

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM NO DESEMPENHO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO À BASE DE METACAULIM E RESÍDUO DE GABRO

INFLUENCE OF DOSAGE PARAMETERS ON THE PERFORMANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE BASED ON METAKAOLIN AND GABBRO WASTE

Ryan de Jesus Ferreira

Aluno de Graduação da Engenharia de Minas 9º período

Instituto Federal do Espírito Santo - IFES

Bolsista de Iniciação Científica FAPES

Período: setembro de 2025 a agosto de 2026

ryan-ferreira@outlook.com.br

Mariane Costalonga de Aguiar

Orientador, Química, D.Sc.

maguiar@cetem.gov.br

Kayrone Marvila de Almeida

Coorientador, Engenheiro de Minas, M.Sc.

kmalmeida@cetem.gov.br

RESUMO

A crescente busca por materiais cimentícios mais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de geopolímeros como alternativa ao cimento Portland, devido ao seu menor impacto ambiental e potencial de aplicação na construção civil. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi otimizar o traço de um concreto geopolimérico produzido com metacaulim e resíduo de gabbro, avaliando a influência dos parâmetros de dosagem no desempenho mecânico e na estabilidade química do material. Inicialmente, o metacaulim foi caracterizado por fluorescência de raios X (FRX), enquanto o concreto geopolimérico foi produzido utilizando metacaulim como precursor, resíduo de gabbro como agregado e solução ativadora composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio. Após moldagem e cura térmica, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão depois de 28 dias. Os resultados evidenciaram resistência mecânica, com valor médio de 1,09 MPa, atribuída principalmente ao excesso de líquido na mistura, ao desequilíbrio das relações molares e à ocorrência de eflorescência, fatores que comprometeram a formação da matriz geopolimérica. A partir da análise desses resultados, foi proposta uma nova dosagem com ajustes nas relações líquido/sólido, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e Na/Al , visando reduzir a porosidade, minimizar a eflorescência e melhorar o desempenho do material. Os novos corpos de prova encontram-se em fase de validação experimental para verificar a eficiência da dosagem otimizada.

Palavras-chave: Geopolímero, ativação alcalina, sustentabilidade e otimização de traço.

ABSTRACT

The growing search for more sustainable cementitious materials has driven the development of geopolymers as an alternative to Portland cement, due to their lower environmental impact and potential application in civil construction. In this context, the objective of this work was to optimize the mix design of a geopolymer concrete produced with metakaolin and gabbro residue, evaluating the influence of dosage parameters on the mechanical performance and chemical stability of the material. Initially, metakaolin was characterized by X-ray fluorescence (XRF), while the geopolymer concrete was produced using metakaolin as a precursor, gabbro residue as aggregate, and an activating solution composed of sodium hydroxide and sodium silicate. After molding and thermal curing, the specimens were subjected to a compressive

strength test after 28 days. The results showed mechanical strength, with an average value of 1.09 MPa, mainly attributed to excess liquid in the mixture, imbalance of molar ratios, and the occurrence of efflorescence, factors that compromised the formation of the geopolymer matrix. Based on the analysis of these results, a new dosage was proposed with adjustments to the liquid/solid, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, and Na/Al ratios, aiming to reduce porosity, minimize efflorescence, and improve material performance. The new test specimens are currently undergoing experimental validation to verify the efficiency of the optimized dosage.

Keywords: Geopolymer, alkali activation, sustainability, and mix design optimization.

1. INTRODUÇÃO

A exploração mineral impulsiona o desenvolvimento econômico-industrial e tecnológico, mas também gera impactos ambientais, como supressão da flora, afugentamento da fauna, alteração do relevo e produção de resíduos. Segundo o Roadmap Tecnológico do Cimento (2019), o cimento, “o material feito pelo homem mais utilizado no planeta”, responde por cerca de 7% das emissões globais de CO_2 . No Brasil, sua produção cresceu 277% entre 1990 e 2014, de 26 para 72 milhões de toneladas, com demanda projetada para aumentar de 60% a 120% até 2050. Esse cenário amplia a pressão sobre matérias-primas como o calcário, cuja calcinação responde por 60–70% das emissões do setor; os 30-40% restantes decorrem da queima de combustíveis, ainda dominada no país pelo coque de petróleo.

Nesse contexto, materiais álcali-ativados, ou geopolímeros, surgem como alternativa promissora. Davidovits (2011) os define como polímeros inorgânicos formados pela reação entre precursores ricos em sílica e alumina e soluções alcalinas, originando uma rede tridimensional de aluminossilicatos. Essa estrutura pode conferir resistência mecânica, durabilidade e estabilidade térmica, além de reduzir emissões de CO_2 em relação ao cimento Portland, desde que a formulação considere as razões entre sílica e alumina, a solubilidade dos precursores e a ativação alcalina.

O metacaulim (MK) é amplamente utilizado como precursor geopolimérico por sua simplicidade química e alta reatividade. Contudo, por ser obtido pela calcinação da caulinita entre 650°C e 850°C, demanda energia e maior quantidade de ativador líquido, especialmente silicato de sódio, componente de elevada pegada ambiental em misturas geopoliméricas. Ainda assim, o metacaulim é mais sustentável que o cimento Portland, cuja produção de clínquer requer 1450°C a 1550°C e emite quase uma tonelada de CO_2 por tonelada de cimento, sobretudo pela descarbonatação do calcário. Em contraste, a calcinação do MK ocorre em temperaturas menores e libera principalmente vapor d’água. Dados de Avaliação de Ciclo de Vida indicam que seu potencial de aquecimento global ($9,24 \times 10^{-2}$ kg CO_2 eq/kg) é cerca de nove vezes inferior ao do cimento Portland comum ($8,44 \times 10^{-1}$ kg CO_2 eq/kg).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi otimizar o traço de um concreto geopolimérico produzido com metacaulim e resíduo de gabo, avaliando a influência dos parâmetros de dosagem no desempenho mecânico e na estabilidade química do material.

3. METODOLOGIA

O precursor utilizado neste estudo foi o Metacaulim (MK), um aluminossilicato amorfo obtido pela calcinação controlada da caulinita em temperaturas entre 650 °C e 850 °C. Submetido a análise de fluorescência de raios-X (FRX). Como agregado inerte, utilizou-se um resíduo particulado de gabo, processado até atingir uma granulometria de 0,106 mm, atuando como micro-agregado ou *filler* para o empacotamento da matriz.

A proporção estabelecida entre o precursor (MK) e o agregado (Gabro) foi de 1:3 em massa (25% MK e 75% Gabro). Esta escolha fundamenta-se nos estudos de Steinerova (2011), que indicam que teores de agregados entre 75% e 78% na massa sólida total são ideais para a criação de um esqueleto mineral robusto em matrizes de metacaulim.

Para a ativação da matriz (Tabela 1), foram estabelecidos os seguintes parâmetros molares e de massa. Conforme dados de Handbook de Pacheco-Torgal et al. (2015):

Tabela 1: Parâmetros de ativação alcalina.

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Molar)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (Massa)	[NaOH]	Na/Al (Molar)	Líquido/Sólido (Massa)
3,4 - 3,8	1,5 - 2,5	8 mol/L	1	0,5 - 0,6

A produção do geopolímero consistiu na ativação alcalina de 200 g de metacaulim (precursor) misturados a 600 g de resíduo de gabro (filler), estabelecendo um traço de 1:3 com 75% de agregados, proporção fundamentada nos estudos de Steinerova (2011) para garantir a estabilidade física da matriz. A solução ativadora foi composta por 100 g de hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 8 mol/L e 160 g de silicato de sódio (Na_2SiO_3) dissolvidos em 312,5 ml de água, resultando em uma relação líquido/sólido de 0,71. Após a homogeneização, a mistura foi vertida em moldes cilíndricos e submetida à cura térmica a 60 °C em recipientes selados para acelerar a reação de policondensação e a formação do gel N-A-S-H.

A solução alcalina foi preparada com 24 hrs de antecedência. Este procedimento é crítico porque a dissolução do sólido em água é uma reação fortemente exotérmica. O silicato de sódio sólido foi adicionado à solução de NaOH ainda quente para facilitar sua dissolução. O tempo de repouso permite que o sistema retorne à temperatura ambiente e que as espécies de silicato atinjam o equilíbrio químico necessário; o uso de soluções ativadoras quentes poderia causar o endurecimento instantâneo (*flash set*), inviabilizando a moldagem e prejudicando a resistência final. Os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, em dimensões equivalentes às previstas na NBR 7215 (ABNT, 2019), empregada como referência para o ensaio de compressão. Após o adensamento mecânico para a remoção de bolhas de ar, as amostras foram submetidas a uma cura térmica inicial a 60 °C por 24 hrs, temperatura ótima para acelerar a policondensação do metacaulim.

A etapa mais crítica da metodologia consistiu na selagem total dos moldes com plástico filme, mantida desde o momento da moldagem até o final do período de maturação de 28 dias em temperatura ambiente. Este selamento ocorreu por dois motivos técnicos: (Retenção de Umidade: A perda rápida de umidade causa retração excessiva, microfissuras e perda de integridade. Prevenção da Eflorescência: A exposição direta ao ar favorece a reação entre álcalis não consumidos e o atmosférico, formando o carbonato de sódio (Na_2CO_3), visualizado como um pó branco na superfície.)

Ao final dos 28 dias de cura, as amostras foram desmoldadas e submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples, utilizando-se prensa hidráulica automática. Este ensaio serve como a métrica básica para validar a eficácia do traço proposto e avaliar o desempenho do sistema frente ao concreto cimentício convencional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Composição Química

A composição química do metacaulim (MK), determinada por fluorescência de raios-X (FRX), é apresentada na Tabela 2. Os resultados confirmam que o material é um aluminossilicato de alta pureza, composto majoritariamente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), que juntos somam 92,4% da massa total do material.

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

Analitos (%)	Al ₂ O ₃	CaO	Cl	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂	P ₂ O ₅	PbO	SO ₃	SiO ₂
Concentração	34	0,1	nd	1,8	1,5	0,16	nd	0,11	0,12	nd	58,4

De acordo com Pacheco-Torgal et al. (2015), o metacaulim típico apresenta teores de entre 40-70% de SiO₂ e entre 20-35% de Al₂O₃. Os valores obtidos de 58,4% para a sílica e 34,0% para a alumina situam o precursor no limite superior de reatividade, o que é fundamental para a dissolução e posterior policondensação das espécies minerais durante a ativação alcalina.

Um ponto de extrema importância para a síntese do geopolímero é o teor de óxido de cálcio (CaO), que foi de apenas 0,1%. As fontes classificam materiais com CaO < 10% como sistemas de baixo cálcio, onde o principal produto de reação é o gel N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado), uma estrutura polimérica inorgânica tridimensional. A quase ausência de cálcio (0,1%) garante que a matriz desenvolvida seja puramente geopolimérica, sem a interferência significativa de fases de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A Tabela 3 apresenta a composição química do resíduo de gabro.

Tabela 3: Composição química do Gabro (% em massa).

Analitos (%)	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
Concentração	41,3	17,3	15	8,98	6,53	5,36	3,05	0,84	0,62	0,26	0,25	0,518

O resíduo de gabro foi incorporado à mistura como micro-agregado (filler), apresentando teores de 41,3% de SiO₂ e 15,0% de Al₂O₃. Embora sua relação molar SiO₂/Al₂O₃ (~2,75) esteja compreendida no intervalo de 2 a 4, identificado por pesquisadores como Duxson *et al.* (2005) e Garcia-Lodeiro *et al.* (2014) como a faixa de excelência para o desenvolvimento de ligantes de alta resistência, o material apresenta baixa reatividade e não participa da matriz geopolimérica como precursor. Conforme detalhado por Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015) no Handbook de Pacheco-Torgal et al. (2015) a reatividade em sistemas ativados por álcalis depende fundamentalmente da natureza amorfa ou vítrea do aluminossilicato, sendo que fases cristalinas permanecem praticamente inalteradas pelo ativador.

Dessa forma, fundamentado nos protocolos de Steinerova (2011), o gabro cumpre uma função estritamente física de esqueleto mineral, promovendo o empacotamento denso da matriz, a redução da porosidade total e o suporte estrutural necessário para o gel N-A-S-H formado pelo metacaulim.

4.2. Ensaios de Compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, realizados aos 28 dias em corpos de prova cilíndricos (5 cm x 10 cm), são apresentados na Tabela 4. Para a conversão da carga (kN) em tensão (MPa), considerou-se a área da seção transversal de aproximadamente 1.963,5 mm².

Tabela 4: Resultados do ensaio de compressão simples.

Amostras	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05	CP06	CP07	Média
Carga (KN)	1,50	1,70	1,40	1,50	4,50	2,50	1,90	2,14
Tensão (MPa)	0,76	0,87	0,71	0,76	2,29	1,27	0,97	1,09

Os valores obtidos, variando entre 0,71 MPa e 2,29 MPa, revelaram um desempenho mecânico significativamente inferior ao esperado para sistemas geopoliméricos à base de metacaulim (MK). Segundo Steinerova (2011), argamassas de MK com teores de agregados entre 75% e 78% podem atingir resistências de até 70 MPa. A resistência média alcançada neste experimento (~1,09 MPa) representa apenas cerca de 1,5% do potencial do precursor, indicando que o

material não atingiu a consolidação estrutural necessária para fins de engenharia civil. A baixa resistência pode ser atribuída ao descumprimento de três parâmetros fundamentais definidos na literatura.

Relação Líquido/Sólido (L/S) Excessiva: O traço experimental apresentou uma relação L/S real de 0,71, superando o alvo de 0,51 recomendado para garantir a consistência pastosa e o empacotamento denso da matriz. Zhang et al. (2010) indica que a porosidade total aumenta proporcionalmente à relação L/S. O excesso de água livre, ao evaporar, gerou uma rede de macroporos e vazios que fragilizou a matriz, pois a minimização da porosidade é requisito essencial para a força e tenacidade do gel.

Desequilíbrio na Relação Molar $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$: A relação obtida foi de 3,84, quase quatro vezes superior ao valor ideal de $\sim 1,0$. Em sistemas de ativação alcalina, o sódio deve estar em proporção estequiométrica com o alumínio para neutralizar as cargas negativas da rede tetraédrica. O excesso severo de sódio permaneceu livre nos poros, reagindo com o CO_2 atmosférico para formar carbonato de sódio (Na_2CO_3), o que resulta em eflorescência severa (pó branco) e impede a formação de uma estrutura polimérica estável e contínua. Conforme Rowles e O'Connor (2003) e Duxson et al. (2007).

A Figura 1 apresenta os corpos de prova de geopolímeros produzidos.



Figura 1: Comparação do geopolímero (com selamento X sem selamento após 28 dias).

Excesso de Sílica Solúvel (SiO_2): A relação molar final de 4,87 excedeu a faixa de alto desempenho (3,0 a 3,8). Descrito por Silva e Sagoe-Crentsil (2008). Embora a sílica adicional favoreça a resistência em sistemas equilibrados, o excesso solúvel proveniente do ativador pode ter tornado o sistema excessivamente vítreo, retardando a transição do "Gel 1" (metaestável) para o "Gel 2" (resistente), resultando em uma massa mal consolidada.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a influência dos parâmetros de dosagem no desempenho de um concreto geopolimérico produzido com metacaulim como precursor e resíduo de gabo como agregado mineral. A formulação estudada apresentou resistência média à compressão de 1,09 MPa, evidenciando que, nas condições experimentais empregadas, não foi possível obter um material com desempenho mecânico compatível com o esperado para geopolímeros à base de metacaulim.

A análise dos resultados, em conjunto com a literatura especializada, permitiu verificar que o baixo desempenho mecânico pode estar relacionado principalmente à elevada relação líquido/sólido, ao desequilíbrio da relação molar Na/Al e ao excesso de sílica solúvel proveniente da solução ativadora. Esses fatores podem ter comprometido o grau de consolidação da matriz geopolimérica, favorecido a ocorrência de eflorescência e contribuído para a elevada porosidade do material, refletindo diretamente na baixa resistência obtida.

Apesar de a formulação inicial não apresentar o desempenho esperado, o estudo permitiu identificar os parâmetros críticos responsáveis pelo comportamento do sistema, fornecendo informações relevantes para a otimização do traço. Com base nessa avaliação, foi proposta uma

nova formulação com adequação das relações líquido/sólido, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e Na/Al , visando favorecer a formação de uma matriz geopolimérica mais consolidada e, conseqüentemente, melhorar as propriedades mecânicas do material.

Dessa forma, o trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre a influência dos parâmetros de dosagem na produção de geopolímeros à base de metacaulim e resíduo de gabo, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de formulações mais eficientes e para o aproveitamento sustentável de resíduos minerais em materiais cimentícios alternativos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço a FAPES (Edital: Nº 14/2025 - PIBICES 2025) pela concessão da bolsa. Expresso minha gratidão aos meus orientadores Mariane Costalonga de Aguiar e Kayrone Marvila de Almeida, pelo valioso apoio e direcionamentos. Estendo também a bolsista Janaina Davel e mestrandos Bruno Mardegan e Lahís Menon.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215:2019 — Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Applications. 3. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2011.

DE SILVA, P.; SAGOE-CRENTSIL, K. The effect of Al_2O_3 and SiO_2 on setting and hardening of $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ geopolymer systems. Journal of the Australian Ceramic Society, v. 41, n. 1, p. 39-46, 2008.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. (ed.). Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 19-47.

ROWLES, M.; O'CONNOR, B. Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. Journal of Materials Chemistry, v. 13, n. 5, p. 1161-1165, 2003.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coordenação de Gonzalo Visado e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

STEINEROVA, M. Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure. Ceramics – Silikáty, Praga, v. 55, n. 4, p. 362-372, 2011.

ZHANG, Y.; SUN, W.; LI, Z. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. Applied Clay Science, v. 47, n. 3-4, p. 271-275, 2010.