

Antony Aguedo¹, Julio Guizado² y Máximo Simon³

¹ Compañía minera Poderosa, Lima, Lima, Perú (aaguedo@poderosa.com.pe)

² Compañía minera Poderosa, Lima, Lima, Perú (jguizado@poderosa.com.pe)

³ Compañía minera Poderosa, Lima, Lima, Perú (msimon@poderosa.com.pe)

RESUMEN

La industria minera genera al día millones de toneladas de relaves al día producto de sus operaciones, las cuales son depositadas en presas de relave de grandes dimensiones. En consecuencia, la gestión eficiente de estos residuos para la mitigación de impactos en el ambiente, así como también la sostenibilidad de las operaciones se ha convertido en un gran reto de la minería actualmente. En ese sentido, mediante un enfoque de economía circular, el presente documento detalla la evaluación técnica realizada a los relaves auríferos de poderosa para su aprovechamiento como materiales de construcción prefabricados (ladrillos) mediante la generación de redes geopoliméricas. La resistencia a la compresión alcanzada de la mezcla óptima fue de alrededor de los 20 MPa a temperaturas de fraguado menores a los 100° C en menos de 4 días. Esta resistencia obtenida cumple con la normativa peruana de albañilería superiores a los ladrillos tipo IV y V. Estos resultados indican la viabilidad técnica del relave para uso

1. Introducción

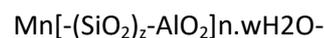
Los geopolímeros han cobrado importancia en los últimos años debido a su capacidad de resistencia a la compresión que puede alcanzar en tiempos de fraguado cortos, así como también, su baja permeabilidad, buena resistencia química y excelente resistencia al fuego. Por otro lado, la necesidad actual de la industria minera para tener una minería sostenible con enfoque de economía circular implica una gestión adecuada de los relaves. En ese sentido, el presente artículo evalúa la viabilidad técnica del aprovechamiento de relaves auríferos como materiales de construcción prefabricados mediante geopolímeros. En ese sentido se han planteado los siguientes objetivos.

- Caracterizar geotécnica, mineralógica y químicamente el relave

- Determinar la viabilidad del relave para el proceso de geopolimerización
- Optimización de la mezcla geopolimérica para obtener resistencias a la compresión altas con el menor consumo energético

2. Marco teórico

El término geopolímero se introdujo por primera vez a partir de las investigaciones del profesor Davidovits (Davidovits,1991) sobre los materiales sólidos cimentados generados por la reacción química entre aluminosilicatos y solución alcalina (Davidovits,2005). La reacción geopolimérica tridimensional tiene como fórmula empírica general la que se muestra a continuación



Donde M es un catión (K,Na,Ca) y n es el grado de policondensación y z es ≥ 1 . Estas estructuras se denominan polisialatos, donde el sialato representa la unidad mínima de construcción del silicoxoaluminato. La red de sialato consta de tetraedros de SiO₄ y AlO₄ unidos compartiendo todos los átomos de oxígeno. Los iones positivos (Na⁺,K⁺,Ca²⁺,etc) deben estar presentes para equilibrar la carga negativa del Al en una coordinación cuádruple. Las cadenas y los anillos se pueden formar y reticular entre sí, siempre a través de un puente Si-O-Al de sialato (Davidovits,2005). Las estructuras tridimensionales de los geopolímeros se muestran en la figura siguiente.

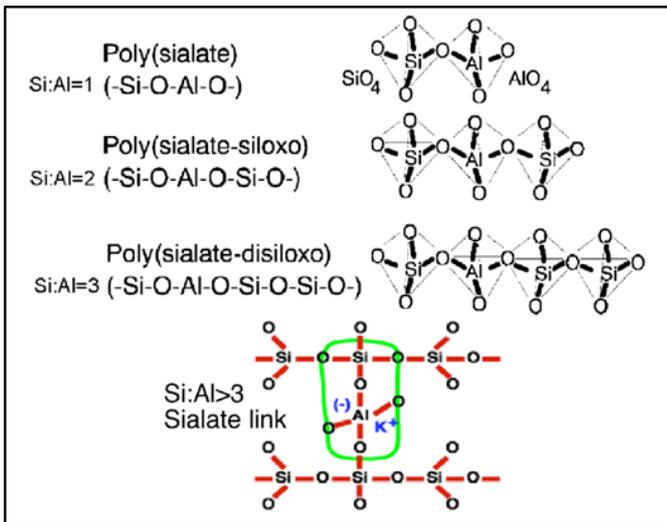


Figura 1: Estructuras geopoliméricas típicas (Davidovits,2005)

El tipo de geopolímero en base de relaves (Davidovits,2013) acorde a las investigaciones del Dr Davidovits debería contener Metacaolinita calcinada a 750°C, escoria de alto horno, tufos volcánicos y solución alcalina. Sin embargo, en esta investigación no se utiliza escoria ni tufos dado al costo que pueda generar conseguir este material, además de maximizar el uso de relave.

3. Antecedentes

Respecto a la aplicación de la tecnología de los geopolímeros para el aprovechamiento de relaves mineros existen varias investigaciones (Zhang,2020) (Zhang,2021) tales como las que se describen a continuación a manera de ejemplo.

El Dr Ahmari (Ahmari,2012), en el 2012, utilizó relaves cupríferos para su evaluación como material de construcción. En esta investigación se obtienen resistencias a la compresión entre los 5 Mpa a 35 Mpa utilizando como activador al NaOH en 7 días de fraguado a temperaturas que iban desde los 60° a 90°C

El Dr Davidovits (Davidovits,2020) , en el 2020, publicó sus resultados sobre la influencia de los minerales férricos en la resistencia a la compresión de los geopolímeros. Los resultados indicaron resistencia entre 30 a 40 Mpa a los 7 días de fraguado y a 75 a 90 Mpa a los 28 días de fraguado. Cabe mencionar que la temperatura de fraguado fue al ambiente, en un promedio de 20°C

4. Metodología

4.1. Caracterización de relaves

En esta etapa se realizaron caracterizaciones geotécnicas, mineralógicas y químicas para garantizar que el relave sea rico en aluminosilicatos para su posible geopolimerización exitosa. Para la caracterización geotécnica se realizaron ensayos granulométricos y de propiedades índice acorde a las normas ASTM. La composición mineralógica del relave se realizó mediante ensayos XRD. La caracterización química se realizó mediante la medición de pH.

4.2. Evaluación y selección de la solución activadora

En esta etapa se evaluaron 3 posibles soluciones activadoras a utilizarse en la producción de geopolímeros a partir de relaves: NaOH, CaO y Silicato de sodio.

Se registró el pH cada 4, 8 y 24 hrs de la mezcla de relave (10 g), agua (100 g) con cada uno de los activadores anteriormente mencionados en vaso de precipitados individuales con cantidades de varían entre el 1 g a 6 g. Esto con el fin de determinar la proporción mínima de activador- relave a utilizar para detener las condiciones de pH adecuadas para obtener geopolímeros (>12)

4.3. Generación y optimización de la mezcla geopolimérica

En esta etapa se realizan ensayos de compresión simple (UCS) a los bloques de ladrillo generados variando los parámetros de proporciones entre relave, activador(es), agua, temperatura y días de fraguado

5. Resultados y discusión

Acorde a la metodología detallada anteriormente se muestran a continuación los resultados obtenidos

5.1. Caracterización de relaves

En las tablas siguientes se muestran las caracterizaciones geotécnicas, mineralógicas y químicas de relave

Tabla 1: Caracterización geotécnica

Gravedad Específica (g/cm ³)	2.7
Límite Líquido (%)	26
Límite Plástico (%)	20
Índice de Plasticidad (%)	6
D ₁₀ (µm)	0.006
D ₃₀ (µm)	0.026

D50 (um)	53.67
D60 (um)	64.89
Pasante malla #200 (%)	68
Contenido óptimo de humedad (%)	10.7
Peso unitario máximo (g/cm ³)	1.926

Tabla 2: Caracterización mineralógica

Mineral	Porcentaje (%)
Cuarzo	60
Mica	16
Pirita	8
Plagioclasa	3
Clorita	3
Calcita	3
Arsenopirita	2
Dolomita	<L.D
Anfibol	<L.D
Esfalerita	<L.D
Rutilo	<L.D
Galena	<L.D

Tabla 3: Caracterización química

Ph	8.04
----	------

De las Tabla 1 se observa que el relave es ligero y con una cantidad de finos altos por lo que no es necesario realizar un proceso de chancado adicional. Además, los valores del límite líquido y plástico nos dan valores referenciales de la humedad a trabajar en la mezcla geopolimérica para tener una mezcla pastosa

De la Tabla 2 se observa una buena proporción de aluminio y silicio presentes en los minerales de cuarzo, mica, plagioclasa y clorita por lo que no será necesario utilizar materiales externos para ser aptos para el proceso de geopolimerización

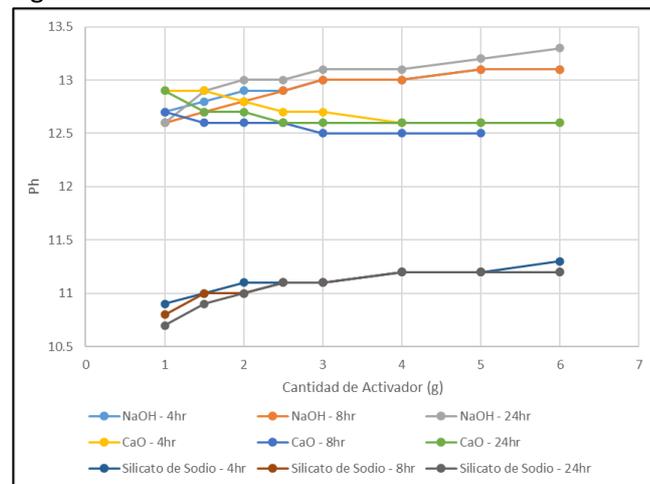
De la Tabla 3 se observa que el activador a utilizar debe elevar como mínimo en 4 unidades el ph para tener un medio en las condiciones mínimas para llevar a cabo el proceso.

5.2. Evaluación y selección de la solución activadora

En la Figura 2 se observa que el NaOH y el CaO en cualquier proporción con el relave supera el valor de ph mínimo de 12, mientras que el silicato de sodio no llega a este valor, y en todo caso se realizara una extrapolación lineal la cantidad a utilizar de silicato sería alto. En ese sentido, se seleccionaron como activadores principales el NaOH y CaO, mientras que

como activador secundario el silicato de sodio. Esto con el fin de reducir el consumo de los activadores primarios debido a su costo.

Figura 2: Evaluación de activador



5.3. Generación y optimización de la mezcla geopolimérica

En el proceso de optimización de la mezcla se descartó las mezclas de CaO como activador primario debido a que los valores de resistencia a la compresión obtenidos eran menores a los que se alcanzaba con el NaOH.

Posteriormente, En la Tabla 4 se muestran las proporciones en peso de la mezcla optima obtenida con NaOH como activador primario obteniendo una resistencia a la compresión de 19.75 Mpa . Por otro lado, es importante mencionar que en el proceso de optimización se realizaron 94 ensayos a la compresión simple ya sea individuales y por duplicado, esto con el fin de corroborar que estas resistencias no tienen variaciones altas para una posible estandarización y escalamiento del proceso a gran escala.

Tabla 4: Mezcla optima geopolimérica

Relave	6.7
NaOH	1
Silicato de sodio	1
Agua	1.3
Temperatura/Días	60°C/1
Temperatura/Días	90°C/3

La resistencia obtenida, acorde a la norma técnica peruana de albañilería (MVCS,sf), es superior a los ladrillos tipo IV (12.7 MPa) y tipo 5 (17.6 MPa) por lo que los ladrillos que se generen a partir de este proceso podrían ser utilizados para construcciones civiles

En las Figuras 3 y 4 se muestran a manera de ejemplo los moldes realizados, así como los bloques antes y después de la rotura

Figura 3: Elaboración de muestras



Figura 4: Elaboración de muestras



Antes de rotura



Después de rotura

N. Conclusiones

El relave aurífero utilizado tiene las características geotécnicas, mineralógicas y químicas necesarias para poder realizar el proceso de geopolimerización.

La mezcla óptima de mezcla geopolimérica dio una resistencia a la compresión de 19.75 MPa teniendo como activador principal el NaOH y como activador secundario el silicato de sodio, por lo que el uso de CaO en este tipo de relaves no es recomendado. Además, de que este producto puede ser utilizado para obras civiles y mineras.

El tiempo de fraguado a temperaturas por debajo de los 100°C resulta en unas emisiones de CO₂ menores a los de un ladrillo convencionales (Davidovits,sf) los cuales deberían ser cuantificados para evaluar el impacto de materiales de construcción más amigables con el ambiente.

Al término de este informe se vienen realizando ensayos de lixiviación tales como el test ABA y TCLP

para garantizar la estabilidad química de nuestros bloques de ladrillos

Agradecimientos

Agradecer a Compañía minera Poderosa y a Ingeniero Diego Sologuren por confiar en el equipo de trabajo y apostar por la innovación minera cero desechos

Referencias

- Ahmari,S .2012.Recycling and reuse of wastes as construction material through geopolymerization.The University of Arizona
- Davidovits,J. 1991. Geopolymers inorganic polymeric new materials
- Davidovits, J. 2005. Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the world congress. Geopolymer Institute
- Davidovits, J. 2003. Geopolymer cement a review 2013
- Davidovits, J. 2020. Ferro-sialate Geopolymers (-Fe-O-Si- O-Al-O-)
- Davidovits, J. (s.f). Geopolymer cement to Minimize carbon dioxide greenhouse warming in cement based materials. Present Future and Environmental Aspects.
- Davidovits, J. (s.f). Geopolymer Chemistry and Applications
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (s.f). Norma Técnica E.070 Albañilería
- Zhang, N. 2020. Damage evaluations and deformation behavior of mine tailing based geopolymer under uniaxial cyclic compression.Elsevier
- Zhang, N. 2021. Specimen size effects on the mechanical behaviours and failure patterns of mine tailings based geopolymer under uniaxial compression.Elsevier

Perfil profesional

Bsc en ingeniería de minas de la PUCP con experiencia en el área de geotecnia de casi 2 años. Pre-docente del curso de resistencia de materiales para minería. Estudiante de maestría en "Regulación, Gestión y Economía minera" en la PUCP

Antony Aguedo Asencios
Ingeniero en entrenamiento
Cia Poderosa
aaguedo@poderosa.com.pe
968789530
Huaraz, Perú

Perfil profesional

Ingeniero Metalurgista egresado de la universidad Nacional de ingeniería, titulado y colegiado con

estudio de maestría en geometalurgia, con más de 20 años de experiencia en el tratamiento de minerales auríferos, fundición de Au y Ag e investigaciones metalúrgicas.

Cargo actual: jefe de investigaciones metalúrgicas de compañía Minera Poderosa s.a.

Algunos trabajos de investigación desarrollados.

- ✓ Uso de reactivos alternativos al cianuro para la recuperación del Au y Ag
- ✓ Uso del relave como materia prima para aplicaciones para la construcción.
- ✓ Recuperación de Au y Ag de minerales refractarios.
- ✓ Incremento de la recuperación de Au y Ag en minerales con contenido de arcillas
- ✓ Uso de medios molidores de alto cromo con el objetivo de incrementar la recuperación de Au y Ag

Julio Guizado

Jefe de investigaciones metalúrgicas

Cia Poderosa

jguizado@poderosa.com.pe

987203038

Lima, Perú

Ingeniero Metalurgista egresado de la universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, titulado y colegiado, con más de 40 años de experiencia en el tratamiento de minerales auríferos, fundición y refinería de Au y Ag

Cargo actual: Superintendente de planta en compañía Minera poderosa s.a.

Algunos trabajos de investigación desarrollados.

- ✓ Refinería química de Au y Ag
- ✓ Ampliaciones de planta de procesamiento de minerales.
- ✓ Fundición de precipitados de Au y Ag

Máximo Simón

Superintendente de planta

Cia Poderosa

msimon@poderosa.com.pe

993522524

Lima, Perú