

Otimização multi-resposta da fluidez e da resistência à compressão em argamassas de escória ativada alcalinamente através da abordagem Taguchi-PCR-TOPSIS.

A. A. Adam^{1*} , B. R. Ramadhan¹ , I. H. Emeraldy¹ , A. P. Kasim¹ 

* Autor de Contato: andi.arham@untad.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1035>

Recebido: 28/03/2026 | Correções recebidas: 09/08/2026 | Aceito: 26/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMO

Este estudo teve como objetivo identificar uma mistura de argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS) que equilibre a fluidez e a resistência à compressão como alternativa sustentável ao cimento Portland. Foram avaliadas vinte e sete misturas variando a dosagem do ativador, o módulo, a relação água/aglomerante, a relação agregado/aglomerante e o teor de superplastificante, por meio de um planejamento Taguchi L27, ANOVA e otimização PCR-TOPSIS. A dosagem do ativador foi o parâmetro mais influente (70,90% de contribuição), seguido pela relação agregado/aglomerante (10,12%), enquanto o módulo e a relação água/aglomerante desempenharam papéis menores. A mistura ótima (fluidez 115%, resistência 48,85 MPa) foi validada por meio de um lote réplica independente, com uma pegada de CO₂ estimada 79% menor que um controle de cimento Portland. Os mecanismos de reação não foram confirmados microestruturalmente. Diferentemente das abordagens de resposta única anteriores, este estudo combina validação estatística, confirmação experimental e estimativa ambiental para uma base de projeto de argamassa mais rigorosa.

Palavras-chave: escória ativada alcalinamente; otimização multi-resposta; PCR-TOPSIS; método Taguchi; resistência à compressão; fluidez.

Citar como: Adam, A. A., Ramadhan, B. R., Emeraldy, I. H., Kasim, A. P. (2026), “Otimização multi-resposta da fluidez e da resistência à compressão em argamassas de escória ativada alcalinamente através da abordagem Taguchi-PCR-TOPSIS.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 475 – 492, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1035>

¹ Faculdade de Engenharia, Universidade Tadulako, Palu/Central de Sulawesi, 94118, Indonésia.

Contribuição de cada autor

Neste artigo, a autora Andi Arham Adam contribuiu 30% para a ideia original, conceituação e redação; Bayu Rahmat Ramadhan para experimentação, coleta de dados e redação em 30%; Isa Hanif Emeraldy para análise estatística e discussão de resultados por 25%, e Atman P Kasim para revisão e supervisão por 15%.

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2027.

Multi-response optimization of flowability and compressive strength in alkali-activated slag mortar using Taguchi–PCR-TOPSIS approach.

ABSTRACT

This study aimed to identify an Alkali-Activated Slag (AAS) mortar mixture balancing flowability and compressive strength as a sustainable alternative to Portland cement. Twenty-seven mixtures varying activator dosage, modulus, water-to-binder ratio, aggregate-to-binder ratio, and superplasticizer content were evaluated using a Taguchi L27 design, ANOVA, and PCR-TOPSIS optimization. Activator dosage was most influential (70.90% contribution), followed by aggregate-to-binder ratio (10.12%), while modulus and water-to-binder ratio played minor roles. The optimal mixture (flow 115%, strength 48.85 MPa) was validated by an independent replicate batch, with an estimated 79% lower CO₂ footprint than a Portland-cement control. Reaction mechanisms were not confirmed microstructurally. Unlike prior single-response approaches, this study combines statistical validation, experimental confirmation, and environmental estimation for a more rigorous mortar design basis.

Keywords: alkali-activated slag; multi-response optimization; PCR–TOPSIS; Taguchi method; compressive strength; flowability.

Optimización multi-respuesta de la fluidez y la resistencia a la compresión en morteros de escoria activada alcalinamente mediante el enfoque Taguchi–PCR-TOPSIS.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo identificar una mezcla de mortero de escoria activada alcalinamente (AAS) que equilibre la fluidez y la resistencia a la compresión como alternativa sostenible al cemento Portland. Se evaluaron veintisiete mezclas variando la dosificación del activador, el módulo, la relación agua/ligante, la relación agregada/ligante y el contenido de superplastificante mediante un diseño Taguchi L27, ANOVA y optimización PCR-TOPSIS. La dosificación del activador fue el parámetro más influyente (70.90% de contribución), seguido por la relación agregado/ligante (10.12%), mientras que el módulo y la relación agua/ligante desempeñaron roles menores. La mezcla óptima (fluidez 115%, resistencia 48.85 MPa) fue validada mediante un lote réplica independiente, con una huella de CO₂ estimada 79% menor que un control de cemento Portland. Los mecanismos de reacción no fueron confirmados microestructuralmente. A diferencia de los enfoques de respuesta única previos, este estudio combina validación estadística, confirmación experimental y estimación ambiental para una base de diseño de mortero más rigurosa.

Palabras clave: escoria activada alcalinamente; optimización multi-respuesta; PCR–TOPSIS; método Taguchi; resistencia a la compresión; fluidez.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A rápida expansão do desenvolvimento da infraestrutura aumentou significativamente a demanda por materiais à base de cimento, suscitando sérias preocupações ambientais. A produção de cimento Portland comum (OPC) está associada a um elevado consumo de energia e a emissões substanciais de dióxido de carbono (CO_2), atingindo aproximadamente 0,9 tonelada de CO_2 por tonelada de cimento produzida (Qaidi et al., 2022). Essa questão tem se tornado cada vez mais crítica em países em desenvolvimento, como a Indonésia, onde o crescimento da infraestrutura continua a se acelerar.

Nos últimos anos, a Indonésia — particularmente Sulawesi Central — tem experimentado uma rápida expansão industrial, especialmente no setor siderúrgico. O desenvolvimento das indústrias de processamento de aço resultou na geração, em larga escala, de subprodutos industriais, como a escória granulada de alto-forno moída (GGBFS). A utilização eficaz desses subprodutos é essencial para reduzir os impactos ambientais e, ao mesmo tempo, promover práticas de construção sustentável. Os materiais de escória ativada alcalinamente (AAS) surgiram como uma alternativa promissora de aglomerante, utilizando GGBFS ativada por soluções alcalinas para produzir sistemas cimentícios de baixo carbono, com propriedades mecânicas e de durabilidade favoráveis (Cong et al., 2024), (Kaliyavaradhan et al., 2024).

Apesar de sua importância, poucos estudos abordaram a interação entre trabalhabilidade e resistência em sistemas de argamassa AAS. Em muitos casos, o aumento da resistência à compressão resulta em redução da fluidez, indicando a existência de uma relação de compromisso (*trade-off*) entre essas duas propriedades. Essa condição evidencia a necessidade de uma abordagem de avaliação mais abrangente, que considere simultaneamente múltiplos critérios de desempenho. Entretanto, a maioria dos estudos ainda se baseia na otimização de resposta única, que pode não representar adequadamente os requisitos reais de engenharia.

Além disso, a aplicação de métodos sistemáticos de otimização multirresposta em pesquisas sobre AAS permanece relativamente limitada. Técnicas avançadas, como a otimização baseada no método Taguchi combinada com métodos de tomada de decisão multirresposta, oferecem uma abordagem mais eficaz para identificar composições ótimas de mistura que equilibrem propriedades concorrentes.

Portanto, este estudo tem como objetivo investigar os efeitos combinados da composição da mistura sobre a fluidez e a resistência à compressão da argamassa de escória ativada alcalinamente, utilizando um planejamento experimental Taguchi. Uma abordagem de otimização multirresposta baseada no método PCR-TOPSIS é empregada para determinar a proporção ótima da mistura que satisfaça simultaneamente aos requisitos de trabalhabilidade e desempenho mecânico. Espera-se que os resultados deste estudo contribuam para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis que utilizem subprodutos industriais, particularmente em regiões em rápido desenvolvimento, como a Indonésia.

2. EXPERIMENTO

2.1 Materiais e método.

Um planejamento experimental estatístico baseado no método Taguchi foi empregado para avaliar a influência da composição da mistura no desempenho da argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS). A abordagem Taguchi permite uma otimização eficiente ao reduzir o número de ensaios experimentais, mantendo, ao mesmo tempo, a capacidade de analisar múltiplos fatores simultaneamente por meio de arranjos ortogonais (Taguchi, 1990). Neste estudo, foi adotado um arranjo ortogonal $L_{27}(3^5)$ para contemplar cinco fatores de controle, cada um em três níveis. Os fatores selecionados incluem a dosagem do ativador (4%, 5% e 6%), o módulo (0,8; 1,0 e 1,2), a

relação água/aglomerante (0,46; 0,47 e 0,48), a relação agregado/aglomerante (2,25; 2,50 e 2,75) e o teor de superplastificante (1%, 2% e 3%). Essas variáveis foram selecionadas devido à sua influência significativa tanto na trabalhabilidade quanto no desempenho mecânico dos sistemas de argamassa AAS (Cong et al., 2024), (Amer et al., 2021), (J. L. Provis, 2018). A dosagem do ativador (D) refere-se à porcentagem de solução alcalina em relação à massa do aglomerante, a qual controla a disponibilidade de espécies reativas para o processo de geopolimerização. Uma dosagem mais elevada geralmente favorece a dissolução dos precursores de aluminossilicatos, resultando em maior formação de géis aglomerantes e melhoria da resistência mecânica (Law et al., 2012). O módulo (M), definido como a relação entre SiO_2 e Na_2O na solução alcalina, representa a disponibilidade de sílica no sistema ativador (Law et al., 2012). Esse parâmetro desempenha um papel crítico no controle da formação do gel C-(A)-S-H e influencia tanto a trabalhabilidade quanto o desenvolvimento da resistência da argamassa de escória ativada alcalinamente. O planejamento experimental foi analisado utilizando a relação sinal-ruído (S/N) e a análise de variância (ANOVA), seguida pela otimização multirresposta por meio do método PCR-TOPSIS, com o objetivo de determinar a proporção ótima da mistura considerando simultaneamente a fluidez e a resistência à

Procedimento de Mistura da Argamassa AAS

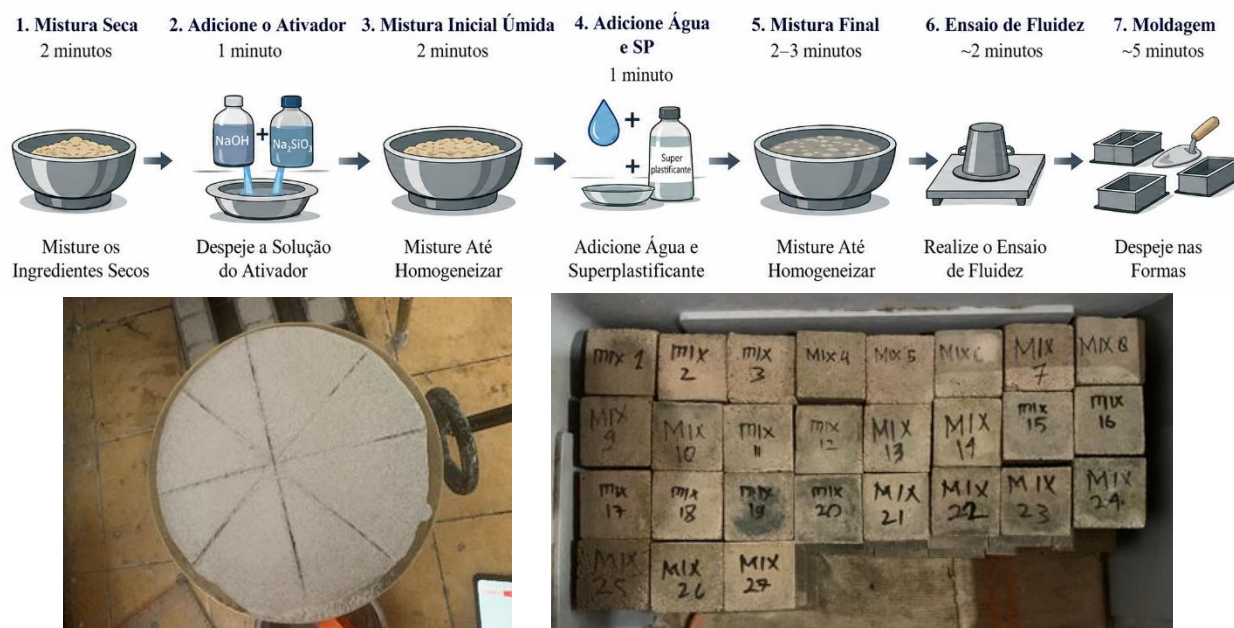


Figura 1. a) Procedimento de mistura da argamassa AAS; b) processo de fluidez; c) argamassas.

Os corpos de prova de argamassa foram preparados utilizando escória granulada de alto-forno moída (GGBFS) como aglomerante principal, conforme apresentado na Tabela 1 e na Figura 1, em conformidade com a ASTM C989/C989M (ASTM International, 2022), e ativada por uma combinação de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) (Nath & Sarker, 2014) (Amer et al., 2021). Areia de rio local, em conformidade com a ASTM C33/C33M (ASTM International, 2018), com módulo de finura de 2,48, foi utilizada como agregado miúdo. O processo de mistura foi realizado utilizando um misturador mecânico para garantir a homogeneidade. Inicialmente, a GGBFS e o agregado miúdo foram misturados a seco por aproximadamente 2 minutos. Em seguida, a solução alcalina e o superplastificante foram adicionados gradualmente, e a mistura prosseguiu até a obtenção de uma argamassa homogênea e trabalhável. A argamassa no estado fresco foi então moldada em formas cúbicas e compactada para eliminar o ar aprisionado.

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos para minimizar a perda de umidade antes do processo de cura.

Tabela 1. Composições químicas da GGBFS e do PCC com base no ensaio de XRF.

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	MnO	S	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	LOI
GGBFS	41.56	37.42	15.20	1.24	0.71	0.30	0.75	0.36	0.52	0.51	1.88	0.65
Cimento (PCC)	55.00	25.00	8.00	2.50	–	–	–	0.80	4.00	–	2.50	1.50

A trabalhabilidade da argamassa no estado fresco foi avaliada por meio do ensaio de mesa de fluidez, em conformidade com a ASTM C1437 (ASTM International, 2020). O ensaio foi realizado submetendo a argamassa a 25 quedas em um intervalo de 15 segundos, e o valor de fluidez foi determinado como o aumento percentual do diâmetro médio de espalhamento da argamassa. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em conformidade com a ASTM C109/C109M (ASTM International, 2023), utilizando corpos de prova cúbicos com dimensões de 50 mm × 50 mm × 50 mm. Os ensaios foram realizados nas idades de cura de 7 e 28 dias, com o objetivo de avaliar tanto o desempenho mecânico nas primeiras idades quanto o desempenho mecânico em idade de referência. Esses períodos de cura são comumente adotados para avaliar o desenvolvimento da resistência de materiais cimentícios (Farooq et al., 2021), (ASTM International, 2023).

Tabela 2. Dosagem das misturas de AASM.

Código	Dosagem (%)	Módulo	W/B	Agg/B	SP (%)	Code	D (%)	M	W/B	Agg/B	SP (%)
T408046225	4	0.8	0.46	2.25	1	T510048225	5	1.0	0.48	2.25	1
T408047250	4	0.8	0.47	2.50	2	T510046250	5	1.0	0.46	2.50	2
T408048275	4	0.8	0.48	2.75	3	T510047275	5	1.0	0.47	2.75	3
T410046250	4	1.0	0.46	2.50	3	T512048250	5	1.2	0.48	2.50	2
T410047275	4	1.0	0.47	2.75	1	T512046275	5	1.2	0.46	2.75	3
T410048225	4	1.0	0.48	2.25	2	T512047225	5	1.2	0.47	2.25	1
T412046275	4	1.2	0.46	2.75	2	T608048275	6	0.8	0.48	2.75	1
T412047225	4	1.2	0.47	2.25	3	T608046225	6	0.8	0.46	2.25	2
T412048250	4	1.2	0.48	2.50	1	T608047250	6	0.8	0.47	2.50	3
T508046250	5	0.8	0.46	2.50	2	T610048225	6	1.0	0.48	2.25	3
T508047275	5	0.8	0.47	2.75	3	T610046250	6	1.0	0.46	2.50	1
T508048225	5	0.8	0.48	2.25	1	T610047275	6	1.0	0.47	2.75	2
T510046275	5	1.0	0.46	2.75	3	T612048250	6	1.2	0.48	2.50	3
T510047225	5	1.0	0.47	2.25	1	CMPC	-	-	0.47	2.50	2

Uma mistura de confirmação, utilizando cimento Portland composto convencional (PCC), foi preparada como amostra de controle, projetada para atingir uma resistência à compressão-alvo de 25,231 MPa aos 28 dias. A proporção da mistura consistiu em uma relação água/aglomerante de 0,47, uma relação agregado/aglomerante de 2,50 e 2% de superplastificante. Essa mistura de controle foi utilizada para comparação com a argamassa de escória ativada alcalinamente em termos de trabalhabilidade e resistência à compressão.

Para garantir uma base de comparação adequada entre as misturas AAS e o controle CMPC, a

relação água/aglomerante (0,47), a relação agregado/aglomerante (2,50) e a dosagem de superplastificante (2%) do controle CMPCC foram deliberadamente ajustadas aos valores dos níveis intermediários utilizados no planejamento das misturas AAS (Tabela 2), em vez de serem otimizadas de forma independente. Deve-se observar, entretanto, que a relação água/aglomerante apresentada na Tabela 2 para as misturas AAS (0,46–0,48) considera apenas a água de mistura adicionada e não inclui a água contida nas soluções ativadoras de NaOH e Na₂SiO₃. Quando essa água adicional é considerada, estima-se que a relação água/aglomerante total efetiva das misturas AAS varie aproximadamente entre 0,49 e 0,52 (por exemplo, aproximadamente 0,50 para a mistura ótima T610046250), com base nas composições das soluções ativadoras descritas na Seção 2.3. Esse valor é ligeiramente superior à relação água/aglomerante nominal do controle CMPCC (0,47) e constitui uma característica inerente aos sistemas ativados alcalinamente, nos quais uma parcela do líquido de mistura é fornecida pelo ativador, em vez de ser adicionada como água livre, em concordância com observações de estudos anteriores sobre AAS [8], [6]. Portanto, os leitores devem considerar essa diferença no teor efetivo de água ao avaliar as comparações apresentadas de resistência à compressão e trabalhabilidade entre as misturas AAS e CMPCC, em vez de pressupor uma disponibilidade de água idêntica entre os dois sistemas aglomerantes. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com folhas plásticas para minimizar a perda de umidade e mantidos à temperatura ambiente de laboratório (± 25 °C) durante 24 horas. Posteriormente, os corpos de prova foram desmoldados e curados em condições ambientes até as idades de ensaio de 7 e 28 dias. Esse regime de cura foi adotado para simular condições práticas de campo e avaliar o desempenho da argamassa de escória ativada alcalinamente sob condições de cura não controladas.

2.2 Otimização multirresposta e análise estatística

Para avaliar a influência dos parâmetros da mistura e determinar a composição ótima, foram realizadas análises estatísticas e otimização multirresposta utilizando a Análise de Variância (ANOVA) e o método PCR–TOPSIS.

A ANOVA foi aplicada para quantificar a contribuição de cada fator para a variação da resistência à compressão (Taguchi, 1990). A contribuição percentual de cada parâmetro foi calculada com base na razão entre sua soma dos quadrados e a soma total dos quadrados, conforme expresso na Eq. (1):

$$P_i = \frac{SS_i}{SS_{total}} \times 100\% \quad (1)$$

em que P_i é a contribuição percentual do fator i , SS_i é a soma dos quadrados do fator i e SS_t é a soma total dos quadrados. Para a otimização multirresposta, foi empregado o método PCR–TOPSIS para avaliar simultaneamente a fluidez e a resistência à compressão (Jolliffe, 2002) (Hwang & Yoon, 1981) (Behzadian et al., 2012) (Madanchian & Taherdoost, 2023). A matriz de decisão X_{ij} foi inicialmente normalizada utilizando a normalização vetorial, a fim de eliminar as diferenças entre as unidades de medida, conforme a Eq. (2):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

A matriz normalizada foi então ponderada para refletir a importância relativa de cada resposta, conforme a Eq. (3):

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3)$$

em que w_j representa o peso de cada resposta. As soluções ideal positiva e ideal negativa foram definidas com base nos valores máximo e mínimo da matriz normalizada ponderada. As distâncias de separação em relação às soluções ideais foram calculadas conforme as Eq. (4) e Eq. (5):

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (4)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (5)$$

Por fim, o coeficiente de proximidade relativa foi determinado utilizando a Eq. (6):

$$C_i^{\square} = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (6)$$

A alternativa com o maior C_i valor foi considerada a mistura ótima. Essa abordagem permite a identificação de uma solução equilibrada quando múltiplos critérios de desempenho apresentam comportamentos conflitantes.

2.3 Estimativa das emissões de CO₂

Foi realizada uma estimativa das emissões de CO₂ do berço ao portão (*cradle-to-gate*) para cada uma das 27 misturas AAS e para o controle CMPCC, com base nos fatores de emissão publicados e nas proporções das misturas apresentadas na Tabela 2. Foram adotados os seguintes fatores de emissão: GGBFS = 0,143 kg CO₂/kg (Ahmad et al., 2022); NaOH (em base sólida) = 1,915 kg CO₂/kg [20]; solução de Na₂SiO₃ (conforme fornecida) = 1,222 kg CO₂/kg (Turner & Collins, 2013); superplastificante à base de éter policarboxilato (PCE) = 2,25 kg CO₂/kg de polímero seco (Schiefer & Plank, 2023); e cimento Portland comum (OPC, utilizado no CMPCC) = 0,91 kg CO₂/kg (Ahmad et al., 2022).

Como a solução ativadora alcalina utilizada neste estudo (NaOH 10 M e Na₂SiO₃ extrapuro, Na₂O 7,5–8,5%, SiO₂ 25,5–28,5%) não foi caracterizada quimicamente, no programa experimental original, para fins de contabilização das emissões de CO₂, foram adotadas as seguintes premissas para esta estimativa: (1) a fração mássica da solução de NaOH foi considerada igual a 30% (solução 10 M, densidade aproximada de 1,33 g/mL); (2) a composição da solução de Na₂SiO₃ foi considerada como o valor médio das especificações do fornecedor (Na₂O = 8%, SiO₂ = 27%); (3) o módulo (M) foi considerado como a relação mássica SiO₂/Na₂O do ativador combinado, e a dosagem do ativador (D, %) foi considerada como a massa total da solução ativadora em relação à massa do aglomerante GGBFS; e (4) considerou-se que o superplastificante à base de PCE (Sika) apresentava um teor de sólidos de 30%, valor típico de aditivos comerciais à base de policarboxilato. Essas premissas permitem calcular, de forma inversa, as proporções mássicas relativas das soluções de NaOH e Na₂SiO₃ necessárias para atender aos valores de D e M de cada mistura e, consequentemente, estimar as correspondentes emissões de CO₂, considerando como base 1 kg de aglomerante.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho da trabalhabilidade (análise da fluidez).

A trabalhabilidade da argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS) foi avaliada por meio do ensaio de mesa de fluidez, e os resultados estão apresentados de forma resumida na Figura 2. Os

resultados experimentais indicam que os valores de fluidez variaram significativamente entre as diferentes composições das misturas, situando-se entre aproximadamente 49% e 135,25%, demonstrando a forte influência da composição do ativador e das proporções da mistura sobre o comportamento no estado fresco.

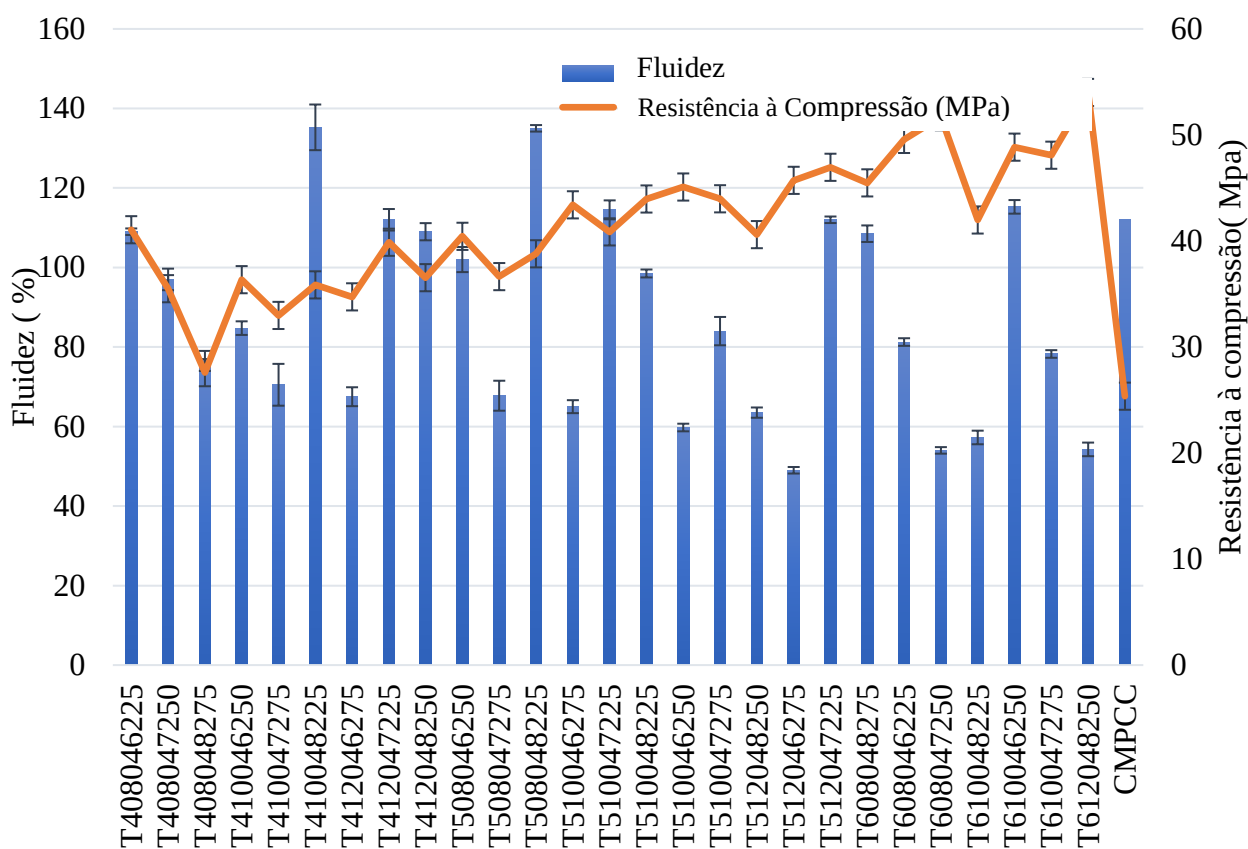


Figura 2. Gráfico da fluidez e da resistência à compressão aos 28 dias da argamassa AAS.

O valor máximo de fluidez obtido neste estudo atingiu 135,25%, excedendo a faixa-alvo ($110 \pm 5\%$). Com base nas observações experimentais e na análise complementar apresentada na Figura 3, a variação da fluidez é governada principalmente por parâmetros-chave, como a dosagem do ativador, o módulo e a relação água/aglomerante. Esse resultado é consistente com estudos anteriores, que relataram que o aumento do teor de líquidos, incluindo o ativador e a água, melhora a lubrificação entre as partículas e reduz o atrito interno, aumentando, consequentemente, a trabalhabilidade (Duxson et al., 2007), (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005).

O efeito dos fatores individuais sobre a fluidez pode ser analisado de forma mais aprofundada por meio dos resultados da ANOVA, particularmente pela resposta média e pela relação sinal-ruído (SNR), conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4. Os resultados indicam que a dosagem do ativador e a relação água/aglomerante são os parâmetros mais influentes. Uma dosagem mais elevada do ativador aumenta a fase líquida, melhorando a lubrificação entre as partículas e resultando em maiores valores de fluidez. Da mesma forma, o aumento da relação água/aglomerante reduz a viscosidade da mistura e melhora a trabalhabilidade, o que está de acordo com estudos anteriores sobre materiais ativados alcalinamente (Abudawaba et al., 2021) (Sri Sunarsih et al., 2024) (Heshmat et al., 2024).

Entretanto, quando os resultados de fluidez são analisados em conjunto com a resistência à compressão aos 28 dias, observa-se uma clara tendência inversa. Misturas com valores de fluidez excessivamente elevados (por exemplo, $>130\%$) tendem a apresentar resistência à compressão

moderada, enquanto misturas com menores valores de fluidez (aproximadamente 50–70%) atingem resistências mais elevadas, chegando a 54,01 MPa. Isso indica uma relação de compromisso (*trade-off*) entre a trabalhabilidade e o desempenho mecânico.

Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento do teor efetivo de líquido, que, embora seja benéfico para a trabalhabilidade, resulta em maior porosidade após o endurecimento e, conseqüentemente, reduz a resistência. Tendências semelhantes foram relatadas em estudos anteriores, nos quais o excesso de água ou de ativador resulta em redução do desempenho mecânico devido ao aumento do volume de poros e à formação de uma microestrutura menos resistente (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005), (Nath & Sarker, 2014).

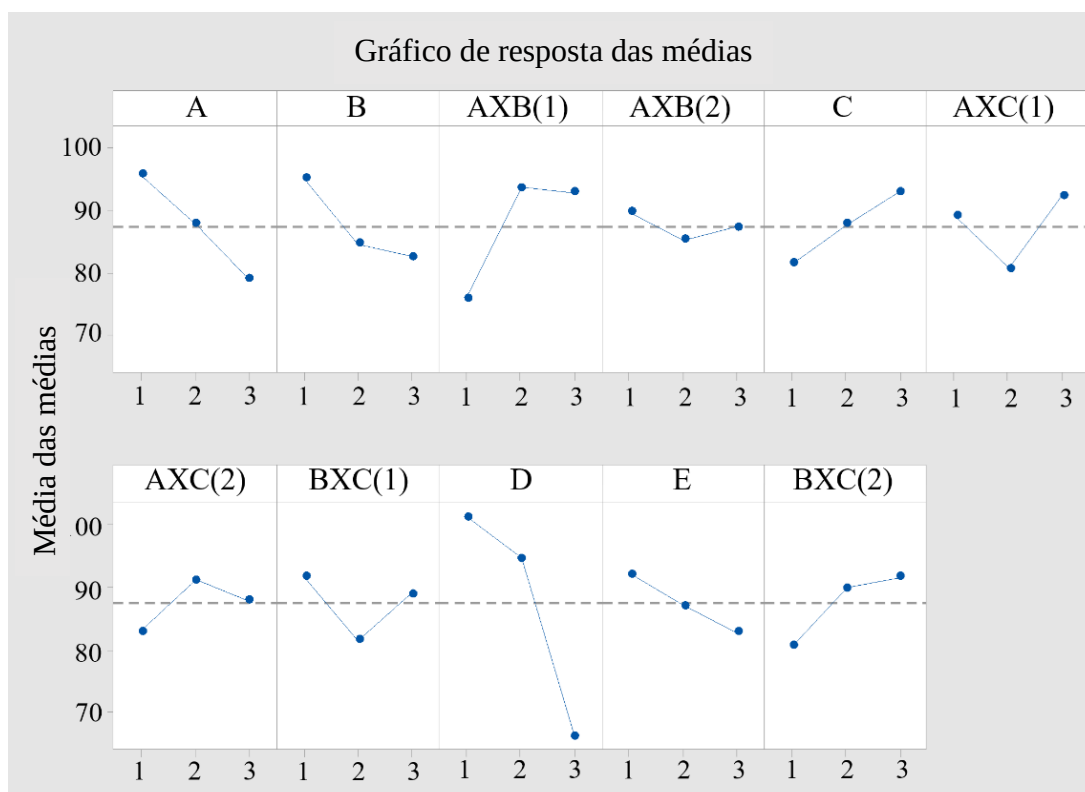


Figura 3. Gráficos de resposta das médias da fluidez da argamassa AAS.

Entretanto, uma fluidez excessiva nem sempre é desejável. Com base na característica de qualidade “nominal-é-melhor” (*nominal-the-best*) do método Taguchi, o valor de fluidez deve ser controlado dentro de uma faixa-alvo específica, em vez de ser maximizado (Taguchi, 1990) (Mohebi et al., 2015). Os resultados indicam que, embora seja possível alcançar valores mais elevados de fluidez, isso não corresponde necessariamente a um desempenho ótimo. Esse resultado evidencia a necessidade de equilibrar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas, conforme será discutido nas seções seguintes.

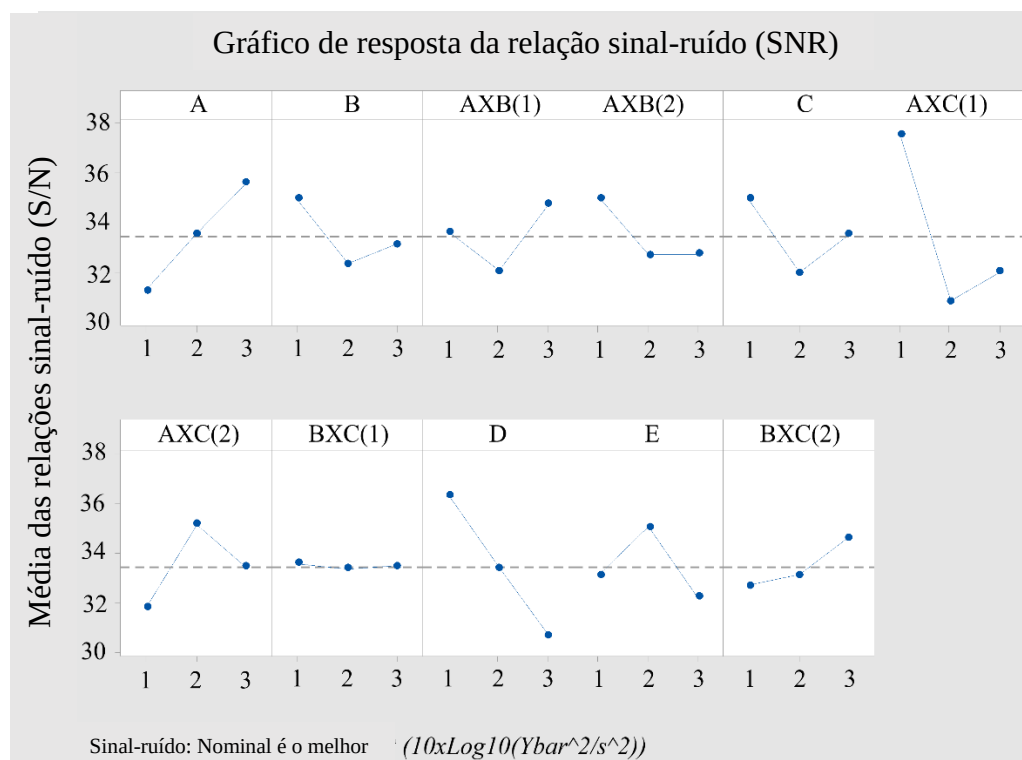


Figura 4. Gráficos de resposta da relação sinal-ruído (SNR) da fluidez da argamassa AAS.

3.2 Desenvolvimento da resistência à compressão

A resistência à compressão da argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS) foi avaliada nas idades de cura de 3, 7 e 28 dias, e os resultados são apresentados na Figura 5. Os resultados demonstram uma variação significativa da resistência à compressão em função da composição da mistura, confirmando a forte influência dos parâmetros do ativador e das proporções da mistura.

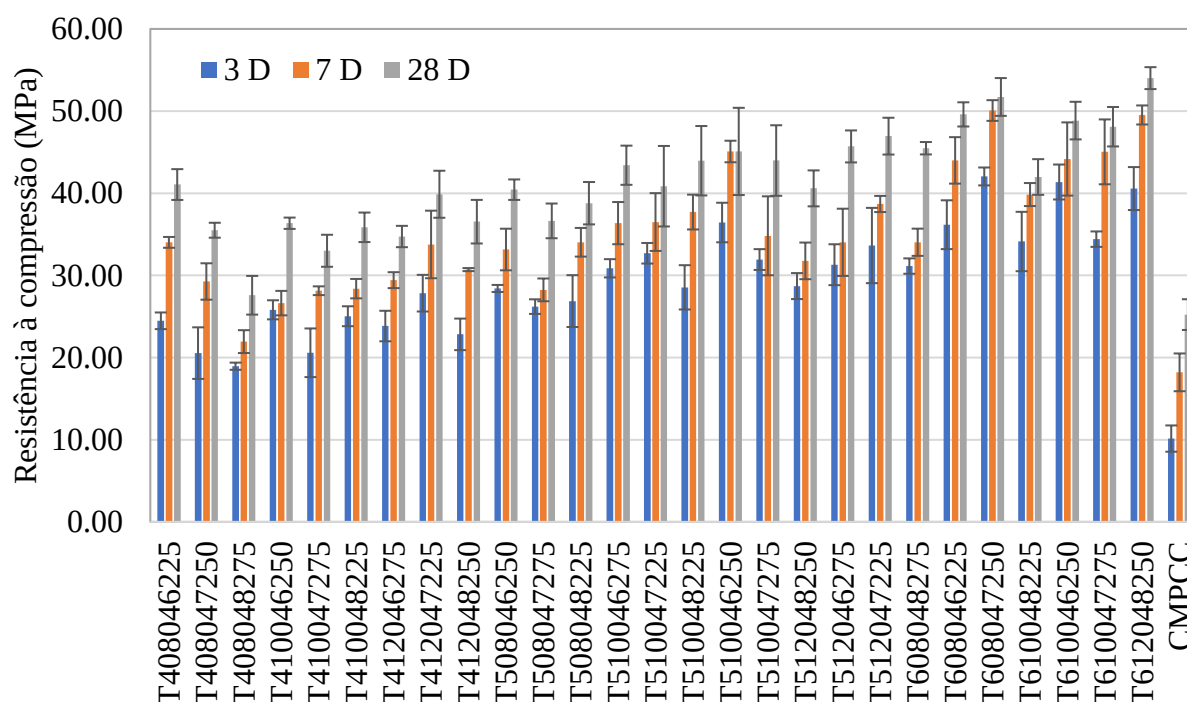


Figura 5. Resistência à compressão das 27 misturas aos 7, 14 e 28 dias.

Aos 28 dias, a resistência à compressão variou de 27,58 MPa (T408048275) a 54,01 MPa (T612048250). A maior resistência foi alcançada pela mistura T612048250 (54,01 MPa), seguida pelas misturas T608047250 (51,72 MPa) e T608046225 (49,58 MPa). Em contrapartida, a menor resistência foi observada na mistura T408048275 (27,58 MPa). Em comparação com a mistura de controle, o PCC apresentou resistência significativamente inferior, de 25,36 MPa, confirmando que a argamassa AAS pode atingir mais que o dobro da resistência à compressão da argamassa convencional. Essa comparação baseia-se na correspondência das proporções nominais das misturas — relação água/aglomerante, relação agregado/aglomerante e dosagem de superplastificante — entre as misturas AAS e CMPCC, e não em um teor efetivo de água idêntico; consulte a Seção 2.1 para uma discussão detalhada dessa distinção.

O desenvolvimento da resistência ao longo do período de cura também apresenta uma tendência consistente de aumento para todas as misturas. Por exemplo, a mistura T608047250 apresentou aumento de 42,05 MPa (3 dias) para 50,07 MPa (7 dias), atingindo 51,72 MPa (28 dias). Da mesma forma, a mistura T510046250 apresentou aumento de 36,44 MPa (3 dias) para 45,08 MPa (7 dias) e 45,09 MPa (28 dias), indicando um rápido desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, característica conhecida dos sistemas AAS [25] (Luukkonen et al., 2017).

3.3 Efeito dos parâmetros da mistura com base na análise Taguchi

Neste estudo, os fatores avaliados consistem na dosagem do ativador (Fator A), no módulo ou relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (Fator B), na relação água/aglomerante (Fator C), na relação agregado/aglomerante (Fator D) e na relação superplastificante/aglomerante (Fator E). Com base nos resultados de resistência à compressão, a influência dos parâmetros da mistura foi posteriormente avaliada utilizando o método Taguchi, por meio da análise de variância (ANOVA), da resposta média e da relação sinal-ruído (SNR).

Os resultados da ANOVA, apresentados na Tabela 3, indicam que a dosagem do ativador é o fator predominante no controle da resistência à compressão, com uma contribuição de aproximadamente 70,90%. Essa contribuição, significativamente superior à dos demais parâmetros, confirma que a concentração do ativador desempenha um papel crítico no controle do processo de geopolimerização, particularmente por favorecer a dissolução dos precursores e promover a formação de uma matriz de reação densa e homogênea (J. Provis & Deventer, 2014), (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005).

A validade da ANOVA depende de três pressupostos fundamentais: independência das observações, normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias (homocedasticidade). A independência foi assegurada pelo planejamento experimental, uma vez que cada uma das 27 misturas corresponde a um lote fisicamente distinto, moldado e ensaiado como um grupo independente de corpos de prova, seguindo o arranjo ortogonal L27. A normalidade dos resíduos foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, aplicado aos resíduos do modelo ajustado de efeitos principais (resistência à compressão observada menos a resistência à compressão prevista para cada mistura); os resultados ($W = 0,971$; $p = 0,629$) indicaram ausência de desvio significativo em relação à normalidade. A homogeneidade das variâncias foi avaliada utilizando o teste de Levene sobre os resíduos agrupados pela dosagem do ativador ($F = 0,359$; $p = 0,702$) e pelo módulo ($F = 1,054$; $p = 0,364$); nenhum dos testes indicou violação significativa da homocedasticidade. O mesmo procedimento foi aplicado aos dados de fluidez (Shapiro-Wilk: $W = 0,976$; $p = 0,759$; teste de Levene para a dosagem do ativador: $F = 0,385$; $p = 0,685$).

Como todos os valores de p são superiores ao nível de significância de 0,05, os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias são atendidos para ambas as respostas, corroborando a adequação da ANOVA para este conjunto de dados, sem a necessidade de transformação dos dados.

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para a resposta média – quarta iteração.

Fonte	DOF	Soma dos Quadrados (SS)	Média dos quadrados (MS)	Razão F
Fator A	2	696.11	348.06	45.20
Fator B	2	62.99	31.49	4.09
Fator C	2	23.37	11.69	1.52
Interação AC	2	17.13	8.57	1.11
Interação BC	2	15.01	7.50	0.97
Fator D	2	99.33	49.66	6.45
Fator E	2	12.10	6.05	0.79
Erro Residual	12	55.52	4.63	–
Total	26	981.88	–	–

Nota: a linha “Interação CB”, presente em uma versão anterior desta tabela, foi removida, pois duplicava a “Interação BC” (os termos de interação B×C e C×B são estatisticamente idênticos). Essa correção eleva o número total de graus de liberdade para 26, em conformidade com o planejamento L27 (27 ensaios – 1), e a Soma dos Quadrados total para 981,88, consistente com os valores apresentados a seguir.

Em contrapartida, o módulo (relação SiO₂/Na₂O) apresenta uma contribuição menor, mas ainda influencia a resistência à compressão como um parâmetro secundário. Seu efeito está associado à disponibilidade de espécies de silicato que contribuem para a formação do gel e o refinamento estrutural. Entretanto, em comparação com a dosagem do ativador, a contribuição do módulo é relativamente limitada, indicando que sua influência depende mais da interação com outros parâmetros do que de sua atuação como fator primário de controle (Nath & Sarker, 2014) (Zheng et al., 2025).

A consistência entre a resposta média e a análise da relação sinal-ruído (SNR) confirma ainda mais a robustez da hierarquia dos parâmetros identificada na Tabela 4. Os resultados da ANOVA com base na SNR também mostram que a dosagem do ativador permanece como o fator mais significativo, reforçando seu papel predominante tanto no desempenho quanto no controle da variabilidade (Taguchi, 1990) (Mohebi et al., 2015).

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para a resposta da relação sinal-ruído (SNR) – quarta iteração.

Fonte	Df	SS	MS	Razão F
A	2	30.49	15.24	53.49
B	2	2.50	1.25	4.39
C	2	1.32	0.66	2.31
AC	2	0.96	0.48	1.68
BC	2	1.15	0.57	2.01
D	2	5.43	2.71	9.52
E	2	0.87	0.43	1.52
Erro residual	12	2.14	0.18	-
Total	26	44.85	-	-

De modo geral, a análise Taguchi demonstra que a resistência à compressão da argamassa AAS é controlada principalmente pela dosagem do ativador, que contribui com 70,90% da variação total,

enquanto o módulo atua como um parâmetro secundário que influencia a eficiência do sistema de reação. Esses resultados ressaltam que a otimização da argamassa AAS deve priorizar a concentração do ativador, seguida de um ajuste cuidadoso do módulo, a fim de alcançar um ambiente de reação equilibrado (Hardjito et al., 2005).

3.4 Análise da relação de compromisso (*trade-off*) entre fluidez e resistência à compressão

Foi observada uma relação de compromisso (*trade-off*) entre a fluidez e a resistência à compressão nos sistemas de argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS), refletindo a influência concorrente dos parâmetros da mistura sobre as propriedades nos estados fresco e endurecido. Uma maior fluidez está geralmente associada ao aumento da relação água/aglomerante e à otimização da composição do ativador; entretanto, isso resulta em redução da densidade da matriz e menor resistência à compressão. Tendências semelhantes têm sido amplamente relatadas, nas quais um maior teor de água aumenta a porosidade e reduz o desempenho mecânico (J. L. Provis, 2018), (Nath & Sarker, 2014).

Por outro lado, maiores resistências à compressão são obtidas com menores teores de água e condições ótimas do ativador, particularmente com uma dosagem de 6% e módulo de 1,2. O papel da concentração do ativador no aumento da cinética das reações e na densificação da matriz está bem estabelecido (Fernandez-Jimenez et al., 2007).

Essa relação inversa indica que a melhoria da trabalhabilidade frequentemente ocorre em detrimento da resistência. Uma fluidez excessiva, acima da faixa-alvo ($110 \pm 5\%$), reflete uma estrutura de matriz diluída, o que pode comprometer a integridade mecânica, conforme também relatado em estudos anteriores (Marvila et al., 2021). Além disso, a dosagem do ativador desempenha um papel duplo, influenciando significativamente tanto a resistência quanto a fluidez sob diferentes condições ótimas (Hardjito et al., 2005).

Portanto, a relação de compromisso (*trade-off*) entre fluidez e resistência à compressão evidencia a necessidade de uma otimização multirresposta, uma vez que ambas as propriedades não podem ser maximizadas simultaneamente. Na prática, a dosagem da mistura deve ser ajustada de acordo com os requisitos de desempenho, buscando equilibrar a trabalhabilidade e a resistência para alcançar um desempenho ótimo.

3.5 Otimização multirresposta utilizando PCR–TOPSIS

Para determinar a mistura ótima, considerando simultaneamente a fluidez e a resistência à compressão, foi realizada uma otimização multirresposta utilizando o método PCR–TOPSIS. A análise foi conduzida com base nos resultados experimentais de fluidez (%) e resistência à compressão aos 28 dias (MPa) obtidos a partir do planejamento Taguchi (Hwang & Yoon, 1981) (Behzadian et al., 2012).

A matriz de decisão foi inicialmente normalizada utilizando a normalização vetorial, a fim de eliminar as diferenças de unidades entre as respostas. Posteriormente, foram atribuídos fatores de ponderação com base na importância relativa de cada resposta. Neste estudo, foi atribuído um peso maior à resistência à compressão (0,6) em comparação com a fluidez (0,4), considerando sua contribuição predominante, conforme indicado pelos resultados da ANOVA. Essa escolha é examinada por meio de uma análise de sensibilidade posteriormente nesta seção (Tabela 6).

A matriz normalizada ponderada foi então utilizada para determinar as soluções ideal positiva e ideal negativa. Foram calculadas as distâncias de separação em relação às soluções ideais, seguidas pela determinação do coeficiente de proximidade relativa para cada mistura experimental (Behzadian et al., 2012). Os resultados da classificação com base nesse coeficiente são apresentados na Tabela 5.

5. Classificação das composições das misturas com base na otimização multirresposta utilizando (C_i).

Código da mistura	Fluidez (%)	Resistência (MPa)	(C_i)	Classificação
T610046250	115.00	48.85	0.784	1
T512047225	112.00	46.95	0.732	2
T608048275	109.00	45.48	0.686	3
T508048225	135.00	38.79	0.655	4
T510047225	115.00	40.86	0.626	5

Os resultados indicam que a mistura ótima é a T610046250, que apresentou o maior coeficiente de proximidade = 0,784. Essa mistura proporciona o melhor equilíbrio entre fluidez e resistência à compressão, com um valor de fluidez de 115% e resistência à compressão de 48,85 MPa. É importante observar que a mistura ótima identificada pelo método PCR–TOPSIS difere daquela que apresentou a maior resistência à compressão. Por exemplo, a mistura T612048250 atingiu a resistência à compressão máxima de 54,01 MPa, porém apresentou fluidez relativamente baixa, resultando em uma classificação geral inferior.

Da mesma forma, misturas com valores de fluidez excessivamente elevados (acima de 130%) não necessariamente apresentam desempenho ótimo devido à redução da resistência mecânica. Isso confirma a existência de uma relação de compromisso (*trade-off*) entre a fluidez e a resistência à compressão, conforme discutido anteriormente. O método PCR–TOPSIS identifica de forma eficaz uma solução de compromisso que atende simultaneamente a ambos os critérios de desempenho. Diferentemente da otimização de resposta única, que pode conduzir a condições extremas, a otimização multirresposta proporciona uma abordagem mais realista para aplicações práticas de engenharia (Madanchian & Taherdoost, 2023).

Para justificar o esquema de ponderação adotado, a classificação PCR–TOPSIS foi recalculada considerando três esquemas adicionais: ponderação igual (0,5/0,5), ponderação com maior peso para a resistência (0,7/0,3) e uma ponderação objetiva baseada na entropia de Shannon (0,21 para resistência / 0,79 para fluidez), derivada do conjunto completo de dados das 27 misturas, conforme resumido na Tabela 6.

Tabela 6. Sensibilidade da classificação PCR–TOPSIS a esquemas alternativos de ponderação.

Esquema de ponderação	w/c (agua/cimento)	w (Fluidez)	Classificação 1 (C_i)	Classificação 2 (C_i)	Classificação 3 (C_i)
Ponderação igual	0.50	0.50	T610046250 (0.777)	T512047225 (0.731)	T508048225 (0.731)
Adotada (subjativa)	0.60	0.40	T610046250 (0.784)	T512047225 (0.732)	T608048275 (0.686)
Com maior peso para a resistência	0.70	0.30	T610046250 (0.792)	T512047225 (0.732)	T608048275 (0.683)
Baseada na entropia (objetiva)	0.21	0.79	T508048225 (0.911)	T410048225 (0.895)	T610046250 (0.766)

A mistura T610046250 permanece na primeira posição em todos os esquemas de ponderação subjetivos, demonstrando que o resultado não é sensível a variações razoáveis nos pesos atribuídos. Por outro lado, a ponderação baseada na entropia favorece a fluidez, uma vez que os dados de fluidez apresentam maior dispersão, selecionando misturas com valores de fluidez ($\approx 135\%$) fora da faixa-alvo ($110 \pm 5\%$, Seção 3.1). Como esse critério puramente estatístico não reflete as prioridades de engenharia, mantém-se a ponderação adotada de 0,6/0,4, respaldada pela

contribuição predominante da dosagem do ativador para a resistência, conforme demonstrado pela ANOVA (Seção 3.3).

3.6 Confirmação experimental da mistura ótima.

Para validar a mistura identificada como ótima pela análise PCR–TOPSIS (T610046250), foi preparado um lote de confirmação independente, denominado KT610046250, utilizando as mesmas proporções da mistura (dosagem do ativador de 6%, módulo de 1,0, relação água/aglomerante de 0,46, relação agregado/aglomerante de 2,50 e superplastificante de 1%) e o mesmo regime de cura (condições ambientes, 25 °C) adotado no programa experimental original. Foram moldados e ensaiados quatro corpos de prova replicados para cada idade de cura.

Tabela 7. Comparação entre a mistura original (alvo) e a mistura de confirmação (KT610046250). results.

Parâmetro	ALVO (T610046250, original)	Confirmado (KT610046250, n = 4)	Desvio (%)	desvio-padrão do valor de referência?
Fluidez(%)	115.25 ± 1.71	113.60	−1.43	Sim
Resistência à Compressão, 7 d (MPa)	41.37 ± 2.13	41.36 ± 0.67	−0.02	Sim
Resistência à Compressão, 14 d (MPa)	–	45.26 ± 0.90	–	–
Resistência à Compressão, 28 d (MPa)	48.85 ± 2.29	50.60 ± 0.86	+3.58	Sim

Os resultados da confirmação apresentam boa concordância com os valores de referência originais, com desvios de −1,43% para a fluidez e de +3,58% para a resistência à compressão aos 28 dias, com valor de 48,85 MPa. Ambos os resultados encontram-se dentro do intervalo de ± 1 desvio-padrão das medições originais e atendem ao critério de aceitação de $\pm 10\%$, comumente aplicado em experimentos de confirmação pelo método Taguchi (Taguchi, 1990).

3.7 Estimativa do impacto ambiental (CO₂)

As emissões de CO₂ das seis misturas AAS variaram de 0,191 a 0,206 kg CO₂/kg de aglomerante, correspondendo a uma redução de 77,7% a 79,4% em relação à mistura de controle PCC (0,924 kg CO₂/kg de aglomerante), conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Estimativa das emissões de CO₂ das misturas AAS representativas e da mistura de controle PCC.

Código da mistura	D (%)	M	CO ₂ (kg/kg aglomerante)	Redução vs. PCC (%)
CMPPC	–	–	0.924	–
T508046250	5	0.8	0.191	79.4
T410046250	4	1.0	0.191	79.3
T510046250	5	1.0	0.191	79.3
T610046250	6	1.0	0.192	79.3
T512046275	5	1.2	0.199	78.5
T612048250	6	1.2	0.206	77.7

Esse resultado é consistente com avaliações recentes do ciclo de vida, que relatam emissões de carbono 70–80% inferiores para concretos geopoliméricos à base de escória e resíduos, em comparação com concretos produzidos com OPC (Marathe et al., 2025), (Liu et al., 2024). O módulo apresentou um efeito mais pronunciado sobre as emissões do que a dosagem do ativador: o aumento do módulo de 0,8 para 1,2 elevou as emissões em aproximadamente 8% (0,191 para 0,206 kg CO₂/kg de aglomerante), refletindo a maior demanda de Na₂SiO₃ em relações SiO₂/Na₂O mais elevadas. Por outro lado, a variação da dosagem de 4% para 6%, mantendo-se o módulo constante, alterou as emissões em menos de 1%. A mistura ótima determinada pelo método PCR–TOPSIS (T610046250) apresentou uma redução de 79,3% nas emissões de CO₂ em relação ao PCC, confirmando que a mistura ótima do ponto de vista mecânico também proporciona benefícios ambientais substanciais.

4. CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a dosagem do ativador é o parâmetro de maior influência sobre a resistência à compressão da argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS), contribuindo com aproximadamente 70,90% da variação total, seguida pela relação agregado/aglomerante (10,12%), enquanto o módulo (6,42%) e a relação água/aglomerante (2,38%) desempenham papéis comparativamente menores. A análise Taguchi confirma que a dosagem do ativador e a proporção de agregados controlam conjuntamente o desenvolvimento da resistência, destacando a importância da otimização tanto da concentração do ativador quanto do teor de agregados.

Os resultados do PCR–TOPSIS indicam que a mistura ótima não é definida apenas pela resistência máxima ou pela máxima fluidez, mas pelo equilíbrio entre ambas as propriedades. A mistura ótima (T610046250) apresentou fluidez de 115% e resistência à compressão de 48,85 MPa. Esses resultados confirmam a relação de compromisso (*trade-off*) entre trabalhabilidade e resistência e ressaltam a importância da otimização multirresposta para a dosagem prática de argamassas AAS. A caracterização microestrutural (por exemplo, SEM, XRD, FTIR ou TGA) não foi realizada neste estudo. As tendências de resistência observadas são, de modo geral, consistentes com estudos anteriores que atribuem o desempenho mecânico dos materiais AAS à formação e à distribuição do gel C–A–S–H e aos mecanismos de ativação alcalina, que diferem fundamentalmente da hidratação convencional do cimento. Recomenda-se, em trabalhos futuros, a confirmação direta desses mecanismos nas misturas estudadas por meio de análises microestruturais.

A mistura ótima identificada por meio do PCR–TOPSIS foi validada por um lote independente de replicação (KT610046250), confirmando a reprodutibilidade da dosagem proposta. Essa mistura também apresentou uma redução estimada de 79,3% nas emissões de CO₂ em relação à mistura de controle à base de cimento Portland, demonstrando que a argamassa AAS ótima do ponto de vista mecânico também proporciona benefícios ambientais substanciais. Esses resultados corroboram a utilização da abordagem Taguchi–PCR–TOPSIS como um método eficaz para o desenvolvimento de argamassas AAS sustentáveis e de alto desempenho.

5. REFERÊNCIA

- Abudawaba, F., Gomaa, E., Ghani, A., ElGawady, M. (2021). *Developing Mix Proportions for Class C Fly Ash-Based Alkali-Activated 3D-Printed Concrete Mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2676, 036119812110391. <https://doi.org/10.1177/03611981211039167>
- Ahmad, J., Kontoleon, K. J., Majdi, A., Naqash, M. T., Deifalla, A. F., Ben Kahla, N., Isleem, H. F., Qaidi, S. M. A. (2022). *A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production*. Sustainability, 14(14), 8783.

<https://doi.org/10.3390/su14148783>

Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., Khalaf, M. A. (2021). *A review on alkali-activated slag concrete*. Ain Shams Engineering Journal, 12(2), 1475–1499.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.003>

Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., Ignatius, J. (2012). *A state-of-the-art survey of TOPSIS applications*. Expert Systems with Applications, 39(17), 13051–13069.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>

Cong, P., Du, R., Gao, H., Chen, Z. (2024). *Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 11(5), 918–938.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.07.011>

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A., Van Deventer, J. (2007). *Geopolymer Technology: The Current State of the Art*. Journal of Materials Science, 42, 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

Farooq, F., Jin, X., Faisal Javed, M., Akbar, A., Izhar Shah, M., Aslam, F., Alyousef, R. (2021). *Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review*. Construction and Building Materials, 306, 124762. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>

Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., Palomo, A. (2007). *Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials*. Journal of Materials Science, 42(9), 3055–3065. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0584-8>

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. (2005). *Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator*. Cement and Concrete Research, 35(10), 1984–1992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.003>

Hardjito, D., Wallah, S. E., Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V. (2005). *Introducing Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Manufacture and Engineering Properties*. 30 th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, January 2005, 23–24.

Heshmat, M., Amer, I., Elgabbas, F., Khalaf, M. A. (2024). *Effect of binder and activator composition on the characteristics of alkali-activated slag-based concrete*. Scientific Reports, 14(1), 13502. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63214-5>

Hwang, C. L., Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer.

ASTM International. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. In ASTM C33/C33M-18. ASTM International.

ASTM International. (2020). *ASTM C1437-20: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*. In ASTM C989/C989M-22. ASTM International.

ASTM International. (2023). *ASTM C109/C109M: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. ASTM International.

Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis (2nd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b98835>

Kaliyavaradhan, S. K., Unnikrishnan, A., Ambily, P. (2024). *CO₂ sequestration through alkali-activated steel slag: a review*. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 14, 1–17. <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2434721>

Law, D. W., Adam, A. A., Molyneaux, T. K., Patnaikuni, I. (2012). *Durability assessment of alkali activated slag (AAS) concrete*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 45(9), 1425–1437. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9842-1>

Liu, M., Dai, W., Jin, W. (2024). *Mix proportion design and carbon emission assessment of high strength geopolymer concrete based on ternary solid waste*. Scientific Reports, 14, 24989.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-76774-3>

Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2017). *One-part alkali-activated materials: A review*. Cement and Concrete Research, 103.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>

Madanchian, M., Taherdoost, H. (2023). *A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making*. Sustainable Social Development, 1(1), 1–6.

<https://doi.org/10.54517/ssd.v1i1.2220>

Marathe, S., Sheshadri, A., Nikolaiev, V. (2025). *Life cycle assessment of sustainable air-cured alkali-activated concrete for permeable pavements using agro-industrial wastes*. Scientific Reports, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04783-x>

Marvila, M. T., de Azevedo, A. R. G., de Oliveira, L. B., de Castro Xavier, G., Vieira, C. M. F. (2021). *Mechanical, physical and durability properties of activated alkali cement based on blast furnace slag as a function of %Na₂O*. Case Studies in Construction Materials, 15(August), e00723.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00723>

Mohebi, R., Behfarnia, K., Shojaei, M. (2015). *Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method*. Construction and Building Materials, 98, 792–798.

<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.128>

Nath, P., Sarker, P. K. (2014). *Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition*. Construction and Building Materials, 66, 163–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>

Provis, J., Deventer, J. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>

Provis, J. L. (2018). *Alkali-activated materials*. Cement and Concrete Research, 114, 110–120.

Qaidi, S., Najm, H. M., Abed, S. M., Ahmed, H. U., Al Dughaisi, H., Al Lawati, J., Sabri, M. M., Alkhatib, F., Milad, A. (2022). *Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis*. Materials, 15(20).

<https://doi.org/10.3390/ma15207098>

Schiefer, C., Plank, J. (2023). *On the CO₂ footprint of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) and its impact on the eco balance of concrete*. Construction and Building Materials, 409, 133944.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133944>

Sri Sunarsih, E., As'ad, S., Mohd.Sam, A. R., Kristiawan, S. (2024). *The Effect of Alkali Activator to Binder Ratio on Workability, Density, and Compressive Strength of Fly Ash-Slag Based Geopolymer Mortar*. Nano Hybrids and Composites, 45, 121–127. <https://doi.org/10.4028/p-MfE2js>

Taguchi, G. (1990). *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization.

Turner, L. K., Collins, F. G. (2013). *Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete*. Construction and Building Materials, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>

Zhang, X. Y., Yu, R., Zhang, J. J., Shui, Z. H. (2022). *A low-carbon alkali activated slag based ultra-high performance concrete (UHPC): Reaction kinetics and microstructure development*. Journal of Cleaner Production, 363, 132416.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132416>

Zheng, Y., Zhong, H., Sun, K., Shen, B., Cui, K., Zhao, Y., Xiong, G., Qin, Q. (2025). *Effect of composite activator on hydration kinetics and micromechanical properties of alkali-activated slag*. Cement and Concrete Composites, 160, 106047.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106047>