

OBTENÇÃO DE GEOPOLÍMEROS APARTIR DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA SUBSTITUTO DO CIMENTO PORTLAND

OBTAINING GEOPOLYMERS FROM ORNAMENTAL STONE WASTE AS A SUBSTITUTE FOR PORTLAND CEMENT

Ryan de Jesus Ferreira

Aluno de Graduação da Engenharia de Minas 7º período
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Período PIBITI/CETEM: setembro de 2024 a agosto de 2025
ryan-ferreira@outlook.com.br

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Orientador, Geólogo, D.Sc.
leolysil@cetem.gov.br

Mariane Costalonga de Aguiar

Coorientadora, Química, D.Sc.
maguiar@cetem.gov.br

Kayrone Marvila de Almeida

Coorientador, Engenheiro de Minas, M.Sc.
kmalmeida@cetem.gov.br

RESUMO

A crescente demanda por recursos minerais e materiais de construção tem intensificado os impactos ambientais causados pela mineração e pela indústria cimenteira, destacando-se a geração de grandes volumes de resíduos sólidos e as elevadas emissões de CO₂. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da produção de geopolímeros a partir da combinação de metacaulim e resíduo de granito, com foco na valorização de resíduos minerais e no desenvolvimento de materiais cimentícios sustentáveis. Os precursores foram ativados com solução alcalina composta por hidróxido de potássio e silicato de sódio, mantendo-se uma razão sólido/líquido de 2,05 g/mL. Foram moldados corpos de prova com proporções iguais de massa e de volume entre os precursores, submetidos à cura ambiente e térmica. O resíduo de rocha ornamental foi caracterizado por fluorescência de raios-X (FRX), permitindo a análise da razão molar Si/Al e da estrutura física das matrizes formadas e os geopolímeros produzidos por densidade, absorção de água e porosidade. Os resultados obtidos indicaram relações molares compatíveis com a formação de estruturas geopoliméricas do tipo polissialato-siloxo (M-PSS), sugerindo potencial para o desenvolvimento de materiais alternativos ao cimento Portland. O estudo reforça a viabilidade técnica da utilização de resíduos como insumos na produção de materiais sustentáveis, promovendo a sustentabilidade e os princípios da economia circular.

Palavras-chave: Geopolimerização, precursor, aluminossilicato, ativação alcalina.

ABSTRACT

The growing demand for mineral resources and construction materials has intensified the environmental impacts of mining and the cement industry, particularly the generation of large volumes of solid waste and high CO₂ emissions. Given this scenario, this study aimed to evaluate the feasibility of producing geopolymers from a combination of metakaolin and granite waste, focusing on the valorization of mineral wastes and the development of sustainable cementitious materials. The precursors were activated with an alkaline solution composed of potassium hydroxide and sodium silicate, maintaining a solid/liquid ratio of 2.05 g/mL. Test specimens with equal mass and volume ratios between the precursors were molded and

subjected to ambient and thermal curing. The ornamental stone waste was characterized by X-ray fluorescence (XRF), allowing analysis of the Si/Al molar ratio and the physical structure of the matrices formed. The geopolymers produced were analyzed by density, water absorption, and porosity. The results indicated molar ratios compatible with the formation of polysialate-siloxo (M-PSS) geopolymer structures, suggesting potential for the development of alternative materials to Portland cement. The study reinforces the technical feasibility of using waste as inputs in the production of sustainable materials, promoting sustainability and the principles of the circular economy.

Keywords: Geopolymerization, precursor, aluminosilicate, alkaline activation.

1. INTRODUÇÃO

A exploração mineral, apesar de essencial para o desenvolvimento econômico e industrial, é uma das atividades humanas que promove impacto no meio ambiente. Entre os principais efeitos estão a destruição da cobertura vegetal, o deslocamento da fauna local e a alteração do relevo natural. Além disso, a mineração gera um grande volume de detritos, que são classificados de acordo com a etapa em que são gerados.

Ainda segundo o Roadmap Tecnológico do Cimento (2019), a indústria cimenteira é responsável, globalmente, por cerca de 7% de todas as emissões de gás carbônico geradas pelas atividades humanas. No contexto nacional, em 2014, a emissão específica do setor foi de aproximadamente 0,56 tonelada de CO₂ por tonelada de cimento produzido.

Nesse contexto, os geopolímeros surgem como uma solução promissora. Segundo Davidovits (2002), os geopolímeros são polímeros inorgânicos resultantes da reação entre precursores ricos em sílica e alumina com soluções alcalinas, formando uma rede tridimensional de aluminossilicatos. Essa estrutura proporciona alta resistência mecânica, durabilidade e estabilidade térmica, além de reduzir significativamente a emissão de CO₂ quando comparada ao cimento Portland. A formulação adequada de um geopolímero depende da razão entre sílica e alumina, da solubilidade dos precursores e da ativação alcalina. Quando materiais com baixa reatividade, como alguns resíduos silicatados, são utilizados, é necessário submetê-los à moagem fina para ampliar a área superficial e favorecer a reação de geopolimerização.

A utilização de geopolímeros representa, portanto, uma estratégia eficiente para reduzir os impactos ambientais da mineração e da indústria de cimento. Além de minimizar os custos com a destinação de resíduos e a extração de novas matérias-primas, a tecnologia pode ampliar a competitividade do setor produtivo. O avanço tecnológico nesse campo também impulsiona a criação de novas aplicações, especialmente na construção civil, fomentando uma economia mais circular, resiliente e sustentável (VIDAL; GONÇALVES; PEREIRA, 2014; SILLANPÄÄ; NCIBI, 2019).

2. OBJETIVO

O objetivo com este trabalho foi avaliar a viabilidade da produção de geopolímeros a partir da combinação de metacaulim e resíduo de granito, com foco na valorização de resíduos minerais e no desenvolvimento de materiais cimentícios sustentáveis.

3. METODOLOGIA

Os precursores utilizados na formulação do geopolímero foram o metacaulim e o resíduo de granito. O resíduo de granito foi coletado como resíduo da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais em Cachoeiro de Itapemirim-ES.

Após a coleta, o material foi submetido a caracterização química, por meio de fluorescência de raios-X (FRX). A análise foi realizada com o objetivo de determinar a composição química dos materiais utilizados e avaliar a relação molar entre sílica (Si) e alumina (Al) na matriz do geopolímero. A caracterização foi conduzida utilizando um espectrômetro de FRX modelo

Bruker S2 Ranger, operando em modo semiquantitativo (standardless) com o software Spectra EDX. As amostras foram preparadas em pastilhas com 40 mm de diâmetro, utilizando 8 g da amostra seca a 105 °C e 2 g de ácido bórico (H_3BO_3) como aglomerante, prensadas a 20 toneladas por 15 minutos. A perda por calcinação (PPC) foi determinada mantendo-se as amostras a 1000 °C por 2 horas em forno mufla.

Davidovits (2002), afirma que a proporção entre o silício e o alumínio determina o tipo de estrutura tridimensional dos aluminossilicatos e, conseqüente, suas características e aplicação. Por se tratar de um material predominantemente cristalino e pouco reativo, o granito foi submetido a um processo de moagem em moinho de pratos e posterior peneiramento em malha de 200 mesh, de forma a garantir que suas partículas apresentassem diâmetro inferior a 75 μm , aumentando a área superficial específica e favorecendo a reação de geopolimerização. Essa abordagem segue recomendações da literatura quanto à redução da granulometria de materiais silicatados com baixa atividade pozolânica.

A ativação alcalina foi realizada com uma solução composta por hidróxido de potássio (KOH) a 8 mol/L e silicato de sódio (Na_2SiO_3), sendo o silicato de sódio adicionado em proporção equivalente a 8% da massa total da formulação. A solução alcalina foi preparada previamente mediante dissolução do KOH em água destilada, seguida do resfriamento da solução a temperatura ambiente e adição do silicato de sódio sob agitação contínua, assegurando a homogeneização completa antes da incorporação aos precursores sólidos.

A razão sólido/líquido (S/L) foi mantida em 2,05 g/mL, conforme metodologia proposta por Zaharaki & Komnitsas (2009), considerando como “líquido” a soma da solução de KOH e do silicato de sódio. Foram moldados corpos de prova geopoliméricos com duas proporções distintas entre os precursores (metacaulim e granito): massas iguais (MM) e volumes iguais (VV). Após moldagem, os corpos de prova permaneceram em cura a temperatura ambiente por 7 dias. Decorrido esse período inicial, os corpos de prova foram submetidos à cura térmica em estufa a 40 °C durante 24 horas, visando intensificar a condensação da matriz geopolimérica e acelerar o desenvolvimento das propriedades mecânicas.

Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de absorção de água, conforme a norma NBR 9778:2009

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição Química

As composições químicas do resíduo de granito preto Santa Angélica e do metacaulim são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Composição química do granito preto Santa Angélica (% em massa).

Óxidos	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃	MnO	PPC	Outros
%	41,3	17,3	15	8,98	6,53	5,36	3,05	0,84	0,62	0,26	0,25	0,518

Tabela 2: Composição química do metacaulim (% em massa).

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Álcalis Totais	MgO	SO ₃	P.F.
%	53,0	39,75	< 5,0	< 0,5	< 1,5	< 0,1	< 0,1	< 4,0

Com base na composição química do resíduo de granito, que apresenta 41,3% de SiO₂ e 15,0% de Al₂O₃, foi realizado o cálculo da relação molar entre silício e alumínio. Considerando as massas molares de 60,1 g/mol para o SiO₂ e 102 g/mol para o Al₂O₃, obtêm-se aproximadamente 0,6871 mol de SiO₂ e 0,2941 mol de Al (considerando dois átomos de alumínio por molécula de Al₂O₃). A razão molar entre Si e Al, portanto, é de aproximadamente

2,34. Para o metacaulim (Tabela 2), com base na proporção de 53,0% de SiO₂ e 39,75% de Al₂O₃, essa razão é aproximadamente 1,13.

Foram preparados corpos de prova formulados com diferentes proporções entre os precursores, o que resultou em distintas relações molares Si/Al. No primeiro, utilizaram-se massas iguais de metacaulim e granito (25 g cada), resultando em uma relação molar Si/Al de aproximadamente 1,65. No segundo, adotou-se o critério de volumes iguais, o que exigiu 33,6 g de granito e 16,4 g de metacaulim, elevando a relação molar Si/Al para cerca de 1,94. A variação na proporção dos precursores — massa x volume — foi o fator determinante para a diferença observada na relação de sílica e alumínio entre os corpos de prova.

Essas razões estão dentro da faixa considerada ideal por Davidovits (2002), ambas as formulações apresentaram relações molares Si/Al entre 1 e 2, o que está de acordo com a faixa adequada para a formação de geopolímeros do tipo Polissialato-siloxo (M-PSS) que apresenta maior resistência química, estabilidade térmica e durabilidade, conforme descrito na literatura.

4.2 Ensaios de Densidade, Porosidade e Absorção de Água

A Tabela 3 apresenta os índices físicos dos geopolímeros produzidos, enquanto a Tabela 4 apresenta os dados médios do cimento Portland conforme Mehta & Monteiro (2008).

Tabela 3: Índices físicos do geopolímero produzido.

Corpo de Prova	Densidade aparente (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
MM	1507	24,80	16,46
VV	1561	17,23	11,04

Tabela 4: Dados médios de pasta de cimento Portland hidratada (sem agregados).

Propriedade	Valor médio típico
Densidade aparente	1800 – 2100 kg/m ³
Porosidade	~25 %
Absorção de água	15 % a 25 %, dependendo do grau de hidratação

Fonte: (Mehta; Monteiro, 2008 apud Quarcioni et al., 2009).

Os corpos de prova geopoliméricos apresentaram densidade aparente inferior à da pasta de cimento Portland, cujo intervalo típico é de 1800–2100 kg/m³. Foram obtidos valores de 1507 kg/m³ para a formulação com massas iguais (MM) e 1561 kg/m³ para a com volumes iguais (VV), indicando maior volume de vazios ou menor grau de compactação. Essa diferença pode estar associada à baixa reatividade do resíduo de granito e à ausência de processos de adensamento durante a moldagem.

A porosidade aparente da formulação MM (24,80%) mostrou-se semelhante à das pastas de cimento convencionais (~25%). Por outro lado, a formulação VV apresentou porosidade menor (17,23%) e menor absorção de água (11,04% contra 16,46%), o que sugere melhor empacotamento das partículas e formação de uma matriz mais densa e coesa.

Embora ambas as formulações estejam dentro da faixa típica de absorção de água para pastas cimentícias (15% - 25%), os resultados indicam uma geopolimerização parcial. Ainda assim, a formulação VV demonstrou desempenho físico superior, mesmo com menor teor de metacaulim. Isso evidencia que a proporção entre os precursores exerce influência significativa sobre a estrutura e densidade da matriz, tornando a formulação baseada em volumes iguais mais promissora para aplicações futuras.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do uso de resíduos de rochas ornamentais, como o granito preto Santa Angélica, na formulação de geopolímeros. As diferentes proporções entre metacaulim e granito proporcionaram relações molares Si/Al dentro da faixa ideal para a formação de estruturas polissialato-siloxo (M-PSS), que favorecem o desempenho físico-químico do material. A análise por fluorescência de raios-X validou a adequação das formulações quanto à razão entre sílica e alumínio, indicando condições propícias à geopolimerização eficaz.

Os ensaios de porosidade, absorção de água e densidade forneceram subsídios importantes para a compreensão da estrutura física das amostras e para o direcionamento de futuras etapas de caracterização. Ainda que estudos complementares sejam necessários, especialmente em relação às propriedades mecânicas, os dados obtidos apontam para o potencial técnico dos geopolímeros desenvolvidos.

Dessa forma, este trabalho contribui com o avanço de alternativas sustentáveis ao cimento Portland, evidenciando o aproveitamento de resíduos minerais como matéria-prima em soluções inovadoras para a construção civil, alinhadas aos princípios da economia circular, da redução de impactos ambientais e da valorização de subprodutos industriais.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq (processo nº 143838/2024-5) pela concessão da bolsa. Expresso minha gratidão ao meu orientador Leonardo Luiz Lyrio da Silveira e de forma especial minha coorientadora, Mariane Costalonga de Aguiar, pelo valioso apoio e orientação. Agradeço também aos bolsistas de iniciação científica Bruno Mardegan e Janaína Davel pela colaboração indispensável neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and applications. 5. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020. ISBN 9782954453118.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

QUARCIONI, V.A.; CHOTOLI, F.F.; GUILGE, M.S.; ANGULO, S.C.; CAVANI, G.R.; CASTRO, A.L. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 129-145, out./dez. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/4g5xG8jd5LGqNRLyBDrNFyg>. Acesso em: 31 jul. 2025. DOI: 10.1590/s1678-86212009000400526.

SILLANPÄÄ, M.; NCIBI, C. The circular economy: case studies about the transition from the linear economy. Finland: Academic Press, 2019. 344 p.

VIDAL, T.M.; GONÇALVES, R.A.; PEREIRA, A.L. Sustentabilidade na indústria do cimento: desafios e oportunidades. Revista Concreto e Construções, São Paulo, v. 80, p. 10-15, 2014.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. (Coord.). Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento; ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, 64 p. 2019.

ZAHARAKI, D.; KOMNITSAS, K. Role of alkali metals on the synthesis of low Ca ferronickel slag-based inorganic polymers. In: Amireg – International Conference: Assessing the Footprint of Resource Utilization and Hazardous Waste Management, 3, 2009, Athens. Anais [...]. Athens: Technical University of Crete, 2009.