

|

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería de Minas

“RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS ADICIONADOS CON MINERALES DE BAJA LEY Y SU APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS EN MINERÍA”

Tesis para optar el título profesional de:
Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. LUIS JAVIER JIMENEZ LOAYZA

Asesor:

Ing. Mg. JESÚS GABRIEL VILCA PEREZ

Trujillo - Perú

2021

DEDICATORIA

En primer lugar, le dedico este trabajo a Dios por ser mi guía espiritual que me conduce siempre hacia el camino del bien y el éxito. Y por darme felicidad de tener a mi familia con mucha salud. Al igual que todas esas personas que me apoyaron y confiaron en mí.

A mi amada familia esposa e hijas, quienes a lo largo de esta etapa de mi vida se han preocupado por mi bienestar y salud, siendo mi apoyo en todo momento depositando su confianza en cada reto y dificultad que se presentó sin dudar un solo momento en mi inteligencia y capacidad.

A la universidad Privada del Norte en cuyas aulas logre mi formación profesional y humana.

A la facultad de ingeniería y a su personal docente por su calidad educativa y profesional que guiaron mi aprendizaje.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener tan buena salud en este año difícil. Gracias a la universidad y docentes que hizo parte de este proceso integral de formación, que deja este grupo de graduados y por permitirme en ser un profesional en lo que tanto me apasiona, quedara como recuerdo y prueba viviente en la historia; esta tesis que perdurara dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que está por llegar a los nuevos futuros e ingenieros del (BICENTENARIO).

Finalmente agradezco a quien lee este apartado y más de mi tesis, por permitir a mis experiencias, investigaciones y conocimiento incurrir dentro de su repertorio de información mental y excelente liderazgo profesional

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO II. MÉTODO.....	42
2.1. Tipo de investigación	42
2.2. Población y muestra.....	42
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	44
2.4. Procedimiento	46
CAPÍTULO III. RESULTADOS	53
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS	79
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Contaminantes y Problemas Médicos Asociados según tipo de Mina.....	23
Tabla 2	Dosificación de mortero de cemento y arena.....	30
Tabla 3	Los principales compuestos que constituyen aproximadamente el 90 al 95 % del cemento.....	32
Tabla 4.	Diseño Unifactorial.....	44
Tabla 5.	Diseño de la matriz experimental para el ensayo de compresión.....	45
Tabla 6	Especificaciones del hidróxido de sodio.....	48
Tabla 7	Diseño de mezcla para los morteros con adición de óxidos minerales.....	49
Tabla 8	Valores de resistencia a la compresión promedio.....	53
Tabla 9	Análisis de costos.....	57
Tabla 10	Cuadro comparativo de muestras.....	71
Tabla 11	Costo de operación de la propuesta de aplicación del método de relleno con morteros de cemento adicionados con una reserva de 5 millones (5 000 000) de minerales oxidados de baja ley para mejorar la confiabilidad del sostenimiento.....	73
Tabla 12	Beneficio de aplicación del relleno con mortero de cementos adicionando con una reserva de 5 millones (5 000 000) de minerales oxidados de baja ley.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Inversión de nuevos proyectos mineros en el Perú. (MINEM, 2019).....	15
Figura 2. Principales minerales metálicos. (aula2005, 2009).....	17
Figura 3. Minerales no metálicos. (aula2005, 2009)	20
Figura 4. Etapas de la actividad minera. (Osinermin, 2009)	21
Figura 5. Etapas en la actividad minera por producto metálico. (Osinermin, 2009).....	22
Figura 6. Marco legal e institucional del sector minero en el Perú, 1991-2017. (Osinermin, 2017).....	25
Figura 7. Residuos de minerales oxidados de baja ley. (fueyoeditores, 2018).....	25
Figura 8. Reacciones involucradas durante el proceso de endurecimiento del cemento. (Zeitung, 1972)	33
Figura 9. Representación esquemática de la formación de geopolimeros. (Singh & Middendorf, 2019)	36
Figura 10. Ilustración esquemática del proceso de geopolimerización: (a) reorganización de aluminosilicato, (b) formación de gel a partir de la condensación de oligómeros, y (c) polimerización. (Singh & Middendorf, 2019)	37
Figura 11. Modelo de simulación de dinámica molecular para geopolymerization. (Singh & Middendorf, 2019)	37
Figura 12. Clasificación de los materiales activados alcalinamente, con comparaciones entre el OPC y los sulfoaluminatos cálcicos. El sombreado indica el contenido en álcalis aproximado, en donde, el sombreado más oscuro corresponde a mayores concentraciones de Na/K. (Torres-Carrasco & Puertas, 2017)	39
Figura 13. Esquema máquina para ensayo de resistencia a la compresión.	39
Figura 14. Dimensiones de las probetas cúbicas.	43
Figura 15. Molienda del mineral rico en oxido de baja ley	46
Figura 16. Arena Gruesa.....	47
Figura 17. Curado de los morteros en el horno tipo mufla.....	51
Figura 18. Ensayo de resistencia a la compresión.	52
Figura 19. Resistencia a la compresión de los morteros.....	54

RESUMEN

Se realiza la investigación con el objetivo de evaluar la resistencia a la compresión de morteros adicionados con minerales de baja ley y su aplicación en estructuras en minería, para lo cual se caracteriza químicamente minerales oxidados de baja ley mediante métodos volumétricos, así como el diseño de mezcla para morteros de cementos adicionados con minerales oxidados de baja ley mediante la aplicación norma ASTM C109 para finalmente evaluar la factibilidad para el uso de minerales oxidados de baja ley en reforzamiento de estructuras de construcciones en minería. Se aplicó un tipo de investigación Explicativa – Experimental, con una población definida por los morteros modificados añadido con minerales de baja ley, ricos en óxidos, cemento portland, arena fina y agua local. Y con una muestra según la norma ASTM C109 con 30 probetas cubicas de mortero para los ensayos de dimensiones de 5 cm x 5 cm x 5 cm. En el diseño experimental se utilizó el tipo unifactorial, considerando el Factor A, al porcentaje de adición de mineral de óxidos de baja ley, con los niveles o tratamientos de estudio a1: 5 %; a2: 10%; a3: 15%; a4: 20% y la variable dependiente fue la resistencia a la compresión (MPa). Los resultados evidencian que los morteros presentaron mejoras en su resistencia a la compresión, para la adición del 15% de mineral oxidado, y hasta con una adición de 20%, lo que implicaría que estos minerales estériles, que son una problemática, debido a su almacenamiento y/o espacio para su disponibilidad, tiene el potencial para ser incorporado en morteros, con el único proceso de su molienda y tamizado aplicados no solo en morteros si no también en la construcción de la hermétizacion de la presa de relave ahorrando en transporte para su disposición final. Por lo tanto, se concluye que los valores de resistencia a la compresión representan un incremento de la resistencia a la compresión respecto al mortero patrón del 17.40%, 33.64%, 46.85% y 5.36%, para los morteros MO-5, MO- 10, MO- 15 y MO- 20 respectivamente..

Palabras clave: Resistencia, compresión, morteros, minerales

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras generan grandes cantidades de residuos sólidos de baja ley, residuos que no tienen suficiente ley ni otras características de mineral a minarse económicamente, de los cuales los más importantes en términos de volumen son los estériles y desechos. Otros residuos sólidos en la industria minera son resultantes de pérdidas del proceso (como los productos de derrames en las usinas de beneficiamiento), residuos de baja ley de las etapas posteriores al procesamiento de los minerales tales como escorias de fundición y el fosfoyeso resultante de la fabricación de ácido fosfórico, embalajes de diversos tipos, chatarras, basura de oficinas, laboratorios y talleres, basura doméstica proveniente de comedores y alojamientos o villas residenciales, y otros tipos de residuos diferentes, desde tubos fluorescentes hasta escombros de construcción. (Sánchez, 1995).

Sin embargo, estos desarrollos en la minería han traído varios resultados que pueden tener efectos negativos en la calidad del medio ambiente a su paso. Los relaves, productos que finalizan el proceso de extracción, son residuos de baja ley, residuos que no tienen suficiente ley ni otras características de mineral a minarse económicamente, y representan un gran riesgo para las plantas, los animales y la vida humana. La estabilización física de los relaves y otros desechos industriales se está convirtiendo en una necesidad ambiental, social y política.

Los relaves de la mina de oro se almacenan en la presa de relaves, pero las cantidades de relaves aumentaron año tras año con el desarrollo de la extracción de oro. Esta situación causa contaminación ambiental. Por lo tanto, el uso de relaves de minas de oro como recursos es tan importante para prevenir la contaminación ambiental. Obviamente, se ve que es necesaria una tecnología que pueda manejar o reciclar una gran cantidad de relaves de manera fácil y económica. Debido a su alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2), los

desechos de la mina de oro de baja ley pueden usarse como fuente de SiO₂ en la producción de geopolímero (Demir & Moroyodor Derun, 2019).

Los morteros y materiales activados con álcalis, también llamados geopolímero o polímeros inorgánicos, han atraído recientemente la atención de muchos grupos de investigación. Los geopolímero no solo proporcionan un rendimiento comparable al OPC= (Cemento Portland Ordinario), en muchas aplicaciones, tanto en nuevas estructuras de hormigón armado como en la reparación de edificios existentes, sino que también muestran otras ventajas, como un desarrollo muy rápido de propiedades mecánicas, alto contenido de ácido resistencia, muy buena adherencia a los agregados, inmovilización de materiales tóxicos y peligrosos y reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (Capasso, y otros, 2019).

La producción de geopolímero se basa en la formación de una estructura amorfa o semi-amorfa activando un material que contiene silicato de alúmina en un ambiente alcalino. Aunque el método de agitación convencional se ha utilizado para el geopolímero de síntesis, hay algunos estudios sobre el método de fusión alcalina en los últimos años. Las excelentes propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los morteros y geopolímero atraen una gran atención durante las últimas décadas. Se pueden usar en materiales de construcción resistentes al fuego, cemento anticorrosivo, cemento de alta temperatura, una alternativa al cemento Portland ordinario (OPC).

(Gharzouni, Vida, Essaidi, Joussein, & Rossignol, 2016) Los geopolímero son nuevos aglutinantes que resultan de la activación de una fuente de aluminosilicatos por una solución alcalina. Estos aglutinantes son rentables desde el punto de vista económico y medioambiental, ya que tienen la ventaja de reutilizar los residuos de baja ley y los subproductos industriales como fuentes de aluminosilicatos. En este contexto, este documento se centró en la incorporación de desechos de geopolímero en diferentes

formulaciones y su efecto sobre la formación de geopolímero y las propiedades de los materiales finales.

Se investigaron tres composiciones que diferían en la solución alcalina utilizada y la cantidad de metacaolín añadida. Un estudio de factibilidad permitió retener el 20% a medida que el porcentaje de residuos se agregaba o sustituía al metacaolín para obtener aún materiales de geopolímero. Además, se demostró que la incorporación del desecho de geopolímero puede alterar la velocidad de policondensación que se demostró que depende en gran medida de la relación sólido a líquido y la relación Si / K de la solución alcalina.

Finalmente, se demostraron relaciones entre las resistencias a la compresión y las composiciones químicas de las diferentes muestras. La baja reactividad de los residuos de geopolímero se puede compensar con el uso de una solución alcalina altamente reactiva o el aumento de la cantidad de metacaolín en la mezcla.

(Prasanphan, Wannagon, Kobayashi, & Liemsirilers, 2019) Este artículo estudió los mecanismos de reacción de los geopolímeros a base de desechos que procesan caolín calcinado en presencia de una solución activadora baja en álcali mediante el método de prensado. Los mecanismos de reacción del geopolímero se midieron en función de la concentración de NaOH mediante análisis DSC, XRD y FTIR. Además, se investigaron los efectos de la concentración de NaOH y el tiempo de curado sobre las propiedades mecánicas y la microestructura del geopolímero a base de residuos de procesamiento de caolín calcinado.

Los resultados de DSC, XRD y FTIR indicaron que la reacción de geopolymerización aumentó con mayores concentraciones de NaOH. La formación del geopolímero por el método de prensado condujo a que las partículas estuvieran juntas en una matriz compacta. Posteriormente, sus superficies se disolvieron con solución de NaOH, induciendo la reacción de geopolymerización. Esta reacción y reacción continua dieron como resultado la resistencia

a la compresión y la microestructura del geopolímero. Las resistencias a la compresión del geopolímero sintetizado con una concentración de NaOH de 10 M (tiempo de curado de 7 días) y un tiempo de curado de 28 días fueron 26.98 MPa y 28.55 MPa, respectivamente, que fueron aproximadamente 22.58% y 52.35% mayores en comparación con el geopolímero sintetizado con una concentración de NaOH de 4 M y un tiempo de curado de 1 día. Las micrografías SEM de las muestras de geopolímero mostraron más gel geopolimérico y matrices más densas con aumentos en la concentración de NaOH y el tiempo de curado. La adsorción de nitrógeno y el volumen de poro disminuyeron con los aumentos en la concentración de NaOH y el tiempo de curado. La síntesis de geopolímeros que utilizan residuos de procesamiento de caolín como materia prima es un proceso de valor agregado y amigable con el medio ambiente.

(Schackow, Stringari, Senff, Correia, & Segadães, 2015). En su investigación el efecto del reemplazo de desechos de ladrillo cocido en polvo (CBW) en reemplazo parcial de (10, 25 y 40 % en peso); sobre la durabilidad de los morteros de cemento Portland. Los morteros curados que contienen CBW mostraron una resistencia y densidad mejoradas, como resultado del efecto físico combinado de relleno de poro y agregado puzolánico del CBW. Sin embargo, el mortero libre de CBW exhibió una mayor dispersión y, siendo más poroso, mayor resistencia al sulfato y capacidad para absorber cloruros. Se encontró un rendimiento óptimo para el mortero con 40 % en peso de CBW cuya resistencia a la compresión puede ser hasta un 130% más alta que la del mortero sin CBW.

(Silva, y otros, 2019). En este estudio presentan los análisis de optimización llevados a cabo para determinar las condiciones de producción adecuadas de geopolímeros basados en ladrillo de arcilla cocida (FCB) y Puzolana Natural (NP). Sus resultados indican que se pueden obtener altas resistencias a la compresión de hasta 37 MPa y 26 MPa para geopolímeros basados en FCB y NP, respectivamente. La solución alcalina óptima para FCB

consistió en $M_s = 0.60$, (Relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) contenido de Na_2O del 8%, relación agua / aglutinante = 0.27 con condiciones de curado al horno entre 65 y 80 °C durante 7 días.

Por otro lado, los geopolímeros basados en NP con las propiedades mecánicas más altas se obtuvieron con una solución alcalina compuesta de $M_s = 1.08$, 8% de contenido de Na_2O y 0.52 de relación agua / aglutinante curada en un horno a 65 °C durante 7 días.

(Hwang, et al., 2018) investigó el desarrollo de una pasta activada con álcali de alta resistencia utilizando un alto volumen de residuos de polvo de ladrillo de arcilla roja (WBP) y residuos de polvo de cerámica (WCP) que comprendieron el 60% del material de partida, mezcladas con cenizas volantes (FA) y escoria granulada de alto horno (GGBFS) que comprendieron aproximadamente el 40% del peso total restante. utilizaron solución de silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH) como activador alcalino. Se prepararon muestras de pasta activada con álcali (AAP) y se curaron a temperatura ambiente durante 3, 7, 28 y 56 días. Las muestras endurecidas de AAP obtuvieron resultados de alta resistencia a la compresión medidos en el rango de 36-70 MPa

(Shao, et al., 2019) Se utilizó polvo de ladrillo de arcilla reciclado (CBP) como material cementoso suplementario para reemplazar parcialmente el cemento para preparar morteros de cemento. La resistencia a la compresión del mortero, mostro una disminución significativa. Pero la muestra de contenido en un 20% de CBP, logró la mayor resistencia a la compresión de 62.2 MPa a los 90 días

(Moukannaa, et al., 2019) Investigó la eficiencia del método de fusión alcalina para mejorar la reactividad geopolimérica de los relaves de minas de fosfato. El efecto del contenido de hidróxido de sodio y la temperatura de fusión sobre la composición mineralógica del lodo de fosfato fusionado se evaluó mediante medición de DRX. La microestructura, así como el comportamiento mecánico de los morteros de geopolímero preparados, se investigaron mediante pruebas de resistencia a la compresión y análisis EDS

SEM. Además, se estudió la estabilidad térmica de las muestras midiendo las propiedades mecánicas después de la exposición a varios ciclos de tratamiento térmico a diferentes temperaturas elevadas (350, 500, 650 y 800 ° C).

Los resultados obtenidos mostraron que la estructura del lodo de fosfato experimentó una variación significativa después de la fusión. El tratamiento térmico alcalino condujo principalmente a la descomposición de illita, palygorskita y dolomita, y la formación de fases cristalinas ricas en Na. Se ha demostrado que el contenido de NaOH y la temperatura de fusión son factores esenciales que controlan las transformaciones de la estructura del material y, por lo tanto, el desarrollo de la resistencia del geopolímero. Las condiciones óptimas de fusión se establecieron en 10% en peso de NaOH y una temperatura de 550 ° C, proporcionando morteros de geopolímero con alta resistencia a la compresión (40 MPa).

Describe y explica los elementos metodológicos pertinentes en consistencia al enunciado declarativo o interrogante (pregunta), objetivo e hipótesis (si fuera necesario) de la investigación propuesta.

En una primera parte, se debe exponer el enfoque del estudio (cualitativo/cuantitativo), seguido de la clasificación (tipo de estudio), según un criterio o más en la que se encuentra el estudio (por ejemplo, según el conocimiento perseguido: Básica o Aplicada; según la planificación en las mediciones o recolección de datos: Retrospectivo/Prospectivo; según el número de mediciones en un determinado tiempo: Transversal/Longitudinal; según la intervención del investigador: Observacional/Experimental; etc. Finalmente, deberá declararse el diseño de investigación.

En una segunda parte, deberá identificarse a los participantes (población/Muestra) del estudio; es decir, la unidad de estudio como consecuencia de haber ubicado su población o muestra (se explica el tipo de muestreo), según sea el caso. Luego, brevemente hacer alusión a las Técnicas/instrumentos: Describir la (s) técnica (s) y especificar el (los)

instrumento (s) utilizado (s), señalando si el instrumento es creado o adaptado, además de evidenciar elementos de validez (validez de contenido para el caso de encuestas, por ejemplo) y confiabilidad de este. Se deberá continuar con el detalle de los procedimientos de recolección de datos, señalando y sustentando cómo se desarrolló el proceso mismo. Como consecuencia final, se deberá establecer, según el enfoque declarado si hubo análisis de datos (investigación cualitativa) o análisis estadístico de los datos (investigación cuantitativa).

En párrafo final, se deberá describir las consideraciones éticas que siguió la investigación.

El Perú ocupa lugares importantes en Latinoamérica y el mundo por su producción y potencial minero. En Latinoamérica, ocupa el primer lugar en la producción de zinc, plomo, estaño, plata y oro siendo segundo lugar sólo en la producción de cobre. A nivel mundial ocupa el primer lugar en plata (16.48%), tercer lugar en zinc (12.15%), cobre (6.86%), y estaño; cuarto lugar en plomo (9.52%) y quinto lugar en oro (8.01%).

A lo largo de la historia económica peruana, la minería ha contribuido al crecimiento económico del país y ha sido una fuente importante de ingresos fiscales. No obstante, la generación de conflictos y los impactos ambientales han sido motivo de preocupación dentro de las comunidades campesinas y la sociedad en general. (Osinermin, 2009).

Actualmente el Perú lidera ranking´s importantes respecto a reserva de metales, como indica la figura N°1, esto genera puestos de trabajo y la inyección de dinero al PBI, es por ello que la minería en el Perú es un pilar importante de crecimiento y desarrollo.



01 Perú: posición dentro del ranking mundial de las reservas de metales*



Figura 1. Inversión de nuevos proyectos mineros en el Perú. (MINEM, 2019)
Fuente: MINEM 2019

La Minería peruana se encuentra concentrada en los medianos y grandes productores. Considerando el tamaño de actividad, podemos clasificarla bajo dos criterios: según el tamaño de la concesión (i.e. según el número de hectáreas que poseen) y según la capacidad productiva (i.e. según el número de toneladas métricas que producen por día).

Gran minería. Cuando la actividad se realiza con una capacidad productiva mayor a 5000 TM (según el tamaño de la producción).

Mediana minería. Cuando la actividad se realiza con una capacidad productiva entre 350 y 5000 TM.

Pequeña minería. Cuando la actividad se realiza en un terreno menor a 2000 hectáreas y/o con una capacidad productiva entre 25 y 350 TM.

Minería artesanal. Cuando la actividad se realiza en un terreno menor a 1000 hectáreas y/o con una capacidad productiva menor a 25 TM.

Óxidos minerales

En sentido estricto, se refiere a minerales formados por el enlace entre metales y metaloides con oxígeno. En minería, se utiliza este término para referirse a todos los minerales derivados del proceso de oxidación de un yacimiento, es decir, el ataque del mineral por parte del oxígeno proveniente de la atmósfera bajo la forma de fluidos oxidantes (agua, aire).

Por esta razón, estos minerales se forman cerca de la superficie. Entre los minerales oxidados de cobre u óxidos más comunes se tienen los carbonatos (malaquita y azurita), los sulfatos (brochantita y antlerita), y el oxiclورو (atacamita y el silicato hidratado crisocola). (Ministerio de minería- Chile, 2018)

Comúnmente se dividen en dos tipos: minerales metálicos y no metálicos.

Minerales metálicos

La minería metálica constituye la actividad de extracción para obtener un metal determinado. Los elementos metálicos se clasifican en cuatro tipos:

Básicos: Cobre, plomo, zinc, estaño.

Ferrosos: Hierro, manganeso, molibdeno, cobalto, tungsteno, titanio, cromo.

Preciosos: Oro, plata, platino.

Radioactivos: Plutonio, uranio, radio, torio.

			
Minerales del hierro (Fe): <i>Oligist, magnetita y siderita.</i> El hierro se emplea en la construcción de casas y en la fabricación de máquinas	Minerales del cobre (Cu): <i>Calcopirita, azurita, malaquita,</i> y cobre <i>nativo.</i> El cobre se emplea como conductor de la electricidad; fabricación de calderas, cañerías y monedas; y en recubrimiento de exteriores.	Minerales del plomo (Pb): <i>Galena.</i> El plomo se emplea para fabricar cañerías, como protector enfrente de radiaciones y para producir pigmentos para pinturas	Minerales del cincos (Zn): <i>Blenda.</i> El zinc se emplea para proteger techos y puertas exteriores, y para proteger el hierro (galvanizado)
			
Minerales del aluminio (Al): <i>Bauxita.</i> El aluminio se emplea para hacer automóviles, puertas, ventanas y utensilios de cocina	Minerales del estaño (Sn): <i>Casiterita.</i> El estaño se emplea para proteger el hierro (hojalata)	Minerales del mercurio (Hg): <i>Cinabri.</i> El mercurio se emplea para la fabricación de termómetros y barómetros	Minerales del azufre (S): <i>Pirita y azufre nativo.</i> La pirita, dada su alto porcentaje en azufre, no sirve para obtener hierro sino para fabricar ácido sulfúrico.
			
Minerales del oro (Au): <i>Oro nativo.</i> El oro se emplea en joyería y para fabricar monedas	Minerales de la plata (Ag): <i>Argentita y plata nativa.</i> La plata se emplea en joyería, para hacer monedas y en fotografía.	Minerales del platino (Pt): <i>Platino nativo.</i> El platino se utiliza en joyería y para favorecer reacciones químicas en la industria.	Minerales del carbono (C): <i>Diamante.</i> Dada su dureza se emplea para fabricar brocas, y utensilios para cortar y pulir

Figura 2. Principales minerales metálicos. (aula2005, 2009)

Fuente: Aula 2005

Minerales no metálicos

La minería no metálica comprende la actividad de extracción de recursos minerales que, luego de un tratamiento especial, se transforman en productos que por sus propiedades físicas y/o químicas pueden aplicarse a usos industriales y agrícolas. Por ejemplo, salitre, yodo, yeso, carbonato de litio, potasio, carbonato de calcio, cal, asbesto, arcillas comunes o sulfato de sodio.

Dada la diversidad de productos no metálicos considerados de interés, para efectos de análisis de su comportamiento y en virtud de su importancia económica y características de su mercado, se les clasifica en 4 grupos:

Grupo I

Salitre (Nitrato de Potasio, Nitrato de Sodio y Salitre Potásico)

Yodo (Yodo y sus sales derivadas Yoduros y Yodatos)

Sales de litio (Carbonato y Cloruro)

Boratos (Ulexita y sus derivados Ácido Bórico, Bórax refinado)

Cloruro de sodio

Sales potásicas (Cloruro y Sulfato)

Grupo II

Se caracterizan por su bajo valor unitario y altos volúmenes de producción, preferentemente integrada a una industria consumidora (autoabastecimiento). Por ejemplo, industrias relacionadas a la construcción y cerámicas. Se considera que existe sólo un mercado marginal, aunque creciente, para estos productos.

Se incluyen en este grupo según su orden de importancia:

Carbonato de calcio (Caliza para cemento y cal)

Yeso (Para objetos de yeso y cemento)

Puzolana (Para cemento)

Arcillas (Arcillas comunes y plásticas)

Óxido de hierro (Para cemento y pigmentos)

Pirofilita (Para cerámicas)

Cemento (Se incluye como producto industrial)

Cal (Se incluye como producto industrial)

Grupo III

La nómina de productos de este grupo, en orden de importancia, es:

Fosfatos (Superfosfatos, Fosfatos de amonio, Roca fosfórica, Guano)

Arcillas Caoliníferas (Caolín, Arcillas Refractarias)

Recursos silíceos (Sílice, Cuarzo, Arenas Silíceas)

Sulfato de Sodio

Diatomita

Azufre (Crudo, Sublimado)

Carbonato de calcio (Creta, C.C. Granulado y Precipitado)

Talco

Feldespato

Rocas (Mármol, Granito)

Bentonita (Cálcica y Sódica)

Abrasivos (Piedra pómez, Granate)

Wollastonita

Perlita

Baritina

Sulfato De Aluminio

Cimita

Grupo IV

Los productos de mayor interés, son los siguientes:

Carbonato de Sodio

Magnesio (Dolomita, Magnesita, Magnesita)

Asbesto

Oxido de Aluminio (Alúmina, Bauxita)

Cromita

Grafito Natural

Andalusita

Fluorita

Mica

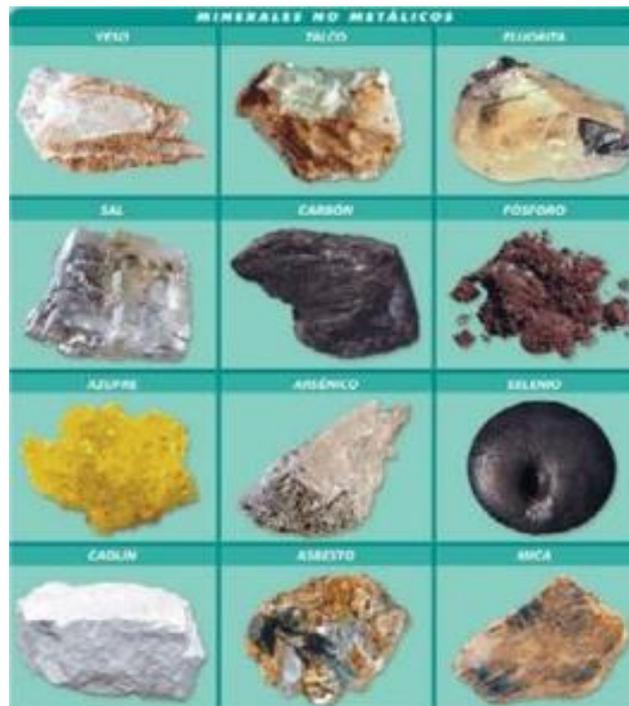


Figura 3. Minerales no metálicos. (aula2005, 2009)

Fuente: Aula 2005

Minerales de baja ley

Residuos que no tienen suficiente ley ni otras características de mineral a minarse económicamente.

Procesamiento de los minerales

Para que el mineral que se encuentra en la tierra tenga valor y se convierta en un producto comercial se requiere de inversiones y trabajos de extracción y procesamiento. Esta actividad es la que realiza la industria minera. La actividad minera comienza con la prospección, la cual, comprende el cateo y la prospección geoquímica. El cateo consiste en la búsqueda del yacimiento mineral mediante la ubicación de anomalías geológicas en la corteza terrestre.

Luego del cateo y prospección, sigue la exploración que se ejecuta con técnicas más avanzadas para elaborar un perfil del yacimiento. Si el perfil es prometedor, se prosigue a

una exploración más avanzada que cuantifique y limite las anomalías determinadas. El objetivo de esta etapa es calcular el tonelaje y leyes para ver si resultan promisorias y de acuerdo a ello elaborar un estudio técnico económico (estudio de factibilidad) en el que se calculen las reservas, costos de extracción, costos de tratamiento, beneficios, y se determine si es factible o no llevar a cabo la explotación.

La explotación es el trabajo que se realiza para extraer el mineral. En el caso de las minas subterráneas, el proceso cíclico típico es el de perforación, voladura, acarreo y transporte fuera de la mina. En el caso de las minas superficiales la explotación comprende las actividades de perforación, voladura, carguío y transporte. Generalmente este último método es empleado por la gran minería e implica altas producciones.

Luego de extraer el mineral, es necesario procesarlo para aumentar su concentración (proporción o ley por tonelada) pues en estado natural no es siempre comercial. El método de concentración a emplearse depende del tipo de mineral, su estructura y otros elementos presentes, y del capital disponible. Los concentrados de los minerales tienen un mercado internacional. Estas etapas se resumen en la figura N°4.

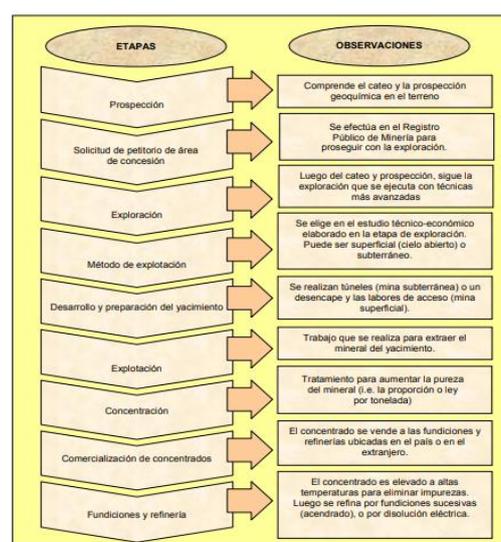
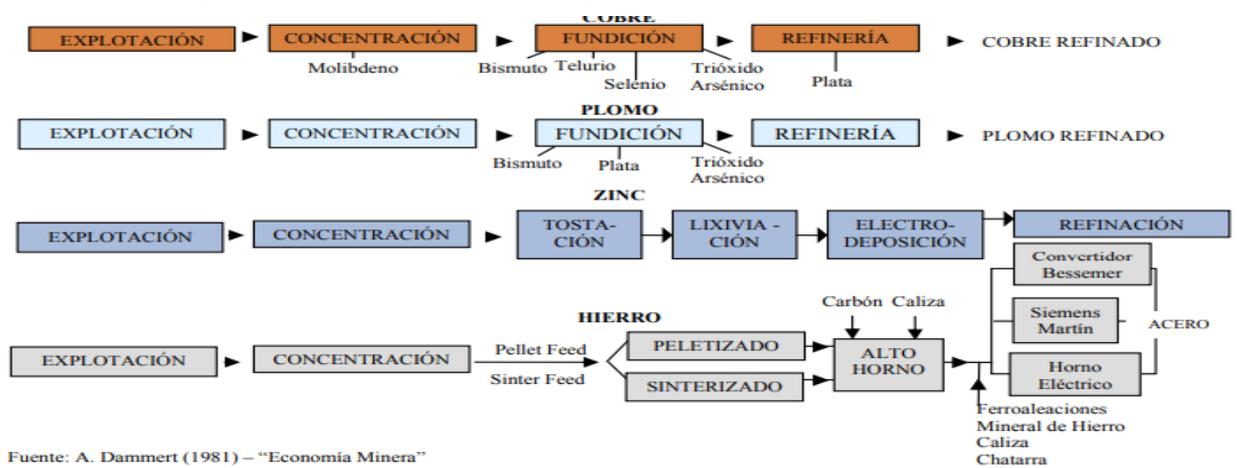


Figura 4. Etapas de la actividad minera. (Osinermin, 2009)

Fuente: Osinermin 2009

Los metales se obtienen al procesar los concentrados con el objeto de elevar su pureza. Las dos principales formas de procesar los concentrados son mediante tratamientos pirometalúrgicos (cobre y plomo) e hidrometalúrgicos (zinc). Posterior a esta etapa se lleva a cabo la etapa de fundición y refinación. La fundición consiste en la actividad que eleva a altas temperaturas el mineral para eliminar impurezas. Posteriormente a la fundición, el mineral es llevado a un proceso de refinación donde alcanza pureza más elevada. En las refinерías, este proceso se lleva a cabo por fundiciones sucesivas (acendrado), o alternativamente por disolución eléctrica. Este proceso se puede observar en la figura N°5.



Fuente: A. Dammert (1981) – “Economía Minera”

Figura 5. Etapas en la actividad minera por producto metálico. (Osinermin, 2009)

Fuente: Economía Minera

Pero en todo proceso productivo de la actividad minera se generan toneladas de relaves mineros y/o residuos minerales de baja ley, residuos que no tienen suficiente ley ni otras características de mineral a minarse económicamente, potencialmente peligrosos y que además son una problemática importante debido a que estos desechos conducen a un consumo de suelo y agua, que si no hay una adecuada gestión de estos relaves pueden, causar un grave daño medio ambiental, tanto para las personas que viven alrededor o cercanas a la mina, como a la ecología entorno a ella.

Es por ello que existen regulaciones medioambientales y entidades del estado que se encargan de asegurar una sostenibilidad entre la actividad minera y el control medioambiental.

Gestión ambiental minera

La tendencia actual de la minería es encumbrarse como un sector responsable de sus operaciones y protector del medioambiente. La explotación de los recursos metálicos deja grandes residuos de baja ley que, de no atenderse inmediatamente, podrían representar una grave amenaza al ecosistema. Para contrarrestar este riesgo, surgen empresas con propuestas para el encausamiento de relaves, a través de inmensos tranques (o depósitos para relaves).

Tabla 1
Contaminantes y Problemas Médicos Asociados según tipo de Mina

Tipo de Mina	Contaminantes	Problemas Médicos
Minas poli-metálicas	Metales pesados, particularmente plomo	Déficit de crecimiento, de desarrollo neuronal, anemia, enfermedades renales
Minas de oro y plata (pequeña escala)	Mercurio	Enfermedades renales, condiciones neurológicas
Minas de oro y plata (gran escala)	Cianuro	Problemas del corazón y tiroides
Minas de piedras preciosas	Material particulado	Problemas respiratorios y estomacales
Minas de fosforita	Radionucleidos	Problemas respiratorios, cáncer al pulmón
Minas de carbón	Material particulado	Problemas respiratorios
Fundidoras de metales pesados	Metales pesados, dióxido de azufre	Mismo que para polimetálicos, problemas respiratorios

Fuente: (Orihuela, et al., 2019)

La Ley n° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), y su reglamento (D.S. 019-2009-MINAM) regulan e indican la obligatoriedad de la certificación ambiental para la ejecución de proyectos mineros en donde se incluyen componentes como los depósitos de relaves y otros. De igual forma, el D.S. 040-2014-EM, que reglamenta la protección y gestión ambiental para actividades de explotación y beneficio, y los términos de referencia (TdR) aprobados mediante RM 116-2015-MEM, dan las pautas para que se elaboren los estudios de impacto ambiental, que una vez aprobados autorizan la construcción de componentes como los depósitos de relaves.

El Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. 024-2016-EM), exactamente en su Artículo 400°, estipula que cada dos años el titular minero presentará, a la autoridad competente, un estudio de estabilidad física de los depósitos de relaves, elaborado por una empresa especializada en la materia, y que garantice las operaciones de manera segura. (Rumbo Minero, 2019).

Ilustración 4-2
Marco legal e institucional del sector minero en el Perú, 1991 - 2017

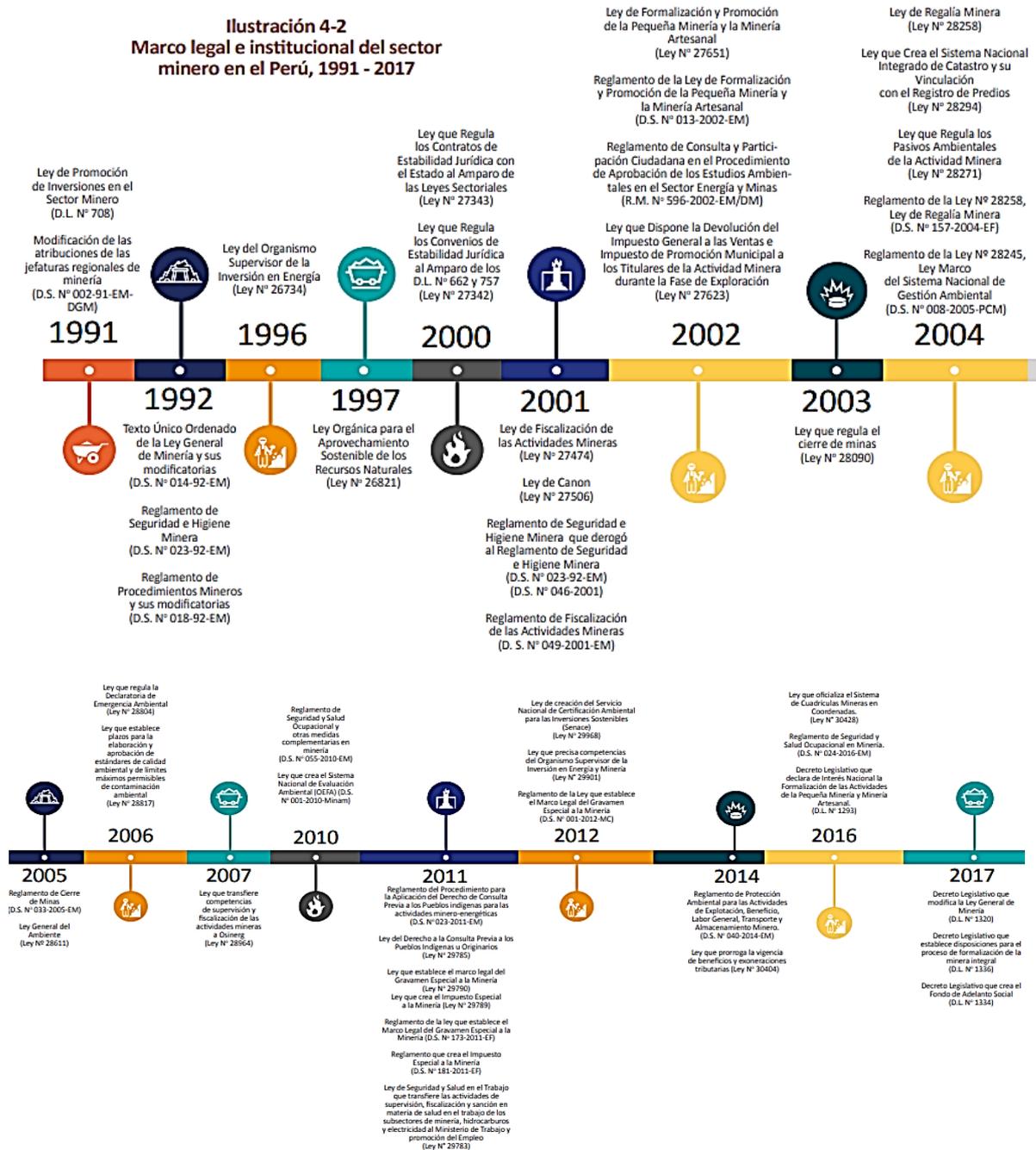


Figura 6. Marco legal e institucional del sector minero en el Perú, 1991-2017. (Osinermin, 2017)

Fuente: Osinermin 2017

Las industrias extractivas, la minería en particular, son actividades contaminantes. Pueden generar contaminación aérea al emitir óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono y material particulado, que son nocivos para la salud de las personas y la calidad de tierra. Además, la actividad minera puede contaminar directamente - vía aire y agua - el medio ambiente por malos manejos y uso y por la generación de pasivos ambientales como relaves, desmontes, escorias, entre otros. La investigación económica sobre esta problemática es aún incipiente (Orihuela, et al., 2019).

En la etapa de extracción, en función de las características de los yacimientos, se hace necesario remover grandes cantidades de material, el cual debe, posteriormente, ser reubicado en el entorno del yacimiento. Los residuos sólidos que se generan en esta etapa son: (i) el lastre, que es el material sin valor económico y es dispuesto en los depósitos de desmonte; (ii) minerales de baja ley, es el material que contiene mineral cuyo contenido de metal no hace rentable su procesamiento en la actualidad; y (iii) desmontes de minas subterráneas, que es el material estéril proveniente de las galerías, piques y rampas. (Rivera Pino , 2018).



Figura 7. Residuos de minerales oxidados de baja ley. (fueyoeditores, 2018)

Fuente: Fueyoeditores 2018

Además, los óxidos de los minerales de desecho son también una problemática, debido a su almacenamiento; entre estos se encuentra las siguientes clasificaciones:

Estéril de mina es todo material sin valor económico extraído para permitir la explotación del mineral útil. Los estériles son de los más variados tipos: la capa superficial del suelo es considerada un estéril en minería (aunque sea el soporte de la vegetación), así como las rocas encajantes.

El mineral que alimenta la usina de beneficiamiento posee un determinado tenor de mineral útil, estando compuesto por minerales útiles y minerales de ganga. En la usina este mineral es normalmente fragmentado para permitir la liberación del mineral útil y su separación de los minerales de ganga a través de procesos físicos, químicos o físico-químicos. Un ejemplo de proceso de separación física es la concentración gravimétrica de minerales pesados como oro, casiterita e ilmenita que, por ser más pesados que la mayoría de los minerales de ganga, son separados en función de la diferencia de densidad.

Métodos de manejo de residuos

Para la disposición de los relaves mineros, las obras de contingencias serían piscinas, trazados estratégicos, doble sistemas, entre otros, pero idealmente en las etapas de diseño se toman medidas para mitigar las posibles fallas, como hacer un diseño más robusto, instrumentación y monitoreo permanente y sistemas de detección de fugas. Las empresas mineras informan sobre la gestión de sus relaves a Osinergmin, y estas realizan inspecciones anuales y sorpresivas a las diversas unidades mineras. Durante la supervisión, cada unidad minera entrega toda la documentación requerida por la entidad. (Osinermin, 2017)

La actividad minera genera diversos impactos en el medio ambiente que pueden variar de acuerdo con el mineral, el proceso y las tecnologías empleadas durante la extracción y producción, y también de las características geográficas en la que se ubica la unidad minera. Las prácticas actuales de manejo de residuos sólidos en la industria apuntan

hacia dos direcciones: por un lado, la minimización y el reaprovechamiento de residuos, por otro el tratamiento y la disposición final. (Mina Santa Elena, 2016)

Los estériles se disponen generalmente en pilas y ocasionalmente se colocan nuevamente en la mina (Backfilling). El retorno del material al lugar de donde fue extraído es evidentemente el mejor método de manejo de residuos, pues minimiza diversas consecuencias ambientales como la erosión acelerada y el impacto visual, y facilita la recuperación del área.

Los desechos pueden ser objeto de disposición superficial, subterránea o subacuática. Este último método ha sido a vía de ejemplo condenado por razones ambientales debido a los impactos negativos que provoca a los ecosistemas acuáticos. Este fue el caso de la mina de bauxita de Trombetas, de la empresa Mineração Rio do Norte (MRN), en Oriximiná, Estado de Pará, país de BRASIL que durante muchos años arrojó los desechos del beneficiamiento en el lago Batata, causando innumerables daños ecológicos.

Si bien los relaves son un montículo tóxico para la naturaleza y para las personas, esto no es impedimento para su reaprovechamiento en el sector construcción. Es así que Arequipa posee un proyecto de fabricación de ladrillos, utilizando como insumos los relaves de la minería artesanal aurífera. El proyecto se ejecutó en el marco de la alianza entre el Centro de Estudios y Entrenamiento de Procesos Metalúrgicos de Minera Porvenir (CEPROMET) y la Universidad Católica San Pablo; entidades que financiaron el 21% y 5%, respectivamente; mientras que el programa “Innovate Perú”, del Ministerio de la Producción, entregó aproximadamente S/ 150 mil; es decir el 74% del financiamiento para esta iniciativa.

Actualmente, Cepromet dispone de una planta piloto para realiza todas las etapas de transformación. Ante la posibilidad de contaminación de los ladrillos por el material con el que se elaboren, su Gerente, Juan Miguel Zegarra, responde que el proceso que se sigue en la planta piloto también se encarga de la descontaminación. Otro proyecto de la misma

característica, también cofinanciado por Innovate Perú, es el de la empresa Green Metallurgy Technologies, la cual desarrolló un plan para el reúso de los relaves minero-metalúrgicos, como suministros para elaborar ladrillos ecotecnológicos, permitiendo así la edificación de viviendas ecológicas a bajo costo. (Rumbo Minero, 2019)

Reutilización de residuos de minerales de baja ley

Los residuos que no tienen suficiente ley ni otras características de mineral a minarse económicamente con el manejo de los residuos generados antes, durante y después del proceso de extracción no es controlado y terminan siendo escombros en lugares no adecuados o vertidos en ríos. (Casadiego Quintero, et al., 2017), es por ello que actualmente se está gestionando estos minerales oxidados estériles, utilizando tecnologías basadas en la reutilización de estos óxidos aplicados en geopolímeros, o también llamados, geocementos. En la cual, con un proceso de molienda previo de estos óxidos minerales estériles, hasta alcanzar un rango de granulometría específica, se pueden manufacturar ladrillos, tejas, bloques, morteros, etc.

También pueden encontrar aplicaciones como materia prima para producir cemento y hormigón. En general, deben estar compuestos por rocas volcánicas ácidas, lutitas negras y grises, que contienen sulfuros diseminados (principalmente pirita). Entonces, incluso si el reciclaje de las rocas de desecho puede reducir significativamente todos los impactos ambientales relacionados con la eliminación, su aplicación como materia prima en la producción de cemento y concreto no se promueve realmente ya que, al usar relaves mineros ricos en compuestos sulfídicos, la producción de ácido en presencia de oxígeno y agua conduce a la intemperie química y la presencia de minerales sulfurosos puede provocar un ataque de sulfato que puede afectar negativamente el rendimiento mecánico del material de relleno dentro de los compuestos cementosos. Recientemente, la activación alcalina se ha

propuesto como una solución alternativa prometedora para limitar el potencial ácido de las rocas de desechos mineros. (Lottermoser, 2011)

Mortero tradicional

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua, que sirven para unir las piedras o ladrillos que integran las obras de fábrica y para revestirlos con enlucidos o revocos. Los morteros se denominan según sea el aglomerante. Así se tienen morteros de yeso, de cal o de cemento. Los morteros bastardos son aquéllos en los que intervienen dos aglomerantes, como, por ejemplo, yeso y cal, cemento y cal, etc. La mezcla de un aglomerante y agua se denomina pasta y se dice de consistencia normal cuando la cantidad de agua de amasado es igual a los huecos del aglomerante suelto; si es menor será seca y mayor fluida, llamándose lechada cuando se amasa con mucha agua. Los morteros, como los aglomerantes, se clasifican en aéreos e hidráulicos. (UCLM, 2010)

Dosificación del mortero: relación entre cantidad de conglomerante y cantidad de arena. (Polanco Madrazo & Setién Marquínez, 2013)

Mortero normal: compuesto por una parte de conglomerante por cada tres de arena, de manera que aquél rellene los vacíos existentes en ésta

Mortero magro: el volumen de conglomerante es insuficiente para rellenar los huecos del volumen de arena empleada.

Mortero graso: el volumen de conglomerante es superior al de los huecos que presenta la arena

Teniendo en cuenta los materiales que los constituyen, pueden ser: - Morteros calcáreos: los que interviene la cal como aglomerante, se distinguen, según el origen de ésta en aéreos e hidráulicos.

Las cales aéreas más conocidas son la cal blanca y la cal gris (dolomítica); en los morteros aéreos la arena tiene como objetivo principal evitar el agrietamiento por las contracciones del mortero al ir perdiendo el agua de amasado. Se recomienda que la arena sea de partículas angulares y que esté libre de materia orgánica. La proporción de cal-arena más usada para revoque es de 1 -2 y para mampostería simple de 1-3 o de 1-4. Si la proporción aumenta el mortero pierde ductilidad y trabajabilidad. Se utiliza este mortero en trabajos de embellecimiento de interiores que requieren esquinas perfectas.

Morteros de yeso: Se preparan con yeso hidratado con agua. El contenido de agua es variable según el grado de cocción, calidad y finura de molido del yeso. En obras corrientes se agrega el 50%, 115 para estucos el 60% y para moldes el 70%. El mortero se prepara a medida que se necesita, pues comienza a fraguar a los cinco minutos y termina más o menos en un cuarto de hora. - Morteros de cal y cemento: Son aconsejables cuando se busca gran trabajabilidad, buena retención de agua y alta resistencia (superior a la de los morteros de cal; en estos morteros se sustituye parte del cemento por cal, razón por la cual se les conoce también como Morteros de Cemento Rebajado. (Universidad Nacional de Colombia, 2017).

Tabla 2
Dosificación de mortero de cemento y arena.

Morteros de cemento y arena					
Tipo de mortero	Proporción en volumen		kg cemento por m ³ de mortero	Empleo preferente	Resistencia kg/cm ²
	Cemento	Arena			
Ricos	1	1	800	Bruñidos y revoques impermeables.	160
	1	2	600	Enlucidos, revoque de zócalos, corrido de cornisas	
	1	3	450	Bóvedas tabicadas, muros muy cargados, enlucidos de pavimento, enfoscados.	
Ordinarios	1	4	380	Bóvedas de escalera, tabiques de rasilla.	130
	1	5	300	Muros cargados, fábrica de ladrillos, enfoscados.	98
Pobres	1	6	250	Fábricas cargadas.	75
	1	8	200	Muros sin carga.	50
	1	10	170	Rellenos para solado.	30

Fuente: (UCLM, 2010)

Materiales para los morteros

A. Agua

Participa en las reacciones de hidratación del cemento, además confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para su puesta en obra. La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario.

El agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos en el hormigón, disminuyendo su resistencia.

Un déficit de agua de amasado origina masas pocos trabajables y de difícil colocación en obra.

Cada litro de agua de amasado añadido de más a un hormigón equivale a una disminución de 2 kg de cemento.

B. Áridos

Los áridos se oponen a la retracción del hormigón.

Grava o árido grueso: fracción mayor de 5 mm

Arena o árido fino: fracción menor de 5 mm

Arena gruesa: 2-5 mm

Arena fina: 0.08-2 mm Polvo o fino de la arena: < 0.08 mm

Desde el punto de vista de durabilidad en medios agresivos:

deben preferirse los áridos de tipo silíceo (gravas y arenas de río o de cantera) y los que provienen de machaqueo de rocas volcánicas (basalto, andesita) o de calizas sólidas y densas.

las rocas sedimentarias (calizas, dolomitas) y las volcánicas sueltas (pómez, toba) deben ser objeto de análisis.

No deben emplearse áridos que provengan de calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas porosas.

C. Cemento Portland

El cemento utilizado en la elaboración del mortero de albañilería es el Cemento Portland, que cumpla con las propiedades físicas, químicas y mecánicas. Según la Norma Técnica Peruana NTP 334.009, el cemento Pórtland es un cemento hidráulico producido mediante la pulverización del Clinker compuesto esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente una o más de las formas sulfato de calcio como adición durante la molienda; (Torre, 2004)

Es decir:

Cemento Pórtland = Clinker Pórtland + Yeso

Tabla 3

Los principales compuestos que constituyen aproximadamente el 90 al 95 % del cemento.

Designación	Fórmula	Abreviatura	Porcentaje
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	30% a 50%
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15% a 30%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	4% a 12%
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8% a 13%
Cal libre	CaO		
Magnesia libre (Periclasa)	MgO		

Fuente: (Torre, 2004).

Mecanismo de fraguado del cemento portland

El mecanismo de hidratación, cuando el material calcáreo se pone en contacto con el agua se genera la dispersión inicial (a), e inmediatamente se produce la hidrólisis de los silicatos de calcio y se crea una disolución sobresaturada de iones oxidrilos (OH^-) y calcio

(Ca²⁺). Otros iones como los sulfatos, álcalis, como así también pequeñas cantidades de sílice, alúmina y óxido de hierro, se encuentran en la disolución.

Además de iones carbonato procedentes de la disolución del carbonato de calcio del cemento. Los iones OH⁻ y Ca²⁺ tienden a orientarse sobre la superficie de los granos de la adición, que debido al proceso de molienda se encuentran cargados electrostáticamente (b). Este efecto se desarrolla en varias capas sucesivas las cuales van perdiendo intensidad a medida que se alejan del grano del material calcáreo (c). Simultáneamente se produce la formación sobre los granos de cemento de la etringita de amasado (en forma de agujas prismáticas de corta longitud) y una fina capa de CSH. (Bonavetti, et al., 2013) Para que el mecanismo de endurecimiento del cemento se produzca, implica que se den una serie de reacciones, que mayormente involucran los silicatos tricálcicos y dicálcicos, que se encuentran en el Clinker del cemento portland.

Estas reacciones se ilustran en la figura N° 8

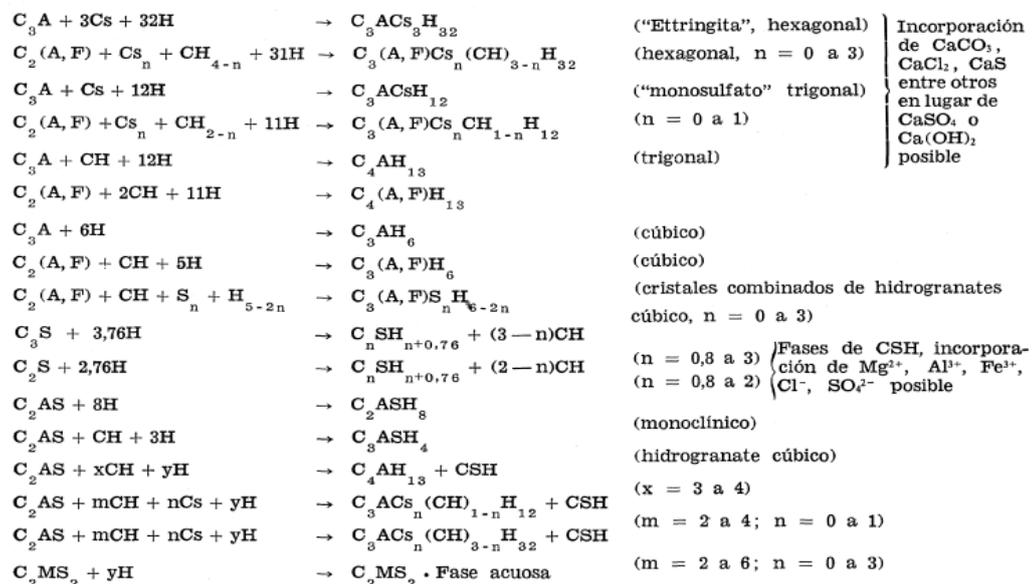


Figura 8. Reacciones involucradas durante el proceso de endurecimiento del cemento. (Zeitung, 1972)

Fuente: Zeitung 1972

Las características exigibles a un mortero son:

Retener agua para evitar que sea totalmente absorbida por los materiales en su contacto

Resistencia para soportar las cargas que han de actuar sobre el muro o fábrica –

Adherencia a las piezas o zonas que solidariza

Durabilidad en concordancia con las condiciones a las que va a estar expuesto

Mortero modificado con adiciones de óxidos minerales.

Los morteros modificados, con adiciones con óxidos ricos en aluminosilicatos, se han venidos investigando ampliamente, ya que estos materiales pueden ser utilizados como reemplazo parcial del cemento portland como también se puede utilizar como reemplazo parcial de agregado para el concreto. Aunque este tema ya ha sido mencionado hasta donde sabemos, que al aumentar el pH de la solución activadora aumenta el grado de policondensación.

Sin embargo, los valores de pH que informan solo se dan a la unidad completa más cercana y, por lo tanto, deben ser aproximados. En cualquier caso, estos tres estudios destacan claramente la importancia de los iones de hidróxido en el proceso de geopolimerización. Mostraron que el pH afecta la disolución de varios aluminosilicatos en suspensiones diluidas.

Llegaron a la conclusión de que la disolución es promovida por mayores concentraciones de hidróxido alcalino, también han resaltado el hecho de que la cinética de disolución de las fuentes de aluminosilicato depende en gran medida del pH inicial de la solución. (Champenois, et al., 2019).

A. Geopolimerización

El proceso de geopolimerización consiste en disolución y reorganización, condensación y polimerización. La disolución y reorganización del aluminosilicato forma

varios tipos de oligómeros; Los oligómeros se conectan y forman polímeros grandes. Cuando los oligómeros se conectan, los grupos OH en su extremo se encuentran y liberan agua al compartir un átomo de oxígeno. Los geopolímeros se utilizaron en muchas construcciones antiguas y las unidades de construcción de geopolímeros consisten principalmente en tetraedros T-O₄ (donde T es Si o Al). (Singh & Middendorf, 2019) y puede resolver los problemas de las industrias del cemento y los problemas relacionados con la contaminación ambiental.

i. Mecanismo de formación de geopolímero a base de óxidos ricos en aluminosilicatos

Los geopolímeros son un tipo de materiales cementosos que se han estudiado intensamente durante las últimas décadas como una alternativa de cemento Portland debido a sus características atractivas, tales como altas propiedades mecánicas, resistencia a altas temperaturas, durabilidad a largo plazo y costos de producción competitivos.

La red de geopolímeros consiste en unidades tetraédricas de silicato (SiO₄) y aluminato (AlO₄) e incluye el enlace Si-O-Al en tres direcciones al compartir los átomos de oxígeno entre estas unidades tetraédricas. La fórmula empírica de la estructura del geopolímero se muestra en la ecuación. (Singh & Middendorf, 2019)



el proceso de geopolimerización tiene lugar cuando los óxidos de minerales de silicio y aluminio o aluminosilicatos reaccionan con una solución alcalina para formar enlaces poliméricos de Si-O-Al. Las estructuras son de tipo Poli (sialato) (-Si-O-Al-O-), tipo Poli (sialato-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-) y Poli (sialato-disiloxo) tipo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) como se muestra en la figura N°9. (Connie , et al., 2018).

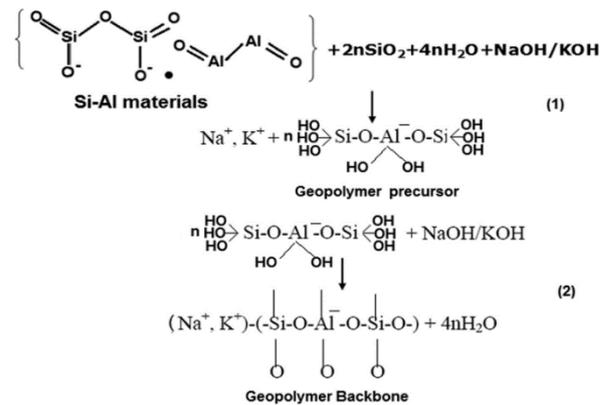
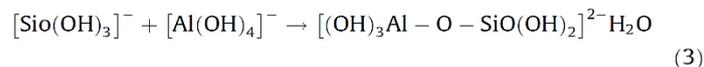
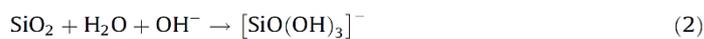


Figura 9. Representación esquemática de la formación de geopolimeros. (Singh & Middendorf, 2019)

Fuente: Singh & Middendorf 2019

El mecanismo de geopolimerización se puede resumir en las siguientes ecuaciones, que básicamente los materiales ricos en óxidos ricos en alúmina y sílice, interactúan con los hidróxidos del agente activante (solución alcalina) que luego de formar los iones tetraédricos de la sílice y alúmina respectivamente, esto que quelatos ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$) (1) y (2); se unen por atracción electrostática de los oxígenos que componen su estructura, formando una estructura tipo cadenas de dreierketten.



Proceso de activación alcalina

La activación alcalina es la reacción de materiales sólidos de aluminosilicato con soluciones de hidróxido alcalino y silicato alcalino, que promueve la disolución de iones Al^{3+} y Si^{4+} de los materiales de partida y, posteriormente, la formación de gel alcalino activado con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad en fase endurecida. La activación alcalina de los residuos industriales reduce significativamente la necesidad de utilizar materias primas tradicionales en el cemento, lo que reduce directamente las emisiones de CO_2 , el consumo de energía y la utilización de vertederos. (Hwang, et al., 2019)

El proceso de geopolimerización, es un proceso que inicia con los precursores ricos en aluminosilicato mezclados con el activador alcalino se disuelven en tetraedros SiO_4 y AlO_4 , que posteriormente se van a unir entre sí debido a la fuerza de atracción electrostática del oxígeno, que a esto se le llama la etapa de reorganización, luego cuando se ha reaccionado la mayor cantidad y unido entre si los tetraedros Si-O-Al formando geles de geopolimeros, además el catión del activador alcalino ayuda a que estas estructuras sean estables a pH alto y se formen geles en la etapa final de endurecimiento, como lo indica la figura N°10.

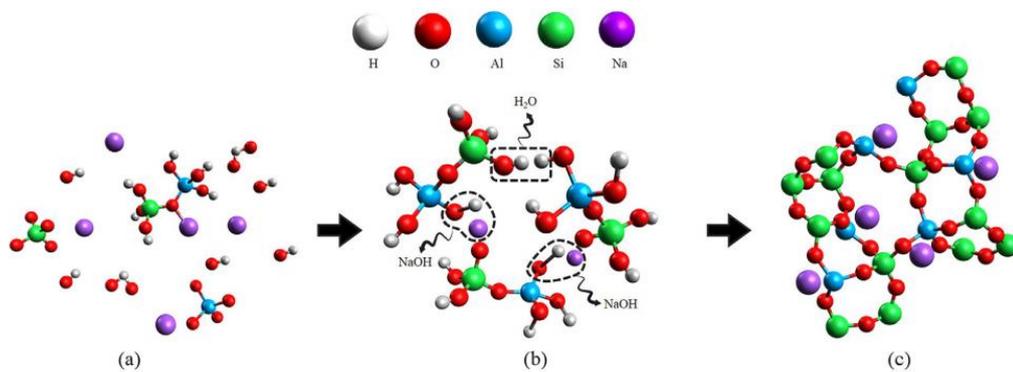


Figura 10. Ilustración esquemática del proceso de geopolimerización: (a) reorganización de aluminosilicato, (b) formación de gel a partir de la condensación de oligómeros, y (c) polimerización. (Singh & Middendorf, 2019)

Fuente: Singh & Middendorf 2019

Todo el proceso de polimerización puede consistir en (i) oligomerización, (ii) agregación y (iii) condensación. Se usó un método de simulación de dinámica molecular reactiva (MD) para modelar la estructura molecular de los geopolímeros.

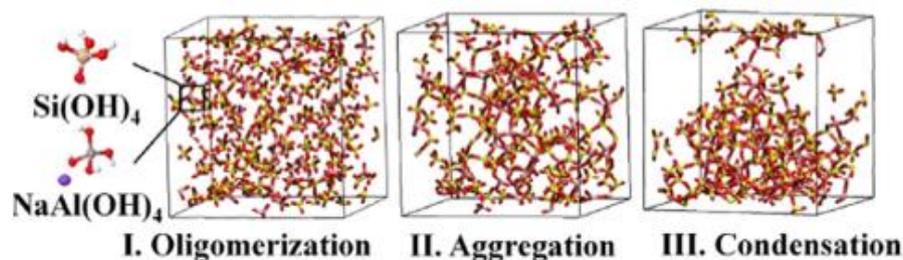


Figura 11. Modelo de simulación de dinámica molecular para geopolymerization. (Singh & Middendorf, 2019)

Fuente: Singh & Middendorf 2019

Activadores alcalinos

Las materias primas más utilizadas como precursores en la preparación de cementos activados alcalinamente son las escorias vítreas de alto horno (componentes ricos en calcio), las cenizas volantes procedentes de la combustión de carbón (pobres en calcio) y arcillas activadas térmicamente (en su mayoría metacaolín); o bien mezcla de algunos o varios de estos precursores. En la Figura 11 se muestra la composición de estos materiales en el diagrama ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃.

Por lo general, las sales de álcalis o los hidróxidos alcalinos son los que se utilizan como activadores alcalinos de los cementos y hormigones activados alcalinamente. Se clasificaron en seis grupos de acuerdo a su composición química (Shi, et al., 2005):

1. Hidróxidos alcalinos: MOH
2. Sales de ácidos débiles: M₂CO₃, M₂SO₃, M₃PO₄, MF, etc.
3. Silicatos: M₂O·nH₂O
4. Aluminatos: M₂O·nAl₂O₃
5. Aluminosilicatos: M₂O·Al₂O₃·(2-6)SiO₂
6. Sales de ácidos fuertes: M₂SO₄

De todos estos activadores, NaOH, Na₂CO₃, Na₂O·nSi₂ y Na₂SO₄ son los productos químicos más ampliamente disponibles. Algunos compuestos de potasio se han utilizado en estudios de laboratorio. Sin embargo, sus posibles aplicaciones serán muy limitadas debido a su disponibilidad y coste.

Por otro lado, las propiedades de los compuestos de sodio y potasio son muy similares. Estos activadores alcalinos se pueden utilizar en forma líquida o sólida. Se tiende a preparar cementos que incorporen el precursor y el activador (en estado sólido) y utilizar agua como líquido de amasado. (Torres-Carrasco & Puertas, 2017)

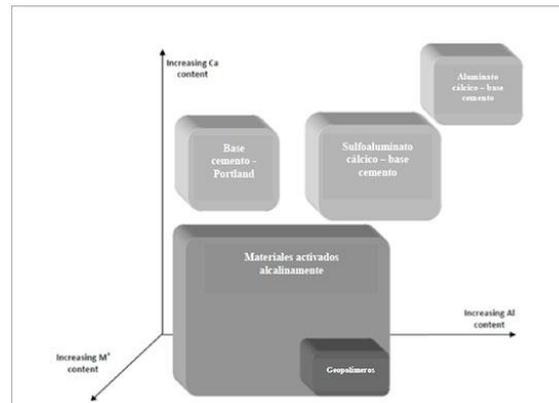


Figura 12. Clasificación de los materiales activados alcalinamente, con comparaciones entre el OPC y los sulfoaluminatos cálcicos. El sombreado indica el contenido en álcalis aproximado, en donde, el sombreado más oscuro corresponde a mayores concentraciones de Na/K. (Torres-Carrasco & Puertas, 2017)

Fuente: Torres & Puertas 2017

Estado endurecido

Resistencia a la compresión. (Norma ASTM C109, NTP 334.051. ASTM C, y la norma técnica peruana 334.009 y de la ASTM C 150)

La resistencia a compresión es uno de los requisitos principales del diseño estructural para garantizar que la estructura sea capaz de soportar una carga pretendida. También se emplea como medida de calidad, para estimar la durabilidad. El parámetro obtenido es una propiedad principalmente física y es frecuentemente usado en el diseño de estructuras, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) o en Megapascales (MPa).

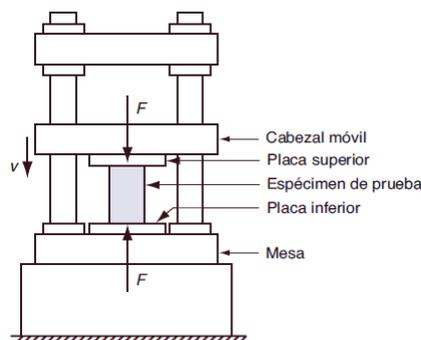


Figura 13. Esquema máquina para ensayo de resistencia a la compresión.

Fuente: (Groover, 2013)

El número de probetas dependerá de las prácticas establecidas y de la naturaleza del programa de prueba. Normalmente, se prueban tres o más probetas de mortero para cada condición de prueba. Las edades del concreto utilizadas normalmente son de 7 y 28 días. Si el mortero es utilizado como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si el mortero va a ser utilizado para soportar cargas altas y sucesos, tal es el caso de la mampostería estructural, debe poseer una alta resistencia a la compresión ya que es fácil de medir y puede relacionarse con otras propiedades como la adherencia y la durabilidad.

Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero; y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos.

El tamaño de los granos de la arena juega un papel importante en la resistencia del mortero; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento. Por último, el contenido de agua del mortero tiene influencia sobre su resistencia; los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, porque pueden ser más densamente compactados. (Gallón Martínez, et al., 2018).

Formulación del problema

¿Cuál es la resistencia a la compresión de morteros adicionados con minerales de baja ley y su aplicación en estructuras en minería?

Objetivos

Objetivo principal

Evaluar la resistencia a la compresión de morteros adicionados con minerales de baja ley y su aplicación en estructuras en minería.

Objetivos secundarios

Caracterizar químicamente minerales oxidados de baja ley mediante métodos volumétricos.

Desarrollar diseño de mezcla para morteros de cementos adicionados con minerales oxidados de baja ley mediante la aplicación norma ASTM C109.

Evaluar la factibilidad para el uso de minerales oxidados de baja ley en reforzamiento de estructuras de construcciones en minería.

Hipótesis

Hipótesis general

La evaluación de la resistencia a la compresión de morteros adicionados con minerales de baja ley permitirá su uso en estructuras de construcciones en minería

CAPÍTULO II. MÉTODO

2.1. Tipo de investigación

De acuerdo a sus descubrimientos y aporte teóricos; busca confrontar la teoría con la realidad (Tamayo, 2003) y con el fin que se persigue es de tipo aplicada

La investigación experimental “se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de descubrir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular” (Tamayo, 2003, p. 47).

De acuerdo a la técnica de contrastación: Explicativa – Experimental

2.2. Población y muestra

2.2.1. Material de estudio

El material de estudio consta de probetas cubicas con adiciones del 5%, 10%, 15% y 20% en peso, respecto a la masa del cemento portland.

2.2.2. Población o Universo Muestral

La población está definida por los morteros modificados añadido con minerales de baja ley, ricos en óxidos, cemento portland, arena fina y agua local.

2.2.3. Muestra

La muestra según la norma ASTM C109, sugiere utilizar probetas de dimensiones de 5 cm x 5 cm x 5 cm. Como muestra se han elaborado 30 probetas cubicas de mortero para los ensayos.

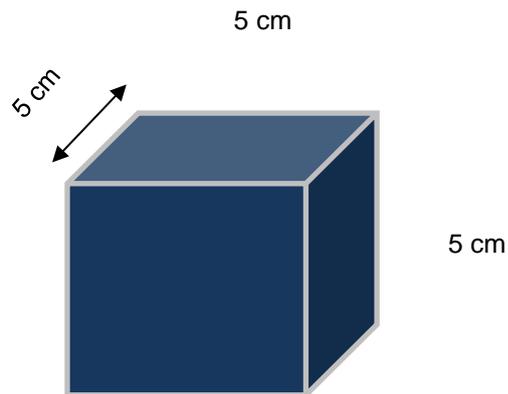


Figura 14. Dimensiones de las probetas cúbicas.

Fuente: Elaboración propia

2.2.4. Ensayo de Resistencia a la Compresión

En los ensayos de resistencia a la compresión, se usaron 30 probetas para el ensayo de resistencia a la compresión según norma ASTM C109. Método normalizado de ensayo de resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulicos (utilizando especímenes cúbicos de 2 pulgadas o 50 mm partes de arena y una relación $a/c = 0.485$ para todos los cementos portland y 0.460 para los cementos incorporadores de aire. Dato importante En la Norma ASTM C-109 se utilizó moldes de madera con la finalidad de asemejarse a las situaciones de campo ya que por motivo de costo no se pudo adquirir dichos moldes de ACERO.

2.2.2. Materiales e Instrumentos

Como parte de los materiales que se utilizaron, se describen a continuación

Gabilejo

Recipientes de metal

Balde de 4 litros transparente

Moldes de madera de 5 cm x 5cm x 5cm

Apisonador.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Diseño Experimental

En el diseño experimental se utilizó el tipo unifactorial, con las variables de estudio que se muestran en la Tabla N° 4.

En la cual el Factor A es el porcentaje de adición de mineral de óxidos de baja ley, con los niveles o tratamientos de estudio:

a1: 5 %;

a2: 10%;

a3: 15%;

a4: 20%

Tabla 4.

Diseño Unifactorial.

Variables Independientes de Estudio	Niveles de Estudio
Factor A	a ₁
	a ₂
	a ₃
	a ₄
Variables Dependientes de Estudio	
Resistencia a la compresión (MPa)	

Fuente: Elaboración Propia.

Matriz de Diseño

Ensayo de Compresión.

Para el ensayo de compresión, el diseño unifactorial de la matriz experimental fue cuatro tratamientos y cinco corridas experimentales.

Tabla 5.

Diseño de la matriz experimental para el ensayo de compresión.

Porcentaje de óxidos	Número de corrida experimental					Y
	1	2	3	4	5	
5	1	2	3	4	5	Y1
10	6	7	8	9	10	Y2
15	11	12	13	14	15	Y3
20	16	17	18	19	20	Y4

Fuente: Elaboración propia

En el diseño unifactorial de la matriz experimental para el ensayo de compresión, se considera:

$$[(N^{\circ} \text{ Tratamientos}) * (N^{\circ} \text{ de corridas})] = [(4) * (5)] = 20 \text{ probetas.}$$

6 probetas con 0% de concreto reciclado

Número total de pruebas a realizar = 25

En anexos se muestra la matriz con la secuencia aleatoria de los experimentos.

Las técnicas para la recolección y obtención de datos, fue la técnica de prueba y error en las cuales de todo el conjunto de muestras de morteros con los diferentes porcentajes de adición de minerales de baja ley ricos en óxidos se compararon con los morteros convencionales.

Se evaluó su factibilidad de estos morteros modificados con las adiciones de estos minerales oxidados, haciendo una comparación entre ellos respecto a los valores máximos de resistencia a la compresión.

Así mismo, una vez realizado los ensayados con los morteros, tanto con los morteros con adición de minerales oxidados, así como los morteros convencionales; los valores de resistencia a la compresión de todas las muestras fueron evaluados y representados en un gráfico con la finalidad de realizar una interpretación más clara.

Finalmente, para esta representación gráfica se utilizó el software Origin en su versión

2.4. Procedimiento

a. Proceso de molienda de los minerales oxidados de baja ley

El material utilizado como adición en los morteros de cemento, son los minerales oxidados de baja ley, provenientes de canteras de minas de oro.

Este mineral fue previamente triturado y clasificado a un tamaño promedio de entre de 4- 1.5 cm, para facilitar su transporte y posterior molienda.



Figura 15. Molienda del mineral rico en óxido de baja ley

Se continuó con el acondicionamiento mediante el proceso de molienda. Este se realiza en un molino de montaje giratorio, revestimiento interior refractario, con capacidad de 80 Kg y funciona por el principio de impacto y atrición mediante bolas de cerámica que golpean el material continuamente sin contaminarlo.

El tiempo aproximado del proceso fue de 3 horas para alcanzar una finura aceptable.

Seguidamente, se realizó un segundo proceso de molienda, este se realizó en un molino de bolas con capacidad de 10 kg.

Se procedió a moler durante 30 minutos, logrando moler un total de 50 kg.

Tamizado del mineral rico en óxido de baja ley

Una vez terminado el proceso de moliendo del mineral por el molino de bolas, se procedió a tamizar por la malla N° 200, del cual se utilizó el pasante de esta malla, para la adición de diferentes porcentajes a los morteros de cemento.

b. Arena

Para la conformación de los morteros, tanto los morteros normales y los morteros a los cuales se añadió los minerales ricos en óxidos. Así mismo la arena gruesa fue proporcionada por Dino.(Socio Estratégico de agregado)



Figura 16. Arena Gruesa
Fuente: Elaboración propia

c. Activadores Alcalinos y agua

El activador alcalino que se utilizó fue el hidróxido de sodio ($\text{Na}(\text{OH})$), en forma de pellets, que fueron disueltos en el agua, sirviendo para la conglomeración de todo el mortero.

El hidróxido de sodio (NaOH) en pellets tuvo un grado del 98% de pureza y fue proporcionado por la distribuidora Dropaksa, cuyas composiciones se encuentran detalladas en la tabla N°6

Tabla 6

Especificaciones del hidróxido de sodio.

PRODUCT	CAUSTIC SODA FLAKES
Batch No.	412
Manufacturing Date	27.10,2016
Expiry Date	26.10,2020
Sodium Chloride, NaCl	0.014% (m/m)
NaOH	98.2% (m/m)
Appearance	White or almost White hygroscopic flakes which tend to stick together

Fuente: Elaboración propia

Para los morteros con adiciones del mineral rico en óxidos se utilizó el activador alcalino a una concentración de 4 M.

Para la preparación de la solución activante, se empleó Hidróxido de Sodio en microperlas (suministrado por la empresa DROPAKSA) y agua potable.

Se preparó la solución de 4 Molar de NaOH para lo cual se disolvieron 160 gr por litro de agua correspondiente.

Se colocó en un vaso de precipitación las perlas de hidróxido de sodio con agua y se disolvió vigorosamente hasta conseguir un líquido homogéneo



d. Preparación de Moldes

Se fabricaron moldes de madera de 5 x 5 cm debido a que no reacciona con los componentes químicos de las mezclas y al mismo tiempo asegura la rigidez de las paredes en el momento de vaciado.

La figura N° 14 muestra el molde empleado en el desarrollo experimental.

e. Preparación de Mezclas

Las mezclas se prepararon de acuerdo al diseño experimental establecido en la tabla N°7.

Tabla 7

Diseño de mezcla para los morteros con adición de óxidos minerales.

Muestras codificadas	Agua (g)	Arena gruesa (g)	Aglutinante (g)	
			Cemento	Oxido mineral
MC-0	200	1125	375	0
MO-5	200	1125	375	18.75
MO-10	200	1125	375	37.5
MO-15	200	1125	375	56.25
MO-20	200	1125	375	75

Fuente: Elaboración propia

Se pesó en gramos según la siguiente secuencia:

Pesar el mineral de baja ley previamente molido y tamizado

Pesar el Hidróxido de Sodio

Pesar el cemento

Pesar la arena gruesa

Para el pesar el mineral de baja ley rico en oxido se utilizó una balanza digital de 0.001 g de precisión, con un rango máximo de peso de 2000 g.

Se controló el peso según la atabla N°5, este peso se fue incrementando para cado mortero.

Así mismo se utilizó 180g de hidróxido de sodio, para la preparación de la solución activadora, luego se pesó seguidamente el cemento y la arena gruesa.

f. Moldeo

Una vez pesados todos los materiales que conforman el mortero, se mezclaron en un recipiente de metal durante 5 a 6 minutos, seguidamente se fue añadiendo, progresivamente la cantidad de solución activadora y se siguió mezclando hasta obtener una consistencia homogénea.

Seguidamente esta pasta de mortero fue añadida en los moldes previamente cubierto con aceite vegetal, para que el mortero al momento de endurecer no quede adherido al molde.

Cuando se realizó el llenado se golpeó en los laterales de los moldes para que estos expulsen las burbujas de aire atrapados en su interior y no tenga defectos o cangrejeras que si son demasiado grandes se tendría que nuevamente realizar el mismo procedimiento de moldeo.



Finalmente, una vez que se llenaron los diferentes moldes, se dejó secar por 48 horas al aire libre.

Posteriormente se procedió a desmoldar los morteros, esta parte se realizó con sumo cuidado, ya que había la posibilidad de que, con los golpes al momento de sacar los morteros del molde de madera, estos se puedan rajar.

Una vez retirados todos los morteros del molde se procedió a verificar si estos no tienen defectos significativos y si es posible realizar el ensayo sin ningún inconveniente.

g. Curado de las muestras

Para el curado de las muestras a 70 °F por 72 horas, se utilizó un horno tipo mufla con un rango de temperatura de 0° a 1200°C. Por la norma ASTM C156 AASHTO T 155

La figura N° 16 presenta las muestras de los morteros con adiciones de minerales de baja ley ricos en óxidos dentro del horno.

g. Curado de las muestras

Para el curado de las muestras a 70 °F por 72 horas, se utilizó un horno tipo mufla con un rango de temperatura de 0° a 1200°C. Por la norma ASTM C156 AASHTO T 155

La figura N° 16 presenta las muestras de los morteros con adiciones de minerales de baja ley ricos en óxidos dentro del horno.



Figura 17. Curado de los morteros en el horno tipo mufla.

g. Ensayo de Resistencia a la Compresión

La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó en el laboratorio de Materiales Compuestos. Para la realización de un correcto ensayo, se maquinaron las superficies de contacto inferior y superior a fin de tener un buen contacto con la base de la máquina.

Se ensayaron a 28 días en envejecimiento a temperatura ambiente. La figura Nro 18 presentan la ejecución del ensayo de compresión y los modos de fractura para diferentes muestras geo poliméricas a condiciones de prueba



Figura 18. Ensayo de resistencia a la compresión.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En este capítulo se detallarán los resultados obtenidos de los morteros adicionados con minerales oxidados de baja ley, comparados con los morteros convencionales. Según los resultados obtenidos se valuó también el costo económico y la posibilidad de ser rentable para el uso como adición en morteros.

4.1. Análisis de resistencia a la compresión

Para la evaluación de la resistencia a la compresión de los morteros adicionados con minerales oxidados de baja ley, estos fueron ensayados en una máquina de ensayos universal, luego de un tiempo de curado de 28 días a temperatura ambiente.

La tabla N° 8 se muestra los valores de resistencia a la compresión promedio, para el mortero sin modificar (MC-0) y los morteros MO-5 hasta MO-20, que representan a las adiciones del mineral oxidado de baja ley, previamente molido y tamizado de 5%, 10%, 15% y 20% respectivamente.

Tabla 8
Valores de resistencia a la compresión promedio.

Muestra	Resistencia a la compresión promedio (MPa)
MC-0	20.32
MO- 5	23.85
MO-10	27.15
MO- 15	29.84
MO- 20	21.41

Fuente: Propia

En la figura N° 19 muestra el efecto del porcentaje de adición progresivo de los minerales oxidados de baja ley, sobre la resistencia a la compresión.

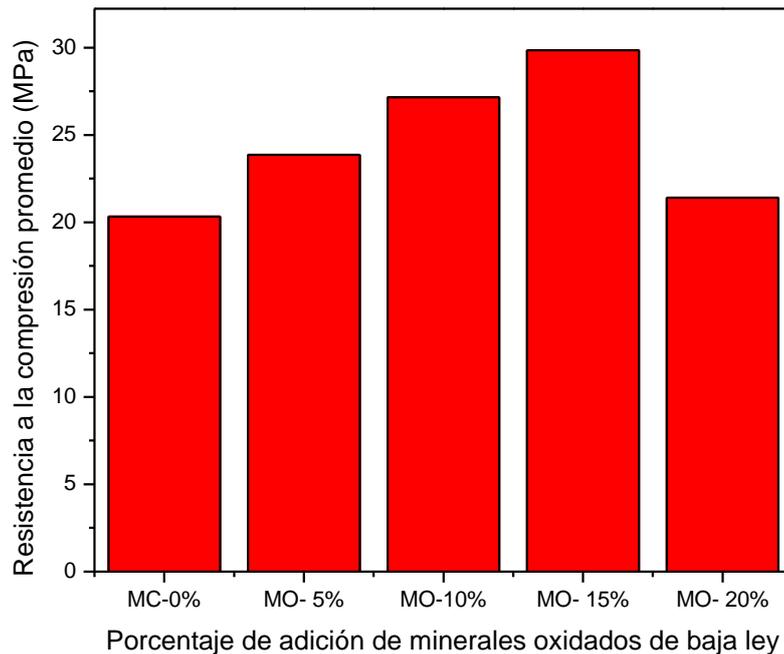


Figura 19. Resistencia a la compresión de los morteros.

Fuente: Propia

En la figura N° 19 podemos apreciar que los valores de resistencia a la compresión para las adiciones de óxidos minerales de baja ley son de 23.85 MPa, 27.5 MPa, 29.84 MPa y 21.41 MPa, para los morteros MO-5, MO- 10, MO- 15 y MO- 20, respectivamente. Estos valores de resistencia a la compresión representan un incremento de la resistencia a la compresión respecto al mortero patrón del 17.40%, 33.64%, 46.85% y 5.36%, para los morteros MO-5, MO- 10, MO- 15 y MO- 20 respectivamente.

Así mismo, el valor de mayor resistencia a la compresión es para el mortero MO- 15 con un valor de resistencia a la compresión de 29.84 MPa, que representa un incremento de la resistencia a la compresión del 46.85%, respecto al mortero tradicional. Como se observa en la gráfica N° 18 a medida que se va incrementando el porcentaje de adición con minerales oxidados de baja ley, previamente molido se va incrementando la resistencia a la compresión, hasta un máximo de adición del 15% (MO- 15) y luego para los morteros con

porcentajes de adición del 20% los valores de resistencia respecto a los demás incrementos, empieza a disminuir, pero este porcentaje de incremento, tiene valores de resistencia a la compresión 5.36% mayor que el mortero de cemento tradicional. Lo que implica que se podría obtener mejores resultados de resistencia a la compresión para los morteros con adiciones del 15% y también se podría obtener morteros con resistencia a la compresión aceptables, es decir valores de resistencia a la compresión comparables a las del mortero de cemento normal.

El aumento de la resistencia a la compresión para los morteros con adiciones de minerales de óxidos de baja ley está relacionado el grado de reacción de los óxidos ricos en sílice que están compuesto mayormente estos minerales. El aumento de la resistencia a la compresión está de acuerdo con el autor (Casasso, Ferone, & B., 2019) que menciona lo siguiente “la resistencia a la compresión de las pastas de cemento mezcladas con materiales ricos en óxidos de silicio y alúmina (SiO_2 y Al_2O_3) estaba relacionada con el grado de reacción de estos materiales, gracias a un tamaño de partícula aproximado de 0.064 mm, se genera un área de contacto mucho mayor y por lo tanto el activador alcalino puede activar mayor cantidad de partícula; además la alta resistencia a la compresión de las pastas de cemento mezcladas con materiales aluminosilicatos (contenía un porcentaje de entre 10 y 20%) eran consistentes con la alta cantidad de C-A-H y C-A-S-H en productos de hidratación de los material ricos en aluminosilicatos y el cemento portland.”.

Así mismo el aumento de la resistencia a la compresión en los morteros con adiciones de minerales oxidados de baja ley se debió a la interacción entre el mineral molido, el cemento portland y el activador alcalino. Durante la hidratación del cemento se genera el gel de silicato calcio hidratado (C-S-H) y también aluminato calcio hidratado (C-A-H), en menor cantidad; sin embargo, como producto de la formación de este gel C-S-H, también se genera el he hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de acuerdo a la figura N° 8, por lo tanto, al formarse estos

productos en un medio bastante alcalino ($\text{pH} > 13$) estos reaccionan con el mineral rico en óxidos (SiO_2 y Al_2O_3) formando geles adicionales de C-A-S-H y N-A-S-H permitiendo la formación de una estructura homogénea en el mortero, evidenciándose en el incremento de la resistencia a la compresión de los morteros que tienen los incrementos progresivos de minerales oxidados, comparados con los morteros de cemento normal, esta reacción química entre los minerales ricos en óxidos y la solución alcalina se le llama geopolimerización, como ya se mencionó en el capítulo de fundamento teórico. según (Moukannaa, et al., 2019) menciona que “Se han logrado resultados particularmente buenos mediante la mezcla con minerales de aluminosilicato con bajo contenido de calcio o calcio, que producen respectivamente C-(A)-S-H y N-A-S-H geles aglutinantes como principal producto de reacción; se espera que estos aglutinantes proporcionen una buena sinergia entre la resistencia mecánica y la durabilidad. Además, al usar un álcali adecuado y mezclarlo con fuentes de calcio más reactivas (que pueden incluir clinker del cemento portland), puede ser posible usar productos de desecho ricos en aluminosilicato que de otro modo serían insuficientemente reactivos para desarrollar una buena resistencia cuando se activan solos, dando así valor a estos materiales”.

Por lo que debido a la formación de estos geles adicionales que se forman con la activación alcalina de los minerales ricos en óxidos y los productos de reacción del cemento portland, hay una mejora en la resistencia a la compresión de los morteros, como se evidencia en la figura N° 18. Además, los morteros presentaron mejoras en su resistencia a la compresión, para la adición del 15% de mineral oxidado, y hasta con una adición de 20%, lo que implicaría que estos minerales estériles, que son una problemática, debido a su almacenamiento y/o espacio para su disponibilidad, tiene el potencial para ser incorporado en morteros, con el único proceso de su molienda y tamizado, probablemente ahorrando en transporte para su disposición final

Finalmente, la síntesis de geopolímeros a partir de residuos minerales oxidados ricos en aluminosilicatos, puede ser una tecnología más sostenible y fomenta un menor uso de los recursos naturales y además se pueda reducir su impacto ambiental de estos minerales, dándoles una utilidad y valor agregado, gracias a esta tecnología de la activación alcalina. Y así mismo el reciclaje de residuos de mina y su uso como fuentes de aluminosilicato parece ser rentable, ya que ofrece beneficios económicos y medioambientales, lo que lleva a una fabricación más ecológica y un desarrollo global sostenible. Los autores (Casadiego Quintero, et al., 2017) “señalan Investigaciones recientes que utilizan agregados de reciclaje producidos en laboratorio señalan el hecho de que el uso de agregados reciclados finos no debe exceder el 30%, de lo contrario el rendimiento podría estar en riesgo”. Por lo tanto, el porcentaje del 20%, está en un rango aceptable de adición, como se muestra en la figura N° 19.

4.2. Análisis de costos.

Tabla 9

Análisis de costos

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio unit. S/.	Parcial S/.
1.00	Mortero de cemento				
1.01	cemento portland tipo I	kg	2	S/. 5.00	S/. 10.00
1.02	arena gruesa	kg	5	S/. 5.00	S/. 25.00
1.03	agua	Litros	5	S/. 0.50	S/. 2.50
				TOTAL	S/. 37.50
2.00	Mortero con adición de minerales oxidados				
2.01	cemento portland tipo I	kg	2	S/. 5.00	S/. 10.00
2.02	arena gruesa	kg	5	S/. 5.00	S/. 25.00
2.03	agua	Litros	5	S/. 0.50	S/. 2.50
2.04	Hidróxido de sodio	paquete	1	S/. 17.00	S/. 17.00
2.05	Molienda del mineral estéril	kg	50	S/. 1.00	S/. 50.00
				TOTAL	S/. 104.50
3.00	Coste de transporte de mineral				
3.01	Chofer	Horas	12	S/. 10.00	S/. 120.00
3.02	Combustible	Litros	70	S/. 3.63	S/. 254.10
				TOTAL	S/. 374.10

Fuente: Propia

4.2. Análisis de factibilidad

Introducción

Las preocupaciones de los stakeholders (partes interesadas) durante los procesos de las extracciones mineras subterráneas son los continuos deslizamientos o derrumbes durante las labores por la falta de inestabilidad en el sostenimiento que conlleva tener equipos atrapados, retrasos en la extracción de minerales y muertes y/o accidentes del personal minero. Otra preocupación son las prácticas ambientales de las empresas mineras que preocupa constantemente a los pobladores hacen que impidan el funcionamiento de las empresas mineras en sus comunidades.

Estas prácticas arruinan no solo el ambiente por vertimientos de agua contaminada, sino también el paisaje con las relaveras producto de la refinación de minerales, creando una desagradable vista en el paisaje. Otra de estas preocupaciones también son la extensión y cimentación de las relaveras, ya que la continua descarga del relave puede provocar fallas en las estructuras produciendo desastres. Este desastre causa contaminación ambiental, pérdida en infraestructura, daños a la población, destrucción del paisajismo y pérdida de vidas humanas. Entre tanto los pasivos ambientales producto de esta actividad como las relaveras es otra de las preocupaciones del minero ya que es de un alto costo en los cierres de mina.

En la minería subterránea se han planteado diversos métodos de relleno para mejorar la confiabilidad del sostenimiento durante las labores mineras. El mejorar el rendimiento de los recursos de las operaciones es una preocupación constante para el minero, y el uso del desecho de relave en las operaciones se ha hecho cada día más frecuente.

Ejemplo, formato de figura (estilo APA):

En algunas minas subterráneas se usa relleno en pasta para los sistemas de relleno; esta pasta lleva en su mezcla un porcentaje de finos de relave; siendo lo más usado en minas como San Rafael (Minsur), Cerro Lindo (Milpo), Iscaycruz (Glencore), Pallancata (Hochschild), entre otros. Su control de calidad es más estricto para poder controlar la granulometría especificada en el diseño de mezcla para cada resistencia. Cuentan con profesionales especializado en este tipo de sistema de relleno para que pueda tener la característica de pasta y alcanzar la resistencia requerida por geomecánica.

La presente investigación presenta un sistema de relleno cementado en forma de mortero usando minerales oxidados de baja ley basándose en mediciones de campo y análisis del relleno en mina subterránea donde se usa el método de minado de corte y relleno ascendente. La comparación entre valores del antes y después del uso de este método de relleno proporciona una buena representación del sistema para la toma de decisiones en cuanto al ahorro en el costo de operaciones. Además, el uso de minerales oxidados de baja ley en las operaciones ayudara a la reducción del relave para evitar colapsos en las presas y al cierre progresivo de la mina.

La confiabilidad que brindaría este nuevo sistema de relleno con mortero de minerales oxidados de baja ley no solo ayudará en la estabilidad de las labores en las operaciones siguientes, sino también el uso del mineral oxidado de baja ley como parte de la mezcla ayudando a bajar los niveles en la relavera y a mejorar el aspecto paisajístico de la zona, mostrando a la comunidad la responsabilidad de la mina por el cuidado del medio ambiente. Esto constituye un aspecto muy importante, ya que la licencia social en la minería se ha vuelto cada día más conflictiva por temas medioambientales. Se propone un nuevo tipo de relleno preparando tajos con puentes y pilares reemplazados con mortero de cementos adicionando minerales oxidados de baja ley previamente, a fin de recuperar totalmente el mineral contenido en estos.

De esta manera, se podrá garantizar la colocación total minerales oxidados de baja ley, filtrando el agua y controlar el drenaje obtenido para su recirculación del circuito después de la masiva extracción de todo el mineral fragmentado contenido de cada tajeo. Las ventajas obtenidas con este nuevo sistema, para aceptación de los empresarios, es el bienestar del entorno social y la preservación del medio ambiente. Además, evita que la mina colapse por explosión de las rocas encajonantes con la consecuente pérdida de dinero en equipo atrapado, mineral “enterrado” y hasta de pérdida de vidas humanas.

Fundamento del aporte

Luego de haber revisado la literatura con respecto a los rellenos usados en la minería subterránea, encontramos que la literatura existente no ha tomado en cuenta las bondades de hacerlo con relleno de mortero de cementos adicionando minerales oxidados de baja ley, más si ha considerado los costos y los beneficios a futuro para las operaciones mineras.

Es precisamente en esta dirección, que está sustentada esta investigación, donde se presenta un innovador sistema de relleno con mortero de cementos adicionando minerales oxidados de baja ley, dando una solución de bajo costo y cumpliendo con los requisitos de resistencia obtenidos por métodos mecánicos. Se delimita la investigación y se centra en la mediana minería formal y la minería subterránea. Se identifican los métodos de minado de relleno o fortificación y con método de corte y relleno ascendente para la toma de muestras.

Esta investigación presenta una metodología de carácter científico en el uso del nuevo sistema de relleno con mortero de cementos adicionando minerales oxidados de baja ley, usando minerales oxidados de baja ley como parte de la mezcla, dando confiabilidad en el sostenimiento de las labores, bajar el nivel de la relavera y evitar accidentes o equipos atrapados durante las extracciones en la minería subterránea.

También se revisó la teoría en cuanto a confiabilidad en el sostenimiento en las labores mineras subterráneas, teniendo como marco teórico principal, la minería subterránea, los métodos de minado, los métodos de sistema de relleno, el sostenimiento y la confiabilidad. En cuanto a la confiabilidad, se centra en que la confiabilidad es la capacidad que un componente, equipo o sistema, no falle o se descomponga durante el tiempo previsto de su funcionamiento bajo condiciones de trabajo definidas.

$$\%C = e^{-\left(\frac{T}{MTBF}\right)}$$

Siendo el MTBF el tiempo medio entre fallas, donde también podríamos relacionarlo con los tiempos de reparación siendo estos:

Tu: Tiempo necesario para que el personal técnico ubique la falla.

Tr: Tiempo de reparación de la falla

Tt: Tiempo necesario para desplazarla

Ta: Tiempo administrativo necesario

$$Tu + Tr + Tt + Ta = MTTR$$

En el caso del sostenimiento entendemos que falla es el evento donde el sostenimiento se cae o deja de cumplir su función frente al macizo rocoso, por tanto, definimos que confiabilidad del sostenimiento en la industria minera es la capacidad de que el sostenimiento no falle. Decimos entonces que es la capacidad de hacer frente a las fallas dentro del sostenimiento para avanzar con las siguientes labores, donde los tiempos no deben ser muy largos.

$\%Cs$ = sostenimiento no falle

La filosofía moderna en tecnología del concreto es como un terno a la medida: si no se hace un estudio previo con la suficiente profundidad y no se domina los principios básicos de la

tecnología del concreto es muy riesgoso en cuanto a las consecuencias en las obras en costos y control de calidad. Se trabajarán con diseños, el primero para las pruebas iniciales y el segundo para el trabajo normal.

Los requerimientos de resistencia del relleno, para lograr la estabilidad local y global dependen de dos factores: del sustento teórico para el cálculo y del método y secuencia de avance del minado. Según esto, el rol estructural del relleno cementado será tener un piso para minar debajo; tener una pared para minar al costado; tener un techo para minar encima.

Estudio técnico

Problematización del estudio técnico

El sostenimiento en las minas subterráneas es el proceso de ejercer estabilidad física a las excavaciones subterráneas mediante el uso de diferentes elementos de sostenimiento salvaguardando vidas y equipos mineros. Entre 2000 y 2015 el 32% de los accidentes mortales son por caída de rocas en minería subterránea según Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM, 2019) ocupando el segundo lugar de accidentes mortales ocurridos en labores subterráneas horizontales como galerías, bypass, crucero, así como tajo convencionales y mecanizados.

Desde la mediana minería subterránea, de acuerdo al comportamiento de su yacimiento y a los anchos de las estructuras mineralizadas, está en el proceso de reducir costos mediante la migración de la explotación de métodos de minado convencionales a métodos de minado mecanizados tales con la aplicación de taladros largos con el método de sublevel Stopping en el caso de que las estructuras sean de ancho mayor a tres metros o la aplicación del método de minado de bench a fill cuando las estructuras sean menores a tres metros.

Dentro de los aspectos estudiados en el proceso de la explotación minera subterránea para reducir los costos, nos encontramos con aspectos tales como las condiciones de macizo rocoso, la geomecánica, el cuidado con las paredes, la recuperación, la presencia de agua, crecimiento de la relavera, perfeccionamiento en las fases de extracción de minerales, operatividad de los equipos, entre otros elementos relevantes que pueden variar según la faena y la etapa de producción en la que se encuentran. El gran logro sería identificar el mejor método para obtener máxima rentabilidad posible dentro del proceso de explotación, teniendo en cuenta reducir los costos y aumentar las toneladas de mineral recuperados.

Es en este sentido que lo que se busca es disminuir el problema de inestabilidad de las labores de explotación originado por los espacios vacíos dejados después de realizar el minado del mineral.

Preparación del mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley

Los minerales oxidados de baja ley se colocarán en una planta dosificadora y mezcladora donde se agrega cemento, agua, arena fina e hidróxido de sodio y es mezclado. El producto final es enviado a una tolva acoplada a una bomba de pistones, llevando el mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley al interior mina por el sistema de tuberías. El contenido de cemento debe ser tal que obtenga una resistencia con el fin de que pueda ser ocupado como piso de trabajo de al menos 2.0 kg/cm² y 4.5 kg/cm² cuando se empleara como pared auto estable, o de acuerdo a los requerimientos determinados por el departamento de geomecánica de la mina.

Bombeo del mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley

La más importante consideración en el diseño del sistema de bombeo, es efectuar la adecuada selección de materiales para preparar el mortero de cemento adicionando minerales oxidados

de baja ley y tener un control granulométrico cuidadoso. Los morteros con revenimientos bajos requieren elevadas presiones de bombeo, mientras que los morteros que tienen altos revenimientos producen golpeteos en las bombas y producen asentamientos cuando las líneas se dejan cargadas. Por esto, se recomienda usar un slump de 7 a 8 pulgadas para su mejor desplazamiento durante el bombeo. Los gradientes de presión aumentan al reducirse el diámetro de la tubería, o al haber cambios de dirección. Los cambios pequeños en el revenimiento del mortero, o de su densidad tendrán un efecto importante, sobre el gradiente de presión.

Diseño de mezcla

La composición de minerales oxidados de baja ley viene condicionada por las propiedades que se exigen a la pasta de concreto fresco y seco. En este caso, se asemeja al mortero de concreto y a la cual la llamos “mortero de minerales oxidados de baja ley”: El mortero de relave fresco debe ser fácilmente manejable y no debe segregarse en el curso del transporte para permitir su compactación sin necesidad de gran energía. Al mortero seco se le exige una determinada resistencia después de un determinado tiempo. Hay que tomar en consideración otras exigencias que dependen de la finalidad y del empleo a la que esta designada este mortero.

En los estudios que se realizaron sobre la composición de una mezcla de mortero, se partió del supuesto de que cuando la compactación es total, las propiedades del relave que trabaja como un árido inerte depende fundamentalmente de la pasta que une estos áridos. Hubo que determinar por lo tanto un valor de la relación agua-cemento (diseño de mezcla), valor que no puede ser sobrepasado en la ejecución del relleno. El cemento, el agua, el relave y el aditivo, cuando se empleen, deben estar mezclados en tal proporción que se conserve la relación agua-cemento especificada y que se alcance la docilidad necesaria y sobre todo,

teniendo en cuenta también, la forma en que se pretende transportar y verter el mortero de relave.

Para obtener una determinada resistencia a la compresión del concreto, a los veintiocho días se pueden hacer usos de tablas con indicación de la relación agua-cemento y que se encuentran en las normas de ACI (American Concrete Institute). En estos cuadros y curvas permite estimar la cantidad de agua que requiere un metro cúbico de concreto fresco compactado en función de la consistencia y composición granulométrica. Si se quiere conseguir un bombeo sin interrupciones, no se debe de cambiar sustancialmente la fórmula de trabajo durante el periodo de relleno.

Es de gran importancia la homogeneidad de la consistencia del mortero de relave fresco y también el mantenimiento de la composición granulométrica y la dosificación del cemento. Durante el transporte la exudación del mortero de relave, puede ser favorecida por las vibraciones de la tubería, dependiendo del tipo de mezcla, composición granulométrica del mineral oxidado de baja ley y también de las propiedades del cemento. Por este motivo se deben de preferir los cementos con buena capacidad de absorción de agua.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que la retracción del mortero de mineral oxidado de baja ley, aumenta con la finura de molido y que un aglomerante hecho de un molido más fino tiene un coeficiente de rozamiento mayor que el de un aglomerante de cemento más grueso para un mismo valor de la relación agua-cemento.

Por lo tanto, lo más indicado para bombear el mortero de relave, es obtener la finura de molido media, que sería la más indicada, siempre y cuando esté asegurada la capacidad de retención de agua. La tensión límite de deslizamiento disminuye, al igual que la consistencia del mortero de mineral oxidado de baja ley, al aumentar el ultra fino hasta una cantidad de 300 kg/m³ y asciende al seguir aumentado los ultra finos. Esto es originado por la

consistencia pastosa que le da el mortero de mineral oxidado de baja ley, el cemento y los ultra finos del mineral oxidado de baja ley.

Debido a estas circunstancias, la conducción se dificulta hasta llegar a pararse la bomba. En general se puede emplear como árido a todos aquellos materiales que en su estructura en que se va emplear, no afecten perjudicialmente al proceso de fraguado y garanticen una adherencia suficiente al mortero. La composición granulométrica elegida no debe ser variada en el curso del bombeo. Al igual relación agua-cemento, el mortero de relave de árido fino precisa para recubrir la superficie de éste y rellenar los intersticios, más cemento que aquel que contenga unos áridos más gruesos.

Por lo tanto, es conveniente emplear una granulometría lo más gruesa posible y con poco volumen de huecos. Sin embargo, por otra parte, los ensayos de bombeo corroboran la experiencia de obra en el sentido de que un mortero de composición granulométrica fina exige menor presión para su transporte que otro de áridos más gruesos. Es especialmente importante que haya suficiente cantidad de finos que pasen la malla # 200 ya que estos forman, con el cemento, la película lubricante adosada a la pared de la tubería e impiden la exudación de la pasta de relave cementado. El exceso de agua disminuye notablemente la resistencia (efecto de la relación agua-cemento) e influye igualmente de manera desfavorable en otras características del relave cementado, por lo tanto, no se debe añadir más agua que la necesaria para el transporte por tubería.

Estos resultados nos dan una idea del comportamiento del relave total como agregado para el uso como relleno de mina y se buscará cambiar o regular sus características de acuerdo a los requerimientos de resistencia solicitados por el geomecánico y que sea auto sostenible, con velocidad de fraguado del relleno (de acuerdo al ciclo de minado) y economía adecuada.

Procedimiento de diseño

Para realizar el diseño del mortero de cementos adicionados con minerales oxidados de baja ley se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Conocer las características de los materiales
- Cálculo del tamaño nominal máximo
- Determinar la resistencia requerida
- Cálculo del revenimiento
- Cálculo del contenido de aire
- Cálculo de la relación agua-cemento
- Cálculo de los volúmenes absolutos de los materiales
- Sumatoria de los volúmenes absolutos de los materiales (cemento, arena, agua, aditivo, aire)
- Cálculo del agregado grueso
- Cálculo de los pesos secos del agregado
- Humedad superficial
- Agua efectiva (agua de diseño – aporte de humedad de material)
- Cantidad de material por m³ corregido por humedad (diseño final)
- Verificar si cumple con la resistencia requerida; de lo contrario volver a diseñar

Una vez conocidas las propiedades del relave a usar y los requisitos de resistencia que necesita el diseño de mezcla, se realiza una mezcla base para ver su comportamiento y determinar si se puede realizar el mortero de minerales oxidados de baja ley a partir del agregado global. Se realizaron ensayos de mezcla con diferentes relaciones de porcentajes de adición de minerales oxidados de baja ley, pero manteniendo la misma cantidad de agua, cemento, arena base de acuerdo a los resultados observados en la determinación de la granulometría y características físicas y químicas obtenidos en las muestras.

Para que tenga las características de bombeabilidad se deberá trabajar con un slump entre 7 y 8 pulgadas, una cantidad constante de parámetros controlando la exudación a casi cero que nos asegure la sedimentación de la mezcla durante el desplazamiento por interior de la tubería que será transportada desde planta al tajo por rellenar; esto evitara atoros de la línea por sedimentación. Para lograr estas características se deberán recurrir al uso de aditivos que le den las particularidades de fluidez, cohesión y mínima contracción las cantidades variables de cemento agua y aditivo. El aditivo empleado para la elaboración de la mezcla de mortero podría ser el SikaLightcrete que incorpora burbujas de aire microscópicas rodeando a cada partícula del agregado y a su vez tiene la tendencia de atraerse mutuamente proporcionando una fuerte cohesividad a toda la mezcla.

Se debe de tener en cuenta que en concretos especiales de baja resistencia como el que estamos diseñando, la ganancia de mayor resistencia a partir de los catorce días es mínima, aun cuando en el tiempo sigue aumentado este valor, pero en cantidades muy bajas; por lo que el diseño lo estamos haciendo para que coincida con el ciclo de minado. El diseño que cumple los requisitos de geo mecánica proyectado para el relleno de la mina los cuales se establecen como diseño patrón para el inicio del reajuste antes de entrar al relleno industrial. Estos diseños deberán ser reajustados cuando se comience la operación de la mina sacando muestras frescas y muestras endurecidas extraídas en los tajos expuestos para comparar sus resistencias e iniciar los reajustes.

En los cuadros que se exhiben en el anexo se tienen los resultados de todos los ensayos con los cuales se tiene una idea del comportamiento de cada una de ellas y la ganancia de resistencia obtenida; la cual se puede aprovechar para seleccionar alguna de ellas cuando se quiera variar los tiempos de los ciclos de minado. Estos resultados nos dan una mezcla Básica; que permite realizar nuevos ensayos hasta alcanzar el diseño óptimo de acuerdo al

ciclo de minado determinado por el jefe planeamiento. Pueden ser dos o tres diseños para ciclos de 7 o 14 días; según se determine.

Ventajas del método de reforzamiento de estructuras de relleno con mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley

Dentro de las ventajas se tienen las siguientes:

El método presenta baja dilución ya que es un método selectivo.

Es posible trabajar vetas de poca potencia, pero alta ley. La dilución debida al acarreo del mineral es mínima.

Puede alcanzar alto grado de mecanización, y su aplicación puede presentar una amplia flexibilidad.

Se adecua a yacimientos con propiedades físicos mecánicas incompetentes.

Aprovecha el material de relave del proceso de concentración.

Permite una disponibilidad inmediata del mineral.

Desventajas del método de reforzamiento de estructuras de relleno con mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley

Dentro de las desventajas se tienen las siguientes:

A los costos de explotación se le debe agregar el costo de la preparación, acarreo y colocación del relleno. El costo disminuiría si se considera la eliminación del costo de la relavera.

Podría elevar el costo la obtención de una bomba ya que, para material pastoso de grano fino, procedente de la preparación, como material de relleno se utilizará la bomba de pistón, que es de válvula de asiento, accionada hidráulicamente, de la serie HSP. Están acondicionadas para rendimientos de hasta 500 m³/h y presiones de transporte de hasta 130 bar.

Mejoras del método de relleno con mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley

De acuerdo a lo señalado aplicando el método de relleno sugerido, se mejoraría lo siguiente:

- Se puede considerar un ahorro en el contenido del cemento, al tener el mineral oxidado de baja ley una característica puzolanica que ayuda a ahorrar hasta el 20% de cemento para obtener resistencias similares.
- Mejorar el sostenimiento para las labores subterráneas evitando que la mina colapse por explosión de las rocas encajonantes, con la consecuente pérdida de dinero en equipo atrapado, mineral “enterrado” y hasta de pérdida de vidas humanas.
- Mejorar el cierre progresivo de mina.
- Mejorar el paisajismo de la superficie del entorno de la unidad minera, minimizando el espacio utilizado por la relavera.
- Sensibilizar a la población de los compromisos de la minera en el cumplimiento legal del medio ambiente.
- La recuperación del 10% al 15% del mineral cubicado (evitando la dilución del mineral al tener paredes auto estables).

La utilización del relave como relleno nos dará un ahorro significativo ya que se reducirá al máximo el uso de áreas para relaveras y se evita así la contaminación ambiental producto del relave y su exposición al medio ambiente. Este tema es un constante dolor de cabeza para toda la actividad minera en general y que obliga a las empresas a grandes inversiones para neutralizar estos pasivos mineros.

Aplicación y costos asociados al nuevo método

Se recogerán muestras de mineral oxidado de baja ley, que a la cual se realiza el muestreo y aporte del nuevo sistema de relleno. Para esto el mineral oxidado de baja ley a usar debe

presentar una consistencia fina. Teniendo en cuenta seguir con la norma técnica ASTM C144 donde se establecen los requisitos para los áridos en los morteros.

Se evaluaron las propiedades físicas y de resistencia del relave basados en la información disponible del mapeo geotécnico de testigos rocosos de los sondajes diamantinos, realizado por el personal del Departamento de Geología. y en base al mapeo geotécnico de las labores mineras subterráneas realizado y las normas ISRM (International Society for Rock Mechanics). La evaluación se realizará mediante ensayos normalizados aplicados a ingeniería de suelos y de construcción tales como el ACI (American Concrete Institute), ASTM (American Society for Testing and Materials) y NTP (Normas Técnicas Peruanas).

Para definir el tipo de relleno a utilizar se ejecutaron varias baterías de diseños con diferentes composiciones o cantidades de mineral oxidado de baja ley y manteniendo constante los agregados, cemento, agua e hidróxido de sodio para encontrar la muestra patrón que nos guíe hacia la mezcla ideal que reúna las características de bombeabilidad, contenido mínimo de agua y resistencias requeridas utilizando como materia prima principal el mineral oxidado de baja ley total. Se realizaron los diseños de mezcla en laboratorio y se hizo el muestreo de resistencia. Teniendo ya el diseño de mezcla aprobado se deberá realizar el proceso del sistema de relleno en mina, para tajos de muestra. Realizado el transporte y relleno del mortero de relave en tajos de muestra, se deberán esperar cuatro y siete días para la verificación de la resistencia en las paredes y pisos rellenados con el mortero de mineral oxidado de baja ley, según el diseño para los ciclos de minado. Estos resultados arrojaron una resistencia a la compresión aceptable de 20.32 y 29.84 MPa respectivamente.

Después de aplicar el nuevo relleno con mortero de mineral oxidado de baja ley en, se obtuvo el cuadro con la nueva propuesta con el siguiente comparativo:

Tabla 10

Cuadro comparativo de muestras.

Tipo de sistema de sostenimiento	Costo de sostenimiento en mina (\$/TM)	MTBF (Horas)	IF	Horas perdidas	Confiability
Tradicional*	2.87	360	Descaje	200	57.38
	2.95	480	Descaje	144	74.08
	2.56	240	Descaje	120	60.65
	2.87	283	Descaje	72	77.88
	3.12	192	Descaje	96	60.65
Relleno en pasta**	4.50	No ocurre	No hay Descaje	8	100.00

Fuente: * Minera Polimetálica del Centro del Perú

* Elaboración propia

A continuación, se presenta un análisis cualitativo costo-beneficio acumulativo asociado a la implementación del mortero con mineral oxidado de baja ley. Este análisis resume los beneficios operacionales, económicos, ambientales, sociales, que afectan a los ambientes físicos, socioeconómicos y de interés humano durante las etapas de explotación y cierre progresivo de las operaciones mineras. La evaluación costo-beneficio se basó en la necesidad de demostrar que aplicando el relleno con mortero de mineral oxidado de baja ley se contribuiría a compensar los impactos generados de las extracciones mineras. En general los beneficios identificados en el análisis, serán ampliamente superados por los costos que se plantean para la implementación del nuevo relleno utilizando desecho de mineral oxidado de baja ley como materia prima principal, repercutiendo en el beneficio operacional, ambiental, social y económico de las operaciones y del entorno minero.

Tabla 11

Costo de operación de la propuesta de aplicación del método de relleno con morteros de cemento adicionados con una reserva de 5 millones (5 000 000) de minerales oxidados de baja ley para mejorar la confiabilidad del sostenimiento

Detalle de costo operativo	Monto \$/TM	en Monto (\$)	Total
Mano de obra	0.30	\$1,500,000.00	
Consumo de cemento	2.94	\$14,700,000.00	
Consumo de hidróxido de sodio	4.00	\$20,000,000.00	
Consumo de energía eléctrica	0.10	\$500,000.00	
Alquiler de una SikaLightcrete	0.10	\$500,000.00	
Operación planta de relleno (Oxido de baja ley sin costo)	0.10	\$500,000.00	
Preparación de barreras, instalación de tuberías y mantenimiento	0.10	\$500,000.00	
Consumo total (\$)		\$38,200,000.00	
Costo / TM		\$7.64	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Beneficio de aplicación del relleno con mortero de cementos adicionando con una reserva de 5 millones (5 000 000) de minerales oxidados de baja ley.

BENEFICIO	DESCRIPCION	VALOR DE CAMBIO	MONTO
Ahorro en cemento (%):	Se puede considerar un ahorro en el contenido de cemento, al tener el mineral oxidado de baja ley geopolimerizado con hidróxido de sodio de hasta:	20%	\$2,940,000.00
Seguridad en labores y equipo atrapado (\$/TM):	Mejora el sostenimiento para labores subterráneas evitando que la mina colapse por explosión de las rocas encajonadas con la consecuencia pérdida de dinero en equipo atrapado, mineral enterrado y hasta posibles pérdidas humanas (\$/Reserva)	3.14	\$15,700,000.00
Cierre progresivo de mina (\$/TM):	Al usar los oxidos totales de baja ley se reduce la inversión en este concepto para el plan de cierre de mina	4.72	\$23,600,000.00
Espacio de la zona de almacenamiento de minerales de baja ley (\$/TM):	Mejora el paisajismo de la superficie del entorno de la unidad minera.	2.83	\$14,150,000.00
Comunidades (\$/TM):	Sensibilizar a la población de los compromisos de la minería en el cumplimiento legal del medio ambiente	2.51	\$12,550,000.00
Recuperación de mineral (\$/TM):	La recuperación del 10 % al 15 % del mineral cubicado (evitando la dilución del mineral al tener paredes autoestables)	18.00	\$90,000,000.00
Consumo total de alta productividad (\$)			\$158,940,000.00
		B/C	4.22

Fuente: Elaboración propia

Con esta relación de B/C se puede concluir afirmando que se beneficia \$4.22 por cada dólar que se invierta.

Evaluación económica de aplicación del relleno con mortero de cemento adicionando con una reserva de 5 millones (5 000 000) de minerales oxidados de baja ley.

Tabla 13

Evaluación económica

INVERSIÓN	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
INGRESOS	25,430,400	28,609,200	31,788,000	34,966,800	38,145,600
Ahorro en cemento (%):	470,400	529,200	588,000	646,800	705,600
Seguridad en labores y equipo atrapado (\$/TM):	2,512,000	2,826,000	3,140,000	3,454,000	3,768,000
Cierre progresivo de mina (\$/TM):	3,776,000	4,248,000	4,720,000	5,192,000	5,664,000
Espacio de la zona de almacenamiento de minerales de baja ley (\$/TM):	2,264,000	2,547,000	2,830,000	3,113,000	3,396,000
Comunidades (\$/TM):	2,008,000	2,259,000	2,510,000	2,761,000	3,012,000
Recuperación de mineral (\$/TM):	14,400,000	16,200,000	18,000,000	19,800,000	21,600,000
EGRESOS	16,112,000	16,866,000	17,620,000	18,374,000	19,128,000
Mano de obra	240,000	270,000	300,000	330,000	360,000
Consumo de cemento	2,352,000	2,646,000	2,940,000	3,234,000	3,528,000
Consumo de hidróxido de sodio	3,200,000	3,600,000	4,000,000	4,400,000	4,800,000
Consumo de energía eléctrica	80,000	90,000	100,000	110,000	120,000
Operación planta de relleno (Oxido de baja ley sin costo)	80,000	90,000	100,000	110,000	120,000
Preparación de barreras, instalación de tuberías y mantenimiento	80,000	90,000	100,000	110,000	120,000

Depreciación		10,080,000				
			10,080,000	10,080,000	10,080,000	10,080,000
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO		9,318,400				
			11,743,200	14,168,000	16,592,800	19,017,600
IGV		859,119				
			966,508	1,073,898	1,181,288	1,288,678
Base Imponibles de Impuesto a la Renta		8,459,281				
			10,776,692	13,094,102	15,411,512	17,728,922
29.50%		2,495,488.00				
			3,179,124.00	3,862,760.00	4,546,396.00	5,230,032.00
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTO		6,822,912				
			8,564,076	10,305,240	12,046,404	13,787,568
Depreciación		10,080,000				
			10,080,000	10,080,000	10,080,000	10,080,000
VALOR NETO ACTUAL		16,902,912				
			18,644,076	20,385,240	22,126,404	23,867,568
FLUJO ECONOMICO	-	16,902,912				
	70,000,000		18,644,076	20,385,240	22,126,404	23,867,568
FLUJO ECONOMICO ACUMULADO	-	53,097,088				
			35,546,988	39,029,316	42,511,644	45,993,972

Fuente: Elaboración propia

En el análisis económico se consideró la tasa de descuento COK de 12%, como referencia de algunos otros proyectos como San Rafael (Minsur), Cerro Lindo (Milpo), Iscaycruz (Glencore), Pallancata (Hochschild), entre otros.

El valor actual neto del proyecto es de 2,069,469 dólares, con una tasa interna de retorno de 13%, por encima de la tasa de descuento definida, y teniendo en cuenta que el periodo de recupero (PRC) es de 3.8, teniendo en cuenta que se requiere 3 años con diez meses para recuperar la inversión de 70 millones de dolares.

Al ser el valor actual neto, altamente positivo y la tasa interna de retorno superior a la tasa de descuento, es factible llevar a cabo el proyecto.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Primera. Se realizó un proceso de evaluación de la resistencia a la compresión de morteros adicionados con minerales de baja ley y su aplicación en estructuras en minería, obteniendo valores de resistencia a la compresión para las adiciones de óxidos minerales de baja ley son de 23.85 MPa, 27.5 MPa, 29.84 MPa y 21.41 MPa, para los morteros MO-5, MO- 10, MO- 15 y MO- 20, respectivamente. Estos valores de resistencia a la compresión representan un incremento de la resistencia a la compresión respecto al mortero patrón del 17.40%, 33.64%, 46.85% y 5.36%, para los morteros MO-5, MO- 10, MO- 15 y MO- 20 respectivamente.

Segunda. Se ha caracterizado químicamente los minerales oxidados de baja ley mediante métodos volumétricos, realizando un diseño de mezcla adecuado para que se logre adicionar los porcentajes de agregado de mineral rico en óxidos, siendo los minerales oxidados de baja ley y se colocaron en una planta dosificadora y mezcladora donde se agregó cemento, agua, arena fina e hidróxido de sodio y es mezclado. El producto final fue enviado a una tolva acoplada a una bomba de pistones, llevando el mortero de cemento adicionando minerales oxidados de baja ley al interior mina por el sistema de tuberías. El contenido de cemento fue de una resistencia que pueda ser ocupado como piso de trabajo de al menos 2.0 kg/cm² y 4.5 kg/cm² cuando se emplee como pared auto estable, o de acuerdo a los requerimientos determinados por el departamento de geomecánica de la mina.

Tercera. Se ha desarrollado el diseño de mezcla para morteros de cementos adicionados con minerales oxidados de baja ley mediante la aplicación norma ASTM C109 Método normalizado de ensayo de resistencia a compresión de morteros de cementos hidráulicos utilizando especímenes cúbicos de 2 pulgadas o 50 mm, logrando morteros con mejoras en

su resistencia a la compresión, para la adición del 15% de mineral oxidado, y hasta con una adición de 20%, lo que implicaría que estos minerales estériles, que son una problemática, debido a su almacenamiento y/o espacio para su disponibilidad, tiene el potencial para ser incorporado en morteros, con el único proceso de su molienda y tamizado, probablemente ahorrando en transporte para su disposición final.

Cuarta. Se evaluó la factibilidad para el uso de minerales oxidados de baja ley en reforzamiento de estructuras de construcciones en minería, logrando determinar un flujo efectivo económico con un valor actual neto del proyecto es de 2,069,469 dólares, con una tasa interna de retorno de 13%, por encima de la tasa de descuento definida, logrando un valor actual neto, altamente positivo y la tasa interna de retorno superior a la tasa de descuento, por lo tanto es factible llevar a cabo el proyecto.

Recomendaciones

Realizar investigaciones en la obtención productos alternativos con materiales reciclados obtenidos a condiciones óptimas, de temperatura y concentración de activador alcalino.

Realizar investigaciones con mezclas de materiales ricos en aluminosilicatos provenientes de los estériles de las minas, como materiales de partida, para su reemplazo total o parcial del cemento portland.

REFERENCIAS

- Aula2005, 2009. *aula2005*. [En línea] Available at: <http://www.aula2005.com/html/cn1eso/05minerales/05elsminerales.htm> [Último acceso: 11 Enero 2020].
- Bonavetti, V. L. y otros, 2013. El modelo de Powers y los límites del contenido de adición de material calcáreo en los cementos portland.. *CONCRETO Y CEMENTO. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO*, 5(1), pp. 40- 50.
- Capasso, I. y otros, 2019. Reuse of mining waste as aggregates in fly ash-based geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, Issue 220, pp. 65- 73.
- Casadiego Quintero, E., Gutiérrez Bayona, . A. G., Herrera Lopez, M. Á. & Villanueva Paez, M. L., 2017. Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras eco-eficientes en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* , VIII(2), pp. 107- 119.
- Champenois, J.-B., Aupoil, J., d'Espinose de Lacaillerie, J.-B. & Poulesquen, A., 2019. Interplay between silicate and hydroxide ions during geopolymerization. *Cement and Concrete Research*, Issue 115, p. 426–432.
- Connie , N. y otros, 2018. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*, Issue 186, pp. 550-576.
- Demir, F. & Moroydor Derun, E., 2019. Modelling and optimization of gold mine tailings based geopolymer by using response surface method and its application in Pb²⁺ removal. *Journal of Cleaner Production*, Issue 117, pp. 237- 246.
- Fueyoeditores, 2018. *fueyoeditores*. [En línea] Available at: <http://www.fueyoeditores.com/rocas-y-minerales/articulos-tecnicos-rocas-y-minerales/1847-tipos-de-esteriles-y-aplicaciones-de-los-mismos-en-las-explotaciones-de-aridos> [Último acceso: 11 Enero 2020].
- Gallón Martínez, S., López Gómez, E. & García Restrepo, C., 2018. Análisis de residuos de ladrillo como agregado grueso para la fabricación de concreto.. *Revista Colombiana de Materiales*, Issue 12, pp. 53- 69.

Gharzouni, A. y otros, 2016. Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties. *Materials and Design*, Issue 94, p. 221–229.

Groover, M., 2013. Propiedades mecánicas de los materiales. En: M. Á. Toledo Castellanos, R. A. del Bosque Alayón, L. Campa Rojas & Z. García García, eds. *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A., p. 47.

Hwang, C.-L., Damtie Yehualaw, M., Vo, D.-H. & Huynh, T.-P., 2019. Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. *Construction and Building Materials*, Issue 218, pp. 519- 529.

Hwang, C.-L., Yehualaw, M. D., Vo, D.-H. & Huynh, T.-P., 2018. Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders.. *Construction and Building Materials*, Issue 218, p. 519–529.

Lottermoser, B. G., 2011. Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes. *ELEMENTS*, Volumen VII, pp. 405- 410.

Mina Santa Elena, 2016. *Declaración de Impacto Ambiental*, Lima: S&L ANDES EXPORT S.A.C. .

MINEM, 2019. *MINEM*. [En línea]
Available at:

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/INVERSION/2019/CP2019-SET2019%20ESP.pdf>

[Último acceso: 11 Enero 2020].

Ministerio de minería- Chile, 2018. *minmineria*. [En línea]
Available at: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-o/oxididos/>

[Último acceso: 11 Diciembre 2019].

Moukannaa, S. y otros, 2019. Alkaline fused phosphate mine tailings for geopolymer mortar synthesis: Thermal stability, mechanical and microstructural properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Issue 511, pp. 76- 85.

Orihuela, J. C., Hinojosa, L., Huaroto, C. & Archer Pérez, C., 2019. *cies*. [En línea]
Available at:

https://www.cies.org.pe/sites/default/files/investigaciones/los_costos_de_la_contaminacion_minera_genero_bienestar_e_instituciones_-

_orihuela_hinojosa_y_huaroto_perez_pmm_0.pdf

[Último acceso: 11 Enero 2020].

Osinermin, 2009. Panorama de la Minería en el Perú , Lima: Osinermin.

Osinermin, 2017. *La industria de la minería en el Perú*, Lima: GRÁFICA BIBLIOS S.A..

Polanco Madrazo, J. A. & Setién Marquínez, J., 2013. *Universidad de Cantabria*. [En línea]
Available at:

https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/868/3_Morteros_hormigones1.pdf

[Último acceso: 11 Diciembre 2019].

Prasanphan, S., Wannagon, A., Kobayashi, T. & Jiemsirilers, S., 2019. Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the presence of low alkali activator solution. *Construction and Building Materials*, Issue 221, p. 409–420.

Rivera Pino , L. R., 2018. *lamolina*. [En línea]
Available at: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3186/rivera-pino-luis-ricardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[Último acceso: 12 Enero 2020].

Rumbo Minero, 2019. *Revista rumbo minero*. [En línea]
Available at: <https://www.rumbominero.com/revista/relaves-mineros-optimizando-la-gestion-para-una-iindustria-ecoamigable/>

[Último acceso: 10 Enero 2020].

Sánchez, L. E., 1995. Manejo de residuos sólidos en minería. *Aspectos Geológicos de Protección Ambiental*, 1(1), pp. 239- 251.

Shi, C., Krivenko, P. & Roy, D., 2005. Alkaline activators. En: T. & Francis, ed. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Canadá: Taylor & Francis Corp., pp. 6-30.

Zeitung, T., 1972. Sobre el fraguado y endurecimiento del cemento. En: *Materiales de Construcción*. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 85- 92.

ANEXOS

Anexo 1
Secuencia aleatoria de experimentos

Secuencia de pruebas	Número corrida	Porcentaje de óxidos
1	20	20
2	11	15
3	6	10
4	2	5
5	4	5
6	3	5
7	18	20
8	15	15
9	10	10
10	16	20
11	5	5
12	19	20
13	8	10
14	9	10
15	12	15
16	14	15
17	13	15
18	7	10
19	1	5
20	17	20

Anexo 2
Dimensiones de promedio de probetas

Dimensiones Promedio (mm)		
probeta	Largo	Ancho
MC- 0 ₁	51.34	51.43
MC- 0 ₂	51.84	52.45
MC- 0 ₃	50.48	50.94
MC- 0 ₄	51.25	52.43
MC- 0 ₅	50.68	52.42
MO-5 ₁	51.54	50.65
MO-5 ₂	52.02	51.12
MO-5 ₃	51.32	50.44
MO-5 ₄	52.32	50.59
MO-5 ₅	52.18	50.56
MO-10 ₁	51.75	50.05
MO-10 ₂	50.90	49.90
MO-10 ₃	52.33	51.12
MO-10 ₄	50.80	51.62
MO-10 ₅	51.36	51.76
MO-15 ₁	50.66	51.10
MO-15 ₂	51.26	52.70
MO-15 ₃	50.88	51.75
MO-15 ₄	51.01	51.38
MO-15 ₅	50.67	51.25
MO-20 ₁	50.82	50.50
MO-20 ₂	53.32	51.93
MO-20 ₃	51.61	53.89
MO-20 ₄	52.46	51.93
MO-20 ₅	53.08	52.41

Anexo 3
Resultados según la secuencia aleatoria de experimentos

Muestra	Fuerza kN	Área (mm ²)	Resistencia a la compresión (MPa)
MC ₁	56.50	2640.24	21.40
MC ₂	52.88	2718.81	19.45
MC ₃	55.69	2571.06	21.66
MC ₄	55.15	2686.61	20.53
MC ₅	49.31	2656.65	18.56
MO-5 ₁	61.34	2610.24	23.50
MO-5 ₂	63.52	2659.00	23.89
MO-5 ₃	60.18	2588.75	23.25
MO-5 ₄	67.46	2646.78	25.49
MO-5 ₅	61.07	2638.05	23.15
MO-10 ₁	67.18	2590.00	25.94
MO-10 ₂	70.66	2539.74	27.82
MO-10 ₃	72.23	2675.28	27.00
MO-10 ₄	75.72	2622.21	28.88
MO-10 ₅	69.48	2658.22	26.14
MO-15 ₁	78.34	2588.73	30.26
MO-15 ₂	79.22	2701.40	29.33
MO-15 ₃	78.18	2632.87	29.69
MO-15 ₄	78.07	2620.64	29.79
MO-15 ₅	78.18	2596.67	30.11
MO-20 ₁	57.92	2566.58	22.57
MO-20 ₂	58.62	2768.64	21.17
MO-20 ₃	59.84	2781.44	21.51
MO-20 ₄	57.02	2723.99	20.93
MO-20 ₅	58.01	2781.75	20.85