

Desenvolvimento de concretos para pavimentação com incorporação de pó de mármore residual

Development of pavement concretes with incorporation of residual marble powder

Aldo Ribeiro de Carvalho, Mestre, Universidade Federal de Ouro Preto

aldorcarvalho@outlook.com

Gilbert da Silva Júnior, Mestre, Universidade Federal de Juiz de Fora

gilber.junior@engenharia.ufjf.br

Arthur Henrique Gasparete Casali, Mestre, Universidade Federal de Juiz de Fora

arthur.casali@engenharia.ufjf.br

Thaís Mayra de Oliveira, Doutora, Universidade Federal de Juiz de Fora

thais.mayra@ufjf.edu.br

Resumo

Este estudo investiga o uso do pó de mármore residual como filer na produção de concreto para pavimentos intertravados, substituindo 15% e 25% da areia natural – percentuais ainda pouco explorados na literatura. Foram analisadas as propriedades físicas e cristalinas dos materiais, bem como as características mecânicas e microestruturais dos concretos produzidos. Os resultados indicam que o pó de mármore reduz os vazios na matriz cimentícia, resultando em um concreto mais resistente, denso e homogêneo. As resistências à compressão obtidas, próximas de 40 MPa, atendem aos requisitos da norma técnica brasileira para pavimentação intertravada. Conclui-se que a incorporação de resíduos industriais não apenas melhora o desempenho dos materiais, mas também reduz o consumo de recursos naturais e os impactos ambientais associados à sua extração, promovendo uma abordagem mais sustentável para a construção civil.

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

Abstract

This study investigates the use of residual marble powder as a filler in the production of concrete for interlocking pavements, replacing 15% and 25% of natural sand—percentages that remain underexplored in the literature. The physical and crystalline properties of the materials were analyzed, as well as the mechanical and microstructural characteristics of the concretes produced. The results indicate that marble powder reduces voids in the cementitious matrix, resulting in stronger, denser, and more homogeneous concrete. The compressive strengths achieved, close to 40 MPa, meet the requirements of the Brazilian technical standard for interlocking pavement. It is concluded that the incorporation of industrial waste not only improves material performance but also reduces the consumption of natural resources and the environmental impacts associated with their extraction, promoting a more sustainable approach to civil construction.

Keywords: Concrete. Waste. Marble powder. Interlocking pavements.

1. Introdução

O concreto é um dos materiais mais utilizado no mundo (Carvalho *et al.*, 2023). Os agregados representam entre 60% e 75% do volume total da mistura, e sua qualidade influencia diretamente as características e propriedades do concreto produzido (Delsaute e Staquet, 2020). No Brasil, a demanda por agregados na construção civil em 2022 ultrapassou 640 milhões de toneladas, sendo 374 milhões de toneladas de areia e 266 milhões de tonelada de brita (ANEPAC, 2025).

A areia natural, principal agregado miúdo empregado na construção, é extraída de leitos de rios, várzeas, depósitos lacustres e mantos de decomposição de rochas, entre outras fontes. Sua extração, no entanto, pode causar impactos ambientais significativos, como alteração da paisagem e do leito dos cursos d'água, supressão da vegetação ciliar e instabilidade das margens e taludes (Rentier e Cammeraat, 2022). Além disso, devido à intensa exploração desse recurso, sua disponibilidade tem diminuído, exigindo a extração em locais cada vez mais distantes, o que acarreta o aumento dos custos de produção. Assim, a utilização de materiais residuais inertes pode ser uma alternativa viável para reduzir custos do concreto, reinserir o material no ciclo produtivo favorecendo a economia circular e também reduzindo a extração de matéria prima natural.

O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de rochas ornamentais, utilizando esse material na fabricação de revestimentos de fachadas, placas para pisos, ladrilhos hidráulicos e argamassas para pisos cimentícios (Gomes *et al.*, 2020). No entanto, a extração e o beneficiamento dessas rochas geram um volume expressivo de resíduos, estimado entre 2 e 2,5 milhões de toneladas anuais no país (Zulcão *et al.*, 2020).

As rochas ornamentais carbonáticas, caracterizadas por sua alta concentração de carbonato de cálcio (CaCO_3), desempenharam um papel relevante na economia brasileira, registrando exportações de 4,2 milhões de dólares no primeiro semestre de 2023, correspondentes a 9,3 toneladas comercializadas (ABIROCHAS, 2023). O beneficiamento dessas rochas resulta na produção de um resíduo extremamente fino, conhecido como pó de mármore, que representa aproximadamente 25% de todos os subprodutos do setor (Barbosa *et al.*, 2022). Esse resíduo, frequentemente armazenado nos pátios de marmorarias ou descartado em aterros, pode causar impactos ambientais adversos, como alteração da paisagem natural, poluição visual e assoreamento de corpos d'água (Barbosa *et al.*, 2022).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) o pó de mármore é classificado como um resíduo não perigoso de Classe II B – Inerte. Assim, sua incorporação em materiais de construção não apresenta riscos ambientais ou à saúde humana. Além disso, devido à sua granulometria reduzida, o pó de mármore pode atuar como um material de preenchimento (fíler) no concreto, contribuindo para a redução da porosidade da matriz e aumentando sua densidade, compacidade e resistência (Crux *et al.*, 2020).

Diante da ampla disponibilidade de resíduos de pó de mármore no Brasil e da ausência de regulamentação específica para sua aplicação em concretos, este estudo teve como objetivo investigar o uso desse material como fíler e seus efeitos na produção de concretos para pavimentos intertravados. Para isso, foram desenvolvidos e avaliados concretos nos quais a areia natural foi parcialmente substituída pelo pó de mármore em proporções de 15% e 25%. Esses percentuais foram escolhidos devido à escassez de referências na literatura sobre a reutilização desse resíduo nessas proporções até o momento. O estudo analisou as propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos, contribuindo para a ampliação do conhecimento sobre a viabilidade da incorporação do pó de mármore na construção civil.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Foram utilizados cimento CP III-40 RS e o aditivo plastificante de pega normal SikaMent RM-300, cujas especificações comerciais indicam densidade de $1,18 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e pH de $6,0 \pm 1,0$.

Os agregados empregados incluem areia artificial, brita 0 e brita 1, provenientes de uma pedreira de gnaiss da empresa Petra Agregados. A areia artificial possui granulometria passante na peneira de 4,8 mm, a brita 0 na peneira de 12,5 mm e a brita 1 na peneira de 25 mm. A areia natural, passante na peneira de 6,8 mm, é extraída do leito do Rio Preto, localizado na região da cidade de Rio Preto, MG. Já o pó de mármore, com granulometria passante na peneira de 0,42 mm, é um subproduto do beneficiamento de rochas calcárias na cidade de Mar de Espanha, MG, sendo coletado imediatamente após o processo produtivo em uma empresa unifamiliar local.

2.2 Preparo do concreto

O traço de referência (T0) foi formulado sem a incorporação de pó de mármore, apresentando a seguinte proporção em massa: 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 por meio da substituição parcial da areia pelo pó de mármore.

Para determinar os percentuais de substituição, analisaram-se as frações passantes nas peneiras da série normal para substituições progressivas de 5%, variando de 0% a 100%. Esse estudo foi realizado com base no modelo de empacotamento de Andreassen modificado, utilizando os parâmetros $q = 0,37$, $D_s = 0,075 \text{ mm}$ e $D_l = 19 \text{ mm}$. Constatou-se que as substituições de 15% e 25% permitiam avaliar o efeito filler sem aumento significativo do material retido nas peneiras de 0,3 mm, 0,6 mm, 1,2 mm e 2,4 mm.

A produção do concreto seguiu a norma NBR 12655 (ABNT, 2022), e a moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Para cada traço (T0, T15 e T25), foram moldados 34 corpos de prova (CP). Os CPs foram desmoldados no quinto dia e armazenados em câmara úmida até completarem 28 dias de cura. 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.

2.3 Métodos

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

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado na prensa hidráulica Contenco Pavitest, em conformidade com as diretrizes da NBR 9781 (ABNT, 2013). O módulo de elasticidade foi determinado por meio de aparelhos Strain Gauge durante o ensaio de compressão dos CP, seguindo as prescrições da NBR 8522 (ABNT, 2021).

Para uma análise mais precisa dos resultados dos ensaios de massa específica e módulo de elasticidade, foi adotado o método estatístico de análise de variância One-Way ANOVA,

utilizando o software GraphPad Prism 9.2.0. Esse método permite realizar comparações entre três ou mais grupos de amostras independentes e verificar se as diferenças observadas são significativas ou se são decorrentes de variabilidade amostral casual.

3. Resultados e Discussões

3.1 Índice de Absorção de Água e Massa Específica

A Figura 1 apresenta o índice de absorção de água e a massa específica dos concretos. O índice de absorção de água do traço de referência (T0) é de 0,62%, reduzindo para 0,53% com a substituição de 15% da areia por pó de mármore (T15). No traço T25, com substituição de 25%, a absorção de água diminuiu ainda mais, atingindo 0,48%. Esse efeito decorre da ação filler do pó de mármore, cujas partículas finas ($\leq 0,15$ mm) preenchem os vazios da matriz, aprimorando a distribuição granulométrica e reduzindo a capilaridade, o que resulta em menor absorção de água (Elyamany, Elmoaty e Mohamed, 2014).

As massas específicas, por sua vez, praticamente não indicaram diferenças entre os traços. Essa constatação é corroborada pelo método One-Way ANOVA, que não identificou variações estatisticamente relevantes entre T0, T15 e T25. Os valores obtidos estão dentro dos padrões normativos ($2,200 \text{ g/cm}^3$ a $2,600 \text{ g/cm}^3$). O traço T15 apresentou o menor desvio padrão, sugerindo maior homogeneidade em relação aos demais. O efeito filler, ao reduzir a porosidade do concreto, geralmente resulta no aumento da massa específica (Bardini, Klinsky e Fernandes Júnior, 2013). Entretanto, neste estudo, o aumento foi praticamente imperceptível.

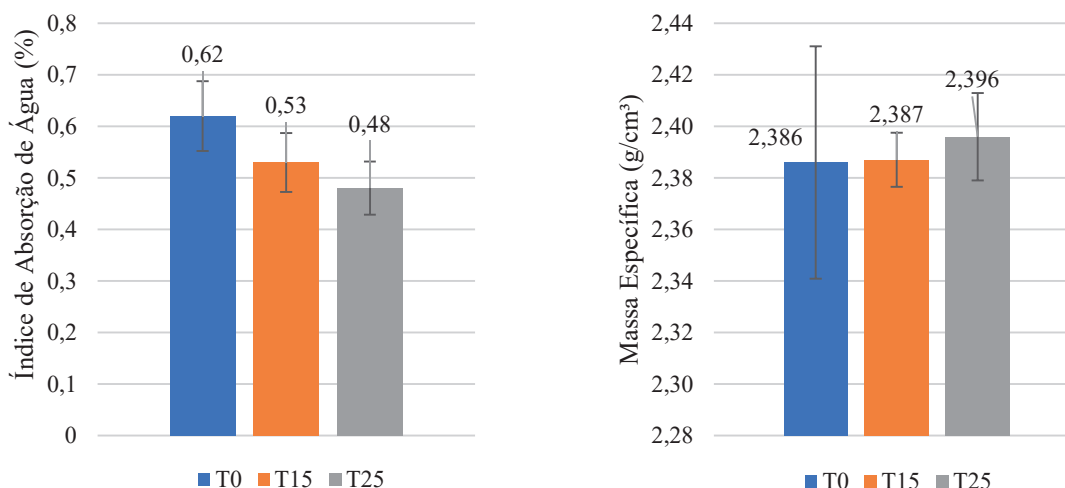


Figura 1: Absorção de Água e Massa Específica. Fonte: Autores (2025)

3.2 Velocidade de Onda de Pulso Ultrassônico

Figura 2 apresenta a velocidade média de propagação de onda ultrassônica no concreto endurecido. Os traços T15 e T25 registraram aumentos de 3,58% e 5,20%, respectivamente, em relação ao traço de referência (4.692 m/s). A redução da porosidade aumenta a densidade da mistura, elevando a velocidade de ultrassom (Elyamany, Elmoaty e Mohamed, 2014). Assim, a superioridade dos valores em T15 e T25 sugere que a incorporação de pó de mármore melhora a compacidade e a homogeneidade do concreto.

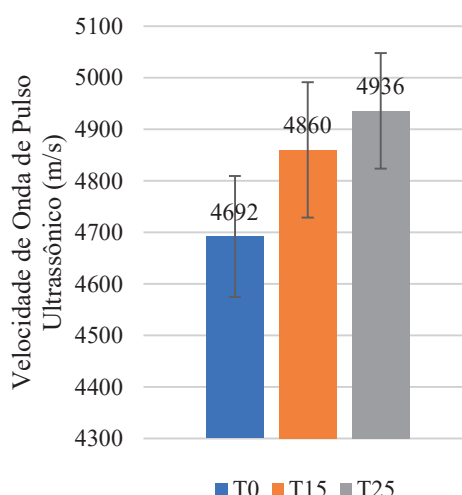


Figura 2: Velocidade de Onda de Pulso Ultrassônico. Fonte: Autores (2025)

3.3 Resistência à compressão

A Figura 18 exibe os resultados de resistência à compressão. O T15 obteve o melhor desempenho, atingindo 40,3 MPa, um incremento de 7,7% em relação ao T0. O T25 também apresentou aumento significativo (7,47%). O menor desvio padrão em T25 indica maior previsibilidade dos resultados. O ganho de resistência decorre da menor porosidade e maior densidade da matriz, conforme preconizado pelo efeito filer (Neville, 2016)

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013) pisos intertravados devem possuir resistência mínima de 35 MPa para pedestres e 50 MPa para tráfego pesado. Como os concretos desenvolvidos atingiram cerca de 40 MPa, são adequados apenas para áreas de circulação de pedestres. O uso do cimento CP III-40 influenciou esses resultados, e a produção de pavers para tráfego pesado demandaria a adoção de outro tipo de cimento, como o CP-V, que proporciona matrizes de maior resistência (ABNT, 2018).

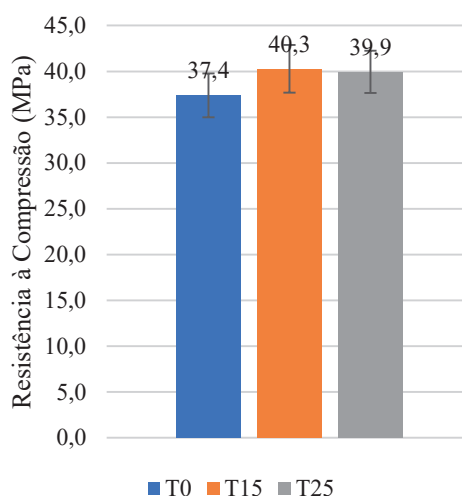


Figura 3: Resistência à Compressão

3.4 Módulo de Elasticidade

A Figura 4 apresenta o módulo de elasticidade dos concretos estudados. Embora os traços T15 e T25 tenham valores ligeiramente superiores ao T0, a diferença não é estatisticamente significativa, conforme análise One-Way ANOVA. Esse comportamento era esperado, pois a redução da porosidade tende a aumentar o módulo de elasticidade (Neville, 2016). O T25 apresentou o menor desvio padrão, evidenciando maior consistência nos resultados.

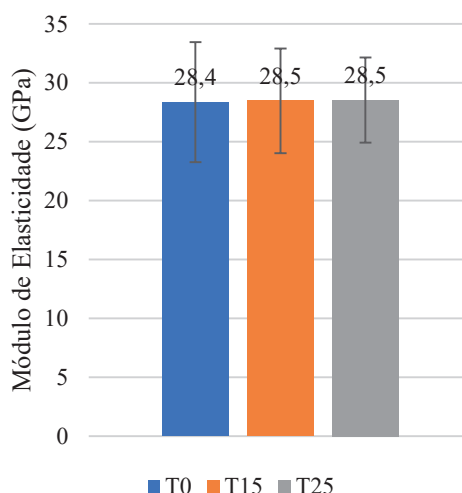


Figura 4: Módulo de Elasticidade

4. Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo avaliar a incorporação de pó de mármore como filer na substituição parcial da areia em concretos para pavimentação, nos teores de 15% (T15) e 25% (T25). Para isso, foram analisadas as propriedades físicas e cristalinas dos agregados e do pó de mármore, além das características mecânicas e microestruturais dos concretos produzidos.

Os principais achados incluem:

- O pó de mármore promoveu um preenchimento mais eficiente dos vazios na matriz cimentícia, resultando em um concreto mais denso e homogêneo, conforme demonstrado pelos ensaios de velocidade de onda ultrassônica;
- Em razão dessa compactação superior, os traços T15 e T25 apresentaram resistência à compressão superior ao traço de referência (T0), que utilizou apenas areia. O maior valor de resistência registrado foi 40,3 MPa, no traço T15, enquanto o T25 apresentou os resultados mais consistentes, devido ao menor desvio padrão;
- Os concretos T15 e T25 atenderam aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018). para aplicação em pavers destinados ao fluxo de pedestres. No entanto, para uso em tráfego pesado, recomenda-se a substituição do cimento CP III-40 pelo CP-V, que apresenta maior resistência inicial. Essa sugestão baseia-se no impacto significativo do tipo de aglomerante na resistência final do concreto. Entretanto, estudos adicionais são necessários para validar a aplicação do concreto com CP-V nesse contexto.

Os resultados confirmam a viabilidade técnica da substituição parcial da areia pelo pó de mármore em 15% e 25% na produção de blocos intertravados para pavimentação. Além disso, espera-se que este estudo contribua para incentivar novas pesquisas sobre a reutilização de

materiais residuais na construção civil, promovendo práticas mais sustentáveis. A incorporação de resíduos industriais reduz o consumo de matérias-primas naturais e mitiga os impactos ambientais associados à extração e beneficiamento desses recursos, favorecendo um modelo produtivo mais sustentável e economicamente viável.

Referências

ABIROCHAS. Balanço 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>.

ANEPAC. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. ANEPAC, 2025. Disponível em: <<https://anepac.org.br/mercado/>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassas e Concretos endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. ABNT. Rio de Janeiro. 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Requisitos**. ABNT. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. ABNT. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655 - concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento**. ABNT. Rio de Janeiro. 2022.

BARBOSA, K. S. L. et al. Resíduos de mármore e granito em materiais compósitos: relação da granulometria das propriedades mecânicas. **Conjecturas**, Março 2022. 1319-1331.

BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Influence of mineral filler on volumetric properties of hot mix asphalt. **Road Materials and Pavements Design**, 2013. 15-27.

CARVALHO, A. R. D. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, 403, 3 November 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823027952>>.

CRUX, A. C. F. D. 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**, 2020.
<https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v26i51.2444>.

DELSAUTE, B.; STAQUET, S. Impact of recycled sand and gravels in concrete on volume change. **Construction and Building Materials**, 30 January 2020. 117279.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117279>.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, A. E. M. A.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, June 2014. 295-307.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>.

GOMES, V. R. et al. Ornamental stone wastes as an alternate raw material for soda-lime glass manufacturing. **Materials Letters**, 15 June 2020. 127579.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127579>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5°. ed. [S.l.]: Bookman, 2016.

RENTIER, E. S.; CAMMERAAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Science of The Total Environment**, 10 September 2022. 155877.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>.

ZULCÃO, R. et al. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction and Building Materials**, 10119523 October 2020. 119523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119523>.