

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TRUJILLO
“BENEDICTO XVI”
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL



**HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN
BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Br. Bendezú Castillo, Rodolfo Rafael

<https://orcid.org/0009-0002-7617-8035>

ASESOR

Ms. Cárdenas Saldaña, Bryan Emanuel

<https://orcid.org/0000-0001-7882-5916>

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Infraestructura, edificaciones y construcción

TRUJILLO – PERÚ

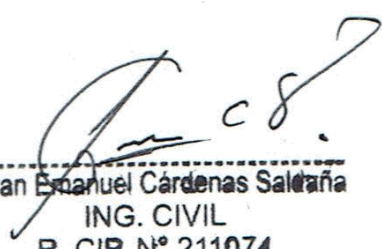
2026

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura:

Mg. Ing. Henry Alexander Chipana Saldaña

Yo, Ms. Cárdenas Saldaña, Bryan Emanuel con DNI N° 71475477, como asesor del trabajo de investigación titulado: **“HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025”**, desarrollado por el egresado BendeZú Castillo Rodolfo Rafael con DNI N° 70891219; del Programa de estudios de Ingeniería Civil; considero que dicho trabajo reúne las condiciones tanto técnicas como científicas, las cuales están alineadas a las normas establecidas en el Reglamento de Titulación de la Universidad Católica de Trujillo “Benedicto XVI” y en la normativa para la presentación de trabajos de titulación de la Facultad Ingeniería y Arquitectura. Por tanto, autorizo la presentación del mismo ante el organismo pertinente para que sea sometido a evaluación por los jurados designados por la mencionada facultad.



Bryan Emanuel Cárdenas Saldaña
ING. CIVIL
R. CIP. N° 211074

Ms. Bryan Emanuel, Cárdenas Saldaña

DNI: 7147577

Asesor

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

EXCMO. MONS. GILBERTO ALFREDO VIZCARRA MORI, S.J.

Arzobispo Metropolitano de Trujillo

Gran Canciller

Universidad Católica de Trujillo “Benedicto XVI”

DR. MARCOANTONIO PACHERRES TORREJÓN

Rector de la Universidad Católica de Trujillo “Benedicto XVI”

DRA. SILVIA ANA VALVERDE ZAVALA

Vicerrectora Académica

DRA. GINA GENARA ZAVALA ESPEJO

Vicerrectora de Investigación

MG. HENRY ALEXANDER CHIPANA SALDAÑA

Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura

DRA. TERESA SOFÍA REATEGUI MARÍN

Secretaria General

DEDICATORIA

A Dios, por sostenerme durante esta travesía hacia mi crecimiento académico y profesional, por mantenerme con actitud positiva en la adversidad y por darme fortaleza para enfrentar los retos durante el proceso.

A mis padres, que ya no están sobre esta tierra, pero su recuerdo mora en mi corazón, que con su amor, apoyo y sacrificio han sido un pilar fundamental en mi formación profesional. Sin ustedes, no lo hubiera logrado.

A mi familia, a mi hijo Adrián que representa la fuerza, el amor y su presencia es un regalo de Dios para mi vida, a Silvia mi pareja y compañera de vida, apoyo y soporte en tiempos difíciles.

A todas las personas que aportaron en el presente trabajo de alguna manera, reiterando que su importante aporte ha sido esencial en esta investigación.

Br. Rodolfo Rafael, Bendezú castillo

Autor

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por afianzar mi determinación para finalizar la investigación. A mis padres y familia por ser apoyo, soporte y un punto clave para concretar mis metas durante mi formación profesional. A la universidad UCT por su sólida formación con alma y valores, haciendo posible realizar esta investigación.

Para concluir agradezco a mi asesor de tesis Ms. Bryan Emanuel Cárdenas Saldaña, por brindarme su apoyo durante el proceso de mi trabajo de investigación, facilitándome los mecanismos indispensables para finalizar mi investigación con la finalidad de conseguir el anhelado título profesional.

Br. Rodolfo Rafael, Bendezú castillo

Autor

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Yo, **Rodolfo Rafael Bendezu Castillo** con **DNI N.º 70891219**, Egresado del **Programa de Estudios de Ingeniería Civil**. De la **Universidad Católica de Trujillo “Benedicto XVI”**, doy fe que he seguido rigurosamente los procedimientos académicos y administrativos emanados por la **Facultad de Ingeniería y Arquitectura**, para la elaboración y sustentación del informe de tesis titulado: **“HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025”**, el cual consta de un total de 90 páginas, incluyendo 15 tablas, 25 figuras y 19 páginas de anexos.

Dejo constancia de la **originalidad y autenticidad** de la mencionada investigación y declaro, bajo juramento y en cumplimiento de los principios éticos, que el contenido del documento es **de mi exclusiva autoría** en cuanto a redacción, organización, metodología y diagramación. Asimismo, garantizo que los fundamentos teóricos están debidamente sustentados en fuentes bibliográficas, asumiendo la responsabilidad de cualquier omisión involuntaria en la citación de autores.

En este sentido, declaro que el uso de herramientas de inteligencia artificial en el presente trabajo se ha limitado exclusivamente a la mejora de la redacción y corrección de errores gramaticales y sintácticos, sin que ello haya influido en la generación del contenido, análisis o interpretación de los resultados de la investigación.

Del mismo modo, reconozco que cualquier vulneración a los derechos de autor derivada del presente trabajo será de mi exclusiva responsabilidad, asumiendo las consecuencias académicas y legales que pudieran derivarse conforme a la normativa vigente.

El autor

Br. Rodolfo Rafael Bendezu Castillo

DNI: 70891219

ÍNDICE

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD	2
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD	6
ÍNDICE.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. METODOLOGÍA	41
2.1. Enfoque y tipo	41
2.2. Diseño de Investigación.....	41
2.3. Objeto de Estudio	42
2.4. Técnicas e instrumentos de recojo de datos de laboratorio	44
2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de información.....	44
2.6. Aspectos éticos en investigación	47
III. RESULTADOS	48
IV. DISCUSIÓN	60
V. CONCLUSIONES	62
VI. RECOMENDACIONES.....	64
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de ciclo de vida (ACV)	39
Tabla 2. Variables y niveles de estudio	43
Tabla 3. Ensayo de Resistencia a la Compresión- Muestra patrón o Grupo control	48
Tabla 4. Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 10 molar de KOH x 75/25 (CR/CV).....	48
Tabla 5. Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 10 molar de KOH x 25/75 (CR/CV).....	49
Tabla 6. Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 12 molar de KOH x 75/25 (CR/CV).....	50
Tabla 7. Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 12 molar de KOH x 25/75 (CR/CV).....	51
Tabla 8. Prueba de normalidad - Shapiro Wilk.....	54
Tabla 9. Prueba de Levene (Homogeneidad de varianzas).....	54
Tabla 10. ANOVA DOS VÍAS — Pruebas de efectos inter-sujetos	55
Tabla 11. Prueba Tukey para Hidróxido de Potasio (KOH)	56
Tabla 12. Prueba Tukey para Concreto Reciclado/Cerámica Vitrificada (CR/CV).....	56
Tabla 13. Ficha experimental de resultados.....	72
Tabla 14. Matriz de consistencia.....	74
Tabla 15. Operacionalización de variables	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Problema de investigación esquematizado.	16
Figura 2. Proceso de conformación de un geopolímero	33
Figura 3. Activación alcalina de un geopolímero.....	34
Figura 4. Composiciones variables de aglomerantes para obtención de geopolímero.	36
Figura 5. Dimensiones de unidad experimental	43
Figura 6. Procedimiento experimental	46
Figura 7. Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 10M de KOH x 75/25 (CR/CV)	49
Figura 8. Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 10M de KOH x 25/75 (CR/CV)	50
Figura 9. Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 12M de KOH x 75/25 (CR/CV)	51
Figura 10. Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 12M de KOH x 25/75 (CR/CV)	52
Figura 11. Resistencia a la compresión de unidades de albañilería geopoliméricas influenciados por la relación de aglomerantes cr/cv y concentración de KOH.....	52
Figura 12. Trituración de residuos.....	85
Figura 13. Molienda en molino de bolas	85
Figura 14. Secado en estufa a 100 °C.....	86
Figura 15. Molienda en molino de mesa (segunda molienda).....	86
Figura 16. Tamizado con malla N°400.....	87
Figura 17. Almacenamiento de los polvos finos	87
Figura 18. Preparación de soluciones alcalinas de KOH (10M, 12M).....	88
Figura 19. Pesaje de componentes (arena, aglomerante, solución alcalina)	88
Figura 20. Mezclado de materiales.....	89
Figura 21. Mezcla final.....	89
Figura 22. Llenado de moldes de unidades y compactación en prensa hidráulica.....	90
Figura 23. Desmolde y primeras unidades conformadas.....	90
Figura 24. Colocación de la unidad en la máquina universal de ensayos para compresión	90
Figura 25. Aplicación de carga y rotura del espécimen	90

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo Determinar la influencia del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025. Para ello, los aglomerantes se obtuvieron mediante trituración y tamizado con malla N° 400, generando polvos finos con alta reactividad adecuados para la síntesis de las unidades. Las unidades se conformaron por moldeo a compresión utilizando concentraciones de Hidróxido de Potasio (KOH), de 10M ,12M y relaciones de concreto reciclado (CR) y cerámica vitrificada (CV), CR/CV de, 75/25, 25/75. Y se ensayaron mediante la norma ASTM C140/C140M. Indicando que el incremento de sílice y alúmina proveniente de la CV favorece la formación de geles N-A-S-H, mientras que el calcio del CR permite la coexistencia de fases híbridas C-(A)-S-H, lo que explica la homogeneidad microestructural de las unidades. En cuanto a la propiedad mecánica, la resistencia a la compresión mostró un comportamiento creciente con la concentración de KOH y la proporción de CV. Los valores máximos de 16.78 MPa se obtuvieron en la mezcla 25/75 con activador de 12M, resultado de la formación de matrices densas con menor volumen de poros y una eficaz transferencia de tensiones, superando incluso a las unidades de control de cemento Portland. Este desempeño se explicó por la mayor disponibilidad de sílice y alúmina reactiva de CV, que permite una polimerización eficiente de la red geopolimérica, combinada con la contribución de calcio del CR que genera fases híbridas que refuerzan la estructura. Finalmente, se identificó que una concentración de KOH de 12M junto con una proporción CR/CV de 25/75 representa las condiciones óptimas para maximizar la propiedad mecánica de resistencia a la compresión de las unidades de albañilería geopolimérica, logrando un desarrollo estructural y microestructural favorable para aplicaciones estructurales sostenibles.

Palabras Clave: *geopolímeros, concreto reciclado, cerámica vitrificada, hidróxido de potasio, unidades de albañilería*

ABSTRACT

The research aimed to determine the influence of potassium hydroxide and construction and demolition waste on the compressive strength of a handmade brick block in Trujillo, 2025. To this end, the binders were obtained by crushing and sieving through a No. 400 mesh, generating fine powders with high reactivity suitable for synthesizing the units. The units were formed by compression molding using potassium hydroxide (KOH) concentrations of 10M and 12M, and recycled concrete (RC) and vitrified ceramic (VC) ratios of 75/25 and 25/75. They were then tested according to ASTM C140/C140M. This indicates that the increased silica and alumina from the CV favors the formation of N-A-S-H gels, while the calcium from the CR allows for the coexistence of C-(A)-S-H hybrid phases, which explains the microstructural homogeneity of the units. Regarding mechanical properties, compressive strength increased with KOH concentration and CV proportion. The maximum value of 16.78 MPa was obtained in the 25/75 mixture with 12M activator, resulting from the formation of dense matrices with a smaller pores volume and efficient stress transfer, surpassing even the Portland cement control units. This performance was explained by the greater availability of reactive silica and alumina from the CV, which allows for efficient polymerization of the geopolymer network, combined with the contribution of calcium from the CR, which generates hybrid phases that reinforce the structure. Finally, it was identified that a KOH concentration of 12M along with a CR/CV ratio of 25/75 represents the optimal conditions to maximize the mechanical property of compressive strength of the geopolymer masonry units, achieving a favorable structural and microstructural development for sustainable structural applications.

Keywords: *geopolymers, recycled concrete, vitrified ceramic, potassium hydroxide, masonry units*

I. INTRODUCCIÓN

La problemática asociada al manejo de residuos de construcción y demolición (RCD) en el Perú exhibe matices múltiples: desde el impacto ambiental y sanitario hasta las limitaciones técnicas y logísticas de su valorización. La redacción desarrolla en detalle la situación actual, enfatizando en la magnitud del problema, las consecuencias para el medio natural y las comunidades, las deficiencias normativas y operativas, así como la urgente necesidad de soluciones basadas en la valorización de escombros mediante activación alcalina. A nivel mundial, la generación de residuos de construcción (RCD) representa aproximadamente el 30 % de los residuos sólidos urbanos, con un crecimiento anual estimado del 2 % al 3 % (UNEP, 2019). En Latinoamérica, la tasa de recuperación y reciclaje de estos materiales no supera el 10 %, contrastando con el 70-80 % de economías desarrolladas (World Bank, 2020). En el Perú, el Inventario Nacional de RCD de 2019 reportó más de 12 millones de toneladas generadas, de las cuales solo el 5 % recibe algún tipo de valorización formal (MINAM, 2020). La concentración de población y obras en la costa central, Lima-Callao, genera más del 40 % del total de RCD nacionales, superando los 4,8 millones de toneladas al año (INEI, 2021). Estas cantidades triplican la capacidad autorizada de los rellenos sanitarios y botaderos municipales, obligando a la creación de vertederos informales en quebradas y playas. Esta tendencia se repite en las costas de todas las capitales de departamento de nuestro país, por lo que es urgente intentar dar alternativas de solución. En las playas del norte y sur de Perú, estudios de Salazar et al. (2021) documentan que hasta el 15 % de la franja de arena ha sido cubierta por escombros de concreto y cerámica. Esto no solo obstruye el paso de turistas, sino que altera las dinámicas de sedimentación y rompeolas naturales, intensificando la erosión costera. El lixiviado de fragmentos cerámicos vitrificados puede liberar metales pesados (Pb, Cd, Cr) y sales alcalinas que incrementan la conductividad eléctrica del suelo hasta en un 50 % (UNALM, 2022). Conducciones de drenaje en áreas urbanas aledañas presentan concentraciones de Pb superiores a 0,05 mg/L, quintuplicando los límites para descarga a cuerpos de agua según la Directiva de Aguas Residuales (MINAM, 2017). La acumulación de RCD en manglares y humedales costeros desplaza fauna bentónica y contamina semillas y esporas de plantas halófitas. Observaciones de Salazar et al. (2021) señalan un decrecimiento del 30 % en la biomasa de macroinvertebrados en zonas con vertederos clandestinos frente a zonas protegidas. La liberación de polvo fino ($< 10 \mu\text{m}$) de concreto y cerámica contiene sílice libre y metales pesados que, al ser inhalados, se asocian a:

- Silicosis y enfermedades pulmonares: Estudios en trabajadores informales de demolición reportan prevalencia de silicosis del 12 % al 18 % tras 5–10 años de exposición (Gonzales et al., 2022).

- Intoxicación por metales: Niños y adultos arrojan niveles de plomo alojados en la sangre que superan los 5 µg/dL, umbral de la OMS para efectos neurotóxicos (Ingenieros del Aire, 2021).

- Afecciones dermatológicas: El contacto con aguas lixiviadas de RCD provoca dermatitis de contacto y ulceraciones en poblaciones ribereñas (Torres & Vega, 2021).

Estos efectos generan costos sanitarios estimados en 15 millones de soles anuales solo en Lima Metropolitana, sumando hospitalizaciones y tratamientos crónicos (Ministerio de Salud, 2022). Además el Marco normativo y brechas de cumplimiento establece según:

- Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM: Establece segregación, valorización y registro de RCD.

- DS N.º 002-2020-MINAM: Regula valorización y uso de áridos reciclados.

- Ordenanza Municipal N.º 178-MML: Impone multas por disposición ilegal.

Sin embargo, solo el 28 % de las obras civiles mayores reporta planes de gestión de RCD (SUNARP, 2021). Las inspecciones municipales detectan un 65 % de vertidos clandestinos en zonas residenciales de Lima norte (Municipalidad de Lima, 2021). Falta de incentivos fiscales y eco etiquetado de materiales reciclados limita la adopción por el sector privado. Entre las posibles alternativas de solución tenemos al reciclaje mecánico de concreto:

- Proceso de trituración y tamizado para obtener árido reciclado.
- Rendimiento deficiente: áridos con alto contenido de finos (< 0,075 mm) generan morteros de baja resistencia (≤ 15 MPa) (Pérez & Morales, 2021).

- Necesidad de aditivos para compensar absorción de agua y adherencia con pasta de cemento.

También el posible uso de cerámica vitrificada:

- Alta dureza (Mohs 7-8) dificulta molienda fina; consumo energético 40 % superior al de cemento (Emenike et al., 2019).

- Aplicaciones actuales limitadas a grava ornamental y sub-base.

Ambas rutas requieren modificaciones químicas y energéticas que encarecen el producto final, reduciendo su competitividad frente a áridos naturales. La activación de RCD, que se propone combina polvos de concreto reciclado (CR) y polvos de cerámica vitrificada (CV) con soluciones de hidróxido alcalino (NaOH o KOH) para estimular la disolución de fases amorfas de sílice y alúmina, promoviendo la formación de geopolímeros (materiales tipo cemento) de matriz inorgánica con características mecánicas y durabilidad comparables al cemento Portland (Davidovits, 2015). Entre las ventajas de este geopolímero podemos mencionar:

- Valorización completa de finos y fracciones cerámicas.
- Emisiones de CO₂ 50-60 % menores vs. cemento convencional (Palomo et al., 2016).
- Flexibilidad en formulaciones: ajuste de alcalinidad y proporción CR/CV para adaptar propiedades.

No obstante, el éxito operativo depende de variables críticas: concentración de KOH, RCD relación CR/CV, tiempo y temperatura de curado, y finura de los polvos.

La concentración del activador alcalino condiciona:

1. Velocidad de disolución de sílice y alúmina: concentraciones ≥ 10 M aceleran la reacción, reduciendo tiempo de trabajo de la mezcla (García et al., 2021).
2. pH máximo alcanzado, que debe mantenerse por encima de 14 para asegurar polimerización de oligómeros sílico-alumínicos.
3. Consumo de agua: soluciones muy concentradas requieren control preciso de la relación agua/seco para evitar exudación en la matriz (Herrera & Soto, 2020).

En geopolímeros basados en cenizas volantes, se recomienda 8-12 M KOH; su extrapolación a CR+CV debe validarse empíricamente ante la distinta composición química y mineralógica de los residuos.

La proporción de polvos afecta:

- Contenido de sílice/reactivos: la CV aporta mayor sílice amorfo, mientras el CR suma fases portlandíticas y arcélica.
- Microestructura final: mezclas con CR/CV = 50/50 muestran microestructuras más densas y menor porosidad total comparadas con 100 % CR o 100 % CV (Susanti et al., 2023).

- Durabilidad: mayor CV mejora resistencia a ciclos de congelación/deshielo, pero puede incrementar la contracción por secado.

Definir la combinación óptima es esencial para lograr propiedades mecánicas de resistencia a la compresión (≥ 12.6 MPa a 28 días).

Pese a estudios prometedores de geopolimerización de cenizas volantes y escorias (Davidovits, 2015; Palomo et al., 2016), son escasos los trabajos centrados en:

1. Activación alcalina de mezclas CR+CV con polvos de construcción y cerámica de baño.
2. Evaluación sistemática de variables independientes (KOH 10-12 M; RCD CR/CV 75/25 % y 25/75 %) en propiedades mecánicas de ladrillos.
3. Adaptación de protocolos de curado para climas cálidos y secos de la costa peruana.

La carencia de datos específicos en RCD peruanos y la falta de escalado a unidades de albañilería justifican plenamente la investigación propuesta. Finalmente, la acumulación incontrolada de residuos de construcción y cerámica vitrificada en el Perú genera impactos ambientales, económicos y de salud de gran envergadura. Las rutas de valorización mecánicas y cerámicas actuales presentan limitaciones técnicas y de calidad, mientras que la activación alcalina ofrece un potencial inexplorado para transformar finos de CR y CV en materiales tipo cemento de alto desempeño. Validar este enfoque con concentraciones de KOH adecuadas y proporciones CR/CV óptimas representaría un avance decisivo hacia la economía circular y la mitigación de la crisis de RCD en nuestro país.

El problema general de la investigación partió desde la siguiente interrogante: ¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?, de manera adicional se formularon los siguientes problemas específicos:

1) ¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?

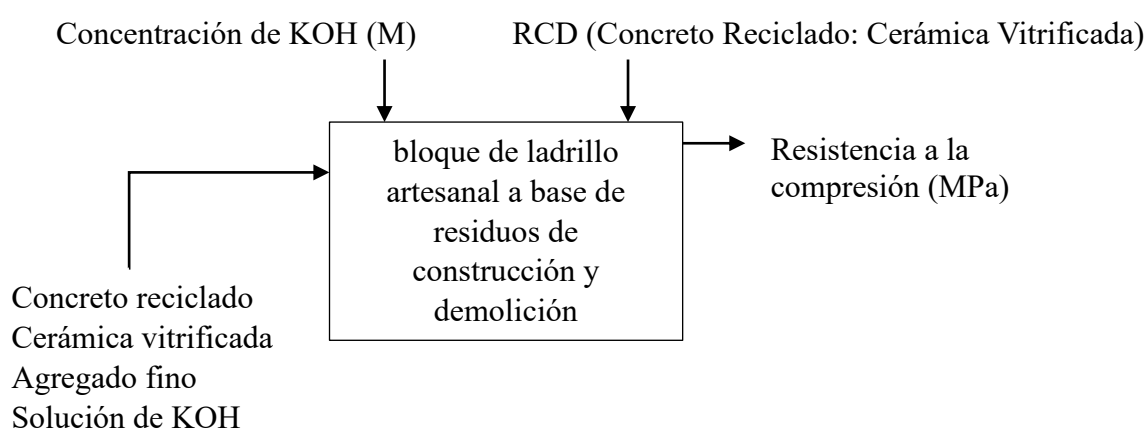
2) ¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?

3) ¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?

4) ¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?

Figura 1

Problema de investigación esquematizado



La investigación se justifica en términos generales por la necesidad de desarrollar materiales de construcción más sostenibles y eficientes, capaces de responder a las exigencias técnicas de la ingeniería civil moderna, al mismo tiempo que se contribuye a la mitigación de impactos ambientales causados por la acumulación de residuos de construcción y demolición. La producción de materiales alternativos como las unidades de albañilería geopolimérica, elaboradas a partir de residuos reciclados y activadas químicamente mediante soluciones alcalinas, representa una opción prometedora para sustituir parcialmente los sistemas tradicionales de fabricación que dependen en gran medida del uso de cemento Portland, la cual su producción es intensiva en energía y emisiones de CO₂. Ante esto, el estudio de la influencia de variables como la concentración del activador alcalino KOH y la proporción entre distintos residuos de construcción y demolición reciclados sobre las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión del producto final permite generar conocimientos aplicables en el diseño de materiales más sostenibles, sin comprometer su desempeño técnico. Desde una perspectiva práctica, esta investigación busca aprovechar residuos como el concreto

reciclado y la cerámica vitrificada, los cuales son comúnmente descartados sin un tratamiento adecuado, generando pasivos ambientales y sobrecarga en los sistemas de disposición final. La valorización de estos residuos mediante su transformación en aglomerantes útiles para la producción de unidades de albañilería no solo permite reducir el volumen de residuos inertes acumulados en botaderos informales, sino que también contribuye a disminuir la demanda de materias primas vírgenes. La preparación, conformado y evaluación de estas unidades siguiendo parámetros normativos como los establecidos por ASTM C140/C140M garantiza que los resultados obtenidos tengan aplicabilidad real en la industria de la construcción, facilitando su escalamiento posterior y eventual incorporación en sistemas constructivos convencionales o alternativos. Teóricamente, la investigación aporta conocimientos sobre tecnología de materiales geopoliméricos, enfocándose en la interacción entre la química de activación alcalina y la naturaleza de los precursores sólidos reciclados. El estudio de la forma de creación de fases activas permite comprender cómo influyen las distintas concentraciones del activador de hidróxido de potasio y las relaciones entre concreto reciclado y cerámica vitrificada en la evolución de los resultados de reacción, como los geles N-A-S-H o C-A-S-H, que son responsables de la generación de propiedades de tipo mecánicas en estos sistemas. Desde el enfoque socio-ambiental, esta investigación responde a la creciente preocupación por la influencia de la industria constructora sobre el medio ambiente y el agotamiento de recursos naturales. La promoción del uso de residuos reciclados como materia bruta en la producción de materiales constructivos geopoliméricos representa una estrategia alineada con los principios de economía circular, reducción de emisiones y responsabilidad ambiental. En particular, en contextos urbanos e industriales donde los residuos de ese tipo son abundantes y muchas veces mal gestionados, como ocurre en diversas ciudades de Latinoamérica, esta propuesta ofrece una alternativa viable para integrar la sostenibilidad en los procesos constructivos. Finalmente, desde el punto de vista metodológico, se justifica por el enfoque sistemático y replicable que propone para evaluar la influencia de dos variables independientes sobre una variable dependiente de respuesta mecánica. El diseño experimental considera un control riguroso en la preparación de las mezclas, el prensado de las unidades y la aplicación de normas técnicas reconocidas internacionalmente, lo cual garantiza la confiabilidad de los datos generados. Asimismo, establecer el vínculo concreto entre la microestructura y el comportamiento mecánico de las unidades, es importante para sustentar científicamente su potencial aplicación.

El objetivo general de la investigación fue Determinar la influencia del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025. Específicamente se planteó:

- 1) Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.
- 2) Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.
- 3) Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.
- 4) Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Por otro lado, la hipótesis general se planteó que, Existe influencia significativa del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025. Específicamente se planteó:

- 1) Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.
- 2) Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.
- 3) Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación

en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

4) Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Complementariamente, se consultaron antecedentes investigativos relevantes, tales como:

Komnitsas et al. (2015) investigaron sobre el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (concreto, ladrillos y cerámicas) mediante su activación alcalina para generar materiales geopoliméricos resistentes. Buscando determinar las condiciones óptimas de síntesis para maximizar la resistencia de tipo mecánica de los geopolímeros hechos a partir de residuos de construcción, mediante la variación controlada de la molaridad de NaOH, temperatura de curado, tiempo de curado y tamaño de partícula, con el fin de identificar los tratamientos que permitan obtener materiales estructuralmente viables. Se empleó un método experimental sistemático en el que los residuos fueron limpiados, pulverizados y tamizados en dos fracciones granulométricas. Posteriormente se prepararon mezclas con soluciones alcalinas (NaOH y Na_2SiO_3) en rangos de concentración de 8 a 14 M, las cuales se mezclaron con los residuos en pasta reactiva. Las probetas se moldearon en cubos de 5 cm, se curaron entre 60 °C y 90 °C durante siete días, se curaron durante 7 y 28 días y se evaluó su resistencia bajo esfuerzos de compresión con una máquina de carga MTS1600. Además, las muestras óptimas fueron sometidas a calentamientos (400-800 °C), ciclos de congelación-deshielo y exposición al agua destilada por hasta dos meses. Se aplicaron técnicas como difracción XRD, espectroscopía FTIR y microscopía SEM para caracterizar la microestructura. Los resultados revelaron que los geopolímeros elaborados con cerámicas y ladrillos alcanzaron resistencias máximas de compresión de 57.8 MPa y 49.5 MPa, respectivamente, bajo condiciones óptimas de activación (10 M de NaOH y curado a 80 °C durante siete días). El geopolímero de concreto alcanzó solo 13 MPa incluso con 14 M de NaOH y curado a 90 °C. La reducción del tamaño particular de 477 μm a 140 μm incrementó la resistencia de 38 a 58 MPa en cerámicas y aportó mejoras significativas en ladrillos y concreto. El envejecimiento prolongado a 28 días apenas mejoró los valores respecto a los 7 días. Los ensayos térmicos a 800 °C redujeron la resistencia a 37 MPa (cerámicas), 15 MPa (ladrillos) y 3 MPa (concreto), debido a pérdida de agua estructural,

microfisuración y variación de porosidad. La exposición al agua y ciclos térmicos deterioraron la resistencia de cerámicas y ladrillos de 50-57 MPa a 9-24 MPa en dos meses. El análisis XRD identificó la formación de pirssonita y las técnicas FTIR y SEM confirmaron la existencia de geles aluminosilicatos. Estos fenómenos se fundamentaron en la química de geopolimerización: altos contenidos de SiO_2 y Al_2O_3 en cerámicas y ladrillos favorecen la formación de enlaces Si-O-Al y geles densos N-A-S-H y (C,N)-A-S-H, mientras que el concreto, rico en CaO, formó fases frágiles como la pirssonita que debilitan la estructura. La reducción de tamaño aumentó la superficie reactiva, acelerando la geopolimerización. En conclusión, el estudio demostró que los residuos de cerámicas y ladrillos tienen un fuerte potencial como materias primas para geopolímeros estructuralmente viables, alcanzando resistencias comparables a materiales tradicionales bajo condiciones específicas (activador de 8-10 M NaOH, curado a 80 °C, tamaño <150 μm y curado mínimo de 7 días). El concreto demostró ser menos adecuado debido a su alto contenido de CaO.

Alakara et al. (2022) investigaron sobre el aprovechamiento de polvo de concreto reciclado (WCP) como sustituto parcial de la escoria de alto horno (BFS) en morteros compuestos geopoliméricos, con el fin de evaluar su impacto en propiedades mecánicas y físicas. La investigación buscó poder mitigar el impacto ambiental del desecho de concreto al incorporarlo como material cementante alternativo en matrices geopoliméricas. De esta forma poder determinar cómo influye la sustitución de la escoria de alto horno por diferentes proporciones de WCP (10%, 20%, 30% y 40% en peso) en las propiedades mecánicas, particularmente la resistencia bajo esfuerzos flexores y compresivos y la velocidad de pulso ultrasónico de morteros geopoliméricos activados alcalinamente con NaOH a concentración de 16 M. Se propuso identificar el límite de sustitución más eficiente que permitiera mantener propiedades estructurales adecuadas sin comprometer la calidad del material. El método empleado consistió en preparar mezclas geopoliméricas utilizando BFS como aglomerante base, al cual se le incorporaron porcentajes crecientes de WCP. Ambos materiales fueron previamente molidos y tamizados a menos de 75 μm para garantizar una granulometría uniforme. El activador alcalino fue una solución de NaOH con una concentración fija de 16 M. Las mezclas se elaboraron conforme a la norma TS EN 196-1, que define los procedimientos estándar para la preparación de morteros, y fueron fabricados en moldes prismáticos de 40x40x160 mm en dos capas, compactadas sobre una mesa vibratoria. Posteriormente, los especímenes fueron curados a 100 °C durante 24 horas en horno. Luego del curado,

se sometieron a tres tipos de ensayos: resistencia bajo flexión (TS EN 196-1), resistencia bajo compresión (también conforme a TS EN 196-1), y velocidad de pulso ultrasónico (UPV), esta última bajo la norma ASTM C597-16. Los resultados obtenidos evidenciaron que el incremento de la proporción de WCP produjo una disminución progresiva en las propiedades mecánicas evaluadas. En cuanto a la resistencia a la flexión (f_{fs}), los valores disminuyeron de 12.05 MPa (mezcla de referencia sin WCP) a 10.45 MPa (con 40% de WCP), lo que representa una caída de hasta 13.27%. La disminución fue más marcada a partir del 20% de reemplazo. En la resistencia bajo esfuerzos de compresión (f_{cs}), los datos oscilaron entre 59.61 MPa para la mezcla de referencia y 53.35 MPa para la mezcla con 40% de WCP, lo que indica una reducción de hasta 10.50%. A pesar de estas disminuciones, todos los grupos de mezcla mantuvieron valores de resistencia bajo esfuerzos en compresión mayores a 50 MPa, lo cual se considera adecuado para muchas aplicaciones estructurales. En cuanto al ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (UPV), se observó una disminución desde 4.55 km/h para la mezcla de referencia hasta 4.29 km/h con 40% de WCP, es decir, una reducción de hasta 5.70%. El fundamento técnico de estos resultados radicó en el rol que desempeña la escoria de alto horno en el desarrollo del gel geopolimérico. La BFS aporta altos contenidos de óxidos de calcio, silicio y aluminio, esenciales para la creación de geles tipo C-A-S-H (calcio-aluminato-silicato hidratado), los cuales son responsables de proporcionar resistencia mecánica y densidad a la matriz del mortero. Cuando se sustituye parte de la BFS por WCP, disminuye la cantidad de calcio disponible, lo que interfiere con la formación eficiente de los geles estructurales. En consecuencia, la microestructura resultante es más porosa y menos cohesionada. En conclusión, se determinó que es viable utilizar hasta un 40% de WCP como sustituto de la escoria de alto horno en morteros geopoliméricos sin comprometer severamente sus propiedades esenciales, ya que las resistencias se mantienen por encima de los 50 MPa, rango suficiente para muchas aplicaciones constructivas.

Huseien et al. (2020) investigaron sobre las propiedades de tipo reológicas y el estado endurecido del concreto autocompactable activado alcalinamente (SCAAC), incorporando polvo de residuos de cerámicas vitrificadas (CPW) como material cementante suplementario, en reemplazo parcial de la escoria de alto horno molida (GBFS). La investigación buscó determinar cómo influye la adición de diferentes porcentajes de CPW sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de los SCAACs, así como su durabilidad frente a ataques químicos como el ácido sulfúrico. Para cumplir con el objetivo, se desarrolló una secuencia experimental que incluyó el uso de CPW y

GBFS como materiales cementantes, combinados en proporciones desde 10% hasta 80% de CPW en peso. La mezcla control fue elaborada con 100% GBFS. La activación alcalina se logró mediante soluciones de silicato y NaOH (2M), y la mezcla se procesó utilizando una máquina mezcladora de concreto. El tiempo de fraguado fue evaluado según ASTM C191. En estado endurecido, se aplicaron ensayos de resistencia a la compresión conforme a ASTM C109/C109M, resistencia a la tracción indirecta siguiendo ASTM C496/C496M-17, resistencia a la flexión bajo ASTM C78, absorción de agua según ASTM C642-13, y prueba de ataque ácido con ácido sulfúrico al 10% siguiendo ASTM C267. También se realizaron análisis microestructurales mediante DRX, SEM y FTIR sobre muestras a los 28 días. Los resultados obtenidos en estado fresco mostraron que al incrementar la cantidad de CPW en vez de GBFS, la trabajabilidad mejoraba notablemente. El diámetro del flujo aumentó de 560 mm con 0% CPW a 780 mm con 80% CPW, mientras que el tiempo T50 disminuyó de 6 a 2.5 segundos, evidenciando una mejor fluidez. En el ensayo L-box, las mezclas con al menos 30% de CPW cumplieron con los requisitos de autocompatibilidad. Esta mejora en la trabajabilidad se explicó por la menor demanda de agua del CPW en comparación con la GBFS, su baja área superficial específica y su menor contenido de CaO, lo que redujo la velocidad de reacción química inicial y favoreció una mezcla más plástica. Por el contrario, el incremento de CPW redujo la resistencia a la segregación debido a su menor cohesividad. Respecto al tiempo de fraguado, se observó un aumento progresivo del inicio y final del fraguado desde 6-10 minutos en la mezcla control (100% GBFS) hasta 64-108 minutos en la mezcla con 80% CPW. Este fenómeno se atribuyó al mayor contenido de sílice del CPW, que retrasa la formación de geles por reacción alcalina y genera una menor tasa de reacción en las primeras etapas, especialmente por la baja disponibilidad de CaO, fundamental para iniciar la creación de geles de tipo C-(A)-S-H. En cuanto al comportamiento mecánico, las resistencias bajo esfuerzos compresivos, tensionarios y flexivos disminuyeron al subir la proporción de CPW. A los 3 días, la resistencia a compresión descendió de 52.6 MPa (100% GBFS) a 18.6 MPa (80% CPW), mientras que a los 28 días todas las mezclas superaron los 30 MPa, aunque siempre por debajo de la muestra control. La resistencia a tracción indirecta pasó de 6.4 MPa (0% CPW) a 2.9 MPa (80% CPW), y la de flexión bajó de 2.2 MPa a 1.2 MPa en el mismo rango de sustitución. Estas reducciones se explicaron por una menor formación de geles C-(A)-S-H y C-S-H, los cuales se formaron en presencia de altos contenidos de CaO, responsables del desarrollo de resistencia mecánica en matrices alcalinas. Además, la baja reactividad del CPW y su efecto sobre la

compacidad de la mezcla también contribuyeron a este descenso. En términos de durabilidad, los resultados fueron contrastantes. Aunque las propiedades mecánicas disminuyeron, la resistencia al ataque por ácido sulfúrico mejoró considerablemente con el aumento de CPW. La pérdida de resistencia a compresión luego de 12 meses de exposición a ácido sulfúrico disminuyó desde 74% (0% CPW) hasta solo 13.3% (80% CPW), debido a la menor presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que, al reaccionar con el ácido, produce yeso expansivo y favorece la fisuración. Asimismo, la pérdida de peso y de velocidad de pulso ultrasónico también se redujeron con niveles crecientes de CPW, indicando una menor degradación interna. En conclusión, la investigación demostró que es posible producir concretos autocompactables activados alcalinamente con residuos cerámicos, alcanzando propiedades reológicas adecuadas y niveles aceptables de resistencia mecánica, especialmente cuando el CPW no supera el 50% del total de aglomerante. Aunque la sustitución con CPW implica una pérdida de resistencia mecánica, esta se compensa con una mayor resistencia química frente al ataque ácido. Los resultados evidencian que la composición química, en particular el contenido de sílice y calcio tiene un rol determinante en el desempeño tanto físico como mecánico del material, influenciando la formación de geles y la porosidad final de la matriz.

Aly et al. (2018) investigaron sobre el desarrollo de un concreto geopolimérico utilizando polvo de desecho cerámico (CWP) como material aglomerante principal, con el propósito de evaluar su viabilidad técnica como sustituto del cemento Portland. El estudio se enfocó particularmente en aprovechar el polvo de residuos cerámicos generado durante el proceso de pulido final de cerámicas, el cual está compuesto principalmente por sílice (69.4%) y alúmina (18.2%), lo que le confiere un potencial considerable como precursor geopolimérico. Se buscó principalmente determinar la resistencia compresiva y las características de durabilidad del concreto geopolimérico producido con CWP, explorando además el efecto de varios parámetros como el contenido de árido, el uso de aditivos superplastificantes, el tiempo de curado y la inclusión de escoria de alto horno (slag) como material suplementario. Para ello, se ejecutaron una serie de mezclas con diferentes proporciones de CWP respecto a la arena (1:1.5, 1:2.0 y 1:2.5), utilizando agregados naturales con módulo de fineza de 3.9, activadores alcalinos a base de NaOH y KOH con 12M de concentración, y curado térmico a 60°C durante 24 o 48 horas según el ensayo. Posteriormente, algunas mezclas se modificaron con la adición de escoria en porcentajes del 10%, 20% y 40% en peso, como reemplazo parcial del CWP. En cuanto a los aditivos, se utilizó un superplastificante a base de éter policarboxílico, conforme a las

normas ASTM C494 Tipo G y ASTM C1107 Tipo 2. La trabajabilidad se midió según ASTM C270, la resistencia compresiva se evaluó con cubos de 50 mm a 7 y 28 días, mientras que la porosidad total y la tasa inicial de absorción de agua se determinaron conforme a ASTM C642 y ASTM C1585, respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron tendencias claras en función de los distintos factores evaluados. En primer lugar, al incrementar la relación árido: CWP a 1:2.5, se observó una mejora significativa en la resistencia compresiva, alcanzando los valores más altos a los 7 días de curado. A pesar de que el aumento del árido redujo la fluidez de la mezcla, contribuyó positivamente a su resistencia mecánica. En cuanto al efecto del aditivo, se encontró que la incorporación de 1.5% en peso de superplastificante mejoró la fluidez entre un 10% y un 30%, con mejoras leves en resistencia, mientras que al aumentar la dosis a 4% se optimizó tanto la trabajabilidad como la resistencia, particularmente en la mezcla con relación CWP: arena de 1:2.5 y empleando el régimen de mezcla identificado como “D”, que mostró los mejores resultados. En cuanto al tiempo de curado, extenderlo de 24 a 48 horas a 60°C mejoró la resistencia, sin embargo, se optó por mantener 24 horas de curado térmico seguido de curado al aire, como medida de eficiencia energética. Cuando se incorporó escoria como reemplazo parcial del CWP, los mejores resultados se alcanzaron con 40% de escoria, bajo el régimen de curado combinado de 24 h a 60°C seguido de curado al aire. Esta mezcla mostró una resistencia compresiva superior tanto a los 7 como a los 28 días en comparación con la mezcla sin escoria. Por ejemplo, las mezclas con escoria mostraron incrementos relevantes de resistencia respecto a las mezclas 100% CWP, y la resistividad eléctrica volumétrica también fue mayor, lo que implica una mayor resistencia a la corrosión. En contraste, la mezcla sin escoria presentó menores porcentajes de porosidad y tasas de absorción inicial de agua. Los fundamentos se encontraron en los mecanismos de reacción geopolimérica, los cuales no dependen de la hidratación del cemento, sino de la polimerización de especies aluminosilicatos activadas por álcalis. Este proceso ocurre principalmente en edades tempranas, razón por la cual se observó que la resistencia entre los días 7 y 28 no presentó incrementos significativos. La inclusión de escoria, rica en calcio, favoreció la formación de estructuras de reacción más compactos y densos, elevando así la resistencia mecánica y la resistividad. El uso de superplastificantes facilitó la dispersión de partículas y mejoró la trabajabilidad, mientras que el orden de adición de las soluciones alcalinas demostró tener un impacto crítico tanto en la fluidez como en el desarrollo de resistencia. Como conclusión, el estudio demostró que el polvo de residuos cerámicos tiene un alto potencial como material precursor en la

fabricación de concretos geopoliméricos, siendo posible lograr un buen equilibrio entre resistencia mecánica y durabilidad.

Mahmoodi et al. (2020) investigaron sobre el desarrollo y optimización de aglomerantes geopoliméricos basados en residuos de cerámicas vitrificadas (CTW), empleando un método de curado a temperatura ambiente y un enfoque para el diseño de mezclas a partir de proporciones químicas preestablecidas. Este estudio buscó demostrar que, mediante la formulación precisa de relaciones molares entre sílice, alúmina y óxidos de sodio, es posible producir matrices geopoliméricas con propiedades mecánicas competitivas sin recurrir necesariamente a procesos térmicos intensivos. En particular, se exploraron las relaciones molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 10.5 y 11.5, y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ entre 0.14 y 0.24, manteniéndose constante la relación líquido/sólido en 0.30. Las mezclas se prepararon utilizando residuos cerámicos molidos a un tamaño promedio de 29.5 μm , combinados con activadores de tipo alcalino como NaOH y Na_2SiO_3 . Además, se investigó el efecto del curado a temperaturas elevadas (50 °C, 75 °C y 100 °C durante 24 h. Para ello, se propuso y aplicó un algoritmo de diseño de mezclas basado en proporciones químicas objetivo, que permitió calcular con precisión las cantidades requeridas de precursores, soluciones alcalinas y agua adicional. Se fabricaron cubos de mortero de 50 mm por lado, que fueron curados a temperatura ambiente y, en algunos casos, sometidos a curado térmico inicial. La resistencia bajo esfuerzos compresivos se evaluó a los 7 y 28 días, y las mezclas con mejor desempeño fueron sometidas a análisis microestructurales mediante difracción XRD, microscopía SEM-EDS y espectroscopía FTIR. Las normas utilizadas para evaluar el comportamiento fresco y también endurecido incluyeron ASTM C230/230M-14 para la fluidez de las pastas geopoliméricas y ASTM C191-13 para los tiempos de fraguado. Los resultados obtenidos mostraron que es posible alcanzar resistencias a compresión de 23.2 MPa a los 7 días y 31.8 MPa a los 28 días en condiciones de curado ambiente, cuando se emplea una proporción $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 11.1 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.2. Estas combinaciones resultaron ser las más eficaces para facilitar la disolución de los precursores y la formación de geles C-(N)-A-S-H en mayor cantidad y calidad. Por otro lado, al aplicar curado térmico a 75 °C, se logró una resistencia máxima de 38.1 MPa a los 7 días y 42 MPa a los 28 días para la mezcla con $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 10.9 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.18. Estos resultados representan incrementos del 80% y 57% en al comparar con las mismas composiciones curadas a temperatura ambiente, lo cual se otorga a la aceleración en la disolución particular de cerámicas y a una polimerización más eficiente a temperaturas elevadas. No obstante, cuando la temperatura de curado

sobrepasó el nivel óptimo (100 °C en algunas composiciones), se observaron reducciones de resistencia debido a la pérdida de agua estructural, la formación de microgrietas y la evaporación parcial de los activadores alcalinos. El fundamento de los fenómenos se basó en la necesidad de mantener un equilibrio químico entre las especies de sílice, alúmina y sodio para favorecer la formación de una red geopolimérica estable. Se comprobó que una concentración insuficiente de Na_2O no proporciona los iones OH^- necesarios para disolver los aluminosilicatos del CTW, mientras que un exceso puede inducir la formación de sales carbonatadas y promover la eflorescencia. Asimismo, un contenido elevado de sílice soluble puede obstaculizar la policondensación al formar productos tempranos que impiden el contacto del activador con partículas no reaccionadas. En conclusión, la investigación confirmó que los residuos de cerámica vitrificada pueden ser empleados exitosamente como insumo para la producción de aglomerantes geopoliméricos de alto desempeño, tanto en condiciones de curado ambiente como con curado térmico moderado.

Mahmoodi et al. (2021) investigaron sobre el desarrollo de aglomerantes geopoliméricos a partir de residuos mixtos de construcción y demolición, específicamente ladrillo reciclado (RBW) y cerámicas recicladas (RCT). El estudio se centró en optimizar estos sistemas binarios completamente curados a temperatura ambiente, así como en evaluar la incorporación de materiales suplementarios cementantes (SCM) como metacaolín, escoria granulada de alto horno, ceniza volante clase C y F (FC y FF), y el efecto de condiciones de curado a temperaturas elevadas. Se buscó evaluar la influencia de proporciones variables de RBW y RCT (20 a 80%), así como de las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y la relación líquido/sólido (L/S), sobre la fluidez, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y microestructura de los aglomerantes. Además, se investigó el efecto de incorporar hasta 45% de SCMs y de someter las mezclas óptimas a curado a 50, 75 y 100 °C durante las primeras 24 h, para identificar condiciones que mejoren el desempeño mecánico. El método experimental consistió en preparar mezclas binarias y ternarias mediante un diseño algorítmico que consideró parámetros fisicoquímicos, seguido por mezclado controlado, moldeo en cubos de 5×5×5 cm y curado a temperatura ambiente ($\sim 25 \pm 2$ °C) o elevada, según la etapa experimental. Las propiedades en estado fresco se evaluaron conforme a ASTM C230-21 y ASTM C191-19, y las resistencias a la compresión a 7 y 28 días se midieron siguiendo ASTM C109-20b. Para la caracterización microestructural, se emplearon difracción XRD, microscopía SEM-EDS y espectroscopía FTIR. Los resultados mostraron que la composición binaria

con 20% RBW y 80% RCT, una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 10.0 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.24, alcanzó la mayor resistencia a compresión bajo curado ambiente: 26.6 MPa a 7 días y 30 MPa a 28 días. En ternarios, la adición de 45% de ceniza volante clase C (FC) mejoró la resistencia a 56.5 MPa a los 28 días, lo que representa un incremento del 88% respecto al sistema binario base. Al curar la mezcla óptima a 100 °C durante 24 h, se logró una resistencia de 52.3 MPa a 28 días, lo que supuso un incremento del 74% respecto al curado ambiente. El fundamento principal de estos comportamientos se atribuyó al equilibrio químico logrado en las proporciones de sílice, alúmina y sodio, lo que favoreció la disolución de precursores, la formación de geles geopoliméricos (N-A-S-H, C-A-S-H y C-S-H) y la compactación de la matriz. El aumento de la cantidad de RCT, con mayor superficie específica y contenido de CaO y MgO, facilitó una mayor nucleación y estabilización de fases hidratadas, contribuyendo al aumento de resistencia. Asimismo, los curados a alta temperatura promovieron una cinética acelerada de polimerización, mayor densificación estructural y consumo temprano de especies activas. Finalmente, se concluyó que la combinación de RBW y RCT en relaciones controladas permite desarrollar geopolímeros de alta resistencia sin requerir curado térmico, aunque este último mejora significativamente el desempeño. La inclusión de FC en sistemas ternarios fue la más efectiva para mejorar propiedades mecánicas a temperatura ambiente. Los análisis microestructurales confirmaron que el diseño químico bien ajustado fue decisivo para alcanzar una red geopolimérica compacta con alta formación de enlaces covalentes tipo Si-O-Si y Si-O-Al, fundamentales para explicar los resultados obtenidos.

Rihan et al. (2024) estudiaron sobre el desarrollo de un concreto geopolimérico (GPC) sustentable que reemplaza el uso de cemento Portland por una combinación de ceniza volante (FA) y ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA), con el objetivo de reducir significativamente las emisiones de carbono en el sector de la construcción. El propósito del estudio fue evaluar cómo la variación en la molaridad del hidróxido de sodio (NaOH) y el contenido de SCBA afecta las propiedades mecánicas del concreto geopolimérico. Para ello, se utilizaron soluciones de NaOH con concentraciones de 10 M, 12 M, 14 M y 16 M, así como proporciones de SCBA del 0%, 5%, 10%, 15% y 20% como sustituto parcial de la ceniza volante. El método empleado consistió en preparar distintas mezclas de GPC con proporciones variables de SCBA y molaridades de NaOH, manteniendo una relación fija de 2.5 entre silicato de sodio y NaOH. Las muestras fueron moldeadas en cubos, cilindros y vigas, y luego curadas a 80 °C por 24 horas para acelerar la geopolimerización. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos de trabajabilidad

(slump), resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión conforme a las normas BS EN 12390-03, ASTM C496/C496M-04 y ASTM C78-02, respectivamente. En cuanto a los resultados, se observó que, al aumentar la molaridad del NaOH de 10 M a 16 M, la resistencia a la compresión a los 28 días mejoró entre un 3.75% y un 10.2%. La resistencia a tracción aumentó entre un 15.5% y un 61% cuando la molaridad subió de 10 M a 14 M, mientras que la resistencia a flexión incrementó hasta en un 40% con 14 M de NaOH antes de disminuir con 16 M. Los fundamentos detrás de estos fenómenos están relacionados con la acción del NaOH en el proceso de geopolimerización. Un aumento en la concentración de NaOH promueve una mayor disolución de los iones de silicio (Si^{4+}) y aluminio (Al^{3+}), lo cual favorece la formación de geles geopoliméricos como N-A-S-H y C-A-S-H, responsables del desarrollo de resistencia mecánica. Sin embargo, cuando la concentración supera cierto rango (más allá de 14 M), el exceso de solubles puede inhibir el proceso de geopolimerización, provocando una leve disminución en la resistencia. En conclusión, el estudio demuestra que tanto la concentración de NaOH como el porcentaje de SCBA tienen un efecto determinante en las propiedades mecánicas del concreto geopolimérico. Una molaridad de hasta 14 M mejora las resistencias sin comprometer la trabajabilidad, mientras que un contenido moderado de SCBA puede sustituir exitosamente la ceniza volante.

Hardjito & Tsen (2008) estudiaron las propiedades de un mortero geopolimérico fabricado a partir de ceniza volante clase F de bajo contenido de calcio. El sistema fue activado con una combinación de hidróxido de potasio (KOH) y silicato de potasio, con el objetivo de evaluar cómo la concentración del activador alcalino, así como la relación en masa entre silicato y KOH, afectan la resistencia mecánica, el tiempo de fraguado y la estabilidad térmica del mortero geopolimérico. Principalmente se buscó determinar la influencia de la molaridad del hidróxido de potasio y de la relación $\text{K}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ en la resistencia a compresión del mortero geopolimérico, así como su comportamiento bajo exposición térmica y su tiempo de fraguado. Para ello, se prepararon nueve mezclas con diferentes proporciones de activador, manteniendo una relación constante de arena a ceniza volante de 2.75. Las soluciones de KOH se disolvieron en agua destilada en concentraciones entre 6 M y 14 M, y las relaciones en masa de silicato a hidróxido de potasio se variaron entre 0.4 y 2.5. Las muestras se mezclaron a temperatura ambiente ($\sim 25\text{-}30^\circ\text{C}$), se moldearon en cubos de $50\times 50\times 50$ mm, compactadas en dos capas con varillado y vibrado, y se curaron a 60°C durante 24 horas, seguido de curado a temperatura ambiente hasta los días de prueba. Las pruebas de resistencia compresiva se

hicieron conforme a la norma ASTM C109, a los 1, 7, 28 y 70 días. Para evaluar la estabilidad térmica, los especímenes curados se expusieron a temperaturas entre 400 °C y 800 °C durante tres horas en horno, y luego se comparó su resistencia con la de especímenes sin exposición térmica. Los resultados mostraron que al aumentar la concentración de KOH, la resistencia a compresión del mortero geopolimérico también aumentó. En particular, se observó que una concentración de hasta 14 M proporcionó los valores más altos de resistencia compresiva. Asimismo, se determinó que la relación óptima entre silicato y KOH para obtener las mayores resistencias estaba en el rango de 0.8 a 1.5. En cuanto a la resistencia térmica, los especímenes conservaron su integridad estructural incluso después de ser expuestos a 800 °C durante tres horas, mostrando así una excelente estabilidad térmica. Respecto al fraguado, se observó que a mayor molaridad del KOH, el tiempo de fraguado se redujo significativamente, con los morteros activados con 14 M presentando fraguado más rápido que los activados con 10 M o 6 M. Los fundamentos de estos fenómenos se atribuyeron al proceso de geopolimerización acelerado por una mayor concentración de KOH, que promueve una disolución más rápida y eficiente de los componentes aluminosilicatos presentes en la ceniza volante, generando una matriz más densa y resistente en menor tiempo. La relación óptima de silicato a hidróxido también permitió un equilibrio ideal entre viscosidad del activador y reactividad, lo que favoreció una mayor formación de geles geopoliméricos, responsables de la resistencia mecánica. En conclusión, el estudio determinó que una mayor concentración de hidróxido de potasio mejora notablemente la resistencia compresiva, y que una relación silicato/KOH entre 0.8 y 1.5 produce los mejores resultados mecánicos. Además, se verificó que este tipo de mortero posee una excelente resistencia al fuego, manteniendo su resistencia incluso tras ser sometido a temperaturas de hasta 800 °C. Finalmente, se evidenció que el incremento de la molaridad del activador reduce el tiempo de fraguado, lo cual está directamente relacionado con una geopolimerización más rápida y eficiente.

Pathak & Jha (2012) estudiaron el aprovechamiento de residuos de construcción como el cemento-arena residual (CSW) y la ceniza volante de carbón (CFA) generados por demolición y construcción de edificaciones. Estos residuos, ricos en alúmino-silicatos, fueron utilizados como insumo para la creación de geopolímeros, materiales alternativos al cemento convencional, con el fin de transformar desechos problemáticos en productos de valor estructural. Principalmente se buscó optimizar la producción de geopolímeros a partir de CSW y CFA mediante la experimentación de parámetros clave

como la concentración de álcalis (NaOH y KOH), la proporción de silicato de sodio (Na_2SiO_3) y el tiempo de curado, para mejorar la resistencia mecánica del producto final. El método experimental consistió en preparar muestras pulverizadas de CSW y CFA, que luego fueron activadas químicamente con soluciones alcalinas de distintas concentraciones y mezcladas manualmente con diferentes cantidades de silicato de sodio. Estas mezclas se moldearon en cubos plásticos y se curaron en horno a 40°C por periodos que variaron entre 5 y 28 días. Posteriormente, se ensayó la resistencia compresiva con una máquina MARUTO y se caracterizó estructuralmente mediante difracción de rayos X. En cuanto a los resultados, se obtuvo un valor máximo compresivo de 41.9 MPa utilizando CFA con una concentración de 7 M de KOH, una proporción másica de 1.75 de Na_2SiO_3 respecto a CFA y un tiempo de curado de 28 días. En contraste, la mezcla con CSW alcanzó una resistencia de solo 7.3 MPa después de 15 días. También se observó que la resistencia aumentaba con la concentración de álcali hasta cierto punto, disminuyendo luego por efectos adversos de una alcalinidad excesiva. De manera similar, el incremento de Na_2SiO_3 favorecía la resistencia hasta un límite, superado el cual el exceso de silicato afectaba negativamente el proceso de geopolimerización. Los fenómenos observados se fundamentaron en la química del proceso de geopolimerización, donde la presencia de iones OH^- en concentraciones óptimas promueve la disolución de las especies silicato y aluminato, facilitando la formación de una matriz polimérica fuerte. Sin embargo, una alcalinidad excesiva puede interferir con la conectividad de los aniones de silicio y provocar la precipitación prematura del gel, reduciendo así la eficiencia del proceso. Asimismo, el exceso de silicato puede dificultar la evaporación del agua y entorpecer la formación estructural del geopolímero, afectando su integridad mecánica. En conclusión, el estudio demuestra que los residuos de construcción como CFA y CSW pueden ser utilizados eficazmente como materias primas para la producción de geopolímeros, siendo la CFA significativamente más efectiva. Se concluye que una concentración alcalina moderada, una proporción adecuada de silicato de sodio y un tiempo de curado prolongado a baja temperatura son condiciones clave para obtener materiales con alta resistencia mecánica.

Jafari Nadoushan & Ramezaniapour (2016) realizaron una producción de pastas geopoliméricas a base de escoria de alto horno granulada (GGBF) activada alcalinamente, con el objetivo de evaluar cómo diferentes variables del activador afectan su trabajabilidad y propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a compresión. En específico, se analizan los efectos del tipo y concentración de solución alcalina

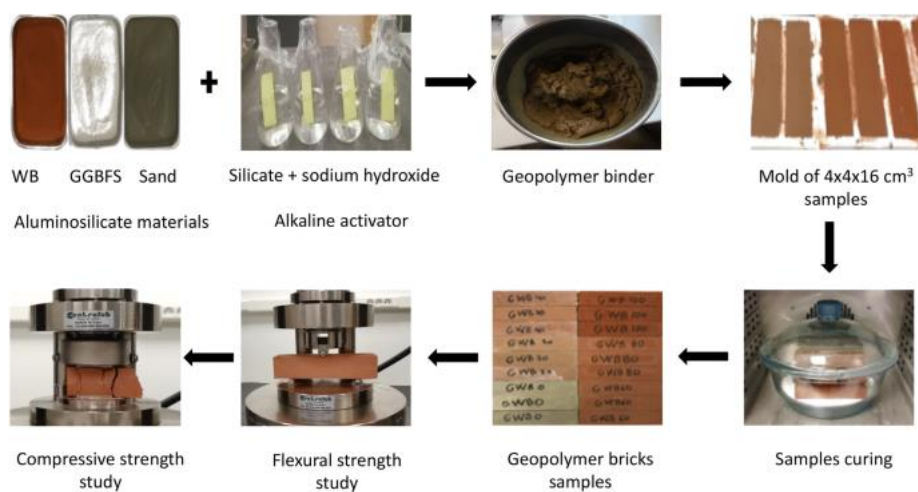
(hidróxidos de sodio y potasio), del módulo del silicato de sodio, de la proporción entre silicato de sodio y solución alcalina, y del reemplazo parcial con puzolana natural. Para lograrlo, se prepararon mezclas con escoria GGBF y puzolana de Taftán, variando las condiciones mencionadas. Se utilizaron soluciones de NaOH y KOH en concentraciones de 6, 8 y 10 molar, y soluciones de silicato de sodio con módulos de 2.1, 2.33 y 3.13. El método experimental consistió en la preparación de 90 mezclas diferentes de pastas geopoliméricas, elaboradas con una relación constante entre aglutinante y activador (0.4), a las cuales se les evaluó la fluidez según la norma ASTM C1437 y la resistencia a compresión conforme a la norma ASTM C109, con probetas cúbicas de 20×20×20 mm, ensayadas a distintas edades de curado hasta 91 días. Además, se realizaron estudios microestructurales mediante microscopía SEM y análisis químicos como XRF y DRX para caracterizar las materias primas. Los resultados indicaron que el uso de KOH como solución alcalina produce mayores resistencias a compresión que NaOH. A los 91 días, la resistencia de las pastas con KOH fue en promedio 16.1% mayor que con NaOH. Las máximas resistencias obtenidas fueron de 145.22 MPa (NaOH 6 M, módulo 2.33) y 169.41 MPa (KOH 8 M, módulo 2.33). Se identificó como óptimo un módulo de silicato de sodio de 2.33 y una relación silicato/solución alcalina de 0.4. La concentración óptima del activador alcalino fue entre 6 y 8 molar; al superar este rango, la resistencia disminuyó, se redujo la trabajabilidad y se observó eflorescencia, especialmente con KOH a 10 M. En cuanto al reemplazo con puzolana, con soluciones de 6 M y 8 M, los máximos valores de resistencia se lograron al sustituir 5% y 10% de la escoria con puzolana respectivamente. El fundamento de estos resultados se encontró en el comportamiento químico de los componentes. El mayor tamaño iónico del potasio (K^+) respecto al sodio (Na^+) favorece la formación de oligómeros de silicato más grandes, los cuales reaccionan con mayor afinidad con el ion $Al(OH)_4^-$, facilitando una mayor formación de la fase geopolimérica. Asimismo, el silicato de sodio mejora la disolución de los componentes activos (Si y Al), elevando el grado de geopolimerización. En conclusión, la investigación demostró que es posible producir pastas geopoliméricas de alto desempeño a temperatura ambiente, utilizando como base la escoria de alto horno activada alcalinamente. Las propiedades mecánicas y la trabajabilidad del material pueden ser optimizadas seleccionando adecuadamente la concentración y tipo de solución alcalina, así como el módulo y proporción del silicato de sodio.

Con respecto a la fundamentación teórica, esta investigación parte desde los residuos sólidos y sus composiciones que los hacen aprovechables. La composición

química y mineralógica de los residuos utilizados se caracteriza por la presencia de fases hidratadas y compuestos vítreos que condicionan su reactividad en medios alcalinos. En el caso del polvo de concreto reciclado (CR), el concreto endurecido está constituido por fases hidratadas de silicato tricálcico (C_3S) y silicato dicálcico (C_2S), cuyos principales productos de hidratación, como el gel de silicato de calcio hidratado ($C-S-H$) y la portlandita ($Ca(OH)_2$), permanecen tras la molienda del desecho (Fernández Jiménez y Puertas, 2015). El análisis por FRX de muestras recolectadas en demoliciones de Lima muestra una composición predominante de SiO_2 entre 45 y 48 %, CaO entre 25 y 30 %, Al_2O_3 entre 6 y 8 % y Fe_2O_3 entre 2 y 3 %, con una pérdida por calcinación de 2 a 4 % (UNALM, 2022). La fracción que pasa la malla N.º 200 ($< 75 \mu m$) concentra la mayor parte de las fases amorfas y de la portlandita libre, lo cual favorece su reactividad alcalina (García Lodeiro et al., 2020). En cuanto al polvo de cerámica vitrificada (CV), este material proviene de accesorios sanitarios elaborados a partir de mezclas de feldespato, caolín y cuarzo que han sido sinterizadas a temperaturas entre 1 180 y 1 240 °C, generando una matriz vítrea con inclusiones de mullita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) (Dondi et al., 2019). La CV molido a tamaños inferiores a $75 \mu m$ presenta una composición química conformada principalmente por SiO_2 entre 60 y 65 %, Al_2O_3 entre 18 y 22 % y óxidos alcalinos ($Na_2O + K_2O$) entre 6 y 8 %. Aunque posee un carácter vítreo, contiene entre 15 y 25 % de fase amorfa que puede disolverse en medios altamente alcalinos (Criado et al., 2021). Desde el punto de vista composicional, la relación $SiO_2/(Al_2O_3 + CaO)$ en mezclas de concreto reciclado y cerámica vitrificada (CR/CV) determina la formación de estructuras tipo geopolímero N-A-S-H (sodio-aluminosilicato hidratado) o de sistemas híbridos C-(N)-A-S-H, en los que el calcio proveniente del CR participa en la generación de geles de silicato de calcio hidratados de naturaleza alcalina (Bernal et al., 2016). El ajuste de las proporciones de mezcla propuestas, que varían desde 75/25 hasta 25/75, permite explorar microestructuras con gradiente de módulos Si/Al entre 1,5 y 2,8 y relaciones $Ca/(Si + Al)$ en el rango de 0,05 a 0,40, lo cual influye directamente en la evolución del sistema cementante alternativo.

Figura 2

Proceso de conformación de un geopolímero

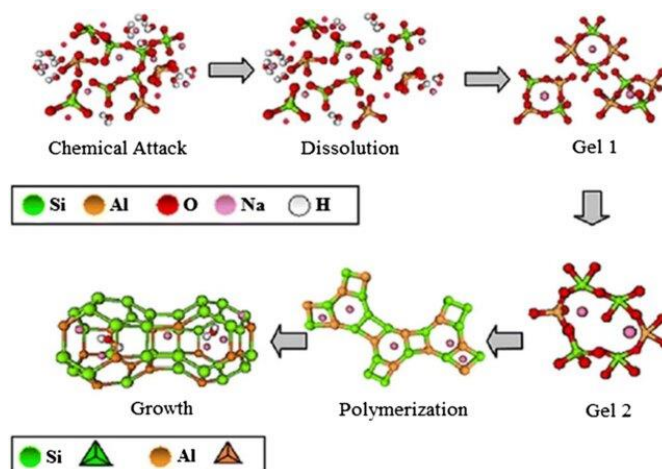


Fuente: Youssef et al. 2019.

La activación alcalina con hidróxido de potasio se fundamenta en un proceso químico que ocurre en dos etapas acopladas según lo señalado por Provis y Van Deventer (2014). En la primera etapa se produce la disolución de especies de silicio (Si^{4+}) y aluminio (Al^{3+}) provenientes de fases vítreas o amorfas presentes en los precursores sólidos. Este proceso ocurre cuando el medio presenta un pH superior a 13,5, condición bajo la cual el ion hidroxilo (OH^-), de carácter nucleofílico, rompe los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al , liberando monómeros reactivos en solución. Posteriormente, en la segunda etapa, estas especies liberadas entran en un proceso de polimerización donde se organizan para formar oligómeros de aluminosilicato con estructuras del tipo $(\text{Si-O-Al-O-Si})^n$. Estos oligómeros se condensan progresivamente, dando origen a redes tridimensionales que constituyen la matriz cementante característica de los materiales activados alcalinamente. Durante la activación con hidróxido de potasio, el catión K^+ , cuyo radio iónico es de 1,38 Å, cumple un rol esencial al neutralizar la carga negativa de los tetraedros AlO_4^{5-} , lo cual permite estabilizar la estructura del gel resultante. Dependiendo de la composición del sistema, puede formarse un gel del tipo K-A-S-H o bien mezclas híbridas C-(K)-A-S-H cuando existe calcio disponible en el medio (Bernal et al., 2016). Además, el uso de KOH presenta ventajas frente al NaOH debido a que su mayor masa molar (56,1 g/mol) permite alcanzar niveles de alcalinidad equivalentes utilizando una menor fracción molar de agua, lo que favorece la formación de geles más densos y disminuye la exudación durante el proceso de fraguado (Felipe Sese et al., 2022).

Figura 3

Activación alcalina de un geopolímero



Fuente: Nodehi & Taghvaei, 2022.

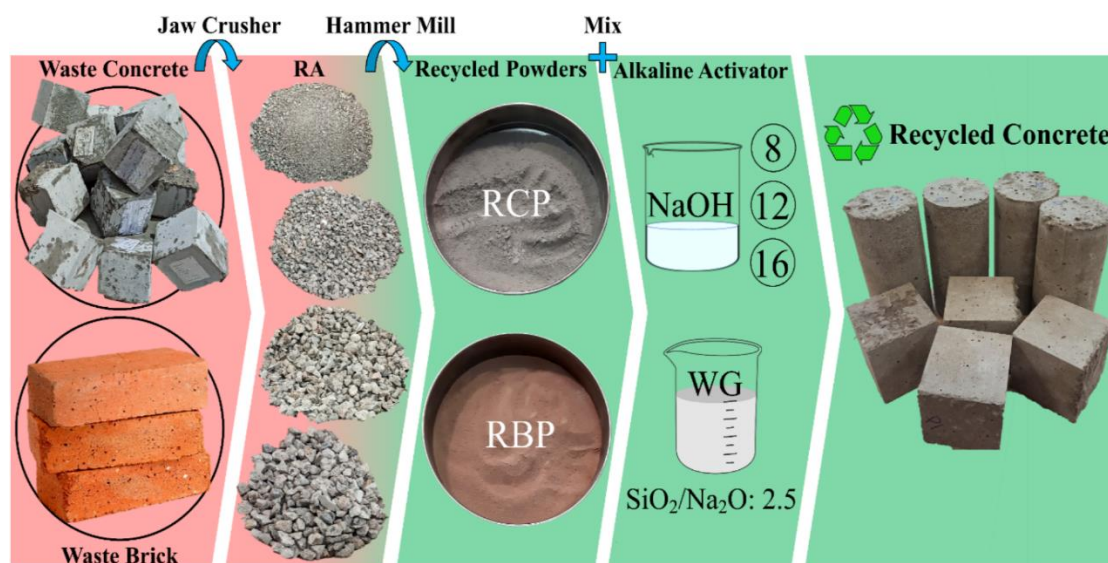
La concentración de KOH ejerce una influencia determinante en el proceso de activación alcalina debido a su efecto directo sobre la cinética de disolución de los precursores y sobre la evolución microestructural del sistema. En relación con la cinética de disolución, se ha observado que la velocidad inicial de liberación de silicio y aluminio, expresada en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, aumenta de manera exponencial con la concentración de iones hidroxilo hasta alcanzar un umbral cercano a 12 M, a partir del cual la elevada viscosidad de la disolución comienza a restringir la difusión de las especies reactivas (Criado et al., 2021). En el caso de polvos de concreto reciclado y cerámica vitrificada finamente molidos, se ha reportado que una concentración de 10 M de KOH proporciona un balance adecuado entre la eficiencia de disolución, con porcentajes de solubilización del SiO_2 amorfo superiores al 60 % en un periodo de dos horas, y la trabajabilidad de la mezcla activada (Fernández Jiménez y Puertas, 2015). Además de su efecto en la fase de disolución, la concentración de KOH influye de manera significativa en el desarrollo microestructural del material. Ensayos de calorimetría isoterma han demostrado que mezclas activadas con una concentración de 8 M presentan picos exotérmicos más tardíos, que se manifiestan después de las tres horas de reacción y se asocian a una nucleación diferida de los geles de reacción. Por el contrario, a concentraciones de 12 M, los picos exotérmicos se detectan antes de los veinte minutos, lo que indica una reacción mucho más rápida; sin embargo, esta aceleración puede inducir la aparición de microgrietas tempranas como consecuencia de la contracción autógena generada durante el fraguado inicial (Bernal et al., 2016). Por este motivo, el intervalo comprendido entre 10 y 12 M

se considera un rango adecuado para optimizar el equilibrio entre la velocidad de reacción y el control de la fisuración temprana, garantizando así un desarrollo microestructural favorable en materiales activados alcalinamente.

La relación entre concreto reciclado y cerámica vitrificada (CR/CV) desempeña un papel fundamental en la formación y evolución de los geles de reacción durante la activación alcalina, debido a las diferencias composicionales y mineralógicas de ambos materiales. En las mezclas con alto contenido de cerámica vitrificada, como aquellas con proporciones 0/100 y 25/75, la elevada disponibilidad de óxidos de silicio y aluminio favorece la formación de geles tipo K–A–S–H con estructuras altamente polimerizadas, caracterizadas por módulos Si/Al cercanos a 2,5. Estos geles suelen presentar densidades superiores, del orden de 2,4 g/cm³, aunque esta elevada polimerización se asocia también con mayores niveles de contracción por secado y una mayor susceptibilidad a procesos de eflorescencia debido a la movilidad de los iones alcalinos presentes en el sistema (Provis y Van Deventer, 2014). En las mezclas balanceadas, como la proporción 50/50, la coexistencia de portlandita derivada del concreto reciclado y sílice amorfa proveniente de la cerámica vitrificada promueve la formación simultánea de geles híbridos C–(K)–A–S–H y K–A–S–H. Esta combinación origina una matriz interpenetrada en la que el calcio contribuye a la densificación temprana del sistema sin comprometer la estabilidad química a largo plazo. Debido a este equilibrio composicional, estas mezclas suelen desarrollar resistencias a compresión en el rango de 30 a 45 MPa a los siete días de curado, mostrando un comportamiento mecánico y microestructural adecuado para aplicaciones estructurales alternativas (Criado et al., 2021). En las mezclas con predominio de concreto reciclado, tales como las proporciones 75/25 y 100/0, la abundancia de portlandita favorece la formación de geles ricos en calcio que reaccionan de manera rápida, generando altos valores de resistencia mecánica en edades tempranas. Sin embargo, este comportamiento acelerado también se asocia con la generación de porosidad capilar residual, lo cual puede comprometer el desempeño a largo plazo si no se controla adecuadamente. En estos casos resulta esencial ajustar la relación agua–sólido para evitar la exudación de portlandita libre y prevenir la formación de estructuras poco densificadas que afecten la durabilidad del material (García Lodeiro et al., 2020).

Figura 4

Composiciones variables de aglomerantes para obtención de geopolímero



Fuente: Rahimpour & Esmaili, 2025.

Las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos mediante la activación alcalina de mezclas de concreto reciclado y cerámica vitrificada constituyen un factor clave para su evaluación como alternativas aplicables en construcción. En términos de resistencia a la compresión, la Norma Técnica E.070 albañilería del reglamento nacional de edificaciones (RNE) establece que las unidades de albañilería deben alcanzar una resistencia mínima de 12.6 MPa a los 28 días de curado. En este contexto, estudios piloto realizados con mezclas CR/CV en proporción 50/50 activadas con una solución de hidróxido de potasio a 10 M han mostrado resultados satisfactorios, alcanzando resistencias de hasta 35 MPa, lo cual supera ampliamente el valor exigido por la normativa y se aproxima al comportamiento mecánico de bloques de concreto vibro comprimidos tradicionales (Felipe Sese et al., 2022). Se considera que una densidad óptima se sitúa entre 1,9 y 2,1 g/cm³, ya que este intervalo garantiza estabilidad dimensional y buen desempeño mecánico sin representar una sobrecarga para aplicaciones estructurales o modulares (Bernal et al., 2016).

La caracterización de sistemas formados por concreto reciclado (CR) y cerámica vitrificada (CV) activados con hidróxido de potasio (KOH) requiere técnicas avanzadas capaces de elucidar tanto la evolución molecular de las fases gelificadas como la distribución elemental de los cationes involucrados en el proceso de activación alcalina. En este contexto, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permite identificar la evolución de los enlaces Si-O-T (donde T puede ser Si o Al) asociados a la

formación de geles aluminosilicatados característicos de matrices geopoliméricas, mientras que la espectroscopía de dispersión de rayos X con fluorescencia (EDRFX) aporta información sobre la distribución de cationes alcalinos y alcalinotérreos como el potasio (K^+) y el calcio (Ca^{2+}), fundamentales para comprender el desarrollo y consolidación de la matriz. En el análisis FTIR se reconocen tres dominios espectrales clave según Criado et al. (2021). El primero se encuentra entre 3700 y 3200 cm^{-1} , asociado a vibraciones de grupos hidroxilo y agua físicamente adsorbida; su disminución progresiva durante la activación indica la incorporación de agua en la red de geles. El segundo dominio, entre 1200 y 900 cm^{-1} , corresponde a la vibración asimétrica del enlace Si-O-T y es el más relevante para la interpretación geoquímica del proceso. En matrices de CR sin activar, esta banda aparece alrededor de $970 \pm 10\text{ cm}^{-1}$, característica de geles tipo C-S-H, pero tras la activación se desplaza hacia $980\text{-}1010\text{ cm}^{-1}$ debido a la formación de geles K-A-S-H con mayor grado de polimerización (Bernal et al., 2016). En mezclas con alto contenido de CV, la desdoblación de esta banda entre 1090 y 1100 cm^{-1} evidencia una rápida polisilicación derivada de la naturaleza vítrea del CV. El tercer dominio, entre 750 y 450 cm^{-1} , corresponde a deformaciones de enlaces Si-O y Al-O, donde el incremento de la banda cerca de 560 cm^{-1} indica la presencia de tetraedros AlO_4^{5-} , un marcador de activación efectiva. Estudios cinéticos de FTIR realizados por Felipe Sese et al. (2022) demostraron que a 12 M de KOH el desplazamiento característico del enlace Si-O-T alcanza su posición final en menos de dos horas, mientras que a 8 M el mismo efecto requiere entre ocho y diez horas, lo que confirma que la velocidad de reacción depende de la concentración de OH^- . Por su parte, el análisis mediante EDRFX permite evaluar la distribución y retención de cationes como K^+ y Ca^{2+} en la matriz endurecida. Bernal et al. (2016) reportaron que en mezclas con relación CR/CV de 50/50 activadas con 10 M de KOH se incorporan hasta 120 mmol de K^+ por kilogramo de sólido, lo que contribuye a la estabilidad estructural del gel, mientras que el K^+ residual en la fase líquida disminuye a menos de 25 mmol/L , reduciendo riesgos de eflorescencia. En contraste, sistemas compuestos únicamente por CV (0/100) retienen solo $90\text{ mmol } K^+ \text{ kg}^{-1}$ y presentan exudación salina superficial, demostrando la función tamponante del $Ca(OH)_2$ proveniente del CR. La cartografía elemental o EDX mapping revela, además, zonificaciones características de los elementos presentes. En formulaciones con relación CR/CV de 75/25 se observa un gradiente de calcio concentrado en las zonas periféricas de las partículas de CR, rodeado por fases intersticiales ricas en geles K-A-S-H con alta

presencia de sílice, lo que explica la elevada resistencia mecánica temprana y la alta densificación de estas matrices (García Lodeiro et al., 2020).

Los modelos cinéticos y termodinámicos permiten describir la disolución de precursores y la formación de geles en sistemas activados alcalinamente. La cinética de liberación de sílice y alúmina se explica mediante la ecuación de Arrhenius modificada, donde r es la velocidad de disolución ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), E_a la energía de activación y m el orden parcial menor a 2 respecto a OH^- (Provis & Van Deventer, 2014). Para cerámica vitrificada (CV) molida se ha determinado una energía de activación aproximada de 56 kJ mol^{-1} y un orden parcial de 1,3, mientras que para concreto reciclado (CR) la energía de activación es de alrededor de 43 kJ mol^{-1} . Este menor valor en el caso del CR se atribuye a la portlandita preexistente que eleva localmente el pH (Criado et al., 2021). La formación y crecimiento del gel se interpreta mediante el modelo de activación alcalina de Provis (2014), que divide el proceso en tres etapas: nucleación homogénea de oligómeros o etapa de inducción, crecimiento dominado por difusión y finalmente reordenamiento y densificación. La calorimetría de conducción muestra un pico exotérmico principal entre 30 y 50 minutos correspondiente a la etapa de crecimiento, cuya integral calórica se correlaciona linealmente ($R^2 > 0,95$) con la resistencia a compresión a 24 horas (Bernal et al., 2016). Los modelos de resistencia en función del grado de reacción explican la evolución mecánica en relación con la conversión de fase reactiva. Felipe Sese et al. (2022) aplican el modelo de percolación de Chong para geopolímeros, donde la resistencia a la compresión f_c depende del grado de reacción α determinado por fluorescencia de rayos X (FRX), de la fracción crítica α_c cercana a 0,28 y del parámetro β aproximadamente igual a 1,5. Para una mezcla CR/CV de 50/50 activada con 10 M, el grado de reacción a siete días alcanzó 0,72 y la resistencia compresiva experimental fue de 41,2 MPa, ajustándose al modelo con un error menor al 5 %.

Los mecanismos de fisuración y durabilidad en los sistemas activados alcalinamente dependen estrechamente de la microestructura y de la composición de los geles formados. La contracción autógena en geopolímeros con baja relación agua/sólido inferior a 0,35 puede generar tensiones internas mayores a la resistencia a tracción temprana, cercana a 2 MPa, lo que provoca la aparición de microgrietas (Duxson & Provis, 2018). En mezclas con más del 75 % de cerámica vitrificada (CV) activadas a una concentración de 12 M, la contracción puede alcanzar $800 \mu\epsilon$ en 24 horas, mientras que la inclusión de un 25 % de concreto reciclado (CR) reduce este valor a menos de $400 \mu\epsilon$.

gracias al efecto amortiguador de la portlandita (García Lodeiro et al., 2020). En cuanto a la resistencia frente a ambientes agresivos, los geles K-A-S-H muestran un mejor desempeño que los geles C-S-H cuando se exponen a soluciones de ácido sulfúrico con pH 2, presentando una pérdida de masa inferior al 5 % después de 28 días de exposición (Provis & Van Deventer, 2014). No obstante, la presencia de calcio libre puede inducir la formación de etringita en ambientes sulfatados con concentraciones superiores a 3 000 mg SO₄²⁻ L⁻¹. Ensayos de inmersión realizados sobre mezclas CR/CV en proporción 50/50 muestran una expansión máxima de 0,045 % tras 90 días, valor que se encuentra dentro del límite establecido por la norma ASTM C1012 (Bernal et al., 2016). La durabilidad frente a ciclos húmedo–seco y a la exposición a ambientes salinos marinos también ha mostrado resultados favorables. La alta densidad del gel y la baja absorción, inferior al 10 %, confieren buena estabilidad dimensional y mecánica, con pérdidas de resistencia menores al 8 % tras 50 ciclos de humedecimiento y secado, de acuerdo con la norma ISO 10845-11 (Felipe Sese et al., 2022). Asimismo, en condiciones de exposición a agua de mar artificial, se ha observado una reducción del 40 % en la difusión de iones cloruro al comparar con morteros de cemento Portland tipo CEM I 42,5 (UNALM, 2022).

La evaluación de sostenibilidad y huella de carbono se realiza mediante un análisis de ciclo de vida conforme a ISO 14040-44, el cual cuantifica las huellas desde la extracción de insumos hasta el final de vida. La reducción de CO₂ superior al 55 % se debe a la sustitución del clinker y al aprovechamiento de residuos locales, lo que compensa la huella de producción de hidróxido de potasio. Además, la geoactivación permite desviar aproximadamente 800 kg de residuos rcd por cada metro cúbico de ladrillo producido.

Tabla 1

Análisis de ciclo de vida (ACV)

Escenario	Emisión CO ₂ -eq (kg/m ³ ladrillo)	Consumo energía primaria (MJ)
Cemento Portland convencional	250	1 600
Geopolímero CR/CV 50/50 – KOH 10 M	110	890
Geopolímero 100 % CV – KOH 12 M	95	960

Fuente: *Felipe-Sese et al., 2022.*

La síntesis crítica y los vacíos de investigación muestran que la concentración de KOH en rangos de 8-12 M equilibra la reactividad y la trabajabilidad, aunque aún faltan estudios de mezclas activadas con hidróxido mixto KOH/NaOH que reduzcan costos. En cuanto a la relación entre concreto reciclado y cerámica vitrificada, la proporción 50/50 optimiza la resistencia y la densidad, pero se requiere validar su comportamiento a largo plazo, superior a un año, frente a procesos de carbonatación. Respecto al curado en ambiente costero, la alta humedad relativa de la costa central puede retardar la ganancia de resistencia, por lo que se propone el uso de cámaras de curado controlado. En el ámbito del escalado industrial, aún falta integrar los procesos de molienda, dosificación y prensado en una línea continua; sin embargo, el análisis de costo beneficio preliminar indica inversiones recuperables en un plazo menor o igual a tres años para plantas de diez mil toneladas por año. Finalmente, en el aspecto normativo, se identifica la necesidad de incorporar una ficha técnica de ladrillo de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la Norma Técnica E.070 para su uso oficial en albañilería portante. La investigación planteada abordará estos vacíos mediante un diseño bifactorial controlado y la aplicación de caracterización avanzada, contribuyendo a la transición de la construcción peruana hacia una economía circular baja en emisiones.

II. METODOLOGÍA

2.1. Enfoque y tipo

La investigación se clasificó como aplicada por su finalidad, ya que tuvo como propósito fundamental resolver un problema práctico relacionado con la reutilización de residuos de construcción y demolición, específicamente concreto reciclado y cerámica vitrificada, en la fabricación de unidades de albañilería geopoliméricas. Este enfoque buscó generar conocimientos que no se limitaron únicamente a la teoría, sino que pudieron ser implementados en contextos reales, especialmente en el sector de la construcción sostenible. El estudio apuntó a contribuir con alternativas tecnológicas viables para reducir el impacto ambiental asociado a la disposición de escombros, promoviendo la valorización de materiales residuales mediante su incorporación en matrices cementantes alternativas. En este sentido, los resultados obtenidos pudieron ser transferidos a procesos constructivos reales, impulsando la economía circular en el ámbito de la ingeniería civil. Asimismo, la investigación fue de tipo explicativa por su nivel de profundidad, ya que pretendió establecer relaciones causales entre las variables estudiadas, analizando cómo la variación en la concentración de la solución activadora de hidróxido de potasio (KOH) y la relación del aglomerante híbrido de concreto reciclado y cerámica vitrificada influyeron sobre las propiedades mecánicas de las unidades geopoliméricas, tal como la resistencia a la compresión. Este nivel de investigación fue más allá de una simple descripción de fenómenos, ya que buscó interpretar y comprender los mecanismos que explican el cambio observado en la propiedad de los materiales en función de los factores modificados experimentalmente. Finalmente, el enfoque de esta investigación fue cuantitativo, ya que se apoyó en la recolección y análisis de datos numéricos que permitieron evaluar objetivamente el comportamiento de las variables en estudio. La propiedad mecánica de las unidades de albañilería geopoliméricas fueron determinadas mediante ensayos normalizados, cuyos resultados se expresaron en magnitudes medibles como MPa. Posteriormente, se aplicaron técnicas estadísticas como el análisis de varianza (ANOVA doble vía) y pruebas de hipótesis para comparar los tratamientos y establecer la significancia de los efectos observados.

2.2. Diseño de Investigación

El diseño metodológico de esta investigación consistió en la aplicación de un diseño experimental bifactorial, el cual resultó adecuado debido a que permitió evaluar simultáneamente el efecto de dos variables independientes y su posible interacción sobre

una variable dependiente como lo es la propiedad mecánica. Este tipo de diseño buscó determinar cómo influyeron tanto la concentración de KOH como la relación del aglomerante reciclado, conformado por concreto reciclado y cerámica vitrificada, en las propiedades mecánicas de unidades de albañilería geopoliméricas. Las variables independientes consideradas en el grupo experimental fueron dos niveles de concentración de KOH (10M y 12M) y dos proporciones en la relación concreto reciclado: cerámica vitrificada (75/25, 25/75). A cada una de estas combinaciones se le evaluó una variable dependiente la propiedad mecánica, la resistencia bajo esfuerzos de compresión (MPa), las cuales permitieron caracterizar el comportamiento mecánico de las unidades geopoliméricas elaboradas. Además, se incluyó un grupo control constituido por unidades de albañilería fabricadas con cemento Portland convencional, para establecer una base de comparación que permitió valorar el desempeño relativo de los nuevos materiales frente a los sistemas tradicionales de construcción. De esta manera, el diseño bifactorial adoptado no solo posibilitó el análisis individual de cada factor, sino también la exploración de efectos combinados, brindando una visión integral del sistema bajo estudio y contribuyendo a la identificación de las condiciones óptimas de formulación del aglomerante reciclado.

2.3. Objeto de Estudio

Universo objetivo: Todas las unidades de albañilería geopoliméricas a partir de residuos sólidos de construcción y demolición.

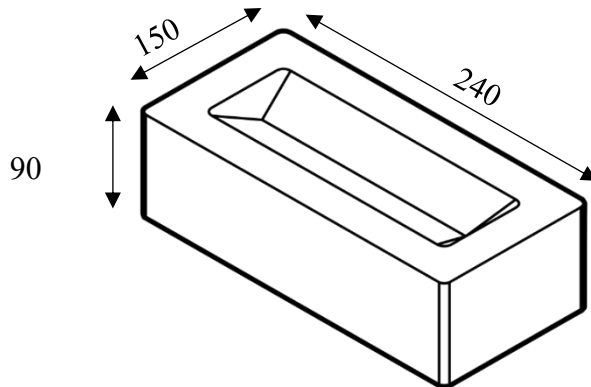
Población: Todas las unidades de albañilería geopoliméricas elaboradas mediante activación alcalina a partir de residuos de concreto reciclado y cerámica vitrificada, empleando distintas concentraciones de hidróxido de potasio (KOH) como solución activadora.

Muestra de estudio:

Se elaboraron 25 unidades de albañilería a partir de aglomerantes reciclados compuestos por distintas proporciones de concreto reciclado (PCR) y cerámica vitrificada (PCV), activados con soluciones KOH a concentraciones variables. Las unidades tuvieron dimensiones de 240 mm x 150 mm x 90 mm y fueron conformadas de acuerdo con las combinaciones establecidas por el diseño experimental bifactorial: dos concentraciones de KOH (10M y 12M) y dos relaciones PCR:PCV (75/25, 25/75), con cinco unidades replicadas por cada una (NTP 399.613). A este conjunto se sumaron cinco unidades adicionales elaboradas con cemento Portland convencional como aglomerante, que funcionaron como grupo control para fines comparativos.

Figura 5

Dimensiones de unidad experimental



Niveles de Estudio

Tabla 2

Variables y niveles de estudio

VARIABLE INDEPENDIENTE DE INVESTIGACIÓN	NIVELES
Factor A	a ₁
	a ₂
Factor B	b ₁
	b ₂
VARIABLE DEPENDIENTE DE INVESTIGACIÓN	
Propiedad Mecánica (Resistencia a la compresión (MPa))	

Leyenda

Factor A: Concentraciones de Hidróxido de Potasio (M)

a₁: 10

a₂: 12

Factor B: Relación Concreto reciclado: Cerámica vitrificada (%)

b₁: 75/25

b₂: 25/75

Matriz de diseño

Nº de unidades geopoliméricas = [(Niveles de Factor A) x (Niveles de Factor B) x (Nº de réplica)] + muestras control

Nº de unidades geopoliméricas = (2 x 2 x 5) + 5 = 25

Nº total de unidades para ensayos mecánicos = 25

Nº total de unidades geopoliméricas = 25

2.4. Técnicas e instrumentos de recojo de datos de laboratorio

Balanza digital de precisión

Se utilizó para el pesaje exacto de los residuos de concreto reciclado (PCR), cerámica vitrificada (PCV), arena y las masas de hidróxido de potasio (KOH) necesarias para preparar las soluciones activadoras a 10M y 12M.

Tamiz de malla N°400

Empleado para clasificar y controlar el tamaño de partícula del polvo de PCR y PCV, garantizando una granulometría fina adecuada para la síntesis geopolimérica.

Estufa eléctrica

Utilizado para eliminar la humedad de los residuos sólidos y de la arena antes de su uso, homogenizando las condiciones iniciales de las muestras.

Molino mecánico

Se empleó para reducir tamaño de los residuos sólidos, obteniendo partículas finas que pudieran participar eficientemente en el proceso de activación de tipo alcalina.

Maquina conformadora de unidades de albañilería

Instrumento utilizado para compactar las mezclas geopoliméricas dentro de los moldes, dando forma y densificación a las unidades de albañilería.

Máquina de ensayo universal

Se utilizó para aplicar cargas graduales sobre las unidades geopoliméricas hasta la rotura, permitiendo registrar la carga máxima para calcular la resistencia a la compresión (ASTM C140/C140M).

2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de información

Técnicas de procesamiento

Etapas 1 - Obtención de materiales

En la primera etapa se procedió con la recolección de aproximadamente 25 kg de residuos de concreto y 25 kg de residuos de cerámica vitrificada, los cuales fueron obtenidos de desmontes urbanos encontrados en los alrededores de la ciudad de Trujillo y de puntos críticos identificados como zonas de acumulación de residuos de construcción. Estos materiales se trituraron inicialmente de forma manual utilizando un martillo, asegurando el uso de protección personal adecuada y sin contacto directo con la muestra, hasta obtener fragmentos pequeños. Posteriormente, los fragmentos fueron sometidos a una primera molienda en un molino de mayor capacidad para su reducción, seguidos de un secado en estufa eléctrica a 100 °C durante 24 horas. Una vez secos, los residuos fueron molidos nuevamente en un molino de mesa para obtener partículas más

finas. Luego, se procedió al tamizado de ambos materiales con una malla N°400, asegurando que el tamaño de partícula fuera suficientemente fino para su uso como aglomerante en la síntesis geopolimérica. Los polvos obtenidos fueron almacenados en bolsas plásticas herméticamente selladas para preservar sus propiedades hasta su utilización en las etapas posteriores. En cuanto al componente activador, se adquirió hidróxido de potasio (KOH) puro en forma de hojuelas por un total de 10 kg. Se prepararon soluciones alcalinas de KOH a concentraciones de 10M y 12M disolviendo los pesos correspondientes de KOH en agua destilada hasta completar 1 litro de solución por cada concentración: para 10M se utilizaron 561.80 g y para 12M se pesaron 674.16 g, considerando un volumen final de solución de 1 litro y una pureza del 100%. También se adquirió arena gruesa como agregado fino, la cual fue igualmente secada en estufa a 100 °C durante 24 horas para eliminar humedad y homogenizar condiciones.

Etapas 2 - Secuencia experimental de conformación de unidades de albañilería geopolimérica

Con los materiales ya preparados se inició el proceso de conformación de las unidades de albañilería geopolimérica. Estas unidades tuvieron una geometría prismática rectangular modular, sin perforaciones, con medidas de 240 mm de largo, 150 mm de ancho y 90 mm de altura. Se aplicó una relación activador/aglomerante de 0.2 y una relación arena/aglomerante de 3:1, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C109. Los polvos reciclados de concreto (PCR) y cerámica vitrificada (PCV) se mezclaron en proporciones controladas según las combinaciones 75/25, 25/75. A cada combinación se le añadió la solución alcalina correspondiente de KOH a 10M y 12M en función del diseño bifactorial del estudio. La mezcla se realizó en dos tiempos para asegurar la activación homogénea de los aglomerantes. Una vez obtenido un material homogéneo, la mezcla fue colocada en la tolva de la máquina conformadora por compresión, donde se llenó el molde, se niveló y se compactó a una presión de 1600 psi para formar las unidades. Las unidades fueron desmoldadas cuidadosamente y colocadas en un área protegida, cubiertas con bolsas plásticas para conservar la humedad y permitir su curado. El curado se realizó durante 28 días en condiciones ambiente controladas, respetando los tiempos necesarios para el desarrollo del gel geopolimérico.

Etapas 3 - Ensayo mecánico de las unidades geopoliméricas

La resistencia bajo compresión de las unidades se realizó mediante ensayos realizados en una máquina de ensayo universal siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C140/C140M. Para cada combinación experimental se moldearon al menos cinco

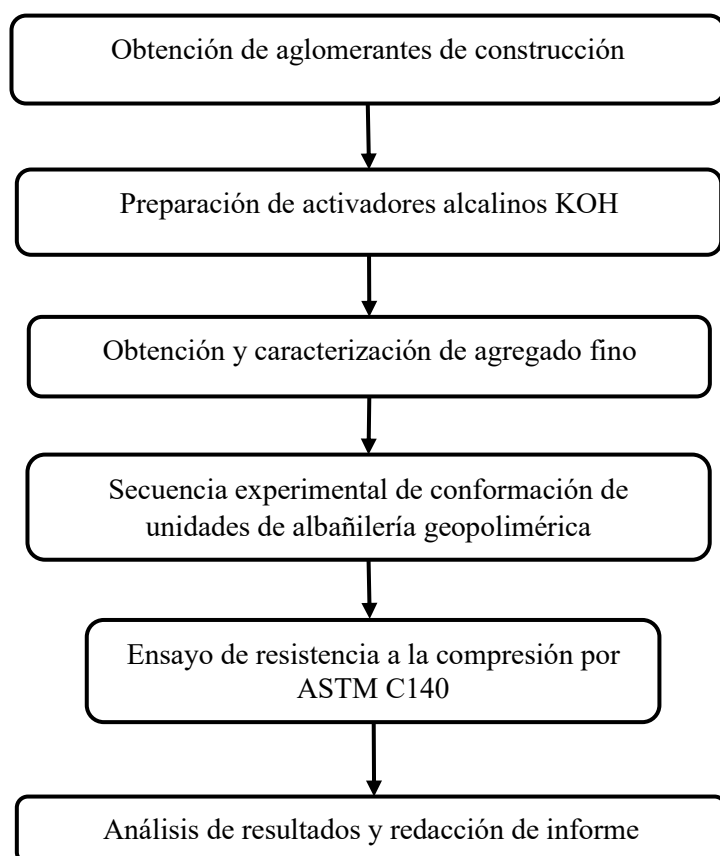
unidades a fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados. Antes del ensayo se registraron las dimensiones y pesos de cada unidad. Luego, las muestras fueron colocadas de forma vertical entre las placas de compresión de la máquina y se aplicó una carga axial creciente hasta la rotura del espécimen. El equipo midió automáticamente la carga máxima soportada y el valor de resistencia se calculó dividiendo la carga máxima entre el área de aplicación de la carga, expresando el resultado en megapascuales (MPa). Estos valores permitieron evaluar el comportamiento estructural de las unidades bajo carga en función de las variables de composición y concentración alcalina.

Etapas 4 - Análisis de resultados y redacción de informe final

Una vez concluidas todas las etapas experimentales, los datos obtenidos fueron organizados y procesados utilizando fichas de recolección de datos elaboradas previamente para cada tipo de ensayo. En base a los resultados obtenidos se elaboró el informe final de tesis, el cual incluyó la discusión técnica de los resultados, conclusiones fundamentadas y recomendaciones para investigaciones futuras o aplicaciones prácticas en el campo de la construcción sostenible.

Figura 6

Procedimiento experimental



Análisis de Datos

Una vez concluidas todas las pruebas mecánicas correspondientes a las unidades con aglomerantes reciclados activados alcalinamente, se procedió con el análisis de los datos del experimento. En primer lugar, los datos de salida fueron registrados de manera ordenada en fichas de recolección previamente elaboradas para cada tipo de ensayo, lo cual permitió un registro sistemático y homogéneo de los resultados. A continuación, dicha información fue organizada, tabulada y representada gráficamente utilizando el software IBM SPSS Statistics, a fin de facilitar la visualización de las tendencias y comparaciones entre las distintas combinaciones experimentales evaluadas. Finalmente, con el propósito de determinar si las variaciones en las proporciones del aglomerante reciclado (PCR y PCV) y la concentración de KOH ejercieron una influencia estadísticamente significativa sobre las propiedades mecánicas de las unidades de albañilería, se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA doble vía) de dos factores con un nivel de significancia del 95%, también mediante el software IBM SPSS Statistics.

2.6. Aspectos éticos en investigación

Se tomaron en cuenta diversos aspectos éticos que garantizaron la integridad del proceso y el respeto por los principios fundamentales que rigen la actividad científica. En primer lugar, se veló por la honestidad en la recopilación, estudio e interpretación de los resultados, evitando cualquier tipo de manipulación que distorsionara los resultados. Asimismo, se aseguró la transparencia en el uso de información bibliográfica y científica, citando adecuadamente todas las fuentes consultadas conforme a las normas del estilo APA 7. Se mantuvo el compromiso con la seguridad en el manejo de materiales potencialmente peligrosos, como reactivos alcalinos, siguiendo los lineamientos establecidos en las hojas de seguridad y en las normativas de seguridad del laboratorio. Del mismo modo, se respetaron los recursos e infraestructuras del laboratorio donde se ejecutaron los ensayos, garantizando su uso responsable y evitando cualquier daño al entorno. Finalmente, los resultados obtenidos fueron reportados con veracidad, sin ocultar información, y estuvieron disponibles para su revisión por parte de la comunidad académica que lo requirió, en cumplimiento con los principios de responsabilidad y rigurosidad científica.

III. RESULTADOS

Resistencia a la compresión de unidades de albañilería.

Para determinar la Resistencia a la Compresión del Grupo Control o Muestra Patrón, se elaboraron cinco unidades adicionales elaboradas con cemento Portland convencional como aglomerante, que funcionaron como grupo control para fines comparativos, evaluando sus propiedades mecánicas conforme a la Norma Técnica E.070 Albañilería (R.N.E) y siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C140/C140M. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Ensayo de Resistencia a la Compresión- Muestra patrón o Grupo control.

Resultado		Norma E.070
Muestra	F'c (MPa)	
01 - uac	12.74	≥ 12.60
02 - uac	13.32	
03 - uac	12.82	
04 - uac	12.80	
05 - uac	13.12	
Prom	12.96	

Los resultados obtenidos para las cinco muestras del grupo control están dentro del parámetro, ya que cumple satisfactoriamente con las especificaciones de la Norma Técnica E.070 Albañilería (R.N.E) para la Resistencia a la Compresión, (≥ 12.60 MPa). En consecuencia, se adopta el grupo control para fines comparativos.

Objetivo 1:

Tabla 4.

Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 10 molar de KOH x 75/25 (CR/CV)

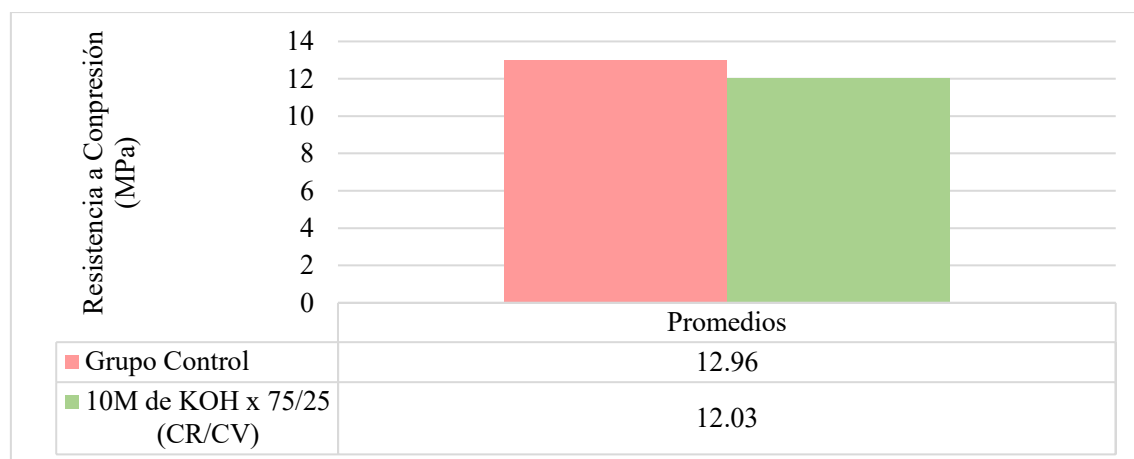
Resultado		Norma E.070
Muestra	F'c (MPa)	
1	11.32	≥ 12.60
2	12.40	
3	12.37	
4	11.66	
5	12.40	
Prom	12.03	

Las cinco muestras elaboradas, 1 litro solución 10 molar de KOH x 75/25 (CR/CV) registraron valores de Resistencia a la Compresión de 11.32, 12.40, 12.37, 11.66

y 12.40 MPa, con un promedio de 12.03 MPa. Este valor representa una disminución de 0.93 MPa respecto a la Resistencia a la Compresión de la muestra patrón (12.96 MPa), equivalente a una disminución del 7.18%.

Figura 7.

Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 10M de KOH x 75/25 (CR/CV)



La figura muestra la comparación de la Resistencia a la Compresión entre el Grupo Control (12.96 MPa) y la muestra con 1 litro de solución 10 molar de KOH x 75/25 (CR/CV) (12.03 MPa), evidenciando una disminución de 0.93 MPa. explicando la disminución de la Resistencia a la Compresión obtenido con esta combinación.

Objetivo 2:

Tabla 5.

Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 10 molar de KOH x 25/75 (CR/CV)

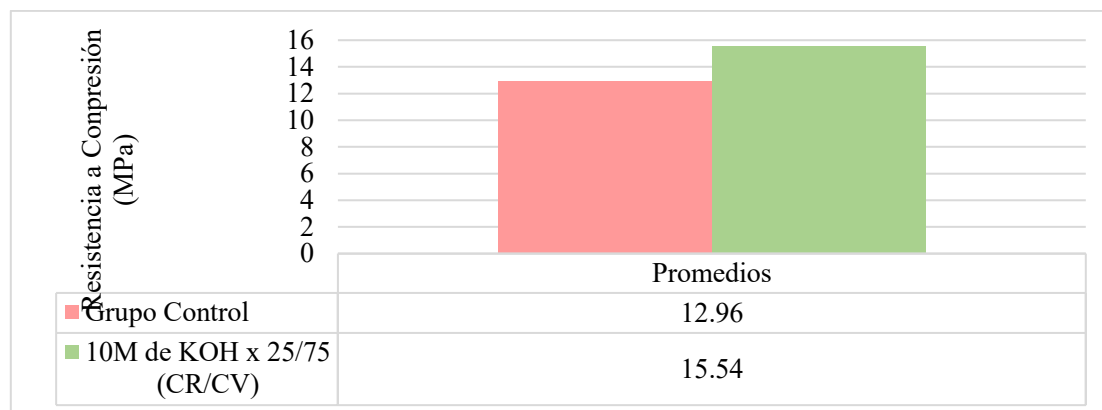
Resultado		Norma E.070
Muestra	F'c (MPa)	
1	14.90	≥ 12.60
2	16.02	
3	15.70	
4	15.20	
5	15.88	
Prom	15.54	

Las cinco muestras elaboradas, 1 litro solución 10 molar de KOH x 25/75 (CR/CV) registraron valores de Resistencia a la Compresión de 14.90, 16.02, 15.70, 15.20, 15.88 MPa, con un promedio de 15.54 MPa, representando un incremento de 2.58 MPa respecto al patrón, equivalente al 19.91%. Al comparar esta combinación con la anterior (75/25 (CR/CV)), la Resistencia a la Compresión aumento en 3.51 MPa, asociado

principalmente a la disminución del porcentaje de Concreto reciclado y el aumento del porcentaje de cerámica vitrificada.

Figura 8.

Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 10M de KOH x 25/75 (CR/CV)



La figura compara la Resistencia a la Compresión de la mezcla patrón (12.96 MPa) con la mezcla con 1 litro solución 10 molar de KOH x 25/75 (CR/CV) (15.54 MPa), mostrando un incremento de 2.58 MPa sobre el patrón. la disminución del porcentaje de Concreto reciclado y el aumento del porcentaje de cerámica vitrificada respecto a la combinación anterior incide directamente en el aumento de la Resistencia a la Compresión dentro del grupo de 10 molar de Hidróxido de Potasio.

Objetivo 3:

Tabla 6.

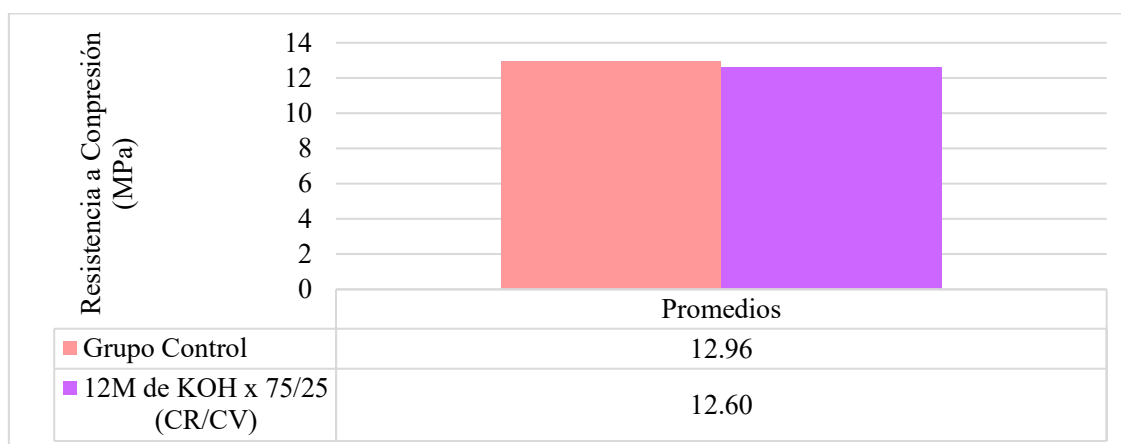
Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 12 molar de KOH x 75/25 (CR/CV)

Resultado		Norma E.070
Muestra	F'c (MPa)	
1	12.10	≥ 12.60
2	12.80	
3	12.90	
4	12.48	
5	12.72	
Prom	12.60	

Las cinco muestras elaboradas, 1 litro solución 12 molar de KOH x 75/25 (CR/CV) registraron valores de Resistencia a la Compresión de 12.10, 12.80, 12.90, 12.48, 12.72 MPa, con un promedio de 12.60 MPa. Este valor representa una disminución de 0.36 MPa respecto a la Resistencia a la Compresión de la muestra patrón (12.96 MPa), equivalente a una disminución del 2.77%.

Figura 9.

Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 12M de KOH x 75/25 (CR/CV)



La figura muestra la comparación de la Resistencia a la Compresión entre el Grupo Control (12.96 MPa) y la muestra con 1 litro de solución 12 molar de KOH x 75/25 (CR/CV) (12.60 MPa), evidenciando una disminución de 0.36 MPa. explicando la disminución de la Resistencia a la Compresión obtenido con esta combinación.

Objetivo 4:

Tabla 7.

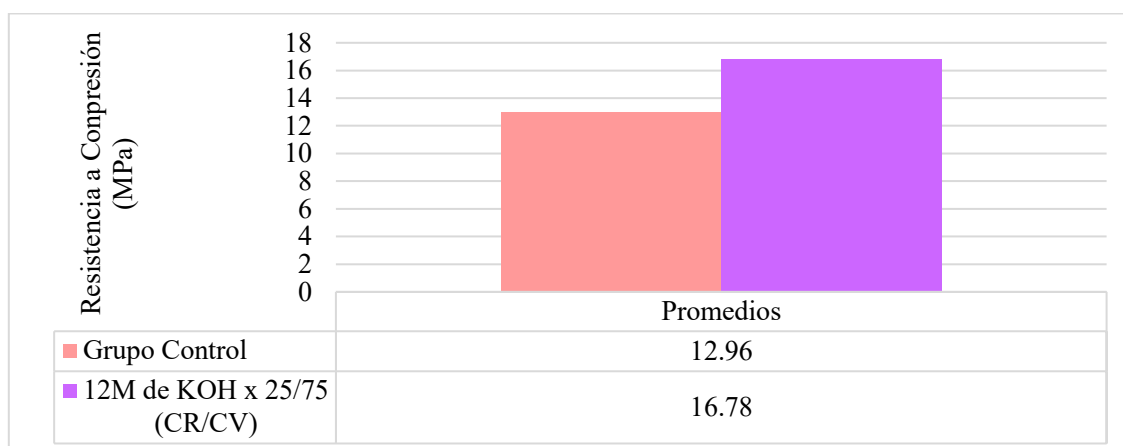
Resultados de Resistencia a la compresión con 1 litro solución 12 molar de KOH x 25/75 (CR/CV)

Resultado		Norma E.070
Muestra	F'c (MPa)	
1	16.10	≥ 12.60
2	17.20	
3	17.04	
4	17.22	
5	16.34	
Prom	16.78	

Las cinco muestras elaboradas, 1 litro solución 12 molar de KOH x 25/75 (CR/CV) registraron valores de Resistencia a la Compresión de 16.10, 17.20, 17.04, 17.22, 16.34 MPa, con un promedio de 16.78 MPa, representando un incremento de 3.82 MPa respecto al patrón, equivalente al 29.48%. Al comparar esta combinación con la anterior (75/25 (CR/CV)), la Resistencia a la Compresión aumento en 4.18 MPa, asociado principalmente a la disminución del porcentaje de Concreto reciclado y el aumento del porcentaje de cerámica vitrificada.

Figura 10.

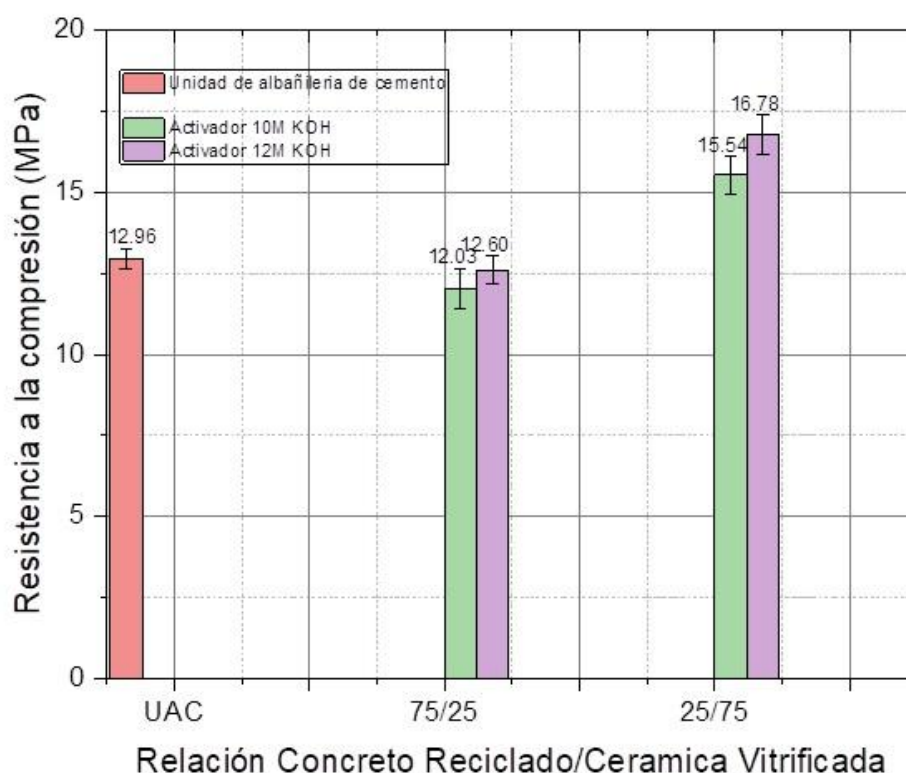
Resistencia a la Compresión – Grupo control vs 12M de KOH x 25/75 (CR/CV)



La figura compara la Resistencia a la Compresión de la mezcla patrón (12.96 MPa) con la mezcla con 1 litro solución 12 molar de KOH x 25/75 (CR/CV) (16.78 MPa), mostrando un incremento de 3.82 MPa sobre el patrón. la disminución del porcentaje de Concreto reciclado y el aumento del porcentaje de cerámica vitrificada respecto a la combinación anterior incide directamente en el aumento de la Resistencia a la Compresión dentro del grupo de 12 molar de Hidróxido de Potasio.

Figura 11

Resistencia a la compresión de unidades de albañilería geopoliméricas influenciados por la relación de aglomerantes cr/cv y concentración de KOH



la Figura 11 presenta el gráfico de barras que resume la resistencia a la compresión, expresada en MPa, de las unidades de albañilería geopoliméricas a los 28 días. En el eje horizontal se ubicaron las distintas relaciones entre los aglomerantes empleados, concretamente las proporciones Concreto Reciclado/Cerámica Vitrificada (75/25, 25/75), incluyendo además la unidad control de cemento Portland identificada como UAC para facilitar la comparación con el grupo experimental. En el eje vertical se graficó la resistencia a la compresión en MPa. Para cada relación CR/CV se muestran dos barras agrupadas que representan las concentraciones de activador alcalino empleadas: KOH 10 M y 12 M, lo que permite visualizar de forma simultánea la influencia combinada de la relación de aglomerantes y de la concentración del activador sobre la resistencia de las unidades. Al observar el gráfico, también se aprecia la tendencia relacionada por el efecto de la concentración de KOH. Se evidenció un patrón de incremento progresivo de la resistencia conforme aumentó la molaridad. Para la relación 75/25 las resistencias aumentaron desde 12.03 MPa a 10M y alcanzando 12.60 MPa a 12M. En la relación 25/75 el patrón también fue creciente con 15.54 MPa a 10M y 16.78 MPa a 12M. En todos los casos, la tendencia general fue ascendente con el incremento de la molaridad del activador alcalino, reflejando una sensibilidad positiva de las matrices geopoliméricas frente a mayores concentraciones de KOH. Respecto a la influencia de la relación entre los aglomerantes CR/CV, se observó en primera instancia, para cada concentración de KOH se advirtió un incremento progresivo de la resistencia a medida que aumentó la proporción de cerámica vitrificada desde la relación 75/25 hasta 25/75. Por ejemplo, a 10 M los valores crecieron de 12.03 MPa a 15.54 MPa al pasar de 75/25 a 25/75, en 12M aumentaron de 12.60 MPa a 16.78 MPa siguiendo la misma dirección. Alcanzando el punto máximo de resistencia en 25/75. Al considerar la comparación con la unidad control de cemento Portland, cuyos resultados reportaron alrededor de 12.96 MPa, se observó que la combinación geopoliméricas de 25/75 superaron claramente su resistencia, en especial aquellas con mayor contenido de cerámica vitrificada y activadas con mayores molaridades.

Prueba de hipótesis

Prueba de hipótesis de resistencia a la compresión de unidades de albañilería

Tabla 8.

Prueba de normalidad - Shapiro Wilk

Grupo		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la compresión	Patrón o Grupo control	0.861	5	0.230
	1 litro de solución 10 molar de KOH x 75/25 - CR/CV	0.780	5	0.055
	1 litro de solución 10 molar de KOH x 25/75 - CR/CV	0.920	5	0.532
	1 litro de solución 12 molar de KOH x 75/25 - CR/CV	0.907	5	0.450
	1 litro de solución 12 molar de KOH x 25/75 - CR/CV	0.829	5	0.136

Los resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk aplicada a la resistencia a la compresión de cada grupo experimental muestran valores de significancia superiores a 0.05 en los cinco grupos evaluados, por lo que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, los datos de la resistencia a la compresión presentan distribución normal en todos los grupos, cumpliéndose el supuesto necesario para aplicar el ANOVA de dos vías y la prueba post hoc de Tukey.

Tabla 9.

Prueba de Levene (Homogeneidad de varianzas)

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la Compresión	Se basa en la media	2.700	4	20	0.060
	Se basa en la mediana	0.388	4	20	0.815
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.388	4	14.745	0.814
	Se basa en la media recortada	2.416	4	20	0.083

Nota: Prueba la hipótesis nula de que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.

a. Variable dependiente: Resistencia a la Compresión

b. Diseño: Intersección + KOH + CR_CV + KOH * CR_CV

Esta prueba evalúa si las varianzas de la resistencia a la compresión son homogéneas entre los cinco grupos experimentales. Los resultados muestran que todos los valores de significancia son mayores a 0.05, indicando homogeneidad de varianzas. se puede proceder con el análisis.

Tabla 10.*ANOVA DOS VÍAS — Pruebas de efectos inter-sujetos*

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	85.104 ^a	4	21.276	115.681	0
Intersección	4551.715	1	4551.715	24748.341	0
KOH	4.095	1	4.095	22.266	0
CR_CV	73.92	1	73.92	401.915	0
KOH * CR_CV	0.561	1	0.561	3.051	0.096
Error	3.678	20	0.184		
Total	4976.191	25			
Total, corregido	88.783	24			

Nota: a. R al cuadrado = ,959 (R al cuadrado ajustada = ,950)

El ANOVA de dos vías evalúa los efectos principales y la interacción de los factores, KOH (Hidróxido de Potasio) y CR/CV (Concreto Reciclado/Cerámica Vitrificada) sobre la Resistencia a la Compresión. Los resultados revelan:

- Efecto principal de KOH: $F = 22.266$, $p = 0.000 \rightarrow$ Existe un efecto estadísticamente significativo de la molaridad del Hidróxido de Potasio sobre la Resistencia a la Compresión.
- Efecto principal de CR/CV: $F = 401.915$, $p = 0.000 \rightarrow$ Existe un efecto estadísticamente significativo de la Relación en Porcentaje del Concreto Reciclado/Cerámica Vitrificada sobre la Resistencia a la Compresión.
- Interacción KOH * CR/CV: $F = 3.051$, $p = 0.096 \rightarrow$ No Existe una interacción significativa entre ambos factores, indicando que el efecto de un factor KOH, sobre la resistencia a la compresión, no depende del nivel del otro factor CR/CV.
- $R^2 = 0.959$: El modelo explica el 95.9% de la variabilidad total de la Resistencia a la Compresión, demostrando un excelente ajuste.

Tabla 11.*Prueba Tukey para Hidróxido de Potasio (KOH)*

(I) KOH		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0.00	10.00	-.8250*	0.23490	0.006	-1.4193	-0.2307
	12.00	-1.7300*	0.23490	0.000	-2.3243	-1.1357
10.00	0.00	.8250*	0.23490	0.006	0.2307	1.4193
	12.00	-.9050*	0.19179	0.000	-1.3902	-0.4198
12.00	0.00	1.7300*	0.23490	0.000	1.1357	2.3243
	10.00	.9050*	0.19179	0.000	0.4198	1.3902

Nota: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel .05.

La prueba post hoc de Tukey compara las medias de la Resistencia a la Compresión entre los diferentes niveles de KOH (0M,10M, 12M). Los resultados muestran:

- 10M KOH vs 0M KOH: Diferencia = 0.8250 MPa ($p = 0.006$) → Significativo
- 12M KOH vs 0M KOH: Diferencia = 1.730 MPa ($p = 0.000$) → Significativo
- 10M KOH vs 12M KOH: Diferencia = -0.905 MPa ($p = 0.000$) → Significativo

El contenido de 12M de KOH produce la mayor resistencia a la compresión promedio respecto al grupo control, y esta resistencia disminuye cuando baja la molaridad a 10M de KOH.

Tabla 12.*Prueba Tukey para Concreto Reciclado/Cerámica Vitrificada (CR/CV)*

(I) CR_CV		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0	25/75	-3.2000*	0.23490	0.000	-3.7943	-2.6057
	75/25	.6450*	0.23490	0.032	0.0507	1.2393
25/75	0	3.2000*	0.23490	0.000	2.6057	3.7943
	75/25	3.8450*	0.19179	0.000	3.3598	4.3302
75/25	0	-.6450*	0.23490	0.032	-1.2393	-0.0507
	25/75	-3.8450*	0.19179	0.000	-4.3302	-3.3598

Nota: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel .05.

La prueba post hoc de Tukey compara las medias de la resistencia a la compresión entre los diferentes niveles de CR/CV (0%, 25/75%, 75/25%). Los resultados muestran:

- 25/75% CR/CV vs 0% CR/CV: Diferencia = 3.20 MPa ($p = 0.000$) → Significativo

- 75/25% CR/CV vs 0% CR/CV: Diferencia = -0.645 MPa ($p = 0.032$) → Significativo

- 25/75% CR/CV vs 75/25% CR/CV: Diferencia = 3.845 MPa ($p=0.000$) → Significativo

El contenido de 25/75% CR/CV produce la mayor resistencia a la compresión promedio en comparación con el grupo control y el grupo 75/25% CR/CV, y esta Resistencia disminuye progresivamente conforme aumenta el porcentaje de CR y disminuye el porcentaje de CV, de 75/25% CR/CV, demostrando que el grupo control produce mayor resistencia a la compresión promedio respecto a el contenido de 75/25% CR/CV.

Hipótesis General

H₀: No Existe influencia significativa del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

H₁: Existe influencia significativa del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Decisión: Se rechaza H₀ y se acepta H₁.

Justificación: El ANOVA de dos vías (Tabla 10) demuestra que tanto el Hidróxido de Potasio ($F = 22.266$, $p = 0.000$) como los Residuos de Construcción y Demolición específicamente el Concreto Reciclado/Cerámica Vitrificada CR/CV ($F = 401.915$, $p = 0.000$) ejercen efectos principales estadísticamente significativos sobre la Resistencia a la Compresión. Además, No existe una interacción significativa entre ambos factores ($F = 3.051$, $p = 0.096$), con un $R^2 = 0.959$ que indica que el modelo explica el 95.9% de la variabilidad. Por lo tanto, existe evidencia estadística contundente de que ambas adiciones influyen significativamente en la Resistencia a la Compresión de un bloque de ladrillo artesanal.

Hipótesis Específica 1

H₀: No Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación

en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

H₁: Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Decisión: Se rechaza H₀ y se acepta H₁.

Justificación: La combinación 1 litro de solución 10 molar de KOH x 75/25 - CR/CV, alcanzó una Resistencia a la Compresión promedio de 12.03 MPa (Tabla 4), representando una disminución de 0.93 MPa (-7.18%) respecto al patrón (12.96 MPa). El ANOVA confirma efectos significativos ($p < 0.000$), y la prueba Tukey demuestra diferencias significativas para ambos niveles de aditivos. Esta combinación produce la menor Resistencia a la Compresión de todas las evaluadas.

Hipótesis Específica 2

H₀: No Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

H₁: Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Decisión: Se rechaza H₀ y se acepta H₁.

Justificación: La combinación 1 litro de solución 10 molar de KOH x 25/75 - CR/CV, alcanzó una Resistencia a la Compresión promedio de 15.54 MPa (Tabla 5), representando un incremento de 2.58 MPa (+19.91%) respecto al patrón. El ANOVA confirma efectos significativos ($p < 0.000$), y la prueba Tukey demuestra diferencias significativas. Esta combinación produce la segunda mayor Resistencia a la Compresión en el estudio.

Hipótesis Específica 3

H₀: No Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

H₁: Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Decisión: Se rechaza H₀ y se acepta H₁.

Justificación: La combinación 1 litro de solución 12 molar de KOH x 75/25 - CR/CV, alcanzó una Resistencia a la Compresión promedio de 12.60 MPa (Tabla 6), representando una disminución de 0.36 MPa (-2.77%) respecto al patrón. El ANOVA confirma efectos significativos ($p < 0.000$), y la prueba Tukey demuestra diferencias significativas. Existe influencia estadísticamente significativa de esta combinación sobre la Resistencia a la Compresión.

Hipótesis Específica 4

H₀: No Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

H₁: Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.

Decisión: Se rechaza H₀ y se acepta H₁.

Justificación: La combinación 1 litro de solución 12 molar de KOH x 25/75 - CR/CV, alcanzó una Resistencia a la Compresión promedio de 16.78 MPa (Tabla 7), representando un incremento de 3.82 MPa (+29.48%) respecto al patrón. El ANOVA confirma efectos significativos ($p < 0.000$), y la prueba Tukey demuestra diferencias significativas. Esta combinación produce la mayor Resistencia a la Compresión de todas las evaluadas en el estudio.

IV. DISCUSIÓN

En la Figura 11 se encontró que las resistencias a la compresión incrementaron conforme aumentó la concentración molar de KOH y que la combinación de materiales precursores CR/CV determinó también la respuesta mecánica de las unidades geopoliméricas. Se observó que las mayores resistencias se concentraron en las mezclas con predominancia de cerámica vitrificada, especialmente en la relación 25/75, mientras que los menores valores se presentaron cuando el concreto reciclado fue el componente predominante. Además, fue evidente que las combinaciones geopoliméricas, relación 25/75 superaron la resistencia obtenida por la unidad control de cemento Portland, demostrando el alto potencial mecánico de estas unidades alternativas para aplicaciones estructurales en albañilería. El comportamiento creciente con respecto a la concentración de KOH, queda fundamentado en fenómenos propios de la geoquímica del proceso de geopolimerización. A concentraciones más altas de KOH incrementan la disponibilidad de iones OH⁻ en el medio, lo que acelera y profundiza la etapa de disolución alcalina de las fases precursoras ricas en sílice y alúmina presentes tanto en el concreto reciclado como en la cerámica vitrificada (Duxson et al., 2007; Rihan et al., 2024). A mayor disolución se libera un mayor contenido de especies monoméricas de SiO₄ y AlO₄ que son fundamentales para la formación de geles geopoliméricos, típicamente clasificados como N-A-S-H o K-A-S-H en sistemas activados con álcalis (García-Lodeiro et al., 2011; Duxson et al., 2007). A una molaridad de 8M el proceso de disolución se mantiene activo pero limitado, lo cual genera estructuras geopoliméricas menos densas y con mayor presencia de vacíos capilares (Ng et al., 2018). En 10M el equilibrio químico favorece una polimerización más eficiente y una mayor interconectividad de la red aluminosilicatada, dando como resultado una matriz más cohesionada con aumento significativo de resistencia (Rihan et al., 2024). Finalmente, en 12M se obtiene una activación más intensa que incrementa aún más la polimerización, generando microestructuras compactas con menor porosidad conectada y con una mayor capacidad de transferir tensiones mecánicas, lo que se muestra en resistencias superiores (Rihan et al., 2024). Sin embargo, valores de molaridad excesivamente altos suelen generar fragilidad o formación de fases cristalinas que interrumpen el crecimiento de la red gelificada, aunque ese efecto no se manifiesta en este intervalo de estudio dado que la estructura sigue manteniendo estabilidad química y mecánica (Rihan et al., 2024; Duxson et al., 2007). Por otro lado, la explicación del comportamiento variable con respecto a las

relaciones de aglomerantes CR/CV, está directamente relacionada con la reactividad química diferencial de los materiales precursores y su interfaz con la solución activadora. El concreto reciclado posee fases hidratadas residuales como C-S-H, portlandita y compuestos sulfoalumínicos que presentan una reactividad baja frente a la activación alcalina debido a su menor contenido de sílice reactiva disponible (Wan et al., 2023; Ahmari et al., 2012). Por esta razón, altos contenidos de concreto reciclado reducen la capacidad de gelificación del sistema geopolimérico y generan una matriz menos compacta (Wan et al., 2023). Al introducir cerámica vitrificada en la mezcla se incrementa el contenido de sílice amorfa y alúmina reactiva proveniente de la fragmentación térmica original del material cerámico durante su fabricación, lo cual favorece la ruptura de enlaces Si-O-Si bajo ataque alcalino, aumentando el contenido disponible de monómeros para la policondensación (Luhar et al., 2021). Este efecto explica el aumento sostenido de la resistencia hasta la relación 25/75. A partir de este punto, cuando la proporción de cerámica se incrementa en exceso, la superficie específica puede ser mayor que la capacidad de disolución de los álcalis disponibles, generando aglomeración de partículas y zonas de material no reaccionado que interrumpen la continuidad de la red polimérica, generando una ligera reducción en la resistencia final (Luhar et al., 2021; Wan et al., 2023). Por ello el punto óptimo se observó consistentemente en la relación 25/75 en combinación con molaridades de 10M y 12M, donde se consiguió una matriz geopolimérica densificada con menor volumen de poros y una eficaz transferencia de cargas.

V. CONCLUSIONES

Objetivo General

La incorporación de Hidróxido de Potasio y residuos de construcción y demolición específicamente concreto reciclado y cerámica vitrificada ejerció influencia altamente significativa sobre la Resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal. El análisis ANOVA reveló efectos significativos Del Hidróxido de Potasio ($F=22.266$, $p=0.000$), concreto reciclado y cerámica vitrificada ($F=401.915$, $p=0.000$) y demostró que no existe interacción entre ambos ($F=3.051$, $p=0.096$), con $R^2=0.959$. La combinación óptima, 12 molar de KOH x 25/75 CR/CV alcanzó 16.78 MPa (+29.48% respecto al patrón de 12.96 MPa), validando que la sinergia entre ambos aditivos maximiza la propiedad mecánica de resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal.

Objetivo Específico 1

La incorporación de 10 molar de KOH x 75/25 (CR/CV) alcanzó 12.03 MPa, el resultado más desfavorable con una disminución del 7.18% respecto al patrón (12.96 MPa). El análisis ANOVA confirmó diferencias altamente significativas ($p<0.000$), validando que esta dosificación minimiza la Resistencia a la Compresión. Los resultados demuestran que la combinación no es técnicamente óptima y no representa la mejor alternativa para mejorar la propiedad mecánica de Resistencia a la Compresión de un bloque de ladrillo artesanal.

Objetivo Específico 2

La incorporación de 10 molar de KOH x 25/75 (CR/CV) alcanzó 15.54 MPa, representando un incremento del 19.91% respecto al patrón. El análisis ANOVA confirmó diferencias significativas ($p<0.000$), validando influencia significativa. Los resultados demuestran que el incremento de la cerámica vitrificada y la reducción del concreto reciclado presentes en esta muestra respecto a la combinación anterior con 75/25 (CR/CV), incrementa la Resistencia a la Compresión en 3.51 MPa, evidenciando que esta dosificación maximiza la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal, representando una alternativa efectiva a la dosificación óptima de 12 molar de KOH x 25/75 (CR/CV).

Objetivo Específico 3

La incorporación de 12 molar de KOH x 75/25 (CR/CV) alcanzó 12.60 MPa, representando una disminución del 2.77% respecto al patrón. El análisis ANOVA confirmó diferencias significativas ($p<0.000$), validando influencia significativa. Los

resultados demuestran que el aumento progresivo del concreto reciclado asociado a la disminución de cerámica vitrificada genera una tendencia decreciente de la Resistencia a la Compresión, confirmando que el 75/25 (CR/CV) reduce la propiedad mecánica de resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal.

Objetivo Específico 4

La incorporación de 12 molar de KOH x 25/75 (CR/CV) alcanzó 16.78 MPa, el mejor resultado con un incremento del 29.48% respecto al patrón. El análisis ANOVA confirmó diferencias altamente significativas ($p < 0.000$), validando que esta dosificación genera excelente propiedad mecánica de la Resistencia a la Compresión de un bloque de ladrillo artesanal. Los resultados demuestran que esta combinación es técnicamente viable y la más óptima.

La concentración de Hidróxido de Potasio y la relación entre concreto reciclado y cerámica vitrificada ejercen una influencia significativa sobre la Resistencia a la Compresión de las unidades de albañilería geopolimérica. Se demostró que una adecuada combinación de estos factores permite mejorar la resistencia a la compresión de las unidades, evidenciando el potencial de estas formulaciones como alternativas estructurales viables frente a unidades convencionales de cemento Portland.

La determinación de la resistencia a la compresión indicó que los mayores valores se alcanzaron en mezclas con predominancia de cerámica vitrificada, particularmente en la relación 25/75, y con activador de 12M, alcanzando un valor máximo de 16.78 MPa. Esta combinación de precursores y concentración alcalina permitió obtener matrices densas, con menor volumen de poros y mayor capacidad de transferencia de tensiones, superando en varios casos las unidades de control de cemento Portland.

La identificación de condiciones óptimas mostró que una concentración de KOH de 12M combinada con una proporción CR/CV de 25/75 permite maximizar la propiedad mecánica de Resistencia a la Compresión de las unidades geo poliméricas, logrando un desarrollo estructural y microestructural favorable para aplicaciones en albañilería estructural.

VI. RECOMENDACIONES

Explorar la influencia de activadores alcalinos alternativos, como hidróxido de sodio (NaOH) o mezclas de KOH/NaOH, evaluando concentraciones entre 8M y 14M, para comparar su efecto.

Evaluar el comportamiento a largo plazo de las unidades geopoliméricas mediante ensayos de durabilidad, incluyendo resistencia al ciclo de congelación-deshielo, absorción capilar y carbonatación.

Investigar la microestructura mediante técnicas complementarias como microscopía electrónica de barrido (SEM) para correlacionar la formación de geles N-A-S-H y C-(A)-S-H con propiedades macroscópicas.

Analizar la influencia de la finura de los precursores, empleando mallas alternativas como N° 200 o N° 600, sobre la reactividad y las propiedades físico-mecánicas de las unidades.

Estudiar la incorporación de aditivos o refuerzos naturales, como fibras vegetales o polímeros, en proporciones de 0.5% a 2% en masa de aglomerante, evaluando su efecto sobre la absorción de agua, resistencia a tracción y flexión, y la reducción de microfisuración superficial.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, 718–729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044>
- Alakara, E., Sevim, O., Demir, İ., & Günel, G. (2022). Effect of waste concrete powder on slag-based sustainable geopolymer composite mortars. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 13(3), 101–108. <https://doi.org/10.20528/cjcr.2022.03.003>
- Aly, S., Kanaan, D., El-Dieb, A., & Abu-Eishah, S. (2018). Properties of ceramic waste powder-based geopolymer concrete. In F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, C. C. Snellings, & A. Nazari (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction Materials* (pp. 489–496). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78175-4_54
- Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., Duxson, P., Gehman, J. D., & van Deventer, J. S. J. (2016). Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, 53, 127–143. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.10.001>
- Carrillo-Beltran, R., Picazo Camilo, E., Perea Toledo, G., & Corpas Iglesias, F. A. (2025). Geopolymers Manufactured by the Alkali Activation of Mining and Ceramic Wastes Using a Potential Sustainable Activator from Olive Stone Bottom Ashes. *Materials*, 18(3), 688. <https://doi.org/10.3390/ma18030688>
- Criado, M., Walkley, B., Ke, X., Bernal, S., & Provis, J. (2021). Alkali activation of ceramic waste: Reaction mechanisms and microstructural evolution. *Construction and Building Materials*, 291, 123173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123173>
- Dal Poggetto, G., D'Angelo, A., Blanco, I., Piccolella, S., Leonelli, C., & Catauro, M. (2021). FT-IR study, thermal analysis, and evaluation of the antibacterial activity of a MK-geopolymer mortar using glass waste as fine aggregate. *Polymers*, 13(17), 2970. <https://doi.org/10.3390/polym13172970>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633–1656.
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer chemistry and applications* (4.^a ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.

- Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M., & Zanelli, C. (2019). Recycling sanitary ceramic wastes in tile production. *Ceramics International*, 45(9), 11513–11525. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.003>
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.” *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
- Duxson, P., & Provis, J. L. (2018). Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(5), 13–28. <https://doi.org/10.1111/jace.15602>
- Ebrahim, A. A. M., Ahmed, D. A., & Abu-Elwafa, R. (2024). Development of an eco-friendly geopolymer mortar using slag and fly ash with high bentonite content for thermal and environmental applications. *Scientific Reports*, 14(1), 26727. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76780-5>
- Emenike, C. P., Omole, D. O., & Ngene, B. U. (2019). Biosorption in fixed-bed reactors: Performance of KOH-activated *Musa paradisiaca* fibers. *Journal of Hazardous Materials*, 371, 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.057>
- Felipe-Sese, M., Pérez-Vilches, M., & Sánchez-Soto, P. (2022). Microstructural development and mechanical performance of KOH-activated recycled concrete powders. *Journal of Cleaner Production*, 344, 131040. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131040>
- Fernández-Jiménez, A., & Puertas, F. (2015). Alkali-activated slag cements: Strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 315–322. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00227-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00227-5)
- García, M., Sánchez, P., & Ortega, L. (2021). Optimization of pineapple peel activation with KOH for heavy metal remediation. *Industrial Crops and Products*, 172, 113917. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113917>
- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2020). Compatibility of Portland cement with alkaline solutions: Pore solution composition and gel characterization. *Cement and Concrete Research*, 120, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.016>
- Gao, B., Li, Y., Jang, S., Son, H., Lee, H., & Bae, C. J. (2024). Effect of geopolymerization reaction on the flexural strength of kaolin-based systems. *Materials*, 17(10), 2223. <https://doi.org/10.3390/ma17102223>

- Gonzales, M., Ramírez, P., & Torres, L. (2022). Evaluación de la calidad del aire en zonas de depósito informal de escombros en Lima. *Revista Peruana de Salud Pública*, 36(2), 115–124.
- Guo, X., & Navrotsky, A. (2018). Hydration dynamics in zeolite A – An X-ray diffraction and infrared spectroscopic study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 268, 197–201. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.04.040>
- Hardjito, D., & Tsen, M. (2008). Strength and thermal stability of fly ash based geopolymer mortar. *Proceedings of the 3rd International Conference of the Asian Concrete Federation / Vietnam Concrete Association (ACF/VCA 2008)*. Curtin University of Technology, Malaysia.
- Herrera, P., & Soto, A. (2020). Factorial design for optimization of cassava fiber activation. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118823. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.118823>
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Shah, K. W., & Mirza, J. (2020). Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali-activated concrete. *Construction and Building Materials*, 236, 117574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117574>
- INEI. (2021). *Estadísticas de vivienda y medio ambiente*. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Jafari Nadoushan, M., & Ramezaniapour, A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.086>
- Jenkins, R., Gould, R. W., & Gedcke, D. (1995). *Quantitative X-Ray Spectrometry* (2nd ed.). CRC Press.
- Kljajević, L., Nenadović, M., Ivanović, M., Bučevac, D., Mirković, M., Mladenović Nikolić, N., & Nenadović, S. (2022). Heat Treatment of Geopolymer Samples Obtained by Varying Concentration of Sodium Hydroxide as Constituent of Alkali Activator. *Gels*, 8(6), 333. <https://doi.org/10.3390/gels8060333>
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.012>

- Li, S., Huang, Y., Cui, Q., Liu, Y., Zhang, H., & Wang, F. (2025). Effect of calcium content on geopolymer consolidation of saline soils in the seasonally frozen zone. *Scientific Reports*, 15, 16168. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00307-9>
- Li, Z., Zhang, J., & Wang, M. (2020). *Structure, Reactivity, and Mechanical Properties of Sustainable Geopolymer Material: A Reactive Molecular Dynamics Study*. *Frontiers in Materials*, 7, 69. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00069>
- Luhar, I., Luhar, S., Abdullah, M. M. A. B., Nabiałek, M., Szmidla, J., Jurczyńska, A., Razak, R. A., Aziz, I. A., Jamil, N., & Deraman, L. M. (2021). Assessment of the suitability of ceramic waste in geopolymer composites: An appraisal. *Materials*, 14(12), 3279. <https://doi.org/10.3390/ma14123279>
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2020). Development of ceramic tile waste geopolymer binders based on pre-targeted chemical ratios and ambient curing. *Construction and Building Materials*, 258, 120297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120297>
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2021). Development and characterization of binary recycled ceramic tile and brick wastes-based geopolymers at ambient and high temperatures. *Construction and Building Materials*, 301, 124138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124138>
- Manzi, S., Baldazzi, L., & Saccani, A. (2023). Formulating Geopolymer Mortars through Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling: A Comprehensive Case Study. *Materials*, 16(23), 7304. <https://doi.org/10.3390/ma16237304>
- Marvila, M., Azevedo, A., & Vieira, C. M. (2021). Reaction mechanisms of alkali-activated materials / Mecanismos de reação de materiais álcali ativados. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(3), e14003. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000300009>
- MINAM. (2020). *Inventario nacional de residuos de construcción y demolición 2019*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- Mohamed, O. A. (2023). Effects of the curing regime, acid exposure, alkaline activator dosage, and precursor content on the strength development of mortar with alkali-

- activated slag and fly ash binder: A critical review. *Polymers*, 15(5), 1248. <https://doi.org/10.3390/polym15051248>
- Moudio, A. M. N., Riyap, I. H., Siewé, J. M., Nzeugang, A. N., Tchamba, A. B., & Kamseu, E. (2024). Influence of CaO/Al₂O₃ molar ratio of synthetic calcium aluminate hydrates on the engineering properties of metakaolin-based alkali-activated materials. *Discover Civil Engineering*, 1, 139. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00147-y>
- Municipalidad de Lima. (2021). *Informe de fiscalización de generadores de RCD*. Lima: Gerencia de Gestión Ambiental.
- Ng, H. T., Heah, C. Y., Liew, Y. M., & Abdullah, M. M. A. B. (2018). *The effect of various molarities of NaOH solution on fly ash geopolymer paste*. AIP Conference Proceedings, 2045, 020098. <https://doi.org/10.1063/1.5080911>
- Nodehi, M., & Taghvaei, V. M. (2022). Alkali-activated materials and geopolymer: A review of common precursors and activators addressing circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1–28. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00029-w>
- Onutai, S., Osugi, T., & Sone, T. (2023). Alumino-Silicate Structural Formation during Alkali-Activation of Metakaolin: In-Situ and Ex-Situ ATR-FTIR Studies. *Materials*, 16(3), 985. <https://doi.org/10.3390/ma16030985>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (2016). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 515–522. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.001>
- Pathak, A., & Jha, V. (2012). Synthesis of geopolymer from inorganic construction waste. *Journal of Nepal Chemical Society*, 30, 45–51. <https://doi.org/10.3126/jncs.v30i0.9334>
- Pérez, L., & Morales, S. (2021). FTIR-based evaluation of functional groups in biomass for biosorption applications. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 254, 119659. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119659>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). *Geopolymers: Structures, processing, properties, and industrial applications*. Woodhead Publishing.

- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report*. Heidelberg: Springer.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report*. Heidelberg: Springer.
- Quispe, A., Espinoza, N., & Hidalgo, C. (2021). Efectos de la obstrucción de cauces por vertederos informales en la cuenca del río Chillón. *Revista Ingeniería Hidráulica*, 33(1), 45–56.
- Rahimpour, H., & Esmaeili, J. (2025). Characterization, mechanical strength, rheological properties, and life cycle assessment of fully recycled concrete through geopolymer technology. *Scientific Reports*, 15, 9424. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92307-y>
- Ranjbar, N. (2020). Effects of heat and pressure on hot-pressed geopolymer. *Journal of Composite Materials / Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117106>
- Rehman, S. K. U., Imtiaz, L., Aslam, F., Khan, M. K., Haseeb, M., Javed, M. F., Alyousef, R., & Alabduljabbar, H. (2020). *Experimental Investigation of NaOH and KOH Mixture in SCBA-Based Geopolymer Cement Composite*. *Materials*, 13(15), 3437. <https://doi.org/10.3390/ma13153437>
- Rihan, M. A. M., Alahmari, T. S., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024). Impact of alkaline concentration on the mechanical properties of geopolymer concrete made up of fly ash and sugarcane bagasse ash. *Sustainability*, 16(7), 2841. <https://doi.org/10.3390/su16072841>
- Salazar, R., Paredes, J., & Quispe, F. (2021). Impacto de la acumulación de residuos cerámicos en ecosistemas marinos costeros peruanos. *Ecología Aplicada*, 14(3), 201–214.
- Siddique, S., Gupta, V., Chaudhary, S., Park, S., & Jang, J. G. (2021). Influence of the precursor, molarity and temperature on the rheology and structural buildup of alkali-activated materials. *Materials*, 14(13), 3590. <https://doi.org/10.3390/ma14133590>
- Sitarz, M., Castro-Gomes, J., & Hager, I. (2021). Strength and microstructure characteristics of blended fly ash and ground granulated blast furnace slag geopolymer mortars with Na and K silicate solution. *Materials (Basel)*, 15(1), 211. <https://doi.org/10.3390/ma15010211>

- Susanti, L., Prasetyaningrum, A., & Hartono, S. (2023). Continuous removal of lead ions using banana–coconut biosorbent beads. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109223. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109223>
- Torres, R., & Vega, L. (2021). Comparative kinetics of lead ion adsorption in batch and fixed-bed systems using banana peel biosorbent. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.015>
- UNALM. (2022). *Estudio de lixiviación de metales pesados en cerámica vitrificada*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- UNALM. (2022). *Evaluación de las propiedades químicas del polvo de cerámica vitrificada proveniente de desechos de baños*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- UNEP. (2019). *Global status report on waste management*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Vempada, S., Krishna, K., Seshagiri Rao, M. V., & Shrihari, S. (2021). Effect of molarity of sodium hydroxide and molar ratio of alkaline activator solution on the strength development of geopolymer concrete. *E3S Web of Conferences*, 309, 01058. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901058>
- Verma, N. K., Rao, M. C., & Kumar, S. (2022). Effect of molarity of NaOH and alkalinity ratio on compressive strength of geo-polymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 64(2), 940–947. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.687>
- Wan, X., Li, H., Che, X., Xu, P., Li, C., & Yu, Q. (2023). A Study on the Application of Recycled Concrete Powder in an Alkali-Activated Cementitious System. *Processes*, 11(1), 203. <https://doi.org/10.3390/pr11010203>
- World Bank. (2020). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC: World Bank.
- Youssef, N., Rabenantoandro, A. Z., Dakhli, Z., et al. (2019). Reuse of waste bricks: A new generation of geopolymer bricks. *SN Applied Sciences*, 1, 1252. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1209-6>

ANEXOS

Anexo 1: Instrumento de recolección de datos

Tabla 13

Ficha experimental de resultados

TESIS: HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025			SOLICITA: Br. Bendezú Castillo Rodolfo Rafael
FECHA		julio - agosto 2025	
Unidad	Código	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión promedio (MPa)
1	UAC	12.74	12.96
2		13.32	
3		12.82	
4		12.80	
5		13.12	
6		11.32	
7		12.4	
8	U75/25-10M	12.37	12.03
9		11.66	
10		12.4	
11		12.1	
12	U75/25-12M	12.8	12.6
13		12.9	
14		12.48	
15		12.72	
16		14.9	
17	U25/75-10M	16.02	15.54
18		15.7	
19		15.2	
20		15.88	
21		16.1	
22	U25/75-12M	17.2	16.78
23		17.04	
24		17.22	
25		16.34	

Anexo 2: Matriz de consistencia

Tabla 14

Formulación del problema	Hipótesis	Objetivos	Variables
Problema General	Hipótesis General	Objetivo General	
¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?	Existe influencia significativa del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	Determinar la influencia del hidróxido de potasio y residuos de construcción y demolición en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	V.I. Hidróxido de potasio
Problemas Específicos	Hipótesis Específicas	Objetivos Específicos	
¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?	Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	Residuos de construcción y demolición (concreto reciclado y cerámica vitrificada)
¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?	Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 10 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	D1: 1 litro solución 10 molar de KOH x 75/25 D2: 1 litro de solución 10 molar de KOH x 25/75
¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?	Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 75/25 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	D1: 1 litro solución 12 molar de KOH x 75/25 D2: 1 litro de solución 12 molar de KOH x 25/75
¿Cuál es la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025?	Existe influencia significativa del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	Determinar la influencia del hidróxido de potasio en la concentración de 1 litro de solución 12 molar y residuos de construcción y demolición a la combinación en porcentaje de 25/75 de concreto reciclado y cerámica vitrificada en la resistencia a la compresión de un bloque de ladrillo artesanal en Trujillo, 2025.	V.D. Resistencia a la compresión

Diseño de investigación: Experimental propiamente dicho

Anexo 3: Matriz de operacionalización de variables

Tabla 15

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable independiente Hidróxido de Potasio	El hidróxido de potasio es un compuesto inorgánico de aspecto sólido y blanco. Es una base fuerte que, al disolverse en agua, se separa completamente en iones K ⁺ y OH ⁻ , lo que genera una solución altamente alcalina. (QiChile,2020).	Se utilizarán soluciones de Hidróxido de Potasio con concentraciones de 10M y 12M, preparadas disolviendo la masa correspondiente de Hidróxido de Potasio en agua destilada hasta completar 1 litro de solución. Se controlará la concentración mediante pesaje en balanza digital (± 0.01 g). Además, se utilizará también RCD en combinaciones de concreto reciclado y cerámica vitrificada al 75%-25% y 25%-75%.	1 litro solución 10 molar de KOH x 75/25 1 litro de solución 10 molar de KOH x 25/75 1 litro solución 12 molar de KOH x 75/25 1 litro de solución 12 molar de KOH x 25/75		Razón
Variable independiente Residuos de construcción y demolición	Residuos producto de la construcción, modificación, reparación y demolición de edificaciones. (Clark et al., 2006).				
Variable dependiente Resistencia a la compresión	La resistencia a la compresión del ladrillo artesanal es la evaluación del objeto sometido a fuerzas determinadas, específicamente: una fuerza sobre el ladrillo; (Abanto,2014)	Se determinará el esfuerzo axial mediante el ensayo unidimensional a los bloques de ladrillo artesanal con dosificaciones distintas elaboradas	Resistencia a la compresión	$\geq 12.6MPa$ Aceptable $< 12.6MPa$ rechazable	Intervalo

Anexo 4: Calibración de instrumentos



ORION LABORATORIOS E.I.R.L.

Calibración, Ensayos de Laboratorio Suelos, Concreto y Asfalto

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 018-25 DPC

SOLICITANTE : INGEOCAL E.I.R.L.

TITULO : Calibración de Sistema Digital
para Prensa de Concreto

PRESA

Marca : ORION
Capacidad : 100 TN
Serie : -----

Indicador

Marca : MCC
Modelo : SAFIR
Serie : -----

Bomba

: ELECTRICA
Marca : POWER TEAM
Serie : 2712AP77907

FECHA : Huachipa, 20 de Julio de 2025

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.
[Firma]
Ing. Luis Taboada Palacios
JEFE DE LABORATORIO
CIP 56551

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 018-25 DPC

INFORMACION DEL EQUIPO**1.- GENERALIDADES.**

A solicitud de INGEOCAL E.I.R.L. se procedió a calibrar el Sistema Digital de Prensa de Concreto, realizado en Trujillo el día 20 de Julio del 2025.

2.- SISTEMA A CALIBRAR

Prensa : ORION
Indicador : MCC
Bomba : POWER TEAM

3.- SISTEMA DE CALIBRACIÓN PATRÓN

Dispositivo : Celda de Carga
Fabricante : AEP Transducers
Tipo : C2S- 100TN
Serie N° : 223686
Carga Nominal : 100,000 Kg
Modalidad : Compresión
Indicador : MP10 N° 6390-2013-10

Calibrado en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica - (INF-LE 023-21A).

4.- PROCEDIMIENTO

El procedimiento toma como referencia a la norma ASTM E4-07 y la Norma NTP ISO/IEC 17025, Se aplicaron dos series de carga al Sistema Digital mediante la misma prensa. En cada serie se registraron las lecturas de las cargas.

5.- RESULTADOS

En la Tabla N° 1 se muestran los promedios de las series de verificación y los errores correspondiente.

En el Gráfico N°1 se muestra la curva de regresión y la ecuación de ajuste correspondientes a la presente calibración.

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.

Luis Taborda Palacios
JEFE DE LABORATORIO
CIP 56551

CERTIFICADO DE
CALIBRACIÓN N° 018-25 DPC

TABLA N° 1

CALIBRACION DE PRENSA DIGITAL Marca ORION, Indicador Digital MCC

SISTEMA DIGITAL "A" KG	SERIES DE CALIBRACIÓN (KG)				PROMEDIO "B" KG	ERROR Ep %	RPTBLD Rp %
	SERIE (1)	SERIE (2)	ERROR (1) %	ERROR (2) %			
10,000	10,535	10,576	5.35	5.76	10,555.50	5.56	0.27
20,000	20,033	19,986	0.17	-0.02	20,014.50	0.07	0.13
30,000	29,843	29,763	-0.52	-0.79	29,803.00	-0.66	0.19
40,000	39,600	39,507	-1.00	-1.23	39,553.50	-1.12	0.17
50,000	49,551	49,611	-0.90	-0.78	49,581.00	-0.84	0.09
60,000	59,339	59,410	-1.10	-0.98	59,374.50	-1.04	0.08
70,000	69,205	69,208	-1.14	-1.13	69,206.50	-1.13	0.00
80,000	79,508	79,550	-0.62	-0.56	79,529.00	-0.59	0.04
90,000	89,590	89,615	-0.46	-0.43	89,602.50	-0.44	0.02

NOTAS SOBRE LA CALIBRACION

- 1.- La Calibración se hizo según el Método C de la norma ASTM E4-01
- 2.- Ep y Rp son el Error Porcentual y la Repetibilidad definidos en la citada Norma:

$$Ep = ((A-B) / B) \cdot 100$$

$$Rp = Error(2) - Error(1)$$
- 3.- La norma exige que Ep y Rp no excedan el $\pm 1.0 \%$

Coefficiente Correlación:

$R^2 = 0.9999$

Ecuación de ajuste:

$$y = 0.9889x + 244.49$$

Donde:

X : Lectura de la pantalla
Y : fuerza promedio (KG)

ORION LABORATORIOS E.I.R.L.

 Ing. Luis Taborda Palacios
 JEFE DE LABORATORIO
 CIP 54551



Anexo 5: Ensayos de Resistencia a la Compresión



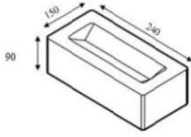
INGENIERIA GEOTECNICA DE ENSAYOS Y CONTROL DE CALIDAD E.I.R.L.
Estudios Geotécnicos, Laboratorio de **Mecánica** de Suelos, Concreto y **Asfalto, Análisis de Agua**

ENSAYO DE COMPRESION LADRILLO (NTP 399.604)
(NTP 399.604)

TESIS	HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025	REALIZADO POR: F.L.G.
DISEÑO	LADRILLO ARTESANAL	REVISADO POR: A.B.G.
SOLICITA	Br. Bendezu Castillo, Rodolfo Rafael https://orcid.org/0009-0002-7617-8035	APROBADO POR: A.B.G.
		FECHA: Ago-25
		CERTIFICADO: CM-001

	1	2	3	4	5
1. Número de Ladrillo					
2. Estructura o Identificación	DISEÑO CON UAC	DISEÑO CON UAC	DISEÑO CON UAC	DISEÑO CON UAC	DISEÑO CON UAC
3. Fecha de Vaciado	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025
4. Fecha de Rotura	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025
5. Edad (días)	28	28	28	28	28
6. Largo (mm)	240	240	240	240	240
7. Ancho (mm)	150	150	150	150	150
8. Área (cm²)	360	360	360	360	360
9. Carga Máxima (kg)	46780.0	48915.0	47052.0	47000.0	48150.0
10. Sección Transversal (cm²)	360	360	360	360	360
11. Resistencia Diseño (kg/cm²)	-	-	-	-	-
12. Resistencia Obtenida (kg/cm²)	129.9	135.9	130.7	130.6	133.8
13. Resistencia Obtenida (MPa)	12.74	13.32	12.82	12.80	13.12

Dimensiones de unidad experimental







Alejandro V. Begazo Giraldo
INGENIERO CIVIL
CIP: 139180

RESOLUCIÓN DE INDECOPI Nº 007971 – 2022/DSD INDECOPI

Urb. Covicorti Mz. A2 - Lote Nº 28 - Trujillo



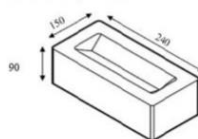
CLARO: 949172510 ENTEL: 990282012, frankling_267@hotmail.com

ENSAYO DE COMPRESION LADRILLO (NTP 399.604)
(NTP 399.604)

TESIS	HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025	REALIZADO : F.L.G.
DISEÑO	LADRILLO ARTESANAL	REVISADO POR : A.B.G.
SOLICITA	Br. Bendeziú Castillo, Rodolfo Rafael https://orcid.org/0009-0002-7617-8035	APROBADO POR : A.B.G.
		FECHA : Ago-25
		CERTIFICADO : CM-001

1. Numero de Ladrillo	1	2	3	4	5
2. Estructura o Identificación	DISEÑO CON U75/25-10M	DISEÑO CON U75/25-10M	DISEÑO CON U75/25-10M	DISEÑO CON U75/25-10M	DISEÑO CON U75/25-10M
3. Fecha de Vaciado	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025
4. Fecha de Rotura	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025
5. Edad (días)	28	28	28	28	28
6. Largo (mm)	240	240	240	240	240
7. Ancho (mm)	150	150	150	150	150
8. Area(cm ²)	360	360	360	360	360
9. Carga Máxima (kg)	41540.0	45523.0	45423.0	42800.0	45523.0
10. Sección Transversal (cm ²)	360	360	360	360	360
11. Resistencia Diseño (kg/cm ²)	-	-	-	-	-
12. Resistencia Obtenida (kg/cm ²)	115.4	126.5	126.2	118.9	126.5
13. Resistencia Obtenida (MPa)	11.32	12.40	12.37	11.66	12.40

Dimensiones de unidad experimental



Alfonso V. Begoza Giraldo
Alfonso V. Begoza Giraldo
INGENIERO CIVIL
CIP: 139180

RESOLUCIÓN DE INDECOPI N° 007971 – 2022/DSD INDECOPI

Urb. Covicorti Mz. A2 - Lote N° 28 - Trujillo



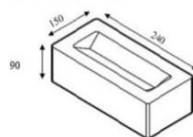
CLARO: 949172510 ENTEL: 990282012, frankling_267@hotmail.com

ENSAYO DE COMPRESION LADRILLO (NTP 399.604)
(NTP 399.604)

TESIS	HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025	REALIZADO : F.L.G.
DISEÑO	LADRILLO ARTESANAL	REVISADO POR : A.B.G.
SOLICITA	Br. Bendezi Castillo, Rodolfo Rafael https://orcid.org/0009-0002-7617-8035	APROBADO POR : A.B.G.
		FECHA: Ago-25
		CERTIFICADO : CM-001

1. Numero de Ladrillo	1	2	3	4	5
2. Estructura o Identificación	DISEÑO CON U75/25-12M	DISEÑO CON U75/25-12M	DISEÑO CON U75/25-12M	DISEÑO CON U75/25-12M	DISEÑO CON U75/25-12M
3. Fecha de Vaciado	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025	22/07/2025
4. Fecha de Rotura	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025	19/08/2025
5. Edad (días)	28	28	28	28	28
6. Largo (mm)	240	240	240	240	240
7. Ancho (mm)	150	150	150	150	150
8. Area(cm ²)	360	360	360	360	360
9. Carga Máxima (kg)	44423.0	47005.0	47356.0	45823.0	46692.0
10. Sección Transversal (cm ²)	360	360	360	360	360
11. Resistencia Diseño (kg/cm ²)	-	-	-	-	-
12. Resistencia Obtenida (kg/cm ²)	123.4	130.6	131.5	127.3	129.7
13. Resistencia Obtenida (MPa)	12.10	12.80	12.90	12.48	12.72

Dimensiones de unidad experimental



Alexandro V. Begazo Giraldo
Alexandro V. Begazo Giraldo
INGENIERO CIVIL
CIP: 139180

RESOLUCIÓN DE INDECOPI Nº 007971 – 2022/DSD INDECOPI

Urb. Covicorti Mz. A2 - Lote Nº 28 - Trujillo



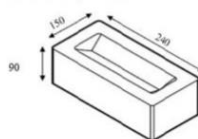
CLARO: 949172510 ENTEL: 990282012, frankling_267@hotmail.com

ENSAYO DE COMPRESION LADRILLO (NTP 399.604)
(NTP 399.604)

TESIS	HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025	REALIZADO : F.L.G.
DISEÑO	LADRILLO ARTESANAL	REVISADO POR : A.B.G.
SOLICITA	Br. Bendezu Castillo, Rodolfo Rafael https://orcid.org/0009-0002-7617-8035	APROBADO POR : A.B.G.
		FECHA : Ago-25
		CERTIFICADO : CM-001

1. Numero de Ladrillo	1	2	3	4	5
2. Estructura o Identificación	DISEÑO CON U25/75-10M	DISEÑO CON U25/75-10M	DISEÑO CON U25/75-10M	DISEÑO CON U25/75-10M	DISEÑO CON U25/75-10M
3. Fecha de Vaciado	23/07/2025	23/07/2025	23/07/2025	23/07/2025	23/07/2025
4. Fecha de Rotura	20/08/2025	20/08/2025	20/08/2025	20/08/2025	20/08/2025
5. Edad (días)	28	28	28	28	28
6. Largo (mm)	240	240	240	240	240
7. Ancho (mm)	150	150	150	150	150
8. Area(cm2)	360	360	360	360	360
9. Carga Máxima (kg)	54710.0	58810.0	57652.0	55800.0	58296.0
10. Sección Transversal (cm2)	360	360	360	360	360
11. Resistencia Diseño (kg/cm2)	-	-	-	-	-
12. Resistencia Obtenida (kg/cm2)	152.0	163.4	160.1	155.0	161.9
13. Resistencia Obtenida (MPa)	14.90	16.02	15.70	15.20	15.88

Dimensiones de unidad experimental



Alfonso V. Begoza Giraldo
Alfonso V. Begoza Giraldo
INGENIERO CIVIL
CIP: 139180

RESOLUCIÓN DE INDECOPI N° 007971 – 2022/DSD INDECOPI

Urb. Covicorti Mz. A2 - Lote N° 28 - Trujillo



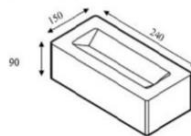
CLARO: 949172510 ENTEL: 990282012, frankling_267@hotmail.com

ENSAYO DE COMPRESION LADRILLO (NTP 399.604)
(NTP 399.604)

TESIS	HIDRÓXIDO DE POTASIO Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN BLOQUE DE LADRILLO ARTESANAL EN TRUJILLO, 2025	REALIZADO : F.L.G.
DISEÑO	LADRILLO ARTESANAL	REVISADO POR : A.B.G.
SOLICITA	Br. Bendezú Castillo, Rodolfo Rafael https://orcid.org/0009-0002-7617-8035	APROBADO POR : A.B.G.
		FECHA : Ago-25
		CERTIFICADO : CM-001

1. Número de Ladrillo	1	2	3	4	5
2. Estructura o Identificación	DISEÑO CON U25/75-12M	DISEÑO CON U25/75-12M	DISEÑO CON U25/75-12M	DISEÑO CON U25/75-12M	DISEÑO CON U25/75-12M
3. Fecha de Vaciado	23/07/2025	23/07/2025	23/07/2025	23/07/2025	23/07/2025
4. Fecha de Rotura	20/08/2025	20/08/2025	20/08/2025	20/08/2025	20/08/2025
5. Edad (días)	28	28	28	28	28
6. Largo (mm)	240	240	240	240	240
7. Ancho (mm)	150	150	150	150	150
8. Area(cm2)	360	360	360	360	360
9. Carga Máxima (kg)	59090.0	63131.0	62550.0	63212.0	59998.0
10. Sección Transversal (cm2)	360	360	360	360	360
11. Resistencia Diseño (kg/cm2)	-	-	-	-	-
12. Resistencia Obtenida (kg/cm2)	164.1	175.4	173.8	175.6	166.7
13. Resistencia Obtenida (MPa)	16.10	17.20	17.04	17.22	16.34

Dimensiones de unidad experimental



Alfonso V. Begazo Giraldo
Alfonso V. Begazo Giraldo
INGENIERO CIVIL
CIP: 139180

RESOLUCIÓN DE INDECOPI Nº 007971 – 2022/DSD INDECOPI

Urb. Covicorti Mz. A2 - Lote Nº 28 - Trujillo



CLARO: 949172510 ENTEL: 990282012, frankling_267@hotmail.com

Anexo 6: Panel fotográfico

Figura 12

Trituración de residuos.



Figura 13

Molienda en molino de bolas

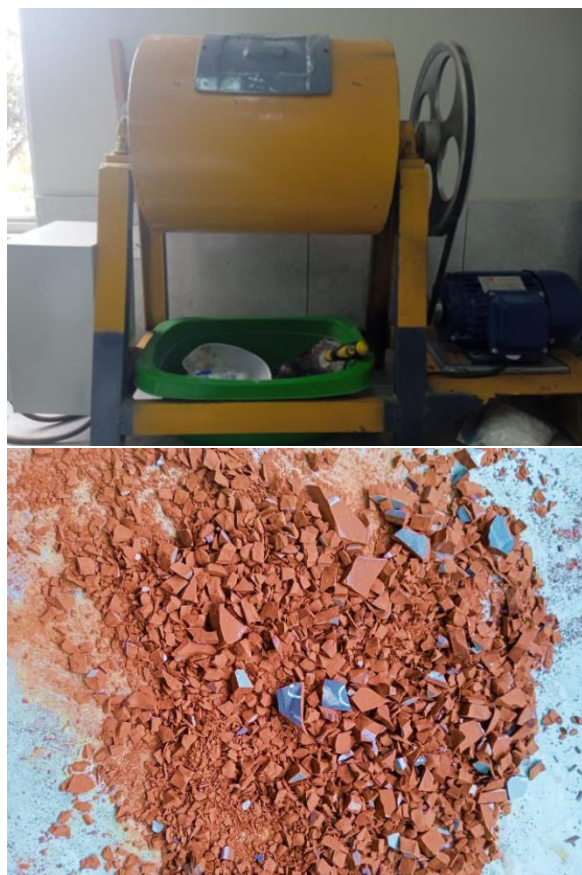


Figura 14

Secado en estufa a 100 °C



Figura 15

Molienda en molino de mesa (segunda molienda)



Figura 16

Tamizado con malla N°400



Figura 17

Almacenamiento de los polvos finos



Figura 18

Preparación de soluciones alcalinas de KOH (10M, 12M)



Figura 19

Pesaje de componentes (arena, aglomerante, solución alcalina)



Figura 20

Mezclado de materiales



Figura 21

Mezcla final



Figura 22

Llenado de moldes de unidades y compactación en prensa hidráulica



Figura 23

Desmolde y primeras unidades conformadas



Figura 24

Colocación de la unidad en la máquina universal de ensayos para compresión



Figura 25

Aplicación de carga y rotura del espécimen



Facultad De INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

INFORME DE TESIS - BENDEZU CASTILLO RODOLFO RAFAEL

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:565566495

Fecha de entrega

9 mar 2026, 17:37 GMT

Fecha de descarga

9 mar 2026, 21:33 GMT

Nombre del archivo

INFORME DE TESIS - BENDEZU CASTILLO RODOLFO RAFAEL.docx

Tamaño del archivo

14.1 MB

90 páginas

23.146 palabras

130.064 caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 11%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 11% Fuentes de Internet
- 6% Publicaciones
- 11% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.uct.edu.pe	2%
2	Internet	www.mdpi.com	<1%
3	Trabajos del estudiante	PREGRADO on 2025-10-11	<1%
4	Internet	hdl.handle.net	<1%
5	Trabajos del estudiante	uaq on 2023-05-02	<1%
6	Trabajos del estudiante	Unidad Publicaciones on 2026-03-04	<1%
7	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
8	Internet	ouci.dntb.gov.ua	<1%
9	Internet	eprints.uanl.mx	<1%
10	Trabajos del estudiante	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2025-11-19	<1%
11	Internet	repositorio.unjfsc.edu.pe	<1%

12	Internet	tecnoscientifica.com	<1%
13	Publicación	Lelly Marini, Mohammad Abdul Mannan, Md. Rezaur Rahman, Muhammad Khusa...	<1%
14	Internet	revistadelaconstruccion.uc.cl	<1%
15	Internet	www.coursehero.com	<1%
16	Internet	revistas.eia.edu.co	<1%
17	Publicación	Osama Mohamed, Anamika Mishra, Fida Isam. "An overview of 3D printed concre...	<1%
18	Trabajos del estudiante	POSGRADO on 2025-08-16	<1%
19	Internet	lume.ufrgs.br	<1%
20	Trabajos del estudiante	PREGRADO on 2026-02-12	<1%
21	Trabajos del estudiante	Universidad Católica de Trujillo on 2026-02-09	<1%
22	Trabajos del estudiante	Universiti Kebangsaan Malaysia on 2026-01-11	<1%
23	Trabajos del estudiante	Universiti Malaysia Perlis on 2023-01-30	<1%
24	Internet	repositorio.urp.edu.pe	<1%
25	Internet	revistaalconpat.org	<1%

26	Internet	link.springer.com	<1%
27	Internet	iukl.edu.my	<1%
28	Internet	mobt3ath.com	<1%
29	Publicación	Trung Thanh Tran, Linh Van Hong Bui, Sayan Sirimontree, Phuoc Trong Nguyen, ...	<1%
30	Internet	www.researchsquare.com	<1%
31	Trabajos del estudiante	Universidad Privada Antenor Orrego on 2023-11-26	<1%
32	Internet	openaccess.hacettepe.edu.tr:8080	<1%
33	Internet	www.nepjol.info	<1%
34	Publicación	Amaresh Tripathy, Prasanna Kumar Acharya. "Strength, life cycle analysis, embo...	<1%
35	Internet	www.uakb.org	<1%
36	Internet	oulurepo.oulu.fi	<1%
37	Trabajos del estudiante	Corporación Universitaria Autónoma del Cauca on 2025-09-28	<1%
38	Internet	upcommons.upc.edu	<1%
39	Trabajos del estudiante	Universidad Continental on 2020-02-18	<1%

40	Trabajos del estudiante	Universidad Católica de Trujillo on 2026-02-10	<1%
41	Trabajos del estudiante	Universitat Oberta de Catalunya on 2026-02-25	<1%
42	Internet	roderic.uv.es	<1%
43	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2025-07-17	<1%
44	Trabajos del estudiante	De La Salle University - Manila on 2025-11-21	<1%
45	Internet	josebrouwers.bwk.tue.nl	<1%
46	Trabajos del estudiante	Middle East Technical University on 2025-09-16	<1%
47	Trabajos del estudiante	Universidad Autónoma de Querétaro on 2025-12-02	<1%
48	Trabajos del estudiante	Universidad Católica de Trujillo on 2026-02-06	<1%
49	Publicación	Zihan Zhou, Shuo Li, Guo Hu, Jun Wu, Chuanqin Yao, Fujun Niu. "On the use of rec...	<1%
50	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2021-07-24	<1%
51	Internet	backend.orbit.dtu.dk	<1%
52	Internet	bdigital.unal.edu.co	<1%
53	Internet	dspace.unitru.edu.pe	<1%

54	Internet	eprints.whiterose.ac.uk	<1%
55	Internet	researchers.mq.edu.au	<1%
56	Internet	theses.hal.science	<1%
57	Trabajos del estudiante	uncedu on 2024-11-13	<1%
58	Internet	upnbllib.pedagogica.edu.co	<1%
59	Internet	www.civilejournal.org	<1%
60	Trabajos del estudiante	PREGRADO on 2025-10-22	<1%
61	Trabajos del estudiante	Universidad TecMilenio on 2024-11-21	<1%
62	Internet	etd.repository.ugm.ac.id	<1%
63	Internet	pubs.acs.org	<1%
64	Internet	recerca.udg.edu	<1%
65	Internet	www.iris.unict.it	<1%
66	Trabajos del estudiante	PREGRADO on 2025-10-30	<1%
67	Trabajos del estudiante	Universidad Andina del Cusco on 2025-07-07	<1%

68	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2025-08-21	<1%
69	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2021-05-31	<1%
70	Internet	patents.google.com	<1%
71	Publicación	Ariel Rey Villca Pozo. "Utilización de geopolímero para la mejora de las propiedad...	<1%
72	Trabajos del estudiante	Curtin University of Technology on 2026-01-30	<1%
73	Publicación	Hussein Nasreddine, Thouraya Salem, Assia Djerbi, Nicolas Dujardin, Laurent Gau...	<1%
74	Publicación	Junior Arturo Gavilan Lizana, Jorge Luis Soto Chicchon, Javier Reynoso Oscanoa, A...	<1%
75	Publicación	Sining Li, Yong Huang, Qiushuang Cui, Ruyun Bai, Huan Li, Liran Jiao. "Effect of ca...	<1%
76	Publicación	Taofiq O. Mohammed, Aman Ul Haq, Mohammad Zunaied Bin Harun, Ebenezer O....	<1%
77	Trabajos del estudiante	Universidad Carlos III de Madrid - EUR on 2025-06-17	<1%
78	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2023-07-31	<1%
79	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-18	<1%
80	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2024-06-19	<1%
81	Trabajos del estudiante	Universidad Politécnica de Cartagena on 2025-10-27	<1%

82	Internet	bibliotecadigital.univalle.edu.co	<1%
83	Internet	bradscholars.brad.ac.uk	<1%
84	Internet	dspace.nm-aist.ac.tz	<1%
85	Internet	repositorio.utea.edu.pe	<1%
86	Internet	www.slideshare.net	<1%
87	Trabajos del estudiante	Griffth University on 2023-05-30	<1%
88	Trabajos del estudiante	Pontificia Universidad Catolica del Peru on 2025-02-07	<1%
89	Publicación	Rafael Andres Robayo-Salazar, Ruby Mejía de Gutiérrez, Alexandra Jimena Mulfor...	<1%
90	Trabajos del estudiante	Similitud UNAT on 2026-01-13	<1%
91	Trabajos del estudiante	Universidad Anahuac México Sur on 2022-03-21	<1%
92	Trabajos del estudiante	Universidad Autónoma de Nuevo León on 2025-12-02	<1%
93	Trabajos del estudiante	Universidad Catolica de Trujillo on 2023-06-12	<1%
94	Trabajos del estudiante	Universidad Católica Boliviana "San Pablo" on 2024-11-04	<1%
95	Trabajos del estudiante	Universidad Católica San Pablo on 2018-02-07	<1%

96	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-12	<1%
97	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-14	<1%
98	Trabajos del estudiante	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia on 2017-05-09	<1%
99	Trabajos del estudiante	Universidad Tecnológica del Perú on 2025-10-29	<1%
100	Internet	apirepositorio.unu.edu.pe	<1%
101	Internet	doczz.com.br	<1%
102	Internet	e-spacio.uned.es	<1%
103	Internet	eprints.ucm.es	<1%
104	Internet	repositorio.uroosevelt.edu.pe	<1%
105	Internet	repositorio.uss.edu.pe	<1%
106	Internet	repositorio.uwiener.edu.pe	<1%
107	Internet	www.researchgate.net	<1%
108	Internet	www.siza.eco.buap.mx	<1%
109	Internet	www.tdx.cat	<1%

Facultad De INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

INFORME DE TESIS - BENDEZU CASTILLO RODOLFO RAFAEL

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:565566495

Fecha de entrega

9 mar 2026, 17:37 GMT

Fecha de descarga

9 mar 2026, 21:33 GMT

Nombre del archivo

INFORME DE TESIS - BENDEZU CASTILLO RODOLFO RAFAEL.docx

Tamaño del archivo

14.1 MB

90 páginas

23.146 palabras

130.064 caracteres

*% detectado como IA

La detección de IA incluye la posibilidad de que haya falsos positivos. Aunque cierto texto en esta entrega se generó probablemente con IA, los puntajes inferiores al umbral del 20 % no aparecen porque tienen una mayor probabilidad de falsos positivos.

Precaución: Se necesita revisión.

Es esencial comprender los límites de la detección de IA antes de tomar decisiones acerca del trabajo del estudiante. Te alentamos a obtener más información acerca de las funciones de detección de IA de Turnitin antes de usar la herramienta.

Aviso legal

Nuestra evaluación de escritura con IA está diseñada para ayudar a los académicos a identificar texto que podrían haberse preparado mediante una herramienta de IA generativa. Es posible que nuestra evaluación de escritura con IA no siempre sea precisa (existe la posibilidad de que identifique erróneamente redacciones probablemente generadas por humanos como generadas por IA, y redacciones probablemente generadas por IA como generadas por humanos), por lo que no debe usarse como único fundamento para aplicar sanciones a un estudiante. Para determinar si es un caso de deshonestidad académica, se necesita de un escrutinio mayor y el juicio humano, junto con la aplicación de las políticas académicas específicas de la organización.

Preguntas frecuentes

¿Cómo debería interpretar los falsos positivos y el porcentaje de escritura con IA de Turnitin?

El porcentaje que se muestra en el reporte de escritura con IA es la cantidad del texto calificado en la entrega que el modelo de detección de escritura con IA de Turnitin determina se generó probablemente con IA desde un modelo de lenguaje de gran tamaño.

Los falsos positivos (que marcan incorrectamente alertas de texto escrito por humanos como generado con IA) son una posibilidad en los modelos de IA.

Los puntajes de detección de IA inferiores al 20 %, que no aparecen en reportes nuevos, tienen una mayor probabilidad de ser falsos positivos. Para reducir la probabilidad de malinterpretación, no se atribuye ningún puntaje o resaltado y se indican con un asterisco en el reporte (*%).

El porcentaje de escritura con IA no debe ser el único fundamento para determinar si ha ocurrido una mala conducta. El revisor/instructor debería usar el porcentaje como un medio para iniciar una conversación formativa con sus estudiantes o usarlo para examinar el ejercicio entregado según las políticas de la escuela.

¿Qué significa 'texto calificado'?

Nuestro modelo sólo procesa texto calificado en la forma de escritura de formato largo. La escritura de formato largo se refiere a los enunciados individuales en párrafos que constituyen una parte más grande del trabajo escrito, como un ensayo, una disertación, un artículo, etc. El texto calificado que se ha determinado que se generó probablemente con IA se resaltarán en color cian en la entrega.

El texto no calificado, como viñetas, bibliografías comentadas, etc., no se procesará y puede crear disparidad entre los puntos destacados de la entrega y el porcentaje mostrado.

