

Optimización multirrespuesta de la fluidez y resistencia a la compresión en morteros de escoria activada por alcalino utilizando el enfoque Taguchi-PCR-TOPSIS.

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

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

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

Recibido: 28/03/2026 | Correcciones recibidas: 09/08/2026 | Aceptado: 26/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo identificar una mezcla de mortero de escoria activada alcalina (AAS) que equilibre fluidez y resistencia a la compresión como alternativa sostenible al cemento Portland. Se evaluaron veintisiete mezclas variando la dosis activadora, el módulo, la relación agua/aglutinante, la relación agregado/aglutinante y el contenido de superplastificante, mediante un diseño Taguchi L27, ANOVA y optimización PCR-TOPSIS. La dosis activadora fue el parámetro más influyente (contribución del 70,90%), seguida de la relación agregado/aglutinante (10,12%), mientras que el módulo y la relación agua/aglutinante desempeñaron papeles menores. La mezcla óptima (fluidez 115%, resistencia 48,85 MPa) fue validada mediante un lote réplica independiente, con una huella estimada de CO₂ un 79% inferior a la de un control de cemento Portland. Los mecanismos de reacción no han sido confirmados microestructuralmente. A diferencia de enfoques anteriores de respuesta única, este estudio combina validación estadística, confirmación experimental y estimación ambiental para una base de diseño de mortero más rigurosa.

Palabras clave: escoria activada alcalina; optimización de múltiples respuestas; PCR-TOPSIS; método de Taguchi; resistencia a la compresión; fluidez.

Citar como: Adam, A. A., Ramadhan, B. R., Emeraldy, I. H., Kasim, A. P. (2026), “Optimización multirrespuesta de la fluidez y resistencia a la compresión en morteros de escoria activada por alcalino utilizando el enfoque Taguchi-PCR-TOPSIS.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 475 – 492, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1035>

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Tadulako, Palu/Sulawesi Central, 94118, Indonesia.

Contribución de cada autor

En este artículo, la autora Andi Arham Adam contribuyó con un 30% a la idea original, conceptualización y redacción; Bayu Rahmat Ramadhan para experimentación, recogida de datos y redacción con un 30%; Isa Hanif Emeraldy para análisis estadístico y discusión de resultados con un 25%, y Atman P Kasim para revisión y supervisión con un 15%.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 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.

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

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; flui.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La rápida expansión del desarrollo de infraestructuras ha incrementado significativamente la demanda de materiales a base de cemento, lo que genera serias preocupaciones medioambientales. La producción de cemento Portland ordinario (OPC) está asociada a un alto consumo energético y a importantes emisiones de dióxido de carbono (CO_2), alcanzando aproximadamente 0,9 toneladas de CO_2 por tonelada de cemento producida (Qaidi et al., 2022). Este problema se ha vuelto cada vez más crítico en países en desarrollo, como Indonesia, donde el crecimiento de infraestructuras sigue acelerándose.

En los últimos años, Indonesia — especialmente el centro de Sulawesi — ha experimentado una rápida expansión industrial, especialmente en el sector del acero. El desarrollo de las industrias de procesamiento del acero ha dado lugar a la generación a gran escala de subproductos industriales como la escoria granulada de alto horno triturado (GGBFS). La utilización eficaz de estos subproductos es esencial para reducir los impactos medioambientales y promover prácticas constructivas sostenibles. Los materiales de escoria activada alcalina (AAS) han surgido como una alternativa prometedora de aglutinante, utilizando GGBFS activado por solución alcalina para producir sistemas cementicios bajos en carbono con propiedades mecánicas y de durabilidad favorables (Cong et al., 2024), (Kaliyavaradhan et al., 2024).

A pesar de su importancia, pocos estudios han abordado la interacción entre la trabajabilidad y la resistencia en los sistemas de mortero AAS. En muchos casos, el aumento de la resistencia a la compresión resulta en una reducción de la fluidez, lo que indica la existencia de una *relación de compromiso* entre estas dos propiedades. Esta condición pone de manifiesto la necesidad de un enfoque de evaluación más completo, que considere simultáneamente múltiples criterios de rendimiento. Sin embargo, la mayoría de los estudios siguen basándose en optimización de respuesta única, que puede no representar adecuadamente los requisitos reales de ingeniería.

Además, la aplicación de métodos sistemáticos de optimización multirrespuesta en la investigación AAS sigue siendo relativamente limitada. Técnicas avanzadas, como la optimización basada en Taguchi combinada con métodos de toma de decisiones multirrespuesta, ofrecen un enfoque más eficaz para identificar composiciones óptimas de mezcla que equilibran propiedades en competencia.

Por ello, este estudio pretende investigar los efectos combinados de la composición de la mezcla sobre la fluidez y la resistencia a la compresión del mortero de escoria activada alcalina, utilizando un diseño experimental de Taguchi. Se emplea un enfoque de optimización de múltiples respuestas basado en el método PCR-TOPSIS para determinar la proporción óptima de la mezcla que satisface simultáneamente los requisitos de trabajabilidad y rendimiento mecánico. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan al desarrollo de materiales de construcción sostenibles que utilicen subproductos industriales, especialmente en regiones de rápido desarrollo como Indonesia.

2. EXPERIMENTO

2.1 Materiales y método.

Se empleó un diseño experimental estadístico basado en el método de Taguchi para evaluar la influencia de la composición de la mezcla en el rendimiento del mortero de escoria activada alcalina (AAS). El enfoque de Taguchi permite una optimización eficiente al reducir el número de ensayos experimentales, manteniendo la capacidad de analizar múltiples factores simultáneamente mediante disposiciones ortogonales (Taguchi, 1990). En este estudio, se adoptó una disposición ortogonal $\text{L}_{27} (3^5)$ para contemplar cinco factores de control, cada uno en tres niveles. Los factores seleccionados incluyen la dosis activadora (4%, 5% y 6%), módulo (0,8, 1,0 y 1,2), relación agua/aglutinante (0,46, 0,47 y 0,48), relación agregado/aglutinante (2,25, 2,50 y 2,75) y contenido

de superplastificante (1%, 2% y 3%). Estas variables se seleccionaron debido a su significativa influencia tanto en la laborabilidad como en el rendimiento mecánico de los sistemas de mortero AAS (Cong et al., 2024), (Amer et al., 2021), (J. L. Provis, 2018). La dosis del activador (D) se refiere al porcentaje de solución alcalina en relación con la masa del aglutinante, que controla la disponibilidad de especies reactivas para el proceso de geopolimerización. Una dosis más alta generalmente favorece la disolución de precursores de aluminosilicato, lo que resulta en una mayor formación de geles aglomerantes y en una mejor resistencia mecánica (Law et al., 2012). El módulo (M), definido como la relación de SiO_2 a Na_2O en la solución alcalina, representa la disponibilidad de sílice en el sistema activador (Law et al., 2012). Este parámetro desempeña un papel fundamental en el control de la formación del gel C-(A)-S-H e influye tanto en la trabajabilidad como en el desarrollo de resistencia del mortero de escoria activada alcalina. El diseño experimental se analizó utilizando la relación señal-ruido (S/N) y el análisis de varianza (ANOVA), seguido de una optimización multirrespuesta mediante el método PCR-TOPSIS, con el objetivo de determinar la proporción óptima de la mezcla considerando simultáneamente la fluidez y la resistencia a la

Procedimiento de mezclado del mortero AAS

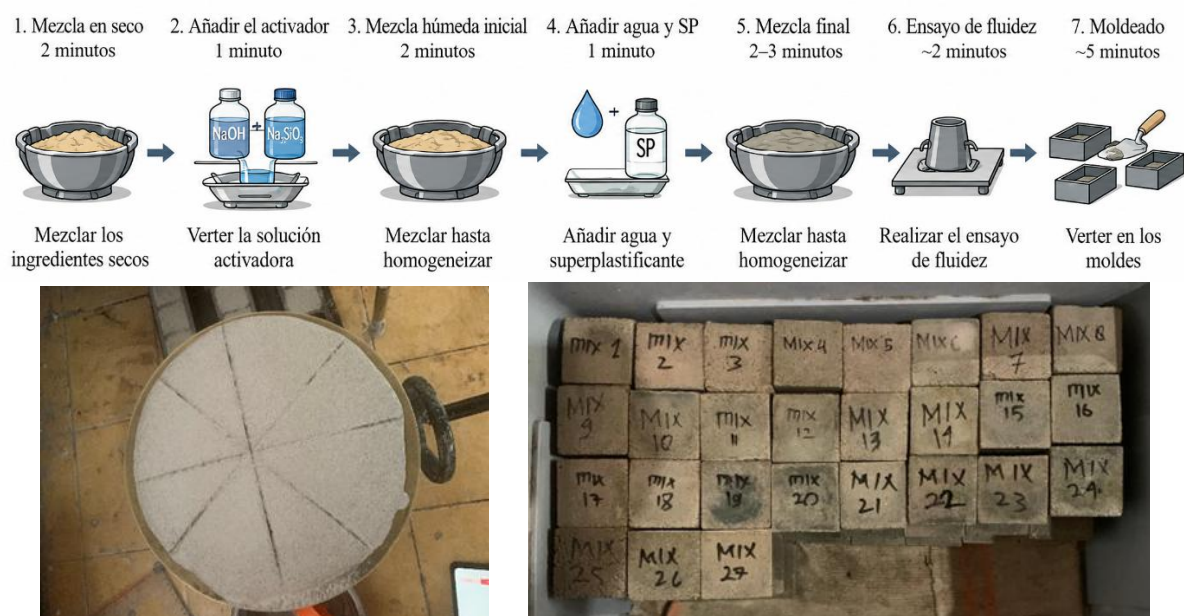


Figura 1. a) Procedimiento de mezcla de mortero AAS; b) proceso de fluidez; c) morteros.

Las muestras de mortero se prepararon utilizando escoria granulada de alto horno molido (GGBFS) como aglutinante principal, como se muestra en la Tabla 1 y la Figura 1, conforme a ASTM C989/C989M (ASTM International, 2022), y se activaron mediante una combinación de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3) (Nath & Sarker, 2014) (Amer et al., 2021). Se utilizó arena local de río, conforme a ASTM C33/C33M (ASTM International, 2018), con un módulo de pureza de 2,48, como agregado fino. El proceso de mezcla se realizó utilizando un mezclador mecánico para asegurar la homogeneidad. Inicialmente, el GGBFS y el agregado fino se mezclaron secos durante aproximadamente 2 minutos. Luego, la solución alcalina y el superplastificante se añadieron gradualmente, y la mezcla procedió hasta obtener un mortero homogéneo y funcional. El mortero en estado fresco se moldeó en formas cúbicas y se compactó para eliminar el aire atrapado. Tras el moldeo, las muestras se cubrieron para minimizar la pérdida de humedad antes del proceso de curado.

Tabla 1. Composiciones químicas GGBFS y PCC basadas en el ensayo XRF.

Material	Perro	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	MnO	S	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	No	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
Cemento (PCC)	55.00	25.00	8.00	2.50	–	–	–	0.80	4.00	–	2.50	1.50

La maniabilidad del mortero en estado fresco se evaluó mediante la prueba de tabla de flujo, conforme a ASTM C1437 (ASTM International, 2020). La prueba se realizó sometiendo el mortero a 25 gotas en un intervalo de 15 segundos, y el valor del caudal se determinó como el porcentaje de aumento en el diámetro medio de dispersión del mortero. La prueba de resistencia a la compresión se realizó conforme a ASTM C109/C109M (ASTM International, 2023), utilizando muestras cúbicas con dimensiones de 50 mm × 50 mm × 50 mm. Las pruebas se realizaron en las edades de curado de 7 y 28 días, con el objetivo de evaluar tanto el rendimiento mecánico en las primeras edades como el rendimiento mecánico en la edad de referencia. Estos periodos de curado se utilizan comúnmente para evaluar el desarrollo de resistencia de materiales cementicios (Farooq et al., 2021), (ASTM International, 2023).

Tabla 2. Dosis de mezclas AASM.

Código	Dosis (%)	Módulo	W/B	Agg/B	SP (%)	Código	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

Se preparó una mezcla de confirmación, utilizando cemento Portland compuesto convencional (PCC), como muestra de control, diseñada para alcanzar una resistencia a compresión objetivo de 25,231 MPa en 28 días. La proporción de mezcla consistía en una relación agua/aglutinante de 0,47, una relación agregado/aglutinante de 2,50 y un 2% de superplastificante. Esta mezcla de control se utilizó para comparar con mortero de escoria activado por alcalinos en términos de laborabilidad y resistencia a la compresión.

Para asegurar una base adecuada para la comparación entre las mezclas AAS y el control CMPC, la relación agua/aglutinante (0,47), la relación agregado/aglutinante (2,50) y la dosis de superplastificante (2%) del control CMPC se ajustaron deliberadamente a los valores de los niveles intermedios utilizados en la planificación de las mezclas AAS (Tabla 2), en lugar de ser optimizados de forma independiente. Sin embargo, debe señalarse que la relación agua/aglutinante

presentada en la Tabla 2 para las mezclas AAS (0,46–0,48) considera solo el agua añadida de mezcla y no incluye el agua contenida en las soluciones activadoras de NaOH y Na₂SiO₃. Cuando se considera esta agua adicional, se estima que la proporción total efectiva agua-aglutinante de las mezclas AAS oscila aproximadamente entre 0,49 y 0,52 (por ejemplo, aproximadamente 0,50 para la mezcla óptima de T610046250), basándose en las composiciones de las soluciones activadoras descritas en la Sección 2.3. Este valor es ligeramente superior a la relación nominal agua-aglutinante del control CMPCC (0,47) y es una característica inherente de los sistemas activados por alcalinos, en los que una parte del líquido de mezcla es suministrada por el activador, en lugar de añadirse como agua libre, en acuerdo con observaciones de estudios previos sobre AAS [8], [6]. Por lo tanto, los lectores deberían considerar esta diferencia en el contenido efectivo de agua al evaluar las comparaciones presentadas de resistencia a la compresión y trabajabilidad entre las mezclas AAS y CMPCC, en lugar de asumir la misma disponibilidad de agua entre los dos sistemas de aglutinante. Tras el moldeo, las muestras se cubrieron con láminas de plástico para minimizar la pérdida de humedad y se mantuvieron a temperatura ambiente de laboratorio (± 25 °C) durante 24 horas. Posteriormente, las muestras fueron desmoldeadas y curadas en condiciones ambientales hasta las edades de prueba de 7 y 28 días. Este régimen de curado se adoptó para simular condiciones prácticas de campo y evaluar el rendimiento del mortero de escoria activada alcalina bajo condiciones de curado incontroladas.

2.2 Optimización de múltiples respuestas y análisis estadístico.

Para evaluar la influencia de los parámetros de la mezcla y determinar la composición óptima, se realizaron análisis estadísticos y optimización multirrespuesta utilizando el Análisis de Varianza (ANOVA) y el método PCR–TOPSIS.

Se aplicó ANOVA para cuantificar la contribución de cada factor a la variación de la resistencia a la compresión (Taguchi, 1990). La contribución porcentual de cada parámetro se calculó en función de la relación entre la suma de cuadrados y la suma total de cuadrados, expresada en Eq. (1):

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

donde P_i es la contribución porcentual del factor i , SS_i es la suma de los cuadrados del factor i y SS_t es la suma total de cuadrados. Para la optimización multirrespuesta, se utilizó el método PCR–TOPSIS para evaluar simultáneamente la fluidez y la resistencia a la compresión (Jolliffe, 2002) (Hwang & Yoon, 1981) (Behzadian et al., 2012) (Madanchian & Taherdoost, 2023). La matriz de decisión se normalizó inicialmente mediante normalización vectorial para eliminar las diferencias entre las unidades de medida, según Eq. (2): X_{ij}

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

La matriz normalizada se ponderó para reflejar la importancia relativa de cada respuesta, según la Ecuación. (3):

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

donde w_j representa el peso de cada respuesta. Las soluciones positivas ideales e ideales negativas se definieron en función de los valores máximos y mínimos de la matriz normalizada ponderada. Las distancias de separación en relación con las soluciones ideales se calcularon según Eq. (4) y Ecu. (5):

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

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

Finalmente, el coeficiente de proximidad relativa se determinó usando Eq. (6):

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

La alternativa con el valor más alto se consideró la mezcla óptima. Este enfoque permite identificar una solución equilibrada cuando múltiples criterios de rendimiento presentan comportamientos contradictorios. C_i

2.3 Estimación de las emisiones de CO₂.

Se realizó una estimación de las emisiones *de CO₂ de la cuna a la puerta* para cada una de las 27 mezclas AAS y para el control CMPCC, basada en los factores de emisión publicados y las proporciones de las mezclas presentadas en la Tabla 2. Se adoptaron los siguientes factores de emisión: GGBFS = 0,143 kg CO₂/kg (Ahmad et al., 2022); NaOH (sobre base sólida) = 1,915 kg CO₂/kg [20]; Solución Na₂SiO₃ (según el suministro) = 1,222 kg CO₂/kg (Turner & Collins, 2013); superplastificante a base de éter policarboxilato (PCE) = 2,25 kg de CO₂/kg de polímero seco (Schiefer & Plank, 2023); y cemento Portland común (OPC, usado en CMPCC) = 0,91 kg CO₂/kg (Ahmad et al., 2022).

Dado que la solución activadora alcalina utilizada en este estudio (NaOH 10 M y Na₂SiO₃ extrapuro, Na₂O 7,5–8,5%, SiO₂ 25,5–28,5%) no fue caracterizada químicamente en el programa experimental original para tener en cuenta las emisiones de CO₂, se adoptaron las siguientes hipótesis para esta estimación: (1) la fracción mássica de la solución de NaOH se consideró igual al 30% (solución de 10 M, densidad aproximada de 1,33 g/mL); (2) la composición de la solución Na₂SiO₃ se consideró como el valor medio de las especificaciones del proveedor (Na₂O = 8%, SiO₂ = 27%); (3) el módulo (M) se consideró como la relación de masa SiO₂/Na₂O del activador combinado, y la dosis del activador (D, %) se consideró como la masa total de la solución activadora en relación con la masa del aglutinante GGBFS; y (4) el superplastificante a base de PCE (Sika) se consideró que tenía un contenido de sólidos del 30%, un valor típico de aditivos comerciales basados en policarboxilatos. Estas hipótesis permiten calcular, inversamente, las proporciones relativas de masas de las soluciones de NaOH y Na₂SiO₃ necesarias para cumplir los valores D y M de cada mezcla y, en consecuencia, estimar las correspondientes emisiones de CO₂, considerando 1 kg de aglutinante como base.

3. RESULTADOS Y DEBATE

3.1 Rendimiento de la viabilidad (análisis de fluidez).

La laborabilidad del mortero de escoria activada alcalina (AAS) se evaluó mediante la prueba de la tabla de flujo, y los resultados se resumen en la Figura 2. Los resultados experimentales indican que los valores de flujo variaron significativamente entre las diferentes composiciones de las mezclas, oscilando entre aproximadamente el 49% y el 135,25%, lo que demuestra la fuerte influencia de la composición del activador y las proporciones de la mezcla en el comportamiento en estado fresco.

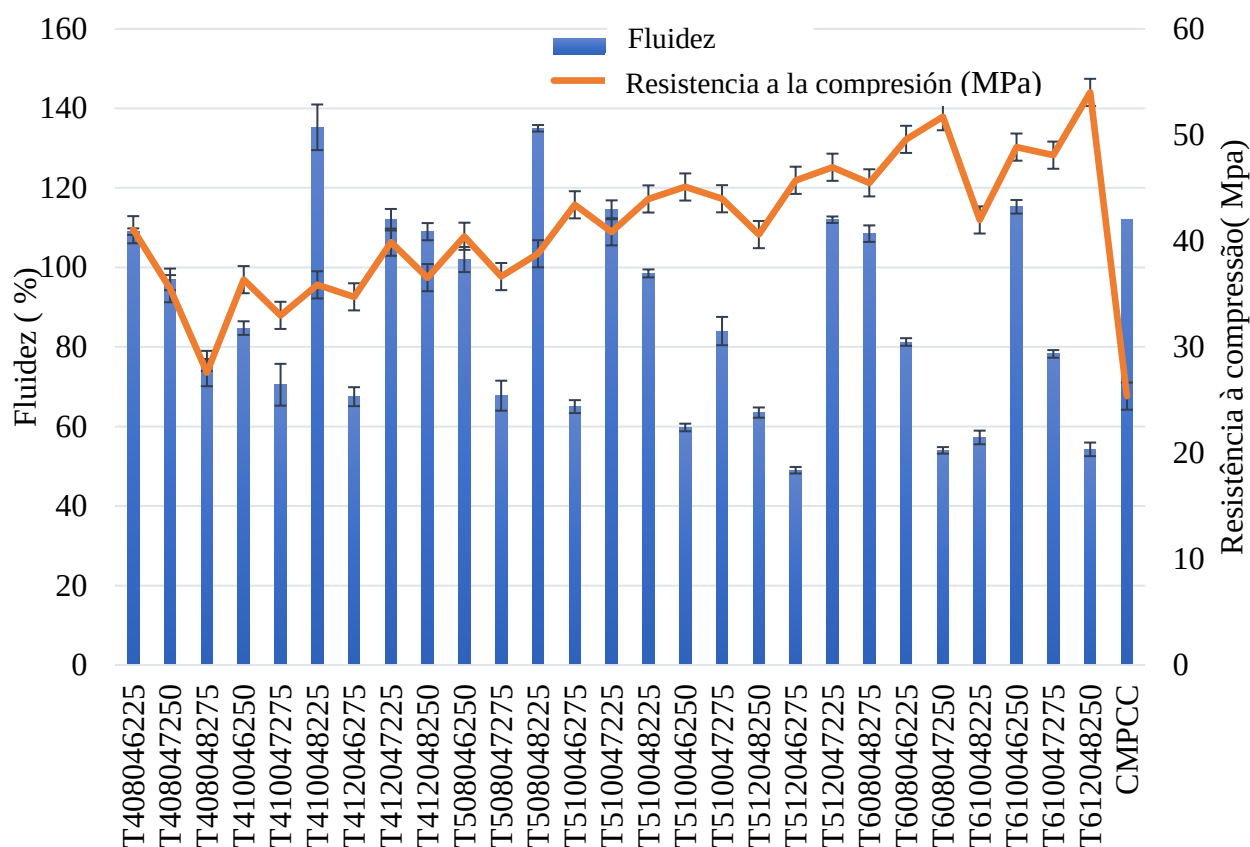


Figura 2. Gráfico de la fluidez y resistencia a la compresión a 28 días del mortero AAS.

El caudal máximo obtenido en este estudio alcanzó el 135,25%, superando el rango objetivo ($110 \pm 5\%$). Basándose en las observaciones experimentales y el análisis complementario presentado en la Figura 3, la variación del caudal está gobernada principalmente por parámetros clave como la dosis del activador, el módulo y la relación agua/aglutinante. Este resultado es coherente con estudios previos, que informaron que aumentar el contenido de líquidos, incluyendo el activador y el agua, mejora la lubricación entre partículas y reduce la fricción interna, aumentando así la laborabilidad (Duxson et al., 2007), (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005).

El efecto de factores individuales sobre la fluidez puede analizarse más a fondo a través de los resultados de ANOVA, especialmente mediante la respuesta media y la relación señal-ruido (SNR), como se ilustra en las Figuras 3 y 4. Los resultados indican que la dosis del activador y la relación agua/aglutinante son los parámetros más influyentes. Una dosis de activador más alta aumenta la fase líquida, mejorando la lubricación entre partículas y resultando en valores de fluidez más altos. De manera similar, aumentar la relación agua/aglutinante reduce la viscosidad de la mezcla y mejora la trabajabilidad, lo cual está en línea con estudios previos sobre materiales activados alcalinos (Abudawaba et al., 2021) (Sri Sunarsih et al., 2024) (Heshmat et al., 2024).

Sin embargo, cuando se analizan los resultados del flujo junto con la resistencia a la compresión a 28 días, se observa una clara tendencia inversa. Las mezclas con valores de flujo excesivamente altos (por ejemplo, $>130\%$) tienden a mostrar resistencia a la compresión moderada, mientras que las mezclas con valores de flujo más bajos (aproximadamente $50\text{--}70\%$) alcanzan mayores resistencias, alcanzando 54,01 MPa. Esto indica un *equilibrio* entre la laborabilidad y el rendimiento mecánico.

Este fenómeno puede atribuirse al aumento del contenido efectivo de líquido, que, aunque beneficioso para la trabajabilidad, resulta en una mayor porosidad tras el endurecimiento y, en consecuencia, reduce la resistencia. Se han reportado tendencias similares en estudios previos, en

los que el exceso de agua o activador resulta en una reducción del rendimiento mecánico debido al aumento del volumen de poros y a la formación de una microestructura menos resistente (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005), (Nath & Sarker, 2014).

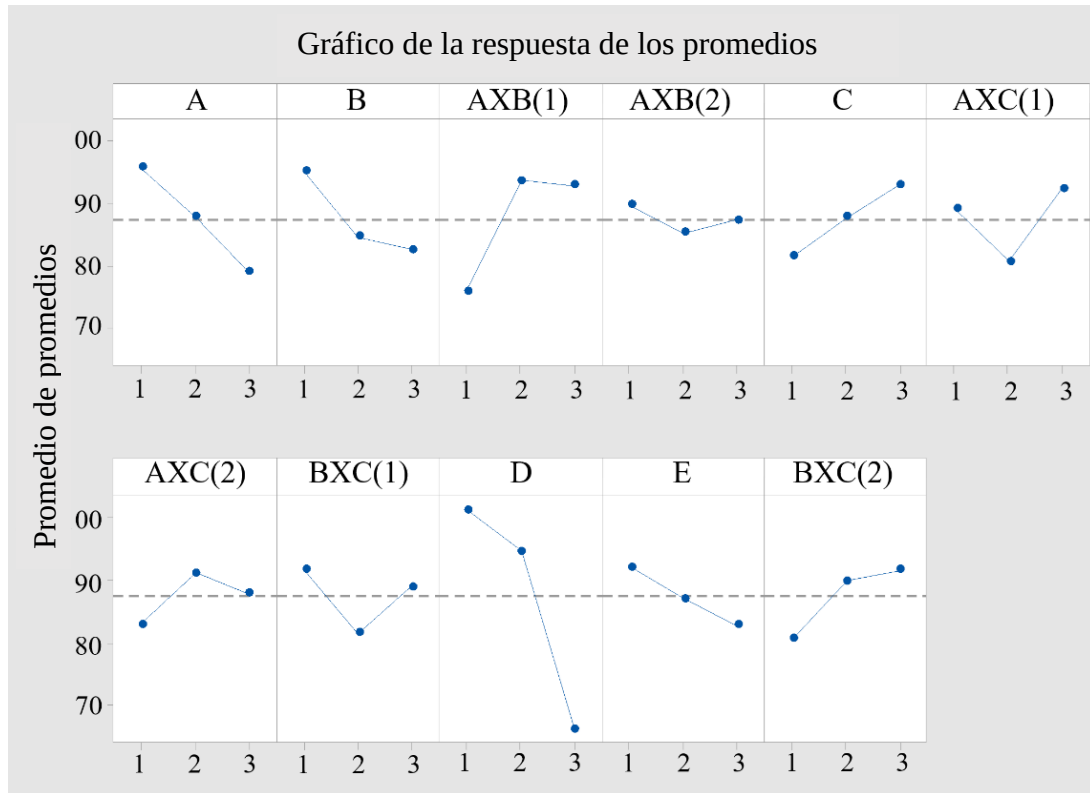


Figura 3. Gráficos de respuesta de la fluidez media del mortero AAS.

Sin embargo, no siempre es deseable una fluibilidad excesiva. Basándose en la característica de calidad de "nominal es mejor" del método de Taguchi, el valor de flujo debe controlarse dentro de un rango objetivo específico, en lugar de maximizarse (Taguchi, 1990) (Mohebi et al., 2015). Los resultados indican que, aunque es posible alcanzar valores de flujo más altos, esto no corresponde necesariamente a un rendimiento óptimo. Este resultado destaca la necesidad de equilibrar la viabilidad y las propiedades mecánicas, como se discutirá en las siguientes secciones.

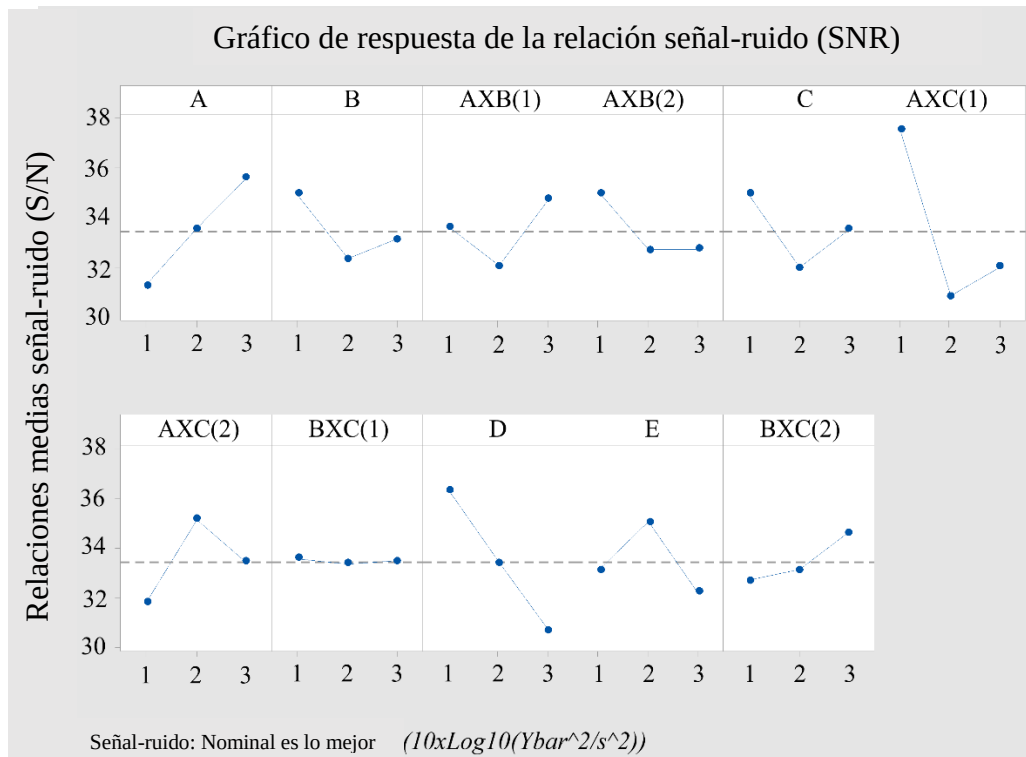


Figura 4. Gráficos de respuesta de la relación señal-ruido (SNR) de la fluidez del mortero AAS.

3.2 Desarrollo de la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión del mortero de escoria activada alcalina (AAS) se evaluó a las edades de curado de 3, 7 y 28 días, y los resultados se presentan en la Figura 5. Los resultados demuestran una variación significativa en la resistencia a la compresión en función de la composición de la mezcla, confirmando la fuerte influencia de los parámetros activadores y las proporciones de la mezcla.

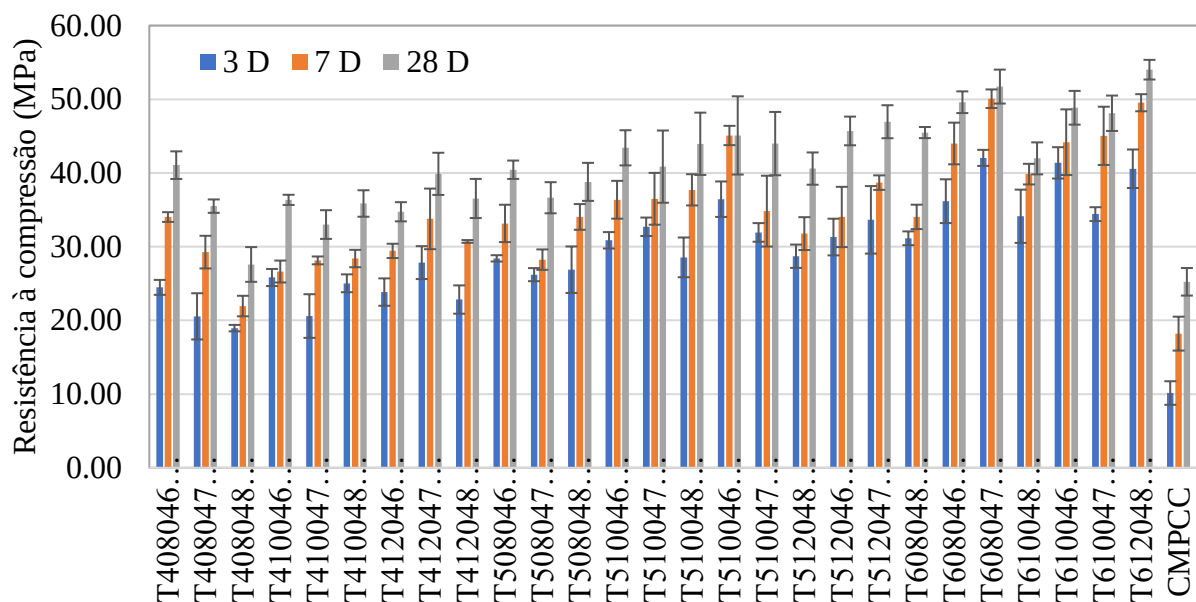


Figura 5. Resistencia a la compresión de las 27 mezclas en 7, 14 y 28 días.

A los 28 días, la resistencia a la compresión osciló entre 27,58 MPa (T408048275) y 54,01 MPa (T612048250). La mayor resistencia la alcanzó la mezcla T612048250 (54,01 MPa), seguida por las mezclas T608047250 (51,72 MPa) y T608046225 (49,58 MPa). Por otro lado, la resistencia más baja se observó en la mezcla T408048275 (27,58 MPa). En comparación con la mezcla de control, el PCC mostró una resistencia significativamente menor, de 25,36 MPa, lo que confirma que el mortero AAS puede lograr más del doble de resistencia a la compresión del mortero convencional. Esta comparación se basa en la coincidencia de las proporciones nominales de mezclas —relación agua/aglutinante, relación agregado/aglutinante y dosis de superplastificante— entre las mezclas AAS y CMPCC, en lugar de en un contenido real de agua idéntico; véase la Sección 2.1 para una discusión detallada de esta distinción.

El desarrollo de resistencia durante el periodo de curado también muestra una tendencia constante al alza para todas las mezclas. Por ejemplo, la mezcla T608047250 mostró un aumento de 42,05 MPa (3 días) a 50,07 MPa (7 días), alcanzando 51,72 MPa (28 días). De manera similar, la mezcla T510046250 mostró un aumento de 36,44 MPa (3 días) a 45,08 MPa (7 días) y 45,09 MPa (28 días), indicando un rápido desarrollo de resistencia en las primeras edades, una característica conocida de los sistemas AAS [25] (Luukkonen et al., 2017).

3.3 Efecto de los parámetros de la mezcla basado en el análisis de Taguchi.

En este estudio, los factores evaluados consisten en la dosis del activador (Factor A), el módulo o razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (Factor B), la relación agua/aglutinante (Factor C), la relación agregado/aglutinante (Factor D) y la relación superplastificante/aglutinante (Factor E). A partir de los resultados de la resistencia a compresión, la influencia de los parámetros de la mezcla fue posteriormente evaluada mediante el método de Taguchi, mediante análisis de varianza (ANOVA), respuesta media y relación señal-ruido (SNR).

Los resultados de ANOVA, presentados en la Tabla 3, indican que la dosis del activador es el factor predominante en el control de la resistencia a la compresión, con una contribución de aproximadamente el 70,90%. Esta contribución, significativamente mayor que la de los otros parámetros, confirma que la concentración del activador desempeña un papel crítico en el control del proceso de geopolimerización, especialmente al favorecer la disolución de precursores y promover la formación de una matriz de reacción densa y homogénea (J. Provis & Deventer, 2014), (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005).

La validez de ANOVA depende de tres supuestos fundamentales: independencia de las observaciones, normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas (homocedasticidad). La independencia se garantizó mediante el diseño experimental, ya que cada una de las 27 mezclas corresponde a un lote físicamente distinto, moldeado y probado como un grupo independiente de muestras, siguiendo la disposición ortogonal L27. La normalidad de los residuos se evaluó utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, aplicada a los residuos del modelo ajustado de efectos principales (resistencia a compresión observada menos la resistencia a compresión predicha para cada mezcla); los resultados ($W = 0,971$; $p = 0,629$) no indicaron desviación significativa de la normalidad. La homogeneidad de las varianzas se evaluó utilizando la prueba de Levene sobre los residuos agrupados por la dosis del activador ($F = 0,359$; $p = 0,702$) y por el módulo ($F = 1,054$; $p = 0,364$); Ninguna de las pruebas indicó una violación significativa de homocedasticidad. Se aplicó el mismo procedimiento a los datos de caudal (Shapiro-Wilk: $W = 0,976$; $p = 0,759$; prueba de Levene para dosis activadora: $F = 0,385$; $p = 0,685$).

Dado que todos los valores p son superiores al nivel de significancia de 0,05, se cumplen las suposiciones de normalidad y homogeneidad de varianzas para ambas respuestas, corroborando la adecuación de ANOVA para este conjunto de datos, sin necesidad de transformación de datos.

Tabla 3. Análisis de varianza (ANOVA) para la respuesta media – cuarta iteración.

Fuente	DOF	Suma de cuadrados (SS)	Media de cuadrados (MS)	Razón F
Factor A	2	696.11	348.06	45.20
Factor B	2	62.99	31.49	4.09
Factor C	2	23.37	11.69	1.52
Interacción con CA	2	17.13	8.57	1.11
Interacción BC	2	15.01	7.50	0.97
Factor D	2	99.33	49.66	6.45
Factor E	2	12.10	6.05	0.79
Residual Error	12	55.52	4.63	–
Total	26	981.88	–	–

Nota: la fila "Interacción CB", presente en una versión anterior de esta tabla, ha sido eliminada, ya que duplicaba la "Interacción BC" (los términos de interacción B×C y C×B son estadísticamente idénticos). Esta corrección eleva el número total de grados de libertad a 26, de acuerdo con el diseño L27 (27 ensayos – 1), y la Suma total de Cuadrados a 981,88, consistente con los valores presentados a continuación.

En cambio, el módulo (relación SiO₂/Na₂O) tiene una contribución menor, pero aún influye en la resistencia a la compresión como parámetro secundario. Su efecto está asociado con la disponibilidad de especies silicatadas que contribuyen a la formación de geles y al refinamiento estructural. Sin embargo, en comparación con la dosis del activador, la contribución del módulo es relativamente limitada, lo que indica que su influencia depende más de la interacción con otros parámetros que de su papel como factor de control primario (Nath & Sarker, 2014) (Zheng et al., 2025).

La consistencia entre la respuesta media y el análisis señal-ruido (SNR) confirma aún más la robustez de la jerarquía de parámetros identificada en la Tabla 4. Los resultados de la ANOVA basada en SNR también muestran que la dosis activadora sigue siendo el factor más significativo, reforzando su papel predominante tanto en el control del rendimiento como de la variabilidad (Taguchi, 1990) (Mohebi et al., 2015).

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para la respuesta de la relación señal-ruido (SNR) – cuarta iteración.

Fuente	Df	SS	MS	Razón 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
A.C.	2	1.15	0.57	2.01
D	2	5.43	2.71	9.52
E	2	0.87	0.43	1.52
Error residual	12	2.14	0.18	-
Total	26	44.85	-	-

En general, el análisis de Taguchi demuestra que la resistencia a la compresión del mortero AAS está controlada principalmente por la dosis del activador, que contribuye con el 70,90% de la

variación total, mientras que el módulo actúa como un parámetro secundario que influye en la eficiencia del sistema de reacción. Estos resultados subrayan que la optimización del mortero AAS debe priorizar la concentración del activador, seguida de un ajuste cuidadoso del módulo, para lograr un entorno de reacción equilibrado (Hardjito et al., 2005).

3.4 Análisis de la relación de compromiso entre fluidez y resistencia a la compresión.

Se ha observado una relación de compromiso entre fluidez y resistencia a la compresión en sistemas de mortero de escoria activada alcalina (AAS), reflejando la influencia concurrente de los parámetros de mezcla sobre las propiedades tanto en estados frescos como endurecidos. Una mayor fluidez generalmente se asocia con un aumento de la relación agua/aglutinante y la optimización de la composición de los activadores; sin embargo, esto resulta en una menor densidad matricial y menor resistencia a la compresión. Se han reportado tendencias similares, en las que un mayor contenido de agua aumenta la porosidad y reduce el rendimiento mecánico (J. L. Provis, 2018), (Nath & Sarker, 2014).

Por otro lado, se obtienen mayores resistencias a compresión con menores contenidos de agua y condiciones óptimas de activador, especialmente con una dosis del **6%** y un módulo de **1,2**. El papel de la concentración de activadores en el aumento de la cinética de reacción y la densificación de la matriz está bien establecido (Fernandez-Jimenez et al., 2007).

Esta relación inversa indica que la mejora de la trabajabilidad a menudo se produce a costa de la resistencia. Una fluidez excesiva, por encima del rango objetivo ($110 \pm 5\%$), refleja una estructura matricial diluida, lo que puede comprometer la integridad mecánica, como también se informó en estudios previos (Marvila et al., 2021). Además, la dosis activadora desempeña un doble papel, influyendo significativamente tanto en la resistencia como en la fluidez bajo diferentes condiciones óptimas (Hardjito et al., 2005).

Por tanto, el *equilibrio* entre fluidez y resistencia a la compresión pone de manifiesto la necesidad de optimización de múltiples respuestas, ya que ambas propiedades no pueden maximizarse simultáneamente. En la práctica, la dosis de la mezcla debe ajustarse según los requisitos de rendimiento, buscando equilibrar la laborabilidad y la resistencia para lograr un rendimiento óptimo.

3.5 Optimización multirrespuesta usando PCR–TOPSIS.

Para determinar la mezcla óptima, considerando simultáneamente la fluidez y la resistencia a la compresión, se realizó una optimización multirrespuesta utilizando el método PCR–TOPSIS. El análisis se realizó basándose en los resultados experimentales de fluidez (%) y resistencia a la compresión a 28 días (MPa) obtenidos del diseño de Taguchi (Hwang & Yoon, 1981) (Behzadian et al., 2012).

La matriz de decisión se normalizó inicialmente mediante normalización vectorial para eliminar diferencias unitarias entre respuestas. Posteriormente, se asignaron factores de ponderación basados en la importancia relativa de cada respuesta. En este estudio, se asignó un peso mayor a la resistencia a la compresión (0,6) en comparación con la fluidez (0,4), considerando su contribución predominante, según indican los resultados de ANOVA. Esta elección se examina mediante un análisis de sensibilidad más adelante en esta sección (Tabla 6).

A continuación, se utilizó la matriz normalizada ponderada para determinar las soluciones ideales positivas e ideales negativas. Se calcularon las distancias de separación en relación con las soluciones ideales, seguidas de la determinación del coeficiente de proximidad relativa para cada mezcla experimental (Behzadian et al., 2012). Los resultados de la clasificación basada en este coeficiente se presentan en la Tabla 5.

5. Clasificación de las composiciones de las mezclas basada en la optimización de múltiples respuestas usando. (C_i)

Mix Code	Fluidez (%)	Resistencia (MPa)	(C_i)	Clasificación
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

Los resultados indican que la mezcla óptima es T610046250, que presentó el coeficiente de proximidad más alto = 0,784. Esta mezcla proporciona el mejor equilibrio entre fluidez y resistencia a la compresión, con un valor de flujo de fusión del 115% y una resistencia a la compresión de 48,85 MPa. Es importante señalar que la mezcla óptima identificada por el método PCR–TOPSIS difiere de la que presentó la mayor resistencia a la compresión. Por ejemplo, la mezcla T612048250 alcanzó la resistencia máxima a la compresión de 54,01 MPa, pero presentó una fluidez relativamente baja, lo que resultó en una clasificación global inferior.

De manera similar, las mezclas con valores de flujo excesivamente altos (por encima del 130%) no necesariamente funcionan de forma óptima debido a la reducción de la resistencia mecánica. Esto confirma la existencia de una relación de compromiso entre la resistencia al flujo y a la compresión, como se ha discutido anteriormente. El método PCR–TOPSIS identifica eficazmente una solución de compensación que cumple simultáneamente ambos criterios de rendimiento. A diferencia de la optimización de respuesta única, que puede conducir a condiciones extremas, la optimización de respuesta múltiple ofrece un enfoque más realista para aplicaciones prácticas de ingeniería (Madanchian & Taherdoost, 2023).

Para justificar el esquema de ponderación adoptado, se recalculó la clasificación PCR–TOPSIS considerando tres esquemas adicionales: ponderación igual (0,5/0,5), ponderación con mayor peso para resistencia (0,7/0,3) y ponderación objetiva basada en la entropía de Shannon (0,21 para resistencia / 0,79 para fluidez), derivada del conjunto completo de datos de las 27 mezclas, resumida en la Tabla 6.

Tabla 6. Sensibilidad de la clasificación PCR–TOPSIS a esquemas de ponderación alternativos.

Esquema de ponderación	Aire acondicionado (agua/cemento)	w (Fluidez)	Rango 1 (Ci)	Rango 2 (Ci)	Rango 3 (Ci)
Ponderación igual	0.50	0.50	T610046250 (0,777)	T512047225 (0,731)	T508048225 (0,731)
Adoptado (subjetivo)	0.60	0.40	T610046250 (0,784)	T512047225 (0,732)	T608048275 (0,686)
Con mayor peso para la fuerza	0.70	0.30	T610046250 (0,792)	T512047225 (0,732)	T608048275 (0,683)
Basado en entropía (objetivo)	0.21	0.79	T508048225 (0,911)	T410048225 (0,895)	T610046250 (0,766)

El T610046250 de mezcla se mantiene en primera posición en todos los esquemas subjetivos de ponderación, demostrando que el resultado no es sensible a variaciones razonables en los pesos asignados. Por otro lado, la ponderación basada en entropía favorece la fluidez, ya que los datos de flujo muestran mayor dispersión, seleccionando mezclas con valores de flujo ($\approx 135\%$) fuera del rango objetivo ($110 \pm 5\%$, Sección 3.1). Como este criterio puramente estadístico no refleja las prioridades de ingeniería, se mantiene la ponderación adoptada de 0,6/0,4, respaldada por la contribución predominante de la dosis activadora a la resistencia, como demuestra ANOVA

(Sección 3.3).

3.6 Confirmación experimental de mezcla óptima.

Para validar la mezcla identificada como óptima por el análisis PCR–TOPSIS (T610046250), se preparó un lote de confirmación independiente, llamado KT610046250, utilizando las mismas proporciones de la mezcla (dosis activadora del 6%, módulo de 1,0, relación agua/aglutinante de 0,46, relación agregado/aglutinante de 2,50 y superplastificante del 1%) y el mismo régimen de curado (condiciones ambientales, 25 °C) adoptado en el programa experimental original. Se moldearon y probaron cuatro muestras replicadas para cada edad de curado.

Tabla 7. Comparación entre la mezcla original (objetivo) y la mezcla de confirmación (KT610046250). Resultados.

Parámetro	TARGET (T610046250, original)	Confirmado (KT610046250, n = 4)	Desviación (%)	¿Desviación estándar respecto al valor de referencia?
Fluidez(%)	115.25 ± 1.71	113.60	−1,43	Sí
Resistencia a la compresión, 7 D (MPa)	41.37 ± 2.13	41,36 ± 0,67	−0,02	Sí
Resistencia a la compresión, 14 d (MPa)	–	45,26 ± 0,90	–	–
Resistencia a la compresión, 28 d (MPa)	48,85 ± 2,29	50,60 ± 0,86	+3.58	Sí

Los resultados de confirmación muestran buena concordancia con los valores de referencia originales, con desviaciones de −1,43% para fluidez y +3,58% para resistencia a la compresión a 28 días, con un valor de 48,85 MPa. Ambos resultados están dentro del rango de ± 1 desviación estándar de las mediciones originales y cumplen el criterio de aceptación del $\pm 10\%$, comúnmente aplicado en experimentos de confirmación por el método Taguchi (Taguchi, 1990).

3.7 Estimación del impacto ambiental (CO₂).

Las emisiones de CO₂ de las seis mezclas AAS oscilaron entre 0,191 y 0,206 kg de CO₂/kg de aglutinante, lo que corresponde a una reducción del 77,7% al 79,4% en relación con la mezcla de control PCC (0,924 kg de CO₂/kg de aglutinante), como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Emisiones estimadas de CO₂ de mezclas representativas AAS y mezcla de control PCC.

Código Mezcla	D (%)	M	CO ₂ (unión kg/kg)	Reducción frente a 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

Este resultado es coherente con evaluaciones recientes del ciclo de vida, que reportan un 70–80%

menos emisiones de carbono para hormigones geopoliméricos basados en escoria y residuos, en comparación con los hormigones producidos con OPC (Marathe et al., 2025), (Liu et al., 2024). El módulo tuvo un efecto más pronunciado sobre las emisiones que la dosis del activador: aumentar el módulo de 0,8 a 1,2 incrementó las emisiones aproximadamente en un 8% (0,191 a 0,206 kg CO₂/kg de aglutinante), reflejando la mayor demanda de Na₂SiO₃ a proporciones más altas de SiO₂/Na₂O. Por otro lado, variar la dosis del 4% al 6%, manteniendo constante el módulo, modificó las emisiones en menos del 1%. La mezcla óptima determinada por el método PCR–TOPSIS (T610046250) mostró una reducción del 79,3% en las emisiones de CO₂ en comparación con la PCC, confirmando que la mezcla óptima desde un punto de vista mecánico también aporta beneficios ambientales sustanciales.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran que la dosis del activador es el parámetro con mayor influencia en la resistencia a la compresión del mortero de escoria activada alcalina (AAS), contribuyendo con aproximadamente el 70,90% de la variación total, seguida por la relación agregado/aglutinante (10,12%), mientras que el módulo (6,42%) y la relación agua/aglutinante (2,38%) desempeñan papeles comparativamente menores. El análisis de Taguchi confirma que la dosis del activador y la proporción de agregados controlan conjuntamente el desarrollo de la concentración, destacando la importancia de optimizar tanto la concentración del activador como el contenido agregado.

Los resultados de la PCR–TOPSIS indican que la mezcla óptima no se define solo por la máxima resistencia o fluidez, sino por el equilibrio entre ambas propiedades. La mezcla óptima (T610046250) mostró fluidez del 115% y resistencia a la compresión de 48,85 MPa. Estos resultados confirman la relación *de compromiso* entre trabajabilidad y resistencia y destacan la importancia de la optimización de múltiples respuestas para la dosificación práctica de morteros AAS.

No se realizó caracterización microestructural (por ejemplo, SEM, XRD, FTIR o TGA) en este estudio. Las tendencias observadas de resistencia son, en general, coherentes con estudios previos que atribuyen el rendimiento mecánico de los materiales AAS a la formación y distribución del gel C–A–S–H y a los mecanismos de activación alcalina, que difieren fundamentalmente de la hidratación convencional con cemento. Se recomienda, en futuros estudios, la confirmación directa de estos mecanismos en las mezclas estudiadas mediante análisis microestructurales.

La mezcla óptima identificada por PCR–TOPSIS fue validada por un lote de replicación independiente (KT610046250), confirmando la reproducibilidad de la dosis propuesta. Esta mezcla también mostró una reducción estimada del 79,3% en las emisiones de CO₂ en comparación con la mezcla de control a base de cemento Portland, demostrando que el mortero AAS mecánicamente óptimo también aporta beneficios ambientales sustanciales. Estos resultados corroboran el uso del enfoque Taguchi–PCR–TOPSIS como método eficaz para el desarrollo de morteros AAS sostenibles y de alto rendimiento.

5. REFERENCIAS

- 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). *CO 2 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>