.: (32) 2102-3411 e (32) 2104-3422 | E-mail: thais.mayra@ufjf.br

Editora 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.