INFLUÊNCIA DO TEOR DE SÍLICA REATIVA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATRIZES GEOPOLIMÉRICAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DE MÁRMORE BRANCO E PÓ DE VIDRO

Influence of reactive silica content in mechanical strength of geopolymeric matrices made from white marble and glass powder wastes

Samara Ferreira de Abreu
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) | Ouro Preto, MG | samara.abreu@aluno.ufop.edu.br

Matheus Henrique Dela Costa Ferreira
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) | Ouro Preto, MG | matheus.dela@aluno.ufop.edu.br

Cristopher Antonio Martins Moura
Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) / UFOP | Ouro Preto, MG | cristopher.moura@ufmt.br

José Agenor Carvalho Júnior
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) | Ouro Preto, MG | j_a_c_jr@outlook.com

Gustavo Dias Ramos
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) | Ouro Preto, MG | gustavo.ramos@aluno.ufop.edu.br

Guilherme Jorge Brigolini Silva
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) | Ouro Preto, MG | guilhermebrigolini@ufop.edu.br

Resumo

As operações de corte e processamento de mármore branco e vidro geram quantidades expressivas de resíduos sólidos de difícil gerenciamento. Diante desse desafio, este estudo propõe um aglomerante geopolimérico álcali-ativado como alternativa sustentável, utilizando resíduo de mármore (RM) e pó de vidro (RV). Os resíduos foram processados e caracterizados utilizando as técnicas de FRX, DRX e Granulometria a Laser. Foram desenvolvidas três composições: uma mistura de referência com RM puro e com teores de substituição do RM por RV de 25% e 50%, empregando solução de NaOH 10M. Os ensaios mecânicos demonstraram que a incorporação do RV elevou a resistência das pastas. Aos 28 dias, as formulações com 25% e 50% de substituição registraram resistências à tração na flexão de 3,65 e 4,65 MPa, enquanto a resistência à compressão alcançou 11,57 e 18,44 MPa, respectivamente. Portanto, concluiu-se que a sílica amorfa do RV foi determinante para o aprimoramento das propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Mármore branco; Pó de vidro; Geopolímero; Ativação alcalina; Aglomerante de baixo carbono.

ABSTRACT

Marble and glass cutting and processing operations generate significant amounts of solid waste that are difficult to manage. In view of this challenge, this study proposes an alkali-activated geopolymer binder as a sustainable alternative, using marble residue (RM) and glass powder (RV). The residues were processed and characterized using XRF, XRD, and Laser Granulometry techniques. Three compositions were developed: a reference mixture with pure RM and RM replacement levels by RV of 25% and 50%, using a 10M NaOH solution. Mechanical tests demonstrated that the incorporation of RV increased the pastes' strength. At 28 days, the formulations with 25% and 50% substitution recorded flexural tensile strengths of 3.65 and 4.65 MPa, while the compressive strength reached 11.57 and 18.44 MPa, respectively. Therefore, it was concluded that the amorphous silica in RV was decisive for improving mechanical properties.

Keywords: White marble; Glass powder; Geopolymer; Alkaline activation; Low carbon binder.

1 INTRODUÇÃO

O mármore branco é uma rocha originada pelo metamorfismo de camadas de rochas sedimentares ricas em carbonatos de cálcio e magnésio, quartzo e outros minerais acessórios como mica, hematita, clorita, limonita e outros minerais em menor proporção (CANTISANI *et al.*, 2005; CITAK *et al.*, 2023). A coloração clara, combinada com sua baixa dureza, a tornou uma opção atraente para aplicações ornamentais, sendo esta rocha utilizada para este fim desde a época Greco-Romana (CANTISANI *et al.*, 2005; WIELGOSZ-RONDOLINO *et al.*, 2020). Nos tempos modernos, a extração e beneficiamento do mármore para uso como rocha ornamental tomou proporções industriais, e neste processo é gerado uma grande quantidade de resíduo de pó de mármore (RM). Por se tratar de um processo feito em via úmida, estes resíduos se misturam junto a água para formar uma lama que é comumente depositada em grandes volumes em áreas a céu aberto e muitas vezes sem leito impermeável (CAMPOS *et al.*, 2013).

Visando propor uma destinação mais nobre para o RM, diversos estudos já propuseram utilizar o resíduo como um potencial precursor para a confecção de matrizes geopoliméricas através da ativação alcalina. Wang *et al.* (2023) utilizaram RM como precursor adicional em misturas de escória de alto-forno e metacaulim. Os autores obtiveram resultados de resistência à compressão de até 60 MPa aos 28 dias em traço 1:1 de RM e escória, respectivamente, além de uma melhora da fluidez das pastas. No entanto, o traço somente com escória obteve resistência superior a 80 MPa aos 28 dias. Liu *et al.* (2023) verificou a influência do RM nas propriedades mecânicas de geopolímeros de escória com substituição por 0-50% de RM e observaram uma tendência similar, com o aumento do índice de consistência para o teor máximo de substituição. No entanto, houve piora da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias ao substituir 50% da escória por RM, o que foi atribuído à diluição da escória, o que dificultou o contato do ativador alcalino com o material. Desta forma, percebe-se um papel importante desempenhado pelo elevado teor de sílica (SiO_2) reativa presente na escória na resistência das matrizes avaliadas em ambos os estudos.

Nesse sentido, com o objetivo de elucidar a influência do teor de SiO_2 reativo em matrizes álcali-ativadas de mármore branco, como também contribuir para os trabalhos no campo de aglomerantes de baixo carbono, este trabalho propõe a substituição do RM por pó de vidro (RV) como uma fonte complementar de SiO_2 reativa em pastas geopoliméricas, visando avaliar a influência da substituição no seu desempenho mecânico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As lamas dos resíduos de RV e RM, obtidos a partir de processos de corte dos insumos na indústria, foram secas em estufa e processadas em moinho de jarro e esferas. Para caracterização dos materiais de partida, aplicou-se as técnicas de difração de raios-X (DRX), perda ao fogo (PF), fluorescência de raios-X (FRX) e granulometria a laser (GL). A análise de DRX foi realizada no difratômetro *Bruker D2 Phaser* equipado com tubo de cobre, atuando a 10 mA e 30 kV, entre 5°≤ 2θ≤80°, com incremento de 0,018 °/passo e aquisição de 1,5 s/passo. As análises foram executadas a partir dos softwares *X'Pert Highscore Plus v*3.0 (*Panalytical*). Para fabricação do geopolímeros foram implementados os traços descritos na Tabela 1, com a ativação alcalina por meio de solução 10 mol/L de NaOH, configurando um processo *two part mix.* Após a mistura em argamassadeira automática, determinou-se o índice de consistência da mistura (IC). Os foram moldados em formas metálicas de 4x4x16cm e curados a 70°C por 3 dias, seguida de cura a 25°C até completar as idades de 7 e 28 dias. O ensaio de tração na flexão em três pontos e compressão foram executados em prensa hidráulica (Intermetric) com as taxas de 0,45 MPa/s e 0,10 MPa/s, respectivamente.

Tabela 1: Misturas de geopolímeros utilizadas neste estudo

Traço	Materiais						IC (mm)
	RM (g)	RV (g)	RM/MTr	RV/MTr	Ativador (g)	Ativador/Sólidos	
TR	1.150,0	0,0	1,0	0,0	690,0	0,60	198,0
T-01	862,5	287,5	0,75	0,25	690,0		202,0
T-02	575,0	575,0	0,50	0,50	690,0		200,7

Legenda: MTr – Massa total de resíduos; IC – Índice de consistência.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

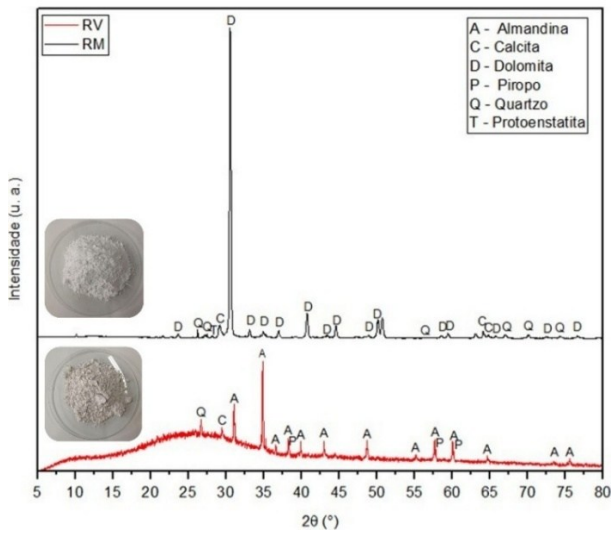
A composição química do RV está apresentada na Tabela 2. Identificou-se a presença de SiO_2, Na_2O, CaO, MgO, Fe_2O_3, Al_2O_3 e outros óxidos em menor teor. A composição química do RV é semelhante aos encontrados em outros trabalhos, por se tratar de um vidro soda-cal comumente utilizado na indústria (SADJI; BOUDCHICHA, 2023).

Tabela 2: Composição química (FRX) dos resíduos de vidro e de mármore (%)

Materiais	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	Fe_2O_3	Outros	PF
RM	29,9	21,7	6,2	0,5	-	-	0,2	41,5
RV	6,9	2,6	52,2	1,7	14,4	2,0	0,7	19,5

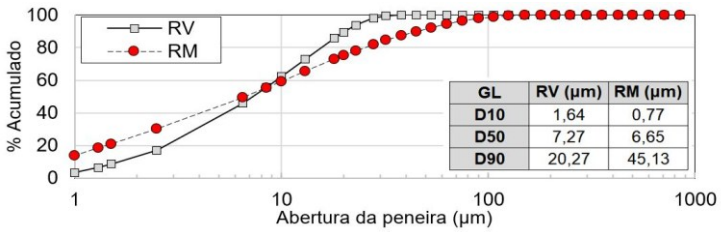
Com o auxílio deste resultado foi possível identificar as fases presentes no difratograma (Figura 1) do RV. Observou-se um halo (5 a 40°) que corresponde à sílica amorfa e a presença dos minerais quartzo – SiO_2, calcita – $CaCO_3$, almandina - $Fe_3^{2+}Al_2(SiO_4)_3$ e piropo - $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ (GONG *et al.*, 2024; SADJI; BOUDCHICHA, 2023; ZHENG *et al.*, 2022). A presença das fases almandina e piropo no RV é devida ao material abrasivo utilizado no processo de corte a jato d'água do vidro. A Tabela 2 também revela que o RM é composto por MgO, CaO, SiO_2 e Al_2O_3 como os principais óxidos, com outros elementos em teores abaixo de 1%. De acordo com o difratograma da Figura 1, houve picos de difração referentes à dolomita – $CaMg(CO_3)_2$, calcita, quartzo e protoenstatita - $Mg_2(SiO_3)_2$ (HOU *et al.*, 2024).

Figura 1: Composição mineralógica do RM e RV.



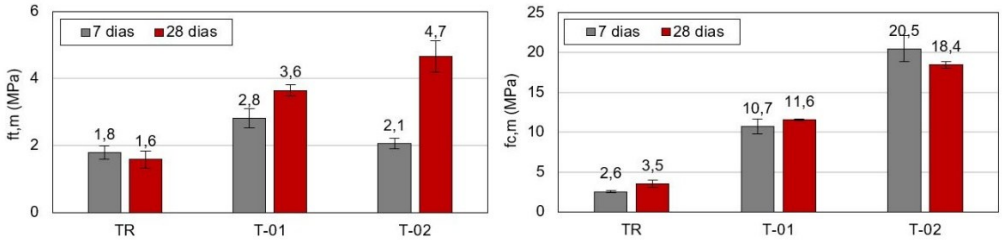
O resultado do ensaio de caracterização da granulometria do RM e RV, junto de seus respectivos índices D_{10}, D_{50} e D_{90}, está disposto na Figura 2. É possível observar que a distribuição granulométrica de ambos os resíduos apresentou curvas pouco inclinadas, o que indica uma distribuição contínua dos grãos.

Figura 2: Distribuição granulométrica do RM e RV.



Ao analisar os índices e o perfil granulométrico do RM e RV, percebeu-se que ambos possuem uma distribuição granulométrica muito fina, com 90% das partículas com tamanhos menores que 20,27 e 45,13 µm para o RV e RM, respectivamente. A granulometria fina dos resíduos está compatível com o que vem sendo praticado pela maioria dos trabalhos que utilizaram ambos os materiais como precursores para aglomerantes álcali-ativados (AGIRMAN; BAYRAK; AYDIN, 2024; LIU *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2023).

Figura 3: Resistência mecânica das misturas propostas aos 7 e 28 dias.



Os resultados de resistência mecânica nas idades de 7 e 28 dias são mostrados na Figura 3. É notável a influência benéfica da adição de RV tanto na resistência à compressão quanto na flexão, sendo que o traço T-01 exibiu um aumento considerável de performance à compressão em ambas as idades, com um ganho de 311% e 231% aos 7 e 28 dias, em comparação ao traço de referência (TR). Seguindo a mesma tendência, o traço T-02 com 50% de substituição de RM por RV foi o que exibiu o melhor desempenho em todas as idades, com ganhos na compressão de 688% e 426% aos 7 e 28 dias. A única exceção consta na ruptura à flexão aos 7 dias, que não seguiu a mesma tendência observada nos demais resultados do T-02. A tendência observada nestes resultados de ruptura está em consonância com outros trabalhos que fizeram uso de RM em conjunto com diversas fontes distintas de SiO_2 reativa, como metacaulim, escória de alto-forno, cinzas volantes, etc. ressaltando a importância de se utilizar uma fonte adicional de SiO_2 solúvel para compensar a deficiência natural do RM no teor de SiO_2 (AGIRMAN; BAYRAK; AYDIN, 2024; LIU *et al.*, 2023; RASHAD *et al.*, 2025; WANG *et al.*, 2023).

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi avaliado o efeito do RV em substituição ao RM na resistência mecânica de pastas geopoliméricas álcali-ativadas. Foi possível observar ganhos relevantes de resistência à compressão tanto para T-01 e T-02, este com 50% de substituição de RM por RV exibindo ganhos máximos de 688% (7 dias) e 426% (28 dias). A partir dos resultados obtidos, sugere-se que a sílica reativa presente no RV contribuiu para o aumento do desempenho mecânico, sendo coerente com o observado em outros estudos da literatura.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de reconhecer e agradecer às instituições CPRM, CNPq e CAPES pelo apoio financeiro, e à UFOP e laboratório Nanolab/REDEMAT por cederem a infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGIRMAN, Serpil; BAYRAK, Barış; AYDIN, Abdulkadir Cüneyt. The confinement effect of basalt fibers for reinforced geopolymer composites: Flexural, shear and torsion capability for ductility and failure. **Construction and Building Materials**, v. 450, p. 138660, 2024. ISSN 1879-0526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824038029?via%3Dihub>. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138660.

CAMPOS, Antonio Rodrigues *et al*. Resíduos: Tratamento e aplicações industriais. *In*: VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. v. 1. ISBN: 987-85-8261-0005-3. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1960>.

CANTISANI, Emma *et al*. Mineralogical and petrophysical characterisation of white Apuan marble. **Periodico di Mineralogia**, v. 74, n. 2, 2005. ISSN 0369-8963.

CITAK, Hakan *et al*. Comprehensive Review of Studies on Metamorphic Rocks. **International Journal of Geosciences**, v. 14, n. 10, p. 999-1035, out. 2023. ISSN: 2156-8367 Disponível em: < https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=128715>. DOI: https://doi.org/10.4236/ijg.2023.1410052.

GONG, Yu'an *et al*. Recycling of waste glass powder: Effects on microstructure, mechanical properties and sustainability of seashell powder calcined sludge cement. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110665, 2024. ISSN: 2352-7102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224022332>. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110665.

HOU, Wei et al. Sustainable Reusing Marble Powder and Granite Powder in Cement-Based Materials: A Review. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 12, n. 7, p. 2484–2510, 2024. ISSN: Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06670>. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06670.

LIU, Bing et al. A preliminary study on waste marble powder-based alkali-activated binders. **Construction and Building Materials**, v. 378, p. 131094, 2023a. ISSN: 0950-0618. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061823008061>. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131094.

RASHAD, Alaa M. et al. Waste marble powder emerges as a promising material choice to enhance the properties of alkali-activated slag cement. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 43, p. 101864, 2025. ISSN: 2352-5541. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235255412400439X>. DOI: 10.1016/j.scp.2024.101864.

SADJI, Amel; BOUDCHICHA, Mohamed Redda. Addition of Glass Powder to Magnesium Potassium Phosphate Cement Based on MgO Brick. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 5, p. 04023085, 2023. ISSN: 0899-1561 Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0004743>. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004743.

WANG, Tongkuai *et al*. Study on properties and mechanism of alkali-activated geopolymer cementitious materials of marble waste powder. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100249, 2023. ISSN: 2666-1659. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S266616592300131X>. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100249.

WIELGOSZ-RONDOLINO, Dagmara *et al*. Improved methodology for identification of Göktepe white marble and the understanding of its use: A comparison with Carrara marble. **Journal of Archaeological Science**, v. 113, p. 105059, 2020. ISSN: 0305-4403. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305440319301463>. DOI: 10.1016/j.jas.2019.105059.

ZHENG, Chuji et al. Characteristics and microstructures of the GFRP waste powder/GGBS-based geopolymer paste and concrete. v. 61, n. 1, **REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE**, p. 117–137, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0005>. DOI: https://doi.org/10.1515/rams-2022-0005.