

RECYCLING OF MINING TAILINGS IN CONSTRUCTION MATERIALS SUCH AS GEOPOLYMER CEMENT

J. Rau Alvarez, Magister, M. Guzmán, Doctor., P. Pereyra, Magíster, A. Ruiz, Magíster¹
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jrau@pucp.edu.pe, mguzman@pucp.edu.pe, ppereyr@pucp.edu.pe,
¹Canadá, Arturo.ruiz@ippdperu.com

Abstract— Mining is an extractive activity of great importance for the economic development of any country. The Peruvian mining industry is one of the largest in Latin America and contributes to the country's growth by being a crucial source of income. Mining activities generate an increase in the production of waste, which in turn increases environmental pollution and has a negative impact on human health. For this reason, companies must incorporate the Sustainable Development Goals (SDGs) into their operations, consolidating global efforts in favor of environmental sustainability and economic development.

The objective of this research is to determine the sustainability of geopolymeric cement production based on laboratory test results carried out on mining tailings in the northern highland of Peru. In this way, the pollutant agent (tailings) can be eliminated and a highly useful product (cement) can be generated. Once the chemical and metallurgical analyses of the tailings were completed, the objective was to minimize the presence of toxic elements for humans (heavy metals). After preparing the geopolymeric cement, physical property tests, radiometry analysis, and an economic feasibility study were conducted.

Keywords—Minig tailing, Radiometry analysis, Geopolymeric cement.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

RECICLADO DE RELAVES MINEROS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO CEMENTO GEOPOLIMERO

J. Rau Alvarez, Magister, M. Guzmán, Doctor., P. Pereyra, Magíster, A. Ruiz, Magíster¹
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jrau@pucp.edu.pe, mguzman@pucp.edu.pe, ppereyr@pucp.edu.pe,
¹Canadá, Arturo.ruiz@ippdperu.com

Recycling of mining tailings into construction materials such as geopolymer cement.

Abstract— Mining is an extractive activity of great importance for the economic development of any country. The Peruvian mining industry is one of the largest in Latin America and contributes to the country's growth by being a crucial source of income. Mining activities generate an increase in the production of waste, which in turn increases environmental pollution and has a negative impact on human health. For this reason, companies must incorporate the Sustainable Development Goals (SDGs) into their operations, consolidating global efforts in favor of environmental sustainability and economic development.

The objective of this research is to determine the sustainability of geopolymeric cement production based on laboratory test results carried out on mining tailings in the northern Sierra of Peru. In this way, the pollutant agent (tailings) can be eliminated and a highly useful product (cement) can be generated. Once the chemical and metallurgical analyses of the tailings were completed, the objective was to minimize the presence of toxic elements for humans (heavy metals). After preparing the geopolymeric cement, physical property tests, radiometry analysis, and an economic feasibility study were conducted.

Keywords—Minig tailing, Radiometry analysis, Geopolymeric cement.

Resumen— La minería es una actividad extractiva de gran importancia para el desarrollo económico de cualquier país. La industria minera peruana es una de las más grandes de América Latina y contribuye al crecimiento del país al ser una fuente crucial de ingresos. Las actividades mineras generan un aumento en la producción de residuos, lo que a su vez aumenta la contaminación ambiental y genera un impacto negativo en la salud humana. Por tal motivo, las empresas deben incorporar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en sus operaciones, consolidando así los esfuerzos globales a favor de la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico.

El objetivo de esta investigación es determinar la sostenibilidad de la producción de cemento geopolimérico basado en los resultados de pruebas de laboratorio realizadas en relaves mineros de la Sierra norte de Perú. De esta manera, el agente contaminante (relaves) puede ser eliminado y se puede generar un producto altamente útil (cemento). Una vez que se completaron los análisis químicos y metalúrgicos de los relaves, el objetivo fue minimizar la presencia de elementos tóxicos para los humanos (metales pesados). Después de preparar el cemento geopolimérico, se realizaron pruebas de propiedades físicas, análisis de radiometría y un estudio de viabilidad económica.

Palabras Clave—Relaves mineros, Análisis radiométrico, cemento geopolimérico.

I. INTRODUCCIÓN

La minería es una industria extremadamente importante en la economía de cualquier país. Sin embargo, debido al movimiento de grandes volúmenes de material, esta industria genera una variedad de residuos, siendo los relaves uno de los productos más grandes. De hecho, la industria minera genera una enorme cantidad de relaves mineros producto de la excavación de minerales en forma de roca desechada o del procesamiento mineral como un polvo fino [1]. En este sentido, la gestión adecuada de los residuos generados es una gran preocupación. Por tal motivo, el uso de los relaves como materia prima para la fabricación de un producto que genere valor es importante porque permite la reducción de estos residuos mineros, generando así menos contaminación; Además, el producto puede ser utilizado por la empresa minera y las comunidades dentro del área de influencia.

Es por eso que, en los últimos años, la industria minera de todo el mundo ha centrado sus esfuerzos en minimizar estos residuos, ya sea reutilizándolos en sus operaciones con el método de corte y relleno [2][3] o buscando usos alternativos en la sociedad. De hecho, los investigadores han buscado formas de reducir o minimizar el volumen de relaves que se deben desechar en grandes espacios [4][5][6][7]. Una forma de hacerlo es utilizarlos como materia prima para la producción de insumos para otras industrias, como la industria de la construcción [6][8][9][10][11][12]. Por otro lado, los estudios han demostrado que los relaves de cobre [13][14][15], oro [15][14][16][17][18] y hierro [19][20][21][22][23] mezclados con geopolímeros [19][14][20] pueden ser utilizados como sustituto parcial del cemento en la construcción de concreto o para fabricar ladrillos de construcción.

En este sentido, el uso de relaves mineros para obtener cemento geopolimérico se convierte en una gran contribución a la economía circular en la minería [24][25][26][27][28][29]. Siendo esta nueva tendencia de gran relevancia en la industria minera y especialmente en la reutilización de colas [30]. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la sostenibilidad de la producción de

cemento geopolimérico utilizando colas mineras como materia prima, que presenta características adecuadas para la construcción de infraestructuras considerando que no es perjudicial para la salud de las personas.

En este artículo, se presentan los resultados preliminares de la obtención de cemento geopolimérico a partir de relaves mineras.

II. METODOLOGÍA

A. Preparación de muestra

Se recolectaron un total de cinco muestras de relave de la mina de oro del norte de Perú. Cada muestra contenía aproximadamente el 25% de sólidos. Luego, para el proceso de secado, la pulpa se sedimentó por gravedad con el fin de separar el agua sobrenadante, ver Fig. 1. La porción líquida se descartó debido a su bajo contenido de sólidos. La porción sólida se separó directamente en grandes bandejas con un peso aproximado de 4 kg para su posterior secado en un horno a una temperatura de alrededor de 50°C [31]. Ver Fig. 2



Fig. 1 El relave viene en pulpa



Fig. 2 El relave es secado al horno entre 50° a 60 °

B. Gravedad específica

Para determinar la gravedad específica se utilizaron tres picnómetros de vidrio de 50 ml. La muestra se tamizó a través

del tamiz ASTM N200 (ver la Fig. 3) y se pulverizó el peso retenido hasta que el 95% de ella pasó por el tamiz M200. Luego, los picnómetros se secaron en un horno a 110°C y se registró el peso del picnómetro seco, el picnómetro lleno con agua destilada, el picnómetro con la muestra mineral y el picnómetro con la muestra mineral y agua. Finalmente, se registraron todos los pesos.



Fig. 3 Tamizado del relave seco

C. Análisis granulométrico

Se pesaron 250 g de muestra para proceder con el tamizado húmedo utilizando los tamices ASTM N200, N230 y N450. Los pesos retenidos de cada tamiz se colocaron en bandejas para luego secarlas a una temperatura de 55°C en el horno. Después de que las muestras se secaron, el peso retenido +M200 se tamizó a través de un conjunto de tamices ASTM N30, N40, N50, N70, N100, N140 y N200. Finalmente, se pesaron los pesos retenidos de cada tamiz y se registraron los datos.

D. Pruebas mineralógicas

Para obtener la composición mineralógica y comprender las reacciones geoquímicas involucradas en la preparación del cemento geopolimérico se aplicaron cuatro pruebas fundamentales a cinco muestras de relaves:

Difracción de rayos X (XRD):

Se seleccionaron 80 mg de material para cada muestra y se realizó el análisis con el equipo DRX Bruker, modelo D8 Discover, con radiación de cobre ($\text{CuK}\alpha = 0.15418 \text{ nm}$), corriente de 40 mA y voltaje de aceleración de 40 kV con un detector Lynxeye con selectividad de energía. El análisis se realizó en un rango de ángulos (2θ) desde 5 hasta 80 grados en incrementos de 0.02 grados considerando un tiempo de paso de 1 segundo. Por motivos de visualización, los resultados se

presentan solo en el rango de 5 a 70 grados. Para calcular la composición de las fases cristalinas y la parte amorfa, se aplicó el método de la Relación de Intensidad de Referencia (RIR). La concentración mínima para este método es del 1% en peso. Esta técnica analítica permitió identificar las principales especies minerales: cuarzo, moscovita, pirita, albita, anortita y caolinita. Ver Fig.4 equipo de Rx

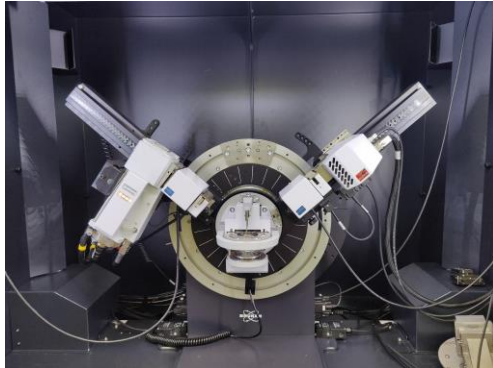


Fig. 4 Equipo de XRF y XRD

Fluorescencia de rayos X (XRF):

Se seleccionó un gramo de material para cada muestra, se realizaron análisis XRF con el espectrómetro de rayos X de dispersión de longitud de onda S8 TIGER de la marca Bruker, con un ánodo de rodio (Rh), una corriente continua de 170 mA, una tensión de aceleración de 60 kV y colimadores con ángulo de apertura de 0.23° y 0.46°. Además de los cristales analizadores: PET, LIF (200), LIF (220) y XS-55, y dos tipos de detectores: contador de centelleo y proporcional de flujo. El análisis y determinación de la composición química se realizó utilizando la rutina QUANTEXPRESS, que realiza un ajuste "sin estándares". El modelo de evaluación fue por óxidos y el tiempo de medición fue de 17 minutos aproximadamente para cada muestra.

Análisis ácido-base (ABA)

Los análisis de predicción de drenaje ácido de minas (DAM) se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento propuesto por Skousen [32]. Se colocaron 2,0 g de muestra pulverizada en un matraz cónico de 250 mL y se agregaron 90 mL de agua destilada. Al inicio de la prueba, se agregó entre 1-3 ml de HCl 1,0 N estandarizado. Luego, se colocó el matraz en un agitador. Después de 2 horas, se agregó una segunda cantidad de ácido. Después de 24 horas, se agregó agua destilada para llevar el volumen a aproximadamente 125 mL. Luego, se registró el pH antes de comenzar la neutralización hasta 8,3 agregando una solución estandarizada de NaOH 0,5 N o 0,1 N

Pruebas de lixiviación

Las muestras de colas se mezclaron con los geopolímeros para obtener ladrillos cúbicos de cinco centímetros de medida. Estos ladrillos fueron sometidos a pruebas de lixiviación para

identificar los metales que podrían lixiviar después de obtener el cemento geopolimérico. Además, esto permitirá evaluar si el cemento geopolimérico tendrá un potencial generador de acidez, complementando así las pruebas ABA.

E. Análisis radiométricos

Las muestras de relave fueron sometidas a pruebas de tasa de exhalación, ver la Fig. 5 y espectrometría gamma para evaluar su riesgo radiológico derivado de la exposición a radionúclidos naturales. Para evaluar la tasa de exhalación de masa de radón, se utilizó un instrumento RAD7 mediante el método de cámara cerrada en una cámara de acumulación de acero inoxidable con una prueba de estanqueidad verificada adecuadamente. Dado que las mediciones se llevaron a cabo en un período corto (menos de un día), es posible despreciar el impacto de fugas y retrodifusión.

El análisis radiométrico se realizó utilizando espectrometría gamma con un detector de centelleo de NaI(Tl) de 3x3" para determinar las concentraciones de actividad (AC) de los radionúclidos naturales 40K, 226Ra y 232Th (en Bq/kg). Se analizaron cinco muestras de relaves, las cuales se colocaron en contenedores herméticos cilíndricos para evitar la fuga de radón, y se almacenaron durante un período de 28 días para alcanzar el equilibrio secular [33].



Fig. 5 Preparando filtros en el equipo de exhalación

Las concentraciones de actividad (AC) de las 5 muestras de relaves se determinaron utilizando una fórmula (ver ecuación 1) [34]:

$$AC(Bq/kg) = \frac{R_{net}}{\epsilon \times I \times m \times e^{-\lambda t}}$$

donde:

- ϵ = eficiencia absoluta de detección de los espectrómetros gamma, cuentas por desintegración a la energía de interés,

- λ = Constante de desintegración para el isótopo de interés, d^{-1} ,
- R_{net} = La tasa neta de conteo de la fórmula de interés,
- I = Fracción gamma, gammas por desintegración, para esa energía de rayos gamma,
- t = tiempo transcurrido desde la recolección de la muestra hasta el punto medio del tiempo de conteo de la muestra, días, y
- m = masa de la alícuota de muestra, kg

F. Geopolimerización

El experimento sobre geopolímeros a base de relaves mineros involucró varios parámetros. Primero, basado en el análisis químico y el análisis DXR de la muestra de relaves, se determinó la relación molar de Si/Al que se utilizaría en el geopolímero. En este caso, la relación se estableció entre 1 y 5 para aumentar la concentración de aluminio se añadió óxido de aluminio a la mezcla.

G. El segundo parámetro fue la relación Si/Na, que también se estableció entre 0.5 y 2.5. Este parámetro es importante porque afecta la estabilidad y las propiedades mecánicas del geopolímero final. Una relación Si/Na más alta puede mejorar la resistencia del geopolímero, mientras que una relación más baja puede mejorar su estabilidad térmica.

La concentración de hidróxido de sodio utilizada en la solución alcalina se estableció entre 9 y 13 molar. Esta concentración es crucial para la formación del geopolímero, ya que inicia la disolución de los residuos y facilita el proceso de polimerización.

La mezcla se preparó considerando 15 recetas de geopolímeros, donde se variaron las relaciones de Si/Al y Si/Na. Todas las recetas se moldearon en moldes cúbicos de 5 cm basados en la norma ASTM C109 [35]. Después del moldeo, los geopolímeros se curaron a temperatura ambiente durante 15 días. Después de este período, los geopolímeros se curaron aún más en un horno a una temperatura de 75°C durante 7 semanas. Finalmente, se realizaron pruebas de resistencia a todos los geopolímeros.

H. Pruebas geomecánicas

Para las muestras geopolimerizadas, se utilizó el método estándar ASTM C109. Este método de prueba proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión del cemento hidráulico y otros morteros, y los resultados pueden ser utilizados para determinar el cumplimiento de las especificaciones.

I. Proceso de Geopolimerización

- Recepción de muestras en el laboratorio.

- Secado de las muestras para eliminar la humedad.
- Análisis de la composición de silicio y aluminio en las muestras.
- Limpieza de los relaves mediante flotación de sulfuros presentes.
- Preparación de los ingredientes: óxido de aluminio, hidróxido de sodio y silicato de sodio. en cantidades según es necesario para balancear el ratio SiO_2/Al_2O_3
- Mezcla de los ingredientes en las proporciones adecuadas.
- Vertido de la mezcla en los moldes preparados previamente.
- Curado del geopolímero a una temperatura específica durante un período determinado.
- Ensayo para verificar la resistencia del geopolímero. Esto implica someter muestras del material a pruebas mecánicas de compresión, para evaluar su resistencia y propiedades físicas.
- Análisis de los resultados del ensayo y comparación con los estándares establecidos.
- Evaluación y validación de los resultados del ensayo para determinar si el geopolímero cumple con las especificaciones y criterios de calidad establecidos.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Gravedad específica

Se han calculado los resultados de la prueba de gravedad específica. Basándose en los pesos registrados, la gravedad específica de la muestra mineral R5 fue de 3,122 g/cm³. Estos valores indican la relación entre la densidad de la muestra mineral y la densidad del agua destilada a una temperatura y presión estándar. Los resultados obtenidos de esta prueba proporcionan información importante sobre las propiedades físicas de la muestra mineral y pueden ser utilizados para análisis y caracterización posteriores.

B. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico de cada muestra nos permitió determinar el D80 (tamaño de malla de la abertura del tamiz por el cual el 80% del sólido que se está tamizando pasa). Los valores de D80 fueron 50.10 μm ; 135.78 μm ; 134.25 μm ; 125.27 μm y 134.92 μm para cada muestra respectivamente, ver la Fig. 6.

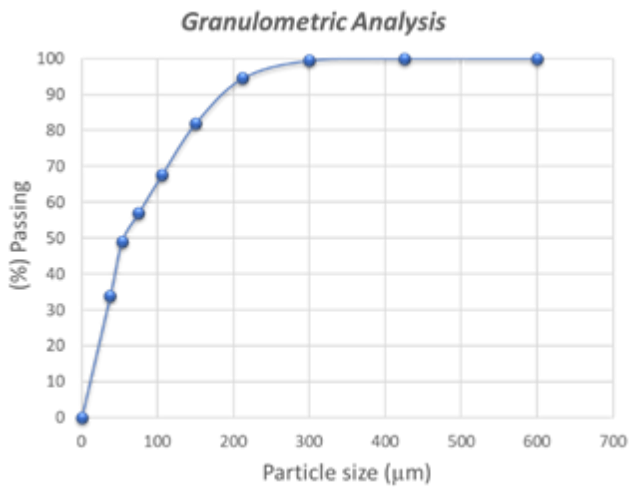


Fig. 6 Distribución granulométrico de las muestras de relave (R5)

C. Análisis químico

Los resultados del análisis químico de la muestra de relaves R5 usando ICP-MS se muestran en la Tabla 1. Esta técnica analítica proporciona mediciones precisas y exactas de elementos traza, permitiendo una comprensión detallada de la composición química de la muestra de colas. Los resultados muestran que la muestra contiene concentraciones variables de varios elementos, incluyendo Cu, Pb, Zn, As, Sb, Cd y Bi. Los niveles de estos elementos son de particular interés debido a su potencial impacto ambiental, así como su valor potencial efecto en la salud humana.

Bajo estándares nacionales el contenido de metales pesados se encuentra bajo los límites permisibles para suelos exceptuando el contenido de Cromo, el cual se encuentra en nivel muy por encima del límite. Por otro lado, el contenido de S es otro de los parámetros sensibles en el tratamiento de estos relaves debido a su potencial de formación de los drenajes ácido

El análisis químico de la muestra de la cola utilizando ICP-MS proporciona información valiosa que se puede utilizar para optimizar las estrategias de procesamiento y minimizar el impacto ambiental. La precisión y la exactitud de los resultados analíticos obtenidos garantizan que los datos obtenidos puedan ser confiables para fines de toma de decisiones.

Tabla 1.- Composición química de R5 obtenido por ICP-MS*. *Análisis elaborado por laboratorio SGS

Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr
ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm
0.3	2.99	6	166	<0.5	<5	0.43	1	6	323
Cu	Fe	Ga	K	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na
ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%
448.4	6.03	19	1.61	4.5	5	0.29	259	16	0.2
Nb	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Sn	Sr	Ti
ppm	ppm	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%
1	7	0.04	24	1.08	5	2.7	<10	69.3	0.08
Tl	V	W	Y	Zn	Zr	Sulfat	S	SO ₄ ²⁻	Hg
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	ppm
<2	56	<10	2.2	96.7	10.7	1.1	0.87	0.23	0.01

Para eliminar el efecto del azufre, se desarrollo de manera exitosa pruebas de flotación bajando el contenido de S a niveles del 0.5%, sumando a efecto alcalino de la geopolimerización la formación de drenajes ácidos se elimina, mientras que el contenido de cromo se espera que pueda ser encapsulado en la estructura del geopolímero, las pruebas de microscopía y microscopía electrónica de estos geopolímeros actualmente se encuentran en proceso.

D. Análisis XRF y XRD

Los resultados del análisis de XRF y XRD de la muestra del relave minero se presentan en la Tabla 2 y la Fig. 7, respectivamente. Esta técnica analítica permite la determinación de la composición mineralógica y estructural de la muestra, proporcionando información sobre las propiedades físicas y químicas del material.

Los resultados muestran que el relave de mina está compuesto predominantemente por cuarzo, con concentraciones variables de otros minerales como moscovita. Las fases minerales identificadas en la muestra son de particular interés debido a los compuestos de aluminosilicatos para la fabricación de cemento geopolimérico a partir de las colas. El análisis XRF y XRD de la muestra de cola de mina proporciona información valiosa que se puede utilizar para optimizar las estrategias de procesamiento y mejorar las prácticas de gestión de colas. La precisión y precisión de los resultados analíticos garantizan que los datos obtenidos puedan ser confiables para la toma de decisiones.

Tabla 2. – Composición mineral de la muestra R5*.

Crystalline phase	Formula	Concentration (W%)
Quartz	SiO ₂	81
Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₁)(OH) ₂	2.7
Wollastonite	CaSiO ₃	1.5
Caolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1
Hematite	Fe ₂ O ₃	0.7
Rutile	TiO ₂	0.4
Trace elements	Amorphous	12.7

*Los análisis fueron llevados a cabo por el Centro de Caracterización Mineral (CAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CAM).

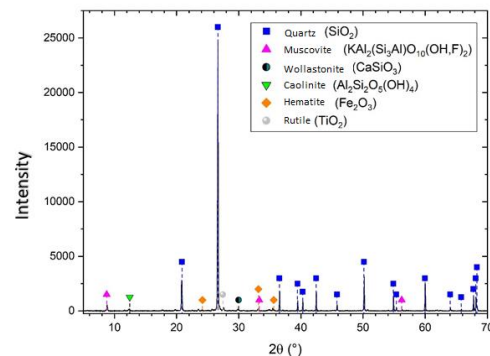


Fig. 7 XRD de la muestra R5 (espectro obtenido del CAM-PUCP)

E. Análisis ácido-base (ABA)

Los resultados del test ABA mostraron que cuatro de los relaves son potencialmente generadoras de ácido. En este sentido, es esencial encapsular las colas para evitar la posterior generación de una DAM. Solo la muestra N°4 no parece ser un potencial generador de acidez. Ver la Fig. 8



Fig. 8 Preparando las pruebas de acidez

F. Análisis de compresión simple

Los resultados de la prueba de resistencia simple de los 15 especímenes geopolímeros han sido recopilados y analizados (Tabla 3). La prueba se realizó utilizando la norma ASTM C109 [35], que mide la resistencia a la compresión de los cementos hidráulicos endurecidos.

Los resultados indican que la resistencia a la compresión de las muestras de geopolímeros varió entre 2 MPa y 8 MPa. La mayor resistencia se logró en las muestras con una relación Si/Al de 3 y una relación Si/Na de 2, mientras que la menor resistencia se observó en las muestras con una relación Si/Al de 3 y una relación Si/Na de 0.5.

Estos hallazgos sugieren que las relaciones Si/Al y Si/Na desempeñan un papel crítico en la determinación de la resistencia del geopolímero. La relación óptima para lograr la mayor resistencia en el geopolímero se encontró que era una relación Si/Al de 3 y una relación Si/Na de 2, con una resistencia valorada de 7,3 MPa.

En general, los resultados de las pruebas de resistencia simple de las muestras geopoliméricas demuestran el potencial de utilizar los relaves mineros para crear una alternativa fuerte y amigable con el medio ambiente en comparación al cemento tradicional. Estos hallazgos pueden incentivar investigaciones y desarrollos futuros en el campo de la síntesis geopolimérica

y abrir el camino para prácticas de construcción más sostenibles.

Table 3.- Resultados de pruebas geomecánicas de la muestra geopolimerizadas R5.

N°	Cod	Simple Compressive strength (Mpa)
1	R5-R1	6.40
2	R5-R2	3.87
3	R5-R3	5.19
4	R5-R4	5.23
5	R5-R5	4.06
6	R5-R6	2.00
7	R5-R7	2.50
8	R5-R8	4.94
9	R5-R9	7.29

G. Análisis radiométricos

Los resultados de análisis radiométrico son mostrados en la Tabla 4.

Table 4.- Concentración de actividad ($Bq.Kg^{-1}$) de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K en las muestras de relave.

Sample	AC_{40K}	AC_{226Ra}	AC_{232Th}
R1	182.6 ± 8.7	BDL*	BDL*
R2	229.2 ± 10.9	BDL*	BDL*
R3	460.5 ± 21.8	9.1 ± 0.5	5.5 ± 0.3
R4	770.8 ± 36.6	15.4 ± 0.8	8.9 ± 0.4
R5	752.4 ± 35.7	9.9 ± 0.5	11.9 ± 0.6

BDL: Below detection limit

IV. CONCLUSIONES

Es base a los resultados obtenidos se conoce la información química, mineralógica y física de las muestras de relaves mineros. Las muestras de relaves son en su mayoría potencialmente generadoras de drenaje ácido de mina (AMD). La prueba de las muestras geopolimerizadas está en curso. Los resultados radiométricos muestran que presentan diferentes valores de actividad de radón y torio. La geopolimerización de los relaves ha permitido reutilizar estas muestras como materia prima para la fabricación de ladrillos geopolímeros, con una resistencia a la compresión máxima 7.29 MPa. Estos resultados nos han demostrado que el cemento geopolimérico hecho de relaves puede ser utilizado como un buen material para infraestructuras con muchas ventajas sobre el cemento convencional, tales como resistencia mecánica, bajos niveles de concentración de actividad de isótopos radiactivos y una baja tasa de exhalación de radón, con bajo grado de contaminación por radiación.

En base a la resistencia a la compresión obtenida, la aplicación apropiada para la fabricación de ladrillos cocidos a baja temperatura, según las normas peruanas la resistencia de un ladrillo debe ser 4.9, 6.9 para ladrillos tipo I y II respectivamente [36].

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido financiado por la Pontificia Universidad Católica del Perú de los proyectos que realiza anualmente (código: CAP 2021-E-0015/PI 00752).

REFERENCIAS

- [1] Nikvar-Hassani, A., Vashaghian, H., Hodges, R., Zhang, L. (2022) Production of green bricks from low-reactive copper mine tailings: Chemical and mechanical aspects. *Construction and Building Materials*, 324, 126695, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126695
- [2] Rafaldi, M. J., Seymour, J. B., Richardson, J., Zahl, E., Board, M. (2019) Cemented Paste Backfill Geomechanics at a Narrow-Vein Underhand Cut-and-Fill Mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 4925–4940
- [3] Hefni, M., Hassani, F. (2020) Experimental Development of a Novel Mine Backfill Material: Foam Mine Fill. *Minerals*, 10, 564. doi:10.3390/min10060564
- [4] Driussi, C., Jansz, J. (2006) Technological options for waste minimisation in the mining industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(8), 682–688. doi:10.1016/j.jclepro.2004.01.013
- [5] Rajdeep, D., Ipseet, C. (2013) Waste management in mining industry. *Indian Journal of Scientific Research*, 4 (2), 139-142. ISSN: 2250-0138
- [6] Nunar, N., Gautam, A. K. (2019) Brick Making From Over Burden Dump, a Mine Waste. *International Journal of Scientific Development and Research*, 4(8), 269-277. ISSN: 2455-2631
- [7] Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., Artem Golev, A. (2019) Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. *Minerals*, 9, 286. doi:10.3390/min9050286
- [8] Lam, E. J., Zetola, V., Ramírez, Y., Montofré, I. L., Pereira, F. (2020) Making Paving Stones from Copper Mine Tailings as Aggregates. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 2448. doi:10.3390/ijerph17072448
- [9] Wang, W., Gan, Y., Kang, X. (2021) Synthesis and characterization of sustainable eco-friendly unburned bricks from slate tailings. *Journal of Materials Research and Technology*, 14 (2021) 1697-1708. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.071>
- [10] Méndez, D., Guzmán-Martínez, F., Acosta, M., Collahuazo, L., Ibarra, D.; Lalangui, L., Jiménez-Oyola, S. (2022) Use of Tailings as a Substitute for Sand in Concrete Blocks Production: Gravimetric Mining Wastes as a Case Study. *Sustainability*, 14, 16285. <https://doi.org/10.3390/su142316285>
- [11] Thejas, H.K.; Hossiney, N. (2022) A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in development of sustainable eco-friendly bricks. *Materialstoday Proceedings*, 61(2), 327-331. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.522>
- [12] Veiga, F., Chambart, H., Vandemeulebroeke, L., Nielsen, P., Adrianto, L. R., Pfister, S., Cappuyns, V. (2022) Mine waste as a sustainable resource for facing bricks. *Journal of Cleaner Production*, 368,133118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133118>
- [13] Ahmari, S., Zhang, L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailing through geopolymerization. *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 323-331, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.048>
- [14] Gitari, M. W., Akinyemi, S.A., Thobakgale, R., Ngoejana, P.C., Ramugondo, L., Matidza, M., Mhlongo, S.E., Dacosta, F.A., Nemapate, N. (2018) Physicochemical and Mineralogical Characterization of Musina Mine Copper and New Union Gold Mine Tailings: Implications for Fabrication of Beneficial Geopolymeric Construction Materials. *Journal of African Earth Sciences*, 137, 218-228. doi:10.1016/j.jafrearsci.2017.10.016
- [15] Roy, S., Adhikari, G. R. (2007) Use of gold mill tailings in making bricks: A feasibility study. *Waste Management & Research*, 25(5), 475-482. DOI:10.1177/0734242X07076944
- [16] Valdez, J., Aguilar, J., Sanchez, L. (2020) Diseño e implementación de un proceso alternativo para la fabricación de ladrillos a partir de relaves mineros de Oro. *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.* 28 (2), 268-276. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200268>
- [17] Benahsina, A., Taha, Y., Bouachera, R., Elomari, M., Bennouna, M.A. (2021) Manufacture and Characterization of Fired Bricks from Gold Mine Waste Rocks. *Minerals*, 11, 695. <https://doi.org/10.3390/min11070695>
- [18] Wei, Z., Zhao, J., Wang, W., Yang, Y., Zhuang, S., Lu, T., Hou, Z. (2021) Utilizing gold mine tailings to produce sintered bricks. *Construction and Building Materials*, 282, 122655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122655>
- [19] Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., Habibi, D. (2016) Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30 (2), 1-24, <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.993834>
- [20] Kumar, R., Das, P., Beulah, M., Arjun, H.R. (2020) Geopolymer Bricks Using Iron Ore Tailings, Slag Sand, Ground Granular Blast Furnace Slag and Fly Ash. in: Alshaaer, M., Jeon, H. Y. (Eds.), *Geopolymers and Other Geosynthetics*. IntechOpen, London. DOI: 10.5772/intechopen.81748
- [21] Beulah, M., Sudhir, M. R., Mohan, M. K., Gayathri, G., Jain, D. (2021) Mine Waste-Based Next Generation Bricks: A Case Study of Iron Ore Tailings, Red Mud and GGBS Utilization in Bricks. *Advances in Materials Science and Engineering*, 9499613, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/9499613>
- [22] Zhang, N., Tang, B., Liu, X. (2021) Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. *Construction and Building Materials*, 288, 123022, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123022>
- [23] Thejas H.K., Hossiney, N. (2022) Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00973. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00973>
- [24] Zhao, Y., Zang, L., Li, Z., Qin, J. (2012) Discussion on the Model of Mining Circular Economy. *Energy Procedia*, 16, 438-443. doi:10.1016/j.egypro.2012.01.071
- [25] Lèbre, L., Corder, G., Golev, A. (2017) The Role of the Mining Industry in a Circular Economy: A Framework for Resource Management at the Mine Site Level. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 662-672. <https://doi.org/10.1111/jiec.12596>
- [26] Pinchuk, A., Tkalenko, N., Marhasova, V. (2019) Implementation of Circular Economy Elements in the Mining Regions. *IVth International Innovative Mining Symposium*. 105, 04048. Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910504048>
- [27] Zamora, G., Hinojosa, O. (2019) Economía circular en minería – caso de estudio: producción minera de concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 4(1), 3-17. ISSN 2519-5352
- [28] Gedam, V. V., Raut, R. D., Lopes de Sousa, A. B., Agrawal, N. (2021) Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. *Resources Policy*, 74, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102279>
- [29] Upadhyay, A., Laing, T., Kumar, V., Dora, M. (2021) Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. *Resources Policy*, 72, 102037. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102037>
- [30] Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P., Mäkinen, J. (2022) A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>
- [31] Cook, E.M., DuMont, D. (1991) *Process Drying Practice*, McGraw-Hill, New York

- [32] Skousen, J., Simmons, J., McDonald, L.M., Ziemkiewicz, P. (2002) Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines. *J Environ Qual.* 31(6), 2034-44. doi: 10.2134/jeq2002.2034. PMID: 12469854
- [33] Gilmore, G. (2008). Practical gamma-ray spectroscopy. John Wiley & Sons
- [34] ASTM. (2020) Standard Practice for the Rapid Assessment of Gamma-ray Emitting Radionuclides in Environmental Media by Gamma Spectrometry. D7784 – 20
- [35] ASTM. (2002) Standard Method of Compression Testing 2-inch concrete cubes. C109.
- [36] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2006). Norma Técnica E.070 Albañilería. Consultado 2022.09.04 <https://drive.google.com/file/d/15N2ZQwZGegdoui4rrjTR6uq5bITu7uyv/view?usp=sharing>