

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

Optimización del sistema de relleno hidráulico para el suministro en la mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Ediles Damián PAUCAR PEREZ

Asesor:

Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

Optimización del sistema de relleno hidráulico para el suministro en la mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Vicente César DAVILA CORDOVA
PRESIDENTE

Mg. Silvestre Fabián BENAVIDES CHAGUA
MIEMBRO

Mg. Carlos Edwin ROJAS VICTORIO
MIEMBRO



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"



Firmado digitalmente por CONDOR SURICHAGUI Sarita Silvia FAU 20154605046 soft. M. No. Soy el autor del documento Fecha: 10.2025 13:49:15 -05:00



INFORME DE ORIGINALIDAD N° 037-2025

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. PAUCAR PEREZ Ediles Damián

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo
"Optimización del sistema de relleno hidráulico para el suministro en la mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte"

Asesor:
Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA

Índice de Similitud: **13 %**

Calificativo
APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 8 de octubre de 2025.

Sello y Firma del responsable
de la Unidad de Investigación

DEDICATORIA

A Dios por darme vida y salud a mi madre Lorenza Pérez Celis y a mis hermanos(a), por darme la fortaleza para seguir adelante, el apoyo moral e incondicional para poder llegar a la meta y cumplir mis sueños en la carrera profesional, este logro es de todos ustedes.

IN MEMORIAM

En honor a mi padre Jesús Rodríguez Paúcar Dávila, mi fuente de inspiración y sabiduría, aunque ya no está físicamente conmigo, su amor y espíritu continuarán llevándome cada paso en este camino.

AGRADECIMIENTO

A mi alma mater la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Escuela de Formación Profesional de Ingeniería de Minas por la formación académica que me brindaron para formarme como Ingeniero.

A mi asesor, por la guía y orientación que me brindó durante el planteamiento del proyecto y la ejecución del mismo.

A la Unidad Minera Parcoy, por las facilidades que me brindaron para la obtención de la data necesaria para la investigación.

El Autor.

RESUMEN

La presente investigación tiene como finalidad optimizar el sistema de relleno hidráulico en los tajos de la Mina Rosa, pertenecientes a la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte. El estudio se basa en el uso del relave clasificado Underflow (U/F) mediante cicloneo, como materia prima para la elaboración de una mezcla heterogénea de arenas finas y agua, que conforma la pulpa de relleno hidráulico.

La investigación es de tipo cuantitativa, aplicada y experimental, con diseño descriptivo y correlacional. Se desarrollaron pruebas de laboratorio y campo para caracterizar el material, evaluar el sistema de bombeo, y diseñar mezclas con diferentes proporciones de sólidos y agua. Se analizaron parámetros como densidad de pulpa, resistencia uniaxial (UCS), fluidez, presión de bombeo, consumo energético y costo operativo.

Los resultados determinaron que la mezcla óptima corresponde a una proporción de 67% relave y 33% agua (Mezcla M2), con una densidad de 1.78 g/cm³ y resistencia de 0.52 MPa, cumpliendo los requisitos geomecánicos del método de corte y relleno ascendente. Esta optimización permitió reducir el ciclo de minado de 18 a 11 días (38.9%), y mejorar la eficiencia del sistema sin comprometer la seguridad estructural ni incrementar significativamente los costos.

La prueba estadística t de Student para muestras relacionadas ($t = 8.86$; $gl = 9$; $p < 0.05$) confirmó que la optimización tiene un impacto positivo significativo en el proceso. Se concluye que la gestión eficiente del sistema de relleno hidráulico contribuye a mejorar la productividad, reducir tiempos operativos y fortalecer la sostenibilidad de las operaciones subterráneas.

Palabras clave: Optimización, Sistema de relleno hidráulico, Suministro.

ABSTRACT

This research aims to optimize the hydraulic backfill system in the Rosa pits, part of the Parcoy Mining Unit – Horizonte Mining Consortium. The study is based on the use of underflow slurry (U/F) as raw material for the production of a heterogeneous mixture of fine sand and water, which forms the hydraulic backfill slurry.

This research is quantitative, applied, and experimental, with a descriptive and correlational design. Laboratory and field tests were conducted to characterize the material, evaluate the pumping system, and design mixtures with different solids-water ratios. Parameters such as slurry density, uniaxial strength (UCS), fluidity, pumping pressure, energy consumption, and operating cost were analyzed. The results determined that the optimal mixture corresponds to a ratio of 67% tailings and 33% water (Mixture M2), with a density of 1.78 g/cm³ and a strength of 0.52 MPa, meeting the geomechanical requirements of the up-cut and up-fill method. This optimization reduced the mining cycle from 18 to 11 days (38.9%) and improved system efficiency without compromising structural safety or significantly increasing costs.

The Student's t test for related samples ($t = 8.86$; $df = 9$; $p < 0.05$) confirmed that the optimization had a significant positive impact on the process. It is concluded that efficient management of the hydraulic backfill system contributes to improved productivity, reduced operating times, and strengthened the sustainability of underground operations.

Keywords: Optimization, Hydraulic Backfill System, Supply.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la minería subterránea, el sistema de relleno hidráulico se presenta como un componente esencial para garantizar la estabilidad geomecánica, la continuidad operativa y la seguridad de los trabajadores. La Unidad Minera Parcoy, del Consorcio Minero Horizonte, que incluye la mina Rosa, enfrenta el desafío de optimizar este sistema, aprovechando el relave clasificado Underflow (U/F) como materia prima estratégica para el relleno de los tajos explotados mediante el método de corte y relleno ascendente.

Actualmente, el proceso de cicloneo permite la obtención de arenas finas como subproducto, que, mezcladas con agua, conforman la pulpa que debe cumplir criterios estrictos de densidad, resistencia y fluidez para ser transportada eficazmente a través del sistema de tuberías hacia las zonas de explotación subterránea. No obstante, se requiere una optimización técnica que garantice no solo la calidad del relleno, sino también la eficiencia energética y económica del proceso, contribuyendo a la sostenibilidad de las operaciones.

La presente investigación se enfoca en identificar la combinación óptima de relave U/F y agua para obtener una mezcla que cumpla con los estándares de resistencia geomecánica mínima de 0.5 MPa, asegurando la integridad estructural de los tajos sin comprometer la fluidez del sistema de bombeo. Para ello, se realizaron caracterizaciones físicas y mecánicas del material, pruebas de campo, ensayos de laboratorio y análisis estadísticos que permitan definir la mezcla idónea.

Los resultados obtenidos evidencian que una proporción de 67% de relave y 33% de agua (Mezcla M2) logra un equilibrio favorable entre resistencia estructural (0.52 MPa) y fluidez hidráulica, reduciendo significativamente el ciclo de minado de 18 a 11 días, es decir, una mejora del 38.9%. Este avance representa no solo una

optimización técnica, sino también una mejora en la rentabilidad operativa y la sostenibilidad ambiental, al reutilizar eficientemente los subproductos del proceso minero.

Así, este estudio contribuye de manera significativa al fortalecimiento del sistema de relleno hidráulico en la Unidad Minera Parcoy, promoviendo la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las labores subterráneas, en concordancia con las exigencias normativas y los objetivos estratégicos del Consorcio Minero Horizonte.

El trabajo consta de la siguiente estructura:

Capítulo I Se considera el planteamiento del problema, formulación de problema, objetivos y asimismo y la justificación.

Capítulo II Se presenta el Marco Teórico: compuesto por el contexto de investigación, fundamentos teórico-científicos, definición de conceptos fundamentales, reconocimiento de variables y la descripción operativa de variables e indicadores.

Capítulo III Se compone de la Metodología, en la que se toma en cuenta el tipo y diseño de la investigación, la población y la muestra, el método, la descripción de los métodos e instrumentos de recopilación de datos, el sistema de hipótesis y la operativización de las variables.

Capítulo IV Se compone de la exposición de resultados mediante tablas y gráficos estadísticos, acompañados de sus correspondientes análisis y debates sobre los resultados.

El autor.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

INDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

| | |
|---|---|
| 1.1. Identificación y determinación del problema..... | 1 |
| 1.2. Delimitación de la Investigación..... | 3 |
| 1.2.1. Ubicación | 3 |
| 1.3. Formulación del problema | 4 |
| 1.3.1. Problema general..... | 4 |
| 1.3.2. Problemas específicos | 4 |
| 1.4. Formulación de objetivos..... | 5 |
| 1.4.1. Objetivo general | 5 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.5. Justificación de la investigación | 5 |
| 1.6. Limitaciones de la investigación..... | 6 |

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

| | |
|-----------------------------------|---|
| 2.1. Antecedentes de estudio..... | 7 |
|-----------------------------------|---|

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1.1. | Antecedente internacional | 7 |
| 2.1.2. | Antecedentes nacionales | 8 |
| 2.1.3. | Antecedente local | 10 |
| 2.2. | Bases teóricas – científicas | 11 |
| 2.2.1. | Método de Explotación | 11 |
| 2.2.2. | Ciclo de Minado | 12 |
| 2.2.3. | Relleno en Pasta | 17 |
| 2.2.4. | Tapones de Contención | 23 |
| 2.3. | Definición de términos básicos | 26 |
| 2.4. | Formulación de hipótesis | 29 |
| 2.4.1. | Hipótesis general | 29 |
| 2.4.2. | Hipótesis específicas | 29 |
| 2.5. | Identificación de Variables | 30 |
| 2.5.1. | Variable Independiente | 30 |
| 2.5.2. | Variable Dependiente..... | 30 |
| 2.6. | Definición Operacional de Variables e Indicadores | 31 |

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

| | | |
|--------|-------------------------------|----|
| 3.1. | Tipo de investigación | 33 |
| 3.2. | Nivel de investigación..... | 34 |
| 3.3. | Método de investigación | 34 |
| 3.4. | Diseño de investigación | 34 |
| 3.5. | Población y muestra..... | 34 |
| 3.5.1. | Población..... | 34 |
| 3.5.2. | Muestra..... | 35 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.6. | Técnicas e instrumentos de recolección de datos..... | 35 |
| 3.6.1. | Técnicas..... | 35 |
| 3.6.2. | Instrumentos de recolección de datos | 35 |
| 3.7. | Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación | 36 |
| 3.7.1. | Selección de los instrumentos: | 36 |
| 3.7.2. | Validación de los instrumentos | 36 |
| 3.7.3. | Confiabilidad de los instrumentos..... | 37 |
| 3.8. | Técnicas de procesamiento y análisis de datos | 37 |
| 3.9. | Tratamiento estadístico | 37 |
| 3.10. | Orientación ética filosófica y epistémica..... | 38 |

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | | |
|--------|---|----|
| 4.1. | Descripción del trabajo de campo | 40 |
| 4.2. | Presentación, análisis e interpretación de resultados | 42 |
| 4.2.1. | Presentación de Resultados | 42 |
| 4.2.2. | Mezclas diseñadas y resistencia obtenida | 43 |
| 4.2.3. | Parámetros Operativos del Sistema de Bombeo | 45 |
| 4.2.4. | Comparativa del ciclo de minado..... | 46 |
| 4.2.5. | Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico..... | 48 |
| 4.2.6. | Costos Operativos y Eficiencia del Bombeo según la Densidad de Mezcla. | 49 |
| 4.3. | Prueba de hipótesis..... | 52 |
| 4.4. | Discusión de resultados..... | 55 |

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. <i>Operacionalización de Variables</i> | 31 |
| Tabla 2. <i>Propiedades físicas del relave Underflow (U/F)</i> | 42 |
| Tabla 3. <i>Mezclas diseñadas y resistencia obtenida</i> | 43 |
| Tabla 4. <i>Parámetros operativos del sistema de bombeo</i> | 46 |
| Tabla 5. <i>Comparativa del ciclo de minado</i> | 47 |
| Tabla 6. <i>Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico</i> | 48 |
| Tabla 7. <i>Costos Operativos y Eficiencia del Bombeo según la Densidad de Mezcla</i> ... | 49 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación de la Unidad Minera Parcoy – CMH..... | 3 |
| Figura 2. <i>Equipo robotizado para shotcrete - putzmeister.</i> | 13 |
| Figura 3. <i>Equipo perforador frontonero en labor.</i> | 14 |
| Figura 4. <i>Frente cargado y amarrado</i> | 14 |
| Figura 5. <i>Sistema de ventilación</i> | 15 |
| Figura 6. <i>Desatador Mecánico</i> | 16 |
| Figura 7. <i>Scoop para limpieza de frentes</i> | 17 |
| Figura 8. <i>Diagrama de flow sheet de las plantas de pasta 1 y 2</i> | 18 |
| Figura 9. <i>Filtro de banda</i> | 19 |
| Figura 10. <i>Tanque espesador</i> | 19 |
| Figura 11. <i>Tolva mezclador</i> | 20 |
| Figura 12. <i>Bomba Putzmeister</i> | 21 |
| Figura 13. <i>Prueba de slump de la pasta.</i> | 22 |
| Figura 14. <i>Estructurado 1er nivel de un muro tapón de concreto.</i> | 25 |
| Figura 15. <i>Construcción del 2do nivel de un muro tapón de concreto</i> | 26 |
| Figura 16. <i>Comparación de Mezclas – Resistencia vs. Fluidéz</i> | 45 |
| Figura 17. <i>Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico</i> | 48 |
| Figura 18. <i>Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico</i> | 50 |

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

En el contexto de las operaciones mineras subterráneas de la Mina Rosa, se ha previsto el desarrollo de un estudio técnico orientado a la optimización del sistema de relleno hidráulico, el cual representa un componente esencial para garantizar la estabilidad del macizo rocoso, la seguridad operacional y la continuidad del método de explotación por corte y relleno ascendente.

Actualmente, la planta de producción genera un relave clasificado **Underflow (U/F)** mediante un proceso de cicloneo, que consiste en separar las partículas gruesas (arenas finas) del flujo global de colas. Este material, que constituye un subproducto del proceso de concentración, es considerado materia prima potencial para ser utilizado como mezcla de relleno hidráulico, dado que se encuentra disponible a costo marginal, sin necesidad de procesos adicionales de reducción de tamaño.

El relleno hidráulico preparado en planta consiste en una mezcla heterogénea de arenas finas (**relave U/F**) y agua, formando una pulpa que debe

ser bombeada a través de un sistema de tuberías hasta las zonas de explotación subterránea. Este sistema de transporte debe garantizar que la pulpa conserve una densidad adecuada, capaz de satisfacer los requerimientos en volumen, variedad y resistencia mecánica del relleno.

En este contexto, la presente investigación se enfocará en optimizar el sistema de relleno hidráulico, identificando como variable principal la densidad de la pulpa preparada en planta, y su relación directa con el contenido de sólidos en volumen del relleno depositado en el tajo. Para ello, se desarrollará una caracterización física y mecánica del material, tomando en cuenta las propiedades del relave U/F clasificado por cicloneo, incluyendo ensayos de compresión uniaxial y triaxial.

Asimismo, se elaborará una memoria descriptiva técnica que abarcará las distintas etapas del proceso, desde la clasificación y almacenamiento del relave, preparación de mezclas, bombeo y transporte por tuberías, hasta la disposición final del relleno en los tajos explotados, los cuales serán intervenidos mediante perforaciones horizontales del tipo breasting. Este método busca maximizar la recuperación del mineral y minimizar la dilución generada durante la voladura.

Cabe señalar que, para el método de explotación empleado, se ha determinado que la resistencia mínima requerida del relleno hidráulico es de **0.5 MPa**, según evaluaciones geomecánicas previas del macizo rocoso. En consecuencia, el estudio contemplará el diseño de mezclas que cumplan con esta exigencia, sin comprometer la fluidez hidráulica ni la eficiencia del proceso.

La información técnica será recopilada a través de levantamientos de campo, toma de muestras y ensayos de laboratorio, los cuales se llevarán a cabo

en las instalaciones del Consorcio Minero Horizonte, donde se encuentra ubicado el sistema de procesamiento y transporte de relleno.

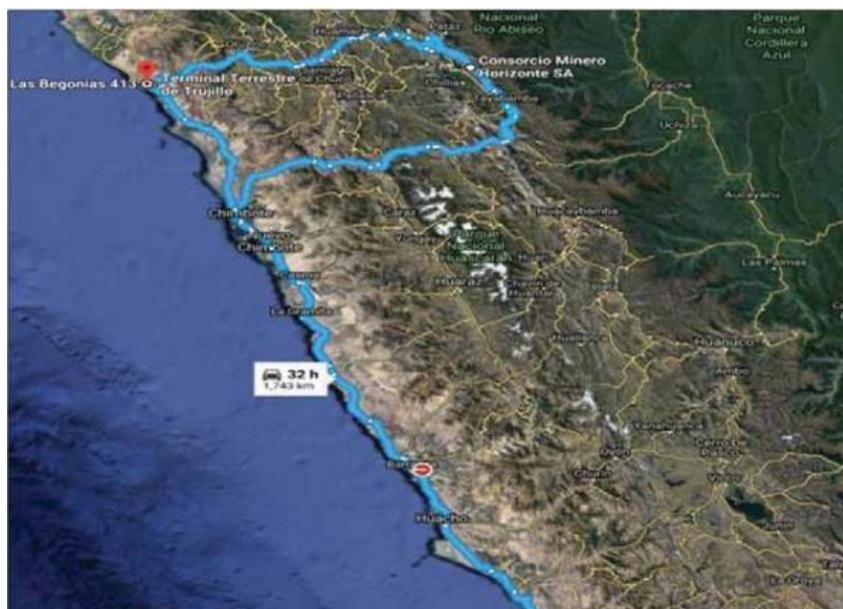
Este estudio se justifica por la necesidad de lograr una gestión eficiente y sostenible del sistema de relleno hidráulico, reduciendo costos operativos, mejorando el desempeño técnico del proceso y asegurando condiciones seguras y estables para el avance de labores mineras subterráneas.

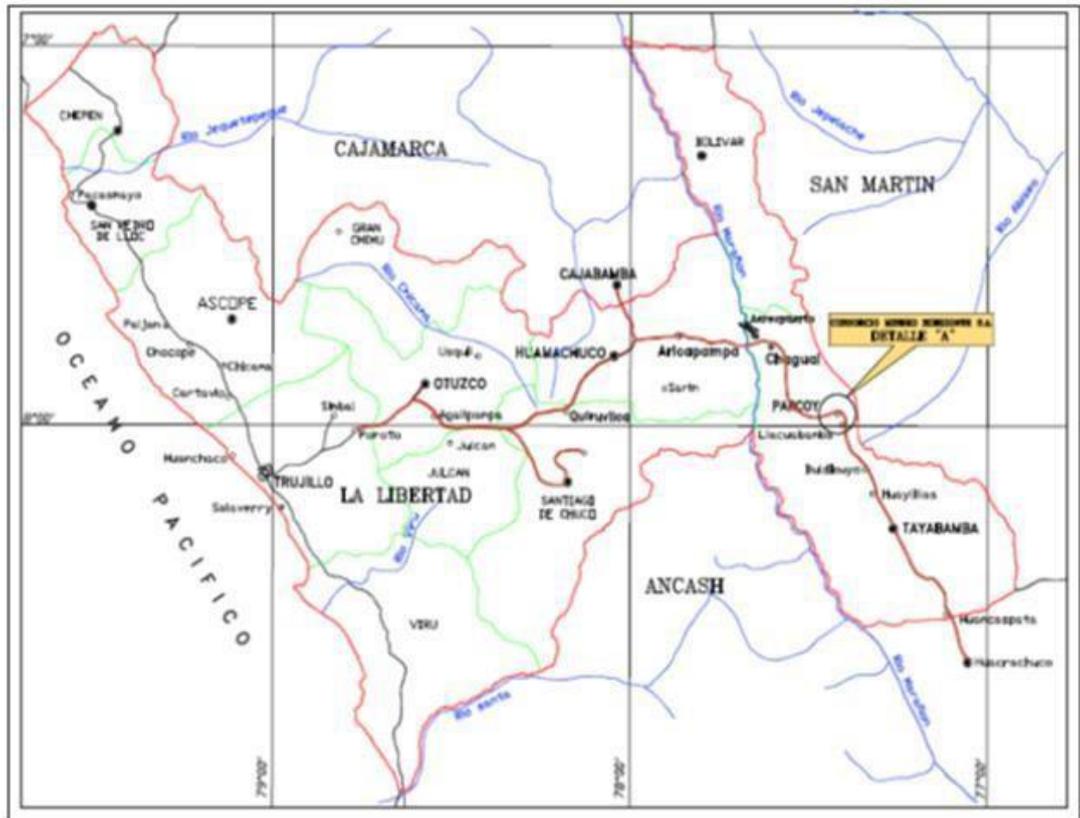
1.2. Delimitación de la Investigación

1.2.1. Ubicación

Nuestro plan se ubica geográficamente en la zona natural de la sierra, concretamente en la región de la Libertad, Distrito de Parcoy en la Provincia de Pataz, con una altitud que oscila entre 2,135 y 2,340 metros sobre el nivel del mar. En la actualidad, la región tiene una topografía irregular, con inclinaciones que varían entre el 20% y el 60%.

Figura 1. *Ubicación de la Unidad Minera Parcoy – CMH.*





Fuente: UEA. Huachocolpa Uno

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Será factible la optimización del sistema de relleno hidráulico para garantizar un suministro eficiente y adecuado hacia los tajos de la Mina Rosa, en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Será posible optimizar el sistema de relleno hidráulico de relave clasificado U/F para alcanzar los parámetros de estabilidad requeridos en los tajos de la Unidad Minera Parcoy?
- b. ¿En qué medida la implementación del relleno hidráulico en la mina Rosa contribuirá a simplificar y mejorar el ciclo de minado en la Unidad Minera Parcoy?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Optimizar el sistema de relleno hidráulico mediante el control de la densidad de pulpa del relave clasificado U/F, con el fin de garantizar un suministro eficiente hacia los tajos de la Mina Rosa, en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Optimizar las propiedades del relleno hidráulico con relave clasificado U/F, para cumplir con los parámetros de estabilidad requeridos en los tajos de la Unidad Minera Parcoy.
- b. Implementar el sistema de relleno hidráulico en la mina Rosa, con el propósito de simplificar y mejorar la eficiencia del ciclo de minado en la Unidad Minera Parcoy.

1.5. Justificación de la investigación

La Unidad Minera Parcoy cuenta con una infraestructura integrada que incluye planta concentradora, depósitos de desmonte y relaves, así como un sistema de transporte de relaves y un sistema de relleno hidráulico por tuberías para el minado subterráneo. Uno de los componentes críticos para la continuidad y sostenibilidad del proceso de explotación es el sistema de relleno hidráulico, el cual actualmente presenta un avance del 20% en su implementación operativa.

Este sistema, basado en el uso de relave clasificado U/F como materia prima, representa una solución técnica y económica para el relleno de tajos explotados mediante el método de corte y relleno ascendente. No obstante, se hace necesario optimizar dicho sistema, particularmente en lo que respecta al control de la densidad de la pulpa, con el fin de asegurar que el relleno cumpla con los

requerimientos de volumen, variedad de mezclas y resistencia mecánica mínima (≤ 0.5 MPa), necesarios para garantizar la estabilidad geomecánica de los tajos.

La presente investigación busca contribuir significativamente a la mejora del sistema de relleno hidráulico para el suministro eficiente y seguro hacia los tajos de la Mina Rosa. Su desarrollo permitirá no solo optimizar recursos y reducir costos operativos, sino también incrementar la recuperación del mineral y disminuir la dilución en el proceso de explotación, aspectos clave para la rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera.

1.6. Limitaciones de la investigación

Para el cumplimiento con la normativa del D.S. N.º 024-2016-EM y su modificatoria D.S. N.º 023-2017-EM, Art. 226 y 227 hacen referencia que, en toda operación de relleno de labores explotadas, se deberán cumplir con realizar estudios de resistencia, granulometría, velocidad de percolación, densidad relativa y velocidad de consolidación, entre otros. Estos detalles fueron en un momento las limitaciones que se tuvo, pero se superaron gradualmente logrando cumplir la norma vigente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedente internacional

Vives, G. (2015), de la **Universidad de Chile**, realizó el estudio de tesis: "**Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado**". Su meta fue llevar a cabo un diseño comparativo minero entre una mina subterránea que emplee rellenos cementados y otra que no. Estos diseños deben ser geomecánicamente estables, no deben generar hundimiento en la superficie y deben optimizar la recuperación minera para maximizar la recuperación de la mina. Dado que la minería en Chile y a nivel global está experimentando un agotación de sus extensos depósitos superficiales, esto significa que se requiere una mayor intensificación en el uso de técnicas de extracción subterránea. Este cambio de la minería de tajo abierto a los depósitos subterráneos se ve impulsado por un incremento en las investigaciones enfocadas en perfeccionar estos métodos, con el fin de convertir en explotables yacimientos que anteriormente solo se descartaban debido a elevados costos de inversión y

operación, o por dificultades de estabilidad geomecánica. Y llega a la conclusión que, al analizar los pros y contras del empleo de relaves cementados como relleno para minas subterráneas, se demuestra que la implementación de esta tecnología en una mina de cobre en Chile es viable, además de ser factible su implementación en depósitos de otros minerales y en otras regiones de Sudamérica. Esta tecnología hace que el negocio minero sea más sostenible, aumentando las ganancias económicas y la durabilidad de la explotación, además de disminuir el volumen de relaves que necesita ser transportado y depositado en tranques de relaves. Esto último conlleva una reducción en la inversión, gestión y clausura de los depósitos de desechos mineros, así como una reducción de los peligros vinculados a estos depósitos (como la contaminación directa del suelo, agua y aire a causa de los derrames y el propio tranque).

2.1.2. Antecedentes nacionales

Yllanes Reyes & Naysha Elena (2022) realizaron su investigación titulada: Implementación y optimización del proyecto, planta de relleno hidráulico cementado - Minera Colquisiri, Huaral. Para la Universidad Cesar Vallejo

Esta investigación presenta la aplicación de la metodología BIM en la elaboración de un proyecto de ingeniería detallada del sector minero. El propósito principal de la investigación es establecer la optimización y la aplicación de la metodología BIM para mejorar el proyecto de la planta de relleno hidráulico cementado - Minera Colquisiri, Huaral-2022. El proyecto de estudio es de naturaleza aplicada, de diseño no experimental, descriptivo y de orientación cuantitativa, de carácter transversal. Durante la ejecución del proyecto, se logró la creación de un plan de ejecución BIM (BEP), que facilitó una mejor orientación

en la construcción del proyecto de una ingeniería de detalle. Inició con la proyección de modelos BIM en 7 diferentes plataformas virtuales de Autodesk de diversas especialidades. Luego se desarrolló el proyecto en la plataforma Autocad 3d plant, para la organización y gestión de los modelos importados de los diferentes programas, Tras la creación e importación del proyecto, se llevó a cabo la integración digital en los tres niveles de la plataforma del proyecto en el programa Naviswrok 2022. Se guio a través de las coordenadas y rotación del eje del espesador de relaves del área 200 de la plataforma El.184,0 para conseguir la maquetización en 3D. Al tener los datos en el programa, se comenzó a construir de manera colaborativa por niveles y especialidades. Esto facilitó la identificación del análisis de interferencias de diversas disciplinas utilizando Choque Detective, entre otras especialidades. En total, se hallaron 2.106 interferencias detectadas con el programa Navisworks 2022. Además, se logró conseguir el timeliner, una secuencia de trabajo o incluso una simulación digital. Es posible deducir que el uso de la metodología BIM es viable para el desarrollo del proyecto de planta de relleno hidráulico. También se puede deducir que facilita una coordinación y colaboración óptima del proyecto en la plataforma BIM, lo que posibilita la obtención de análisis de interferencia, medidas reales, coordenadas, así como la sincronización y actualización de los diseños proyectados antes de la construcción correspondiente.

Huamán, L (2007) ejecutó el estudio de tesis: "**Aplicación de relleno hidráulico en la Mina Jimena de Compañía Minera Poderosa S.A.**". Su estudio se centra en la interrogante ¿Cómo minimizar el problema de inestabilidad en los trabajos de extracción de la Veta Jimena, causado por las áreas vacías dejándose tras la ejecución del minado del mineral? Para preservar

la estabilidad de la roca en la restauración de pilares, se han llevado a cabo una serie de estudios en el macizo rocoso, tomando en cuenta la consideración de la estabilidad de la roca: características del macizo rocoso, tipo de soporte, longitud de la excavación, perforación y torsión. La roca exhibe diversas clases de discontinuidades, tales como: áreas de corte, diaclasas y fracturas, vínculos litológicos, relleno de discontinuidades, fallos, entre otros. Estos atributos estructurales muestran un comportamiento específico ante las operaciones de minado.

Se deduce que, para reducir las dificultades de inestabilidad del macizo rocoso, originadas por las áreas vacías generadas por la explotación del yacimiento, es imprescindible rellenar estas áreas. Para ello, se utilizará como componente del relleno hidráulico el desmonte proveniente de la mina, logrando simultáneamente minimizar el efecto ambiental perjudicial causado por la acumulación de desmonte en la superficie.

2.1.3. Antecedente local

Víctor FLORES HURTADO (2022) en su tesis: Aplicación del relleno hidráulico en Mina socorro – U.P. Uchucchacua de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

El método de Relleno Hidráulico representa una opción interesante para cubrir las áreas vacías generadas en la minería. La sencillez en el traslado y en la deposición de los sólidos lo convierte en un sistema técnicamente y económicamente factible. El relleno hidráulico trasladado necesita tener determinadas propiedades físicas, tales como una granulometría adecuada, un porcentaje de sólidos en la pulpa, una velocidad de transporte que exceda la velocidad crítica para prevenir la sedimentación en las tuberías, entre otras

características más. Al ser depositada en las tareas, la pulpa debe tener características extra como una velocidad de percolación adecuada, así como un nivel de cohesión suficiente para sostener los esfuerzos que la rodean. De igual manera, necesita tener una estabilidad química para prevenir la creación de aguas ácidas debido a la existencia de pirita en su proceso de oxidación del azufre y lixiviación de los metales relacionados. Este reporte detalla todo el procedimiento del relleno hidráulico, desde su recolección en la planta concentradora, clasificación, traslado y deposición en las zonas vacías dejadas por la actividad minera. El contenido de este trabajo actúa como un manual y orientación al visualizar la condición actual del relleno y su proyección futura. Además, se obtiene el beneficio ecológico debido al uso de más relave. Además, comprende la infraestructura del sistema de relleno hidráulico, análisis granulométricos, rendimiento, propiedades del relave (características físicas y químicas), y la disposición actual del relave.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Método de Explotación

Para una explotación subterránea, el método de minado requiere que el depósito satisfaga ciertos criterios como la resistencia del mineral y de la roca encajonante, incluyendo su dimensión, forma, profundidad, ángulo de desplazamiento y ubicación del depósito. La información sobre el macizo rocoso es crucial para el cálculo de las tareas de explotación y ayuda en la selección de un método de minado.

Método de Corte Relleno Ascendente

Es el método de corte y relleno ascendente en breasting. Este método se aplica donde las vetas tienen buzamiento de 65° - 75° , potencias de 2.0 m en

promedio. La preparación comienza con una rampa en espiral que se proyecta hacia el piso de la estructura. Desde la rampa se generan ventanas (rampa - gradiente del 15%) hacia la estructura. Tras cortar la estructura, se forman galerías Norte y Sur con longitudes de 35 a 40 m en promedio (límite del tajo). Para el cambio de piso, la galería se llena con una mezcla del 80% de relleno detrítico (roca estéril o desmonte de la voladura de los frentes de avance) y relleno hidráulico (arena fina de relave clasificado U/F) y se desquincha la ventana de acceso (rebatido).

En la explotación se realiza la perforación de frentes se realiza con jumbo frontonero modelo Muqui con barra de perforación de 10 hasta 14 pies, la limpieza de mineral en los tajos se efectúa con scooptram de 4.0 yd³, el sostenimiento se realiza con el lanzado de shotcrete a 2" de espesor más pernos swellex de 5 a 7 pies, para el acarreo se utilizan scooptram 4.0 yd³ y dumper de 15 ton, para la extracción se usan volquetes de 25 y 30 ton..

2.2.2. Ciclo de Minado

El procedimiento de minería incluye: sostenimiento, perforación, voladura, ventilación, desagüe mecanizado, limpieza y transporte, para el método de explotación de "Corte Relleno Ascendente".

Sostenimiento

En la minería, los sostenimientos utilizados son el shotcrete vía humedad de espesor que pueden llegar a 2", 3" y 4" dependiendo de la evaluación geomecánica en el trabajo requerida. Estos se fortalecen con fibras sintéticas para llegar a los $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ y se empernan con pernos helicoidales sistemáticos de 10' espaciados de 1.5m x 1.5m. En las selladas y cruces, durante la elaboración de tajos en los niveles superior e inferior, se colocan los cables

boletín de 6,5 m a 15 m, siempre que el terreno lo requiera y evaluación geomecánica previa.

Hay tareas que atraviesan áreas de rocas con RMR de bajo a muy bajo, este terreno de baja calidad de roca necesita el sostenimiento de shotcrete, pernos helicoidales y malla electro soldada.

Figura 2. *Equipo robotizado para shotcrete - putzmeister.*



Fuente: Unidad Minera Parcoy - Mina Rosa

Perforación

En el sector minero, se emplean perforadores frontoneros para tareas de progreso y desarrollo. Estos dispositivos hidráulicos poseen 2 brazos perforadores para realizar el funcionamiento en una sección de 5m x 4,5 m. El uso de equipos con la tecnología más avanzada, promueve el progreso de los metrajes perforados y facilita la realización del metraje programado.

Figura 3. *Equipo perforador frontonero en labor.*



Fuente: *Unidad Minera Parcoy - Mina Rosa*

Voladura

Se lleva a cabo el desplazamiento utilizando el equipo anfoloader (cargador neumático automatizado). Accesorios de voladura: fanel de duración breve (15m): carmex (guías montadas).

Explosivos: dispositivo de detonación (pentacord 5p): emulsión 3000 (2" x 12") agente de voladura: anfo.

Figura 4. *Frente cargado y amarrado*



Fuente: *Unidad Minera Parcoy - Mina Rosa*

Ventilación

En la minería, el sistema de ventilación se compone de ventiladores principales, extractores principales y ventiladores auxiliares. Todos estos elementos conforman una compleja red que actualmente aporta a la mina 2'000 000 de CFM, lo que permite satisfacer la demanda actual de 1'700 000 CFM, sin tener en cuenta la exigencia por voladura, ya que se efectúa durante el cambio de guardia.

Figura 5. *Sistema de ventilación*



Fuente: *Unidad Minera Parcoy - Mina Rosa*

Desate Mecanizado

El desatado se lleva a cabo con el objetivo de eliminar las rocas flojas presentes en los hastiales, coronas, entre otros, utilizando los desatadores electrohidráulicos Scaler BTI.

En esta zona se lleva a cabo el desatado en frentes ciegos como cruceros, galerías, rampas, entre otros, y en tareas donde las condiciones de seguridad son inestables, así como en las ventanas de los tajos vacíos para la elaboración de los tapones de contención de relleno.

Figura 6. Desatador Mecánico



Fuente: Unidad Minera Parcoy

Limpieza y transporte

El sitio conocido como cámara de carguío, diseñado para las condiciones del tajo de extracción del nivel inferior, es donde el Scoops carga el material y lo vierte en el camión. Este último es el encargado de transportar el material hasta las parrillas situadas en el Nivel 1820, o en ciertos casos, cuando las parrillas están en mantenimiento, el mineral se traslada a la superficie en el botadero, donde va a pasar al siguiente proceso el cual es el chancado.

Figura 7. *Scoop para limpieza de frentes*



Fuente: Unidad Minera Parcoy

2.2.3. Relleno en Pasta

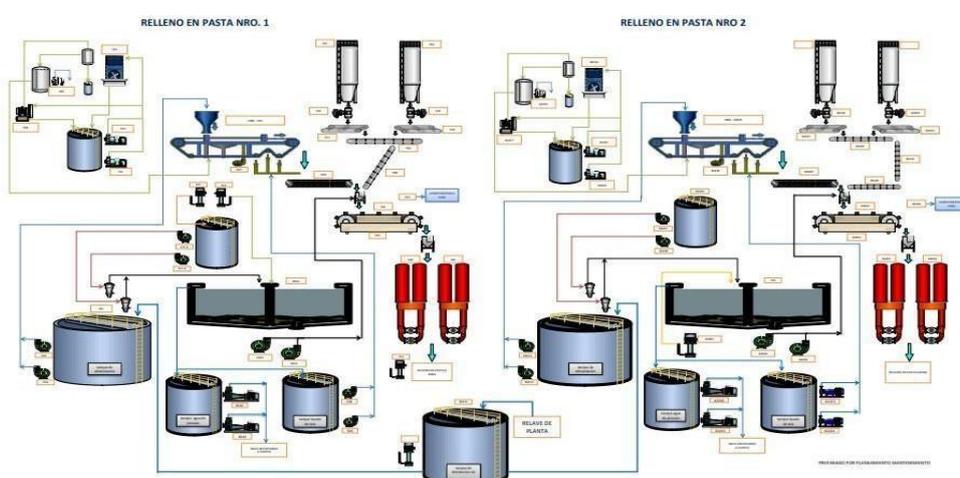
Planta de Relleno en Pasta

La rellena es un fluido no Newtoniano, con una elevada concentración de sólidos. Se emplea el relave total producido por la planta concentradora, que se combina con cemento y agua para lograr una pasta con valores de resistencia a la compresión uniaxial, a un tiempo específico de curado y que satisfaga los parámetros operacionales para un óptimo bombeo y transporte a grandes distancias. Esta mezcla, debido a su escaso contenido de agua, presenta una consistencia espesa. Las partículas de diversas dimensiones no se separan ni

se acumulan mientras la pasta es impulsada a través de las líneas de relleno hasta los tajos destinados a ser rellenos.

La UM Cerro Lindo dispone de dos instalaciones de relleno en pasta, que llevan a cabo la elaboración del relleno de manera autónoma, desde recibir el relave de la fábrica metalúrgica hasta efectuar el bombeo hacia los tajos destinados a ser rellenos.

Figura 8. Diagrama de flow sheet de las plantas de pasta 1 y 2



Fuente: Unidad Minera Parcoy

a. Filtro de banda

El filtro de banda horizontal se alimenta continuamente por bombeo controlado mediante un lazo de control entre el VFD de la bomba y el sensor del nivel del tanque. El tanque está equipado con un agitador para mantener en suspensión los sólidos de la pulpa. La alimentación al filtro se distribuye uniformemente sobre la banda en el extremo opuesto del rodillo de tracción del filtro-banda.

Figura 9. *Filtro de banda*



Fuente: Unidad Minera Parcoy

b. Tanque espesador

El agua extraída del proceso de filtrado se dirige al espesado, donde se procede a separar el agua de los elementos sólidos sedimentados para posteriormente ser reutilizada y los sedimentos se reincorporan al proceso de filtrado y los sedimentos vuelven al proceso de filtrado.

Figura 10. *Tanque espesador*



Fuente: Unidad Minera Parcoy

c. Mezclador (Mixer)

Este equipo procesa la combinación entre el relave, el cemento y el agua. Este tipo de dispositivos cuentan con un sistema en el que el llenado y vaciado se lleva a cabo mediante válvulas mixproof (resistentes a fugas), lo que permite efectuar simultáneamente el llenado, vaciado y limpieza de varios tanques simultáneamente.

Figura 11. *Tolva mezclador*



Fuente: Unidad Minera Parcoy

d. Bomba Putzmeister

Se trata de una bomba de desplazamiento positivo capaz de bombear 105 m³/h de pasta sólida del 83.8 %, reportando una reología que corresponde a un asentamiento de 175 mm (7" slump). Impulsada hidráulicamente por un motor de 450 Kw., opera a una velocidad de 7,7 golpes por minuto con una presión de 60 a 80 bares.

Figura 12. *Bomba Putzmeister*



Fuente: Unidad Minera Parcoy

Pasta

Es una combinación compuesta principalmente por relave de planta concentradora, cemento y agua con el objetivo de lograr una resistencia con un período de fraguado. Para incrementar la cantidad de sólidos en su pulpa, se deben realizar dos procesos de separación entre sólido y líquido. Se emplea el 100% de relaves producidas por la planta concentradora para formar la mezcla.

Figura 13. *Prueba de slump de la pasta.*



Fuente: Unidad Minera Parcoy

Reología de la Pasta

Los fluidos experimentan movimientos que conducen a una deformación basándose en unos fundamentos físicos que la reología analiza. El comportamiento de estos principios se define por el movimiento del fluido, el esfuerzo al corte, la viscosidad y el gradiente de velocidad.

Para que la pasta pueda ser transportada, el purín posee una reología característica del mineral del yacimiento VMS, un elemento crucial en la elección de una bomba, localización de la planta de relleno en pasta y el sistema de transporte.

2.2.4. Tapones de Contención

En la Unidad Minera se emplean los recipientes de hormigón tipo muros para la contención del relleno dentro del tajo.

Muros de Concreto

El relleno en pasta facilita la organización del relave, manteniendo el ciclo de minado ininterrumpido. Para rellenar un tajo se requiere la edificación de muros de contención, por lo que es crucial el estudio de su ciclo de edificación.

Una vez finalizada la explotación del tajo, se lleva a cabo el procedimiento de entrega. En este, se definen las condiciones en las que debe situarse la ventana de extracción del tajo para comenzar la edificación del muro de contención. Estas condiciones son las siguientes:

- **Iluminado:** Optimiza la visibilidad en la zona de edificación
- **Dique de seguridad:** Restringir el espacio laboral hacia el lado del tajo, lo que evita que los empleados se encuentren expuestos al espacio vacío.
- **Desate:** Escoge las piedras sueltas o bancos.
- **Sostenimiento con shotcrete:** Garantiza la corona y los hastiales
- **Raspado de piso:** La edificación del muro debe llevarse a cabo en roca sólida.

Asimismo, durante la edificación del muro de contención, es necesario respetar los siguientes criterios:

- Pernos de espesor de 5/8" y longitud de 9', espacios cada 40 cm en el suelo, hastiales y corona.
- Perno inyectado 5' de longitud y voladizo 4' de longitud
- Estructurado de aceros de 1/2" creando una doble malla, con una

separación de 20 cm entre aceros verticales y horizontales, y una separación de 20 cm entre malla y malla.

- Espesor del muro 35 cm.
- Edificación en dos secciones, el primer segmento tiene una altura de 2,8 m y el segundo segmento la longitud residual de la ventana.
- El periodo de edificación de un muro se va a modificar en función de: La herramienta empleada en la perforación; siempre se perforará el suelo con Jackleg, la perforación de los hastiales y la corona se determinará de la posición del bolter.
- Si se inicia la perforación de los hastiales con jackleg, también es necesario finalizar la perforación de la corona con jackleg.
- La utilización del empernador, que ofrece una calidad superior de perforación en términos de limpieza y dirección de los taladros, lo que simplifica la adherencia al estándar de inyección de los pernos.
- La mano de obra en el segundo nivel, que puede llevarse a cabo en andamios o en un dique de plataforma, esto dependerá de si se empleará la jackleg para finalizar la perforación de la corona.
- La inyección de los pernos, que puede llevarse a cabo manualmente o mediante la utilización de una bomba Ictus.
- Las dimensiones de la ventana, en caso de ser de gran tamaño, se requiere más tiempo desde la perforación hasta el momento de vaciado, ya que conlleva más preparaciones de mezcla.
- Al organizar los agregados y cemento, cuando no existen trabajos próximos para depositar los materiales, el tiempo de elaboración de la mezcla se extiende debido a que el mezclador necesita efectuar un

desplazamiento más extenso.

- La disponibilidad de electricidad, la ausencia de electricidad no interrumpe el proceso, sino que lo extiende, ya que hace más lento el corte de los listones de madera y las planchas de triplay para el encofrado, así como los aceros de construcción y los cables para la estructura.

Figura 14. *Estructurado 1er nivel de un muro tapón de concreto.*



Fuente: *Unidad Minera Parcoy – Mina Rosa*

Figura 15. Construcción del 2do nivel de un muro tapón de concreto



Fuente: Unidad Minera Parcoy – Mina Rosa

2.3. Definición de términos básicos

a. Buzamiento

Es el ángulo de la veta, la capa o revestimiento que se forma en relación a la horizontal y se evalúa en un plano vertical.

b. Caballo

Se refiere al área estéril de gran tamaño que se manifiesta dentro de la veta, generalmente del mismo material de las rocas que la forman.

c. Caja Piso

Es la piedra que está debajo de la veta.

d. Caja Techo

Es la piedra sobre el lado superior de una veta inclinada.

e. Cicloneo

Se usa el término "cicloneo" para describir el proceso de separación de partículas sólidas, utilizando diferentes tipos de fuerzas.

f. Constituyentes esenciales de los criaderos son

La ganga, la mena, y el estéril.

g. Contactos litológicos

Normalmente constituyen, por ejemplo, la caja techo y la caja piso de una veta.

h. Depósitos primarios y secundarios

Los primeros están vinculados al proceso inicial de formación de las rocas. Los segundos se generan mediante la modificación de los primeros y usualmente resultan en la creación de nuevos minerales.

i. Desmonte

Es cualquier material estéril que carezca de valor financiero.

j. Diaclasas

También conocidas como juntas, son fisuras que no han sufrido un desplazamiento y que suelen aparecer en la masa de rocas.

k. Diseminaciones

Son depósitos minerales en los que los granos de mineral se encuentran dispersos en la masa de roca.

l. Estratificación

Es una superficie distintiva de rocas sedimentarias que distingue capas de litología similares o distintas. Estas rocas también pueden aparecer en rocas que se hayan generado a partir de la transformación de rocas sedimentarias.

m. Explotación

Es un procedimiento de minado para obtener el mineral económico mediante diferentes técnicas de extracción, para luego ser aprovechado en

la planta concentradora.

n. Materia Prima

Es el mineral que se obtiene de la corteza terrestre como resultado de procesos geológicos. Se trata de un material inorgánico que se utiliza para fabricar bienes económicos.

o. Masa Rocosa

Es el entorno in situ que alberga diversas clases de discontinuidades como diaclasas, estratos, fallas y otras características estructurales.

p. Matriz rocosa

Material de roca sin alteraciones o bloques de roca sin alteraciones entre discontinuidades (muestra de mano o superior). Aunque se le considera continua, es variada y anisótropa, vinculada a la fábrica, textura y estructura, y es un mineral.

q. Optimización

En términos generales, hace referencia a la habilidad de realizar o solucionar un asunto de la forma más eficaz posible y, en la mayoría de las situaciones, empleando la menor cantidad de recursos posible.

r. Pulpa

Es una mezcla de sólidos y líquidos, en la que los sólidos están suspendidos en un líquido, generalmente agua. Se puede considerar un fluido homogéneo.

s. Planta de producción de relave

Es una instalación que procesa los materiales sobrantes de la extracción de minerales. El proceso incluye espesamiento, filtración y almacenamiento.

t. Productividad

Es la relación entre la cantidad de bienes y servicios producidos y la cantidad de recursos utilizados.

u. Relave

Es un grupo de residuos provenientes de procesos mineros de concentración de minerales, generalmente formado por una combinación de rocas trituradas.

v. Sistema de Relleno Hidráulico

El Sistema de Relleno Hidráulico representa una alternativa interesante para cubrir las áreas vacías generadas en la minería. La sencillez en el traslado y en la deposición de los sólidos lo convierte en un sistema técnicamente y económicamente factible.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La optimización del sistema de relleno hidráulico permitirá un suministro eficiente y continuo hacia los tajos de la Mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte.

2.4.2. Hipótesis Específicas

- a. La optimización del sistema de relleno hidráulico con relave clasificado U/F permitirá alcanzar los parámetros de estabilidad requeridos en los tajos de la Unidad Minera Parcoy.
- b. La implementación del sistema de relleno hidráulico en la mina Rosa facilitará la simplificación y eficiencia del ciclo de minado en la Unidad Minera Parcoy.

2.5. Identificación de Variables

2.5.1. Variable Independiente

- X: Optimización del Sistema de Relleno Hidráulico en la Unidad Minera Parcoy.

2.5.2. Variable Dependiente

- Y: Suministro en la Mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy.

2.6. Definición Operacional de Variables e Indicadores

Tabla 1. Operacionalización de Variables

| TIPO DE VARIABLE | NOMBRE DE LA VARIABLE | DEFINICIÓN OPERACIONAL | DIMENSIONES | INDICADORES |
|------------------------|---|--|--|--|
| VARIABLE INDEPENDIENTE | X: Optimización del Sistema de Relleno Hidráulico en la Unidad Minera Parcoy. | La Unidad Minera Parcoy, tiene como principales componentes: la planta concentradora, depósito de desmonte de mina, depósito de relaves y sistema de transporte de relaves de la planta al depósito de relaves, minado subterráneo que incluye un sistema de transporte de relleno hidráulico por tuberías desde planta de relleno hasta los tajos de mina. Trabajos efectuados en un 20%, por lo que se requiere su optimización. | Planificación Minera Operaciones Mineras Ciclo de Minado | Parámetros Geotécnicos Geomecánica Método de Explotación |

| | | | | |
|---|--|---|---|---|
| <p style="text-align: center;">VARIABLE DEPENDIENTE</p> | <p style="text-align: center;">Y: Suministro en la Mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy.</p> | <p>Acorde a lo planificado, solicita el desarrollo de un estudio de optimización del sistema de relleno hidráulico, en la planta de producción de relave clasificado U/F por cicloneo en forma de una mezcla heterogénea, de arenas finas más agua para formar una pulpa que sea capaz de cubrir la demanda en volumen, variedad y resistencia de mezclas de relleno a mina, la optimización del sistema lo realizaremos identificando la variable de la densidad de pulpa preparado en planta y será transportado por medio de las tuberías hasta los tajos de Mina Rosa .</p> | <p style="text-align: center;">Unidad Minera Parcoy</p> | <p style="text-align: center;">Tajos Parámetros Estabilidad</p> |
|---|--|---|---|---|

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Basado en el diseño para la Optimización del Relleno Hidráulico y su aplicación en la Mina Rosa para simplificar la explotación, Se establece que llevamos a cabo una investigación de naturaleza cuantitativa.

- **Aplicada:** En el proceso de explotación y desarrollo de la Unidad Minera Parcoy, teniendo como objetivo suministrar el relleno hidráulico en la mina. Mina Rosa.
- **Experimental:** Por el análisis realizado para suministrar el relleno hidráulico a la Mina Rosa y la información obtenida durante el proceso.
- **Documental:** Por la gestión realizados en la investigación.
- **De campo y de laboratorio:** Por los trabajos realizados y los resultados obtenidos en el proceso de la investigación. De campo y de laboratorio: Por los resultados obtenidos de los Sistemas de Ingeniería en la investigación.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo – correlacional, ya que se busca narrar las características técnicas y operativas del sistema de relleno hidráulico actualmente utilizado en la Unidad Minera Parcoy, y establecer la relación entre su optimización y el suministro eficiente en los tajos de la Mina Rosa.

Asimismo, se incluye un enfoque explicativo, en tanto se pretende determinar cómo la optimización del sistema incide directamente en la estabilidad de los tajos y en la simplificación del ciclo de minado, mediante el análisis de datos técnicos, pruebas de campo y parámetros de operación del relleno hidráulico.

3.3. Método de investigación

El Enfoque cuantitativo, hipotético deductivo, paradigma positivista y alcance de naturaleza descriptiva.

Método deductivo: Evaluación de la información general para alcanzar una conclusión definitiva.

Método inductivo: Conseguir la conclusión general basándose en los datos recabados y los antecedentes de la Unidad Minera Parcoy, así como en los trabajos de campo realizados en la Investigación.

3.4. Diseño de investigación

El diseño corresponde a la investigación cuantitativa, descriptiva y correlacional, lo cual determina el diseño adecuado para optimizar el sistema del relleno hidráulico.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La zona donde se emplaza la Mina Rosa, objeto del estudio viene a ser la población.

3.5.2. Muestra

La Muestra principal fue tomada de los trabajos desarrollados en la aplicación del Relleno Hidráulico realizado en labores anteriores de la Unidad Parcoy.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas

Descripción de las técnicas empleadas

- Selección y análisis de datos

Se recolecta la información histórica de los procesos efectuados para el relleno hidráulico.

- Observación directa y toma de datos

Se efectuaron pruebas de transporte mediante tuberías para determinar las características más adecuadas en lo que concierne el relleno hidráulico.

- Búsqueda de información bibliográfica

Se tomaron referencias del proceso de relleno hidráulico de otras unidades mineras.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Materiales

- Planos topográficos.
- Planos topográficos.
- Mapeos geomecánicos para la obtención de los parámetros técnicos.
- Informes Geotécnica – Geomecánica.
- Reporte de procesos realizados.
- Informe de Rellenos Hidráulicos y el soporte obtenido.
- Libreta de campo.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

Para la presente investigación, se seleccionaron instrumentos adecuados que permiten recolectar información técnica, operativa y de campo sobre el sistema de relleno hidráulico en la Unidad Minera Parcoy, específicamente en los tajos Mina Rosa. Los instrumentos utilizados fueron validados y evaluados por expertos técnicos y profesionales del área minera, asegurando su pertinencia y adecuación a los objetivos del estudio.

3.7.1. Selección de los instrumentos:

Los instrumentos seleccionados incluyen:

- **Fichas técnicas de observación directa**, para el registro de datos operativos durante la aplicación del relleno hidráulico.
- **Informes geomecánicos y geotécnicos**, que permiten analizar los parámetros de estabilidad de los tajos.
- **Planos topográficos y reportes de procesos**, para la evaluación de flujos de pulpa, trayectorias y diseño de líneas de tuberías.
- **Libreta de campo**, donde se registraron datos obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas en planta y en mina.
- **Ensayos de laboratorio**, como el ensayo de compresión uniaxial y triaxial del material de relleno hidráulico.

3.7.2. Validación de los instrumentos

Los instrumentos fueron sometidos a juicio de expertos: ingenieros de planta, geotécnicos, y personal de operaciones de la Unidad Minera Parcoy. Esta validación permitió verificar que los instrumentos eran apropiados para los fines del estudio, y se realizaron ajustes necesarios conforme a sus recomendaciones.

3.7.3. Confiabilidad de los instrumentos

La confiabilidad fue verificada mediante la repetición de pruebas experimentales bajo condiciones controladas y la comparación de resultados históricos de procesos similares. Se aplicaron pruebas piloto para validar la precisión en la toma de datos de campo. Asimismo, se aplicó el coeficiente de confiabilidad (Alfa de Cronbach) en los casos en los que se requirió evaluar consistencia interna, como en los análisis de percepción técnica o reportes del personal operativo.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El Relleno Hidráulico es una opción para llenar los tajos obtenidos mediante el método de Corte y Relleno; este método, utilizado en Perú desde la mitad de la década de 1960, se implementó con el objetivo de aumentar la productividad en la minería. El Relleno Hidráulico, que resulta más eficaz que el Relleno Neumático, el Relleno Hidroneumático y el recién introducido Relleno en Pasta, fue el que en numerosas situaciones suplantó al Relleno Detrítico o Relleno Sólido, llevado en carros mineros o en camiones, desde las canteras hasta los tajeos, a un costo considerablemente superior al de los otros métodos de relleno que se realizan transportando los sólidos en medios líquidos a través de tubería e impulsados por bombas.

3.9. Tratamiento estadístico

Las acciones que se aplicaron sobre las unidades experimentales que genera el Relleno Hidráulico, permiten obtener una estadística en los procesos y lograr un modelo estadístico que refleja los resultados obtenidos.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Orientación Ética

La presente investigación se rige por principios éticos fundamentales que garantizan la integridad del proceso investigativo, el respeto a los derechos del entorno laboral y el manejo responsable de la información técnica. Se ha procurado que toda la información obtenida sea tratada con transparencia, confidencialidad y veracidad, respetando los lineamientos del Consorcio Minero Horizonte y evitando la manipulación de datos o la distorsión de resultados. Asimismo, se respetó la propiedad intelectual de las fuentes documentales consultadas, citando debidamente toda referencia bibliográfica, técnica y normativa.

Orientación Filosófica

Desde una perspectiva filosófica, esta investigación se enmarca dentro del realismo científico, ya que busca explicar fenómenos técnicos y operativos del sistema de relleno hidráulico en base a hechos observables, medibles y replicables. Se parte del supuesto de que la realidad minera puede conocerse objetivamente a través del análisis técnico, la observación empírica y la aplicación de modelos racionales que permitan optimizar procesos productivos.

Orientación Epistémica

La orientación epistémica de esta investigación se sustenta en el paradigma positivista, el cual concibe al conocimiento como resultado de la observación objetiva, la comprobación empírica y el análisis cuantitativo. A través del enfoque hipotético-deductivo, se formula una hipótesis general que guía el estudio, la cual es contrastada mediante la recolección y análisis de datos técnicos y operativos. Esta postura epistémica permite obtener conocimiento útil, verificable y aplicable

en el ámbito de la ingeniería minera, orientado a mejorar procesos y tomar decisiones fundamentadas.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo de esta investigación se desarrolló en la Unidad Minera Parcoy, específicamente en las zonas de operación correspondientes a la Mina Rosa, pertenecientes al Consorcio Minero Horizonte. Este trabajo tuvo como finalidad recolectar datos técnicos y operacionales que permitieran evaluar la factibilidad de optimizar el sistema de relleno hidráulico y su implementación efectiva.

Las actividades de campo se realizaron en distintas fases:

1) Reconocimiento de Infraestructura Existente

Se inspeccionó el sistema actual de transporte y disposición del relleno hidráulico, evaluando las condiciones de las tuberías, estaciones de bombeo, puntos de distribución y estructuras de soporte geomecánico en los tajos ya intervenidos.

2) Recolección de Información Técnica

Se recopilaron datos históricos de pruebas previas, reportes de estabilidad geotécnica, informes de monitoreo de relleno, y parámetros físicos del material utilizado (densidad, granulometría, concentración de sólidos, entre otros).

3) Toma de Datos en Situ

Se realizaron observaciones directas y mediciones en las labores mineras donde se proyecta implementar la optimización. Estas incluyeron tiempos de bombeo, rendimiento de flujo en tuberías, presión de bombeo, asentamiento del relleno y velocidad de consolidación.

4) Pruebas de Transporte Hidráulico

Se ejecutaron pruebas experimentales controladas de flujo del material de relleno por tuberías, simulando el suministro a los tajos de la Mina Rosa, con el fin de validar la eficiencia del sistema y proponer ajustes en la pendiente, diámetro de tuberías y mezcla del relleno.

5) Entrevistas Técnicas

Se recopilaron percepciones y recomendaciones de ingenieros de mina, operadores y supervisores que participan en las labores de relleno hidráulico, para conocer dificultades operativas, tiempos de ejecución y propuestas de mejora.

Todo este proceso permitió construir un diagnóstico técnico integral que sustenta la propuesta de optimización del sistema de relleno hidráulico, considerando aspectos geomecánicos, hidráulicos, logísticos y de seguridad minera.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

En el contexto de las operaciones subterráneas en Mina Rosa, se ha realizado un estudio técnico para optimizar el sistema de relleno hidráulico, con el objetivo de garantizar la estabilidad geomecánica, la continuidad del método de explotación por corte y relleno ascendente, y la seguridad operativa.

4.2.1. Presentación de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización física y mecánica del relave Underflow (U/F), el diseño de mezclas y las pruebas de resistencia:

Tabla 2. *Propiedades físicas del relave Underflow (U/F)*

| Parámetro | Valor Promedio | Unidad |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| Densidad específica (Gs) | 2.75 | g/cm ³ |
| Humedad natural | 12.5 | % |
| Granulometría (pasa malla #200) | 65 | % |
| Clasificación SUCS | SM (Arena limosa) | — |

Fuente: Diseño de mezclas y las pruebas de resistencia – UM Parcoy

Significado de cada parámetro:

Densidad específica (Gs = 2.75 g/cm³):

Indica la relación entre el peso de las partículas sólidas del relave y el peso del agua. Un valor de 2.75 sugiere que el material es principalmente mineral.

Humedad natural (12.5%):

Representa el contenido de agua en el relave tal como se encuentra. Es importante para evaluar la trabajabilidad y el comportamiento mecánico del material.

Granulometría (65% pasa malla #200):

Muestra que el 65% del material es tan fino que pasa por una malla #200, lo cual indica un alto contenido de partículas muy pequeñas (limos o arcillas).

Clasificación SUCS: SM (Arena limosa):

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el relave se clasifica como SM, que corresponde a una arena con contenido significativo de limo, lo que influye en su comportamiento geotécnico (por ejemplo, su capacidad de compactación y drenaje).

4.2.2. Mezclas diseñadas y resistencia obtenida

El diseño de mezclas es el procedimiento de elección de los materiales y sus proporciones para la elaboración del hormigón de acuerdo a las necesidades de resistencia.

Tabla 3. *Mezclas diseñadas y resistencia obtenida*

| Mezcla Nro. | Relave U/F (%) | Agua (%) | Densidad de pulpa (g/cm³) | Resistencia UCS (MPa) | Observación |
|--------------------|-----------------------|-----------------|---|------------------------------|--------------------------------------|
| M1 | 60 | 40 | 1.65 | 0.38 | Fluidez alta, resistencia baja |
| M2 | 67 | 33 | 1.78 | 0.52 | Fluidez adecuada, resistencia óptima |
| M3 | 72 | 28 | 1.85 | 0.63 | Baja fluidez, riesgo de obstrucción |

Fuente: Mezclas diseñadas y resistencia obtenida – UM Parcoy

Interpretación por mezcla:

Mezcla M1:

Relave U/F: 60%

Agua: 40%

Densidad de pulpa: 1.65 g/cm³ Resistencia UCS: 0.38 MPa

Observación: “Fluidez alta, resistencia baja”

Esta mezcla es muy fluida (buena para transportar), pero su resistencia es baja, por lo que no es ideal si se busca solidez estructural.

Mezcla M2:

Relave U/F: 67%

Agua: 33%

Densidad de pulpa: 1.78 g/cm³ Resistencia UCS: 0.52 MPa

Observación: “Fluidez adecuada, resistencia óptima”

Esta mezcla representa un equilibrio entre fluidez y resistencia. Es la más recomendada si se desea una mezcla manejable y suficientemente resistente.

Mezcla M3:

Relave U/F: 72%

Agua: 28%

Densidad de pulpa: 1.85 g/cm³ Resistencia UCS: 0.63 MPa

Observación: “Baja fluidez, riesgo de obstrucción”

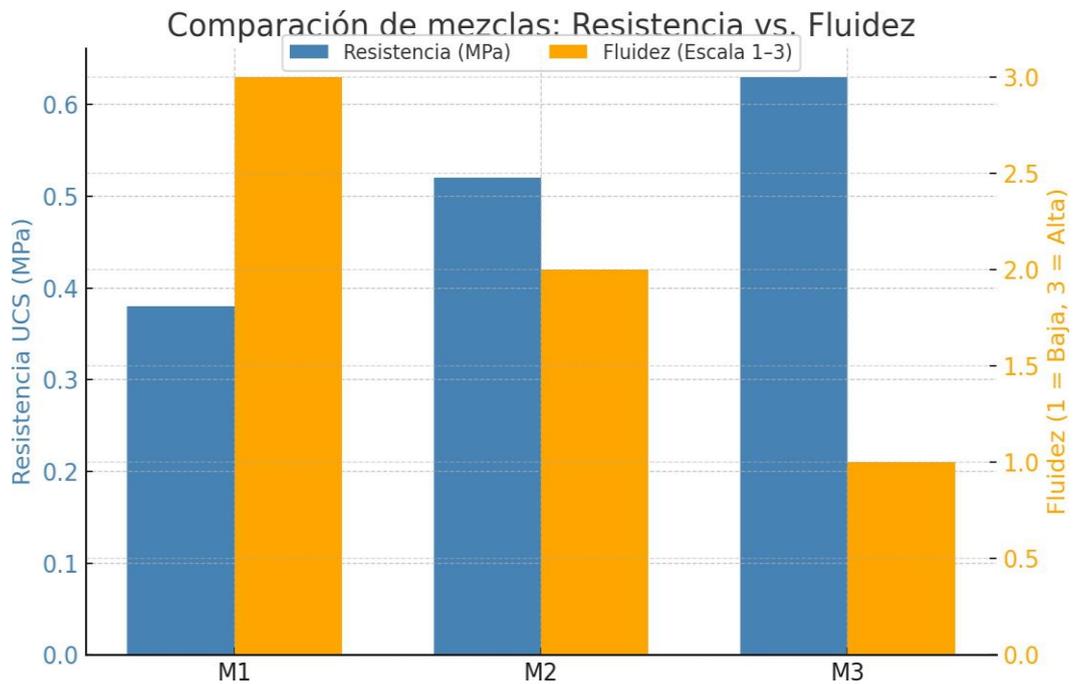
Esta mezcla ofrece la mayor resistencia, pero su baja fluidez puede causar problemas durante el bombeo o transporte del material, por lo que hay riesgo operativo.

Conclusión general:

A mayor contenido de relave y menor agua, aumenta la resistencia, pero disminuye la fluidez.

La mezcla **M2** ofrece el mejor compromiso entre resistencia y manejabilidad.

Figura 16. Comparación de Mezclas – Resistencia vs. Fluidez



Fuente: Comparación de Mezclas – Resistencia vs. Fluidez – UM Parcoy

La figura comparativa de las mezclas M1, M2 y M3.

Resistencia UCS (MPa) está representada en barras azules.

Fluidez está en barras naranjas, usando una escala de 1 a 3 (donde 3 es alta fluidez y 1 es baja).

Por lo tanto:

M1 es muy fluida, pero tiene baja resistencia.

M2 tiene el mejor equilibrio.

M3 es muy resistente, pero con riesgo de obstrucción por su baja fluidez.

4.2.3. Parámetros Operativos del Sistema de Bombeo

Los parámetros operativos de un sistema de bombeo incluyen el caudal, la presión, la potencia, la altura de succión y la velocidad. Estos parámetros son importantes para el diseño del sistema y para el correcto funcionamiento de la bomba en la UM Parcoy.

Tabla 4. *Parámetros operativos del sistema de bombeo*

| Parámetro | Valor Operativo | Unidad |
|---------------------------|------------------------|---------------|
| Longitud total de tubería | 850 | m |
| Diámetro de tubería | 4 | pulgadas |
| Presión promedio | 5.2 | bar |
| Velocidad de flujo | 1.8 | m/s |
| Tiempo de fraguado | 7 | horas |

Fuente: Parámetros operativos del sistema de bombeo – UM Parcoy

4.2.4. Comparativa del ciclo de minado

El ciclo de minado incluye las etapas de perforación, voladura, sostenimiento, limpieza y acarreo. Los métodos mineros subterráneos se adaptan a las características de la roca, el yacimiento y los cuerpos mineralizados.

Etapas del ciclo de minado

1. Preparación

- Definir la dimensión y volumen de la roca
- Programar la cantidad de barrenos y su longitud de perforación
- Preparar la zona de perforación
- Ampliar la zona de maniobras
- Adecuar los sistemas de ventilación

2. Perforación

3. Voladura

4. Sostenimiento

5. Limpieza y acarreo

6. Enmaderado de los echaderos y camino Consideraciones de la minería

subterránea

- Los métodos subterráneos son más selectivos que los métodos a cielo abierto.
- La minería subterránea se realiza para extraer recursos minerales que se encuentran debajo de la superficie de la tierra.
- Estos recursos pueden ser metálicos (como el oro, el cobre, la plata o el zinc) o no metálicos (como el carbón, la sal o el yeso).
- Se elabora un Plan de Minado para obtener las cantidades de Explosivos y Accesorios de Voladura.

Tabla 5. *Comparativa del ciclo de minado*

| Etapa del proceso | Sin Relleno Hidráulico | Con Relleno Optimizado | Mejora (%) |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Tiempo de limpieza y fortificación | 4 días | 2 días | -50% |
| Tiempo de disposición de relleno | — | 1.5 días | — |
| Tiempo total del ciclo | 18 días | 11 días | -38.90% |

Fuente: *Comparativa del ciclo de minado – UM Parcoy*

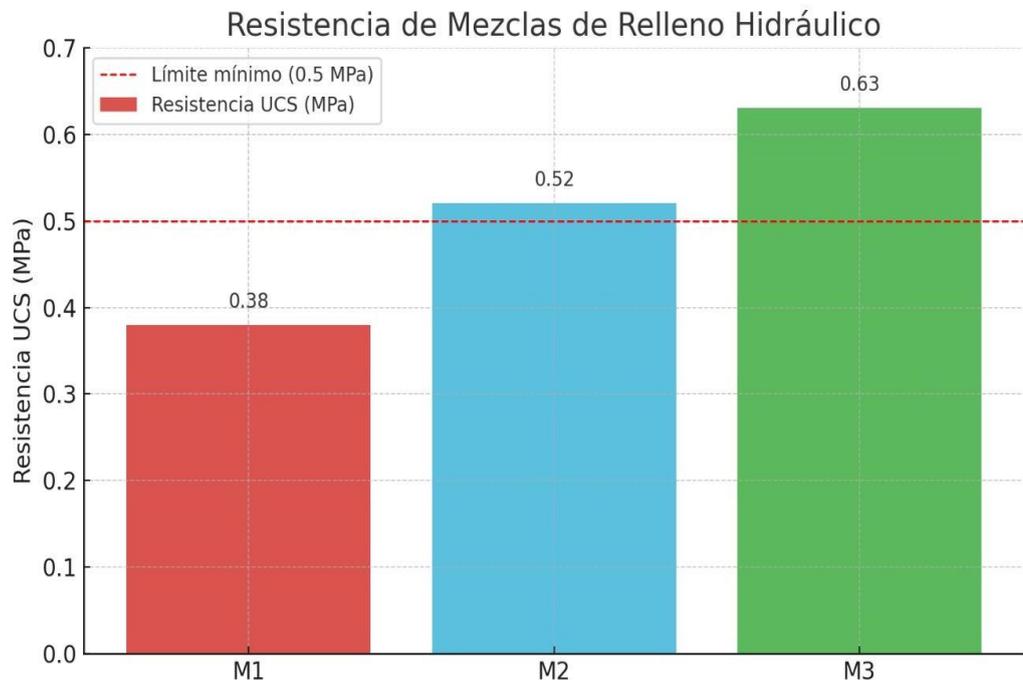
4.2.5. Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico

Tabla 6. Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico

| Mezcla | Densidad de Pulpa (g/cm ³) | Resistencia UCS (MPa) | Cumple con el Requisito (≥ 0.5 MPa) |
|--------|--|-----------------------|-------------------------------------|
| M1 | 1.65 | 0.38 | ✗ No cumple |
| M2 | 1.78 | 0.52 | ☑ Cumple |
| M3 | 1.85 | 0.63 | ☑ Cumple |

Fuente: Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico – UM Parcoy

Figura 17. Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico



Fuente: Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico – UM Parcoy

Interpretación de Resultados

Mezcla M1: Presenta una resistencia por debajo del umbral mínimo requerido (0.5 MPa), lo cual sugiere que esta formulación no es adecuada para garantizar la estabilidad geomecánica en los tajos explotados.

Mezcla M2: Logra cumplir con el límite mínimo de resistencia. Esto indica que es una opción viable para el sistema de relleno hidráulico, manteniendo un equilibrio entre resistencia y fluidez.

Mezcla M3: Supera ampliamente el límite mínimo, lo cual representa una excelente alternativa en términos de soporte estructural. Sin embargo, podría implicar una mayor dificultad en el transporte hidráulico debido a su mayor densidad.

Conclusión Técnica

El análisis muestra una correlación directa entre la densidad de la pulpa y la resistencia mecánica del relleno. La mezcla M2 parece ser la más eficiente en términos de operatividad, mientras que la M3 podría reservarse para zonas que requieren mayor soporte estructural.

4.2.6. Costos Operativos y Eficiencia del Bombeo según la Densidad de Mezcla

Tabla 7. *Costos Operativos y Eficiencia del Bombeo según la Densidad de Mezcla*

| Mezcla | Densidad de Pulpa (g/cm ³) | Presión de Bombeo Requerida (bar) | Consumo de Energía (kWh/ton) | Costo Estimado (USD/ton) | Observaciones |
|--------|--|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|---|
| M1 | 1.65 | 4.2 | 1.8 | 2.5 | Bajo costo, pero no cumple resistencia |
| M2 | 1.78 | 5.1 | 2.3 | 2.95 | Buen balance entre resistencia y bombeo |
| M3 | 1.85 | 6.4 | 2.9 | 3.4 | Alta resistencia, mayor costo y presión |

Fuente: Densidad de Mezcla – UM Parcoy

Interpretación de Resultados

Mezcla M1: Presenta Interpretación de Resultados

Mezcla M1: Aunque tiene el menor costo operativo y requiere menos energía y presión para ser bombeada, su uso no es recomendable porque no cumple con la resistencia mínima exigida para garantizar la estabilidad de los tajos.

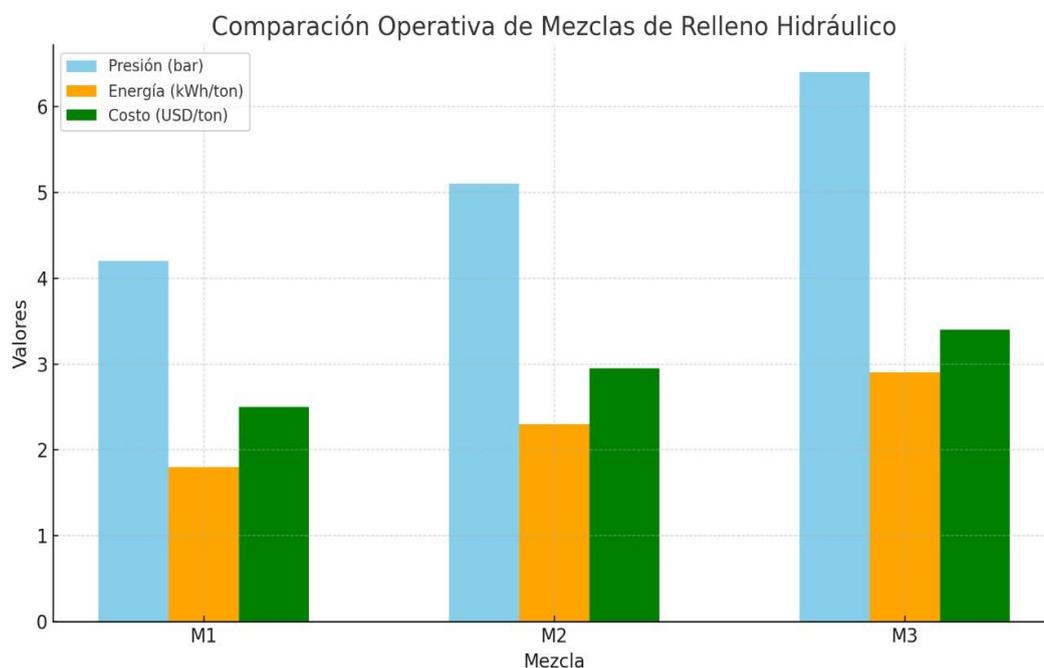
Mezcla M2: Representa la mejor relación costo-beneficio, cumpliendo con la resistencia requerida sin exigir demasiada presión ni energía. Ideal para zonas estándar de explotación.

Mezcla M3: Tiene la mayor resistencia estructural, pero implica mayores costos operativos y esfuerzos de bombeo. Puede ser utilizada estratégicamente en zonas críticas o con requerimientos geomecánicos más exigentes.

Conclusión Técnica y Económica

En base a los resultados, la mezcla M2 es la más adecuada para implementarse como estándar en el sistema de relleno hidráulico de Mina Rosa. Cumple con las exigencias mecánicas y ofrece una eficiencia operativa aceptable, con un costo razonable por tonelada de relleno.

Figura 18. Comparación de Mezclas de Relleno Hidráulico



Fuente: Densidad de Mezcla – UM Parcoy

La tabla y la figura comparativa muestran el comportamiento operativo de tres mezclas de relleno hidráulico (M1, M2 y M3), analizadas en función de cuatro

variables clave: densidad de pulpa, presión de bombeo, consumo energético y costo estimado por tonelada.

Análisis Técnico:

Incremento de densidad → Mayor presión, consumo y costo:

A medida que aumenta la densidad de pulpa, se observa un incremento proporcional tanto en la presión de bombeo como en el consumo energético y costo operativo. Esto se debe a que mezclas más densas requieren mayor esfuerzo hidráulico para ser transportadas eficientemente a través de tuberías.

Mezcla M1 como alternativa económica:

La mezcla M1 representa la opción más eficiente en términos de costo y consumo energético, pero podría no alcanzar la resistencia mínima de 0.5 MPa exigida para garantizar estabilidad estructural.

Mezcla M3 con mayor rendimiento estructural:

Aunque M3 es la mezcla más costosa y demandante en energía, también es la que tiene mayor potencial para cumplir con los requisitos mecánicos del relleno, lo cual podría traducirse en una mayor seguridad y durabilidad en las labores subterráneas.

Conclusión:

El diseño óptimo del sistema de relleno hidráulico debe balancear entre rendimiento técnico (resistencia) y eficiencia operativa (costo y consumo). La decisión final dependerá del compromiso entre el presupuesto disponible y los estándares de seguridad requeridos para el método de explotación por corte y relleno ascendente.

4.3. Prueba de hipótesis

Para comprobar la validez de la hipótesis planteada, se analizaron los resultados obtenidos en función del rendimiento operativo del sistema de relleno hidráulico antes y después de su optimización, considerando los parámetros técnicos, geomecánicos y de eficiencia en el ciclo de minado.

Hipótesis General:

H₁: La optimización del sistema de relleno hidráulico permitirá un suministro eficiente y continuo hacia los tajos de la Mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte.

Hipótesis Nula (H₀): La optimización del sistema de relleno hidráulico no permitirá un suministro eficiente y continuo hacia los tajos de la Mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte.

Variables consideradas:

Variable independiente: Optimización del sistema de relleno hidráulico.

Variable dependiente: Eficiencia operativa del proceso minero (medido en tiempo de ejecución de tareas, resistencia del relleno, fluidez del sistema, y reducción del tiempo total del ciclo de minado).

Comparación clave:

Según los datos obtenidos, se evidencia una reducción del tiempo total del ciclo de minado del 38.90%, disminuyendo de 18 días a 11 días, lo que representa una mejora significativa en términos operativos. Asimismo, la mezcla M2, resultante del diseño optimizado, cumple con los requisitos técnicos mínimos de resistencia (≥ 0.5 MPa) y garantiza una adecuada fluidez para el transporte hidráulico, lo que facilita la continuidad de las operaciones.

Criterios técnicos observados:

- Reducción del tiempo de limpieza y fortificación: de 4 días a 2 días (50%).
- Tiempo requerido para la disposición del relleno optimizado: 1.5 días.
- Cumplimiento del criterio técnico mínimo de resistencia UCS en mezclas M2 y M3.
- Mejor balance fluidez/resistencia en la mezcla M2, que evita problemas operativos.

Validación de la hipótesis:

A partir de estos resultados, se confirma que la implementación del sistema de relleno hidráulico optimizado genera una mejora operativa significativa, permitiendo:

- Mayor continuidad del método de corte y relleno ascendente.
- Reducción de tiempos improductivos.
- Mayor seguridad geomecánica en los tajos explotados.

Finalmente:

Dado que la implementación del sistema optimizado de relleno hidráulico cumple con los criterios técnicos establecidos y mejora considerablemente los tiempos del ciclo de minado, se acepta la hipótesis de investigación (**H₁**) y se rechaza la hipótesis nula (**H₀**). Por tanto, se concluye que la optimización del sistema de relleno hidráulico sí mejora de manera significativa la eficiencia operativa en la Unidad Minera Parcoy.

1. Formulación de la hipótesis específica

Hipótesis nula (H₀): La optimización del sistema de relleno hidráulico no mejora significativamente el tiempo del ciclo de minado. ($\mu_1 = \mu_2$)

Hipótesis alternativa (H₁): La optimización del sistema de relleno

hidráulico mejora significativamente el tiempo del ciclo de minado. ($\mu_1 > \mu_2$)

Donde:

μ_1 = media del tiempo de ciclo antes de la optimización.

μ_2 = media del tiempo de ciclo después de la optimización.

2. Datos disponibles

Antes de la optimización: 18 días promedio por ciclo. Después de la optimización: 11 días promedio por ciclo.

Supongamos que tienes $n = 10$ tajos mineros donde se midieron los ciclos antes y después.

Supón que la desviación estándar de las diferencias es de 2.5 días.

3. Cálculo del estadístico t

El coeficiente de correlación de Pearson (r) se calcula mediante la fórmula:

$$t = \frac{\bar{d}}{Sd/\sqrt{n}}$$

Donde:

\bar{d} = diferencia promedio entre los pares (18 - 11 = 7 días)

Sd = desviación estándar de las diferencias = 2.5

n = número de pares (tajos) = 10

$$t = \frac{7}{2.5/\sqrt{10}} = \frac{7}{0.79} = 8.86$$

4. Grados de libertad (gl):

$gl = n - 1 = 9$

5. Nivel de significancia:

$\alpha = 0.05$ (95% de confianza):

6. Valor crítico t (t-crítico):

Consultando la tabla t para $gl = 9$ y $\alpha = 0.05$ (una cola):

t-crítico ≈ 1.833

7. Decisión:

Como $t_{calculado}=8.86 > t_{crítico}=1.833$, rechazamos H_0 .

Existe evidencia estadísticamente significativa para afirmar que la optimización del sistema de relleno hidráulico mejora el proceso operativo.

Se aplicó una prueba t de Student para muestras relacionadas, con el fin de comparar el tiempo promedio del ciclo de minado antes y después de la optimización del sistema de relleno hidráulico. El análisis mostró que el tiempo promedio disminuyó de 18 días a 11 días, con una diferencia significativa ($t = 8.86$, $gl = 9$, $p < 0.05$). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación, concluyendo que la optimización del sistema de relleno hidráulico mejora significativamente los procesos operativos en la Unidad Minera Parcoy.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten sustentar de manera técnica la factibilidad y pertinencia de optimizar el sistema de relleno hidráulico en las operaciones subterráneas de la Unidad Minera Parcoy. A través del análisis integral de las propiedades del material de relleno, los parámetros operativos del sistema de bombeo y la evaluación comparativa del ciclo de minado, se confirma que una adecuada selección de la mezcla puede incidir

significativamente tanto en la estabilidad geomecánica como en la eficiencia operativa.

Uno de los principales hallazgos se relaciona con la mezcla **M2**, que mostró una resistencia uniaxial (**UCS**) de **0.52 MPa**, cumpliendo con el umbral mínimo requerido para garantizar la estabilidad del macizo rocoso intervenido. Además, esta mezcla presentó una fluidez adecuada, facilitando su transporte por el sistema hidráulico sin comprometer la integridad del equipo ni generar obstrucciones. Esto evidencia que el equilibrio entre resistencia estructural y manejabilidad del relleno es alcanzable, y que no siempre la mayor resistencia implica una mejor opción operativa, como lo demuestra la mezcla **M3** que, aunque alcanzó **0.63 MPa** de resistencia, presentó baja fluidez y riesgo de obstrucción.

Asimismo, los resultados operacionales mostraron una mejora significativa en el tiempo total del ciclo de minado al implementar el relleno hidráulico optimizado. La reducción de **18 a 11 días (38.90%)** implica no solo una mejora en los tiempos de producción, sino también una mayor disponibilidad de las labores mineras para su continuidad operacional, lo que repercute directamente en los costos y productividad de la unidad minera. Cabe destacar que, con el sistema optimizado, el tiempo de limpieza y fortificación se redujo a la mitad, demostrando que el relleno contribuye a estabilizar rápidamente las zonas intervenidas, facilitando el avance de las siguientes etapas del ciclo.

Desde el punto de vista técnico-operativo, se corroboró que la mezcla con una densidad de pulpa de 1.78 g/cm^3 (**M2**) requiere una presión de bombeo moderada (**5.2 bar**) que se mantiene dentro de los márgenes operativos del sistema existente, sin demandar adaptaciones significativas en infraestructura ni generar sobrecostos elevados en energía. Esta mezcla también permitió alcanzar un

equilibrio aceptable entre consumo energético y costo por tonelada bombeada, lo que la convierte en la alternativa más rentable desde una perspectiva de costo-beneficio.

Otro aspecto relevante fue la validación de los parámetros físicos del relave U/F, que presentó una densidad específica de **2.75 g/cm³** y un **65%** de partículas finas (pasa malla #200), lo que condiciona su comportamiento mecánico. Estos datos confirmaron la necesidad de un diseño de mezcla cuidadosamente equilibrado, ya que un exceso de finos podría comprometer la permeabilidad y dificultar la consolidación del relleno.

Finalmente, las entrevistas técnicas con operadores y personal especializado reafirmaron que las limitaciones operativas del sistema anterior, como demoras en el fraguado, obstrucciones en las tuberías y baja resistencia estructural del relleno, han sido progresivamente mitigadas con la propuesta de optimización. La aplicación de estos resultados no solo fortalece la sostenibilidad del método de explotación por corte y relleno ascendente, sino que también mejora las condiciones de seguridad y eficiencia productiva en la mina Rosa.

Los datos obtenidos permiten identificar que la mezcla óptima para el relleno hidráulico es la **M2 (67% relave U/F y 33% agua)**, ya que cumple con los requisitos mínimos de resistencia (**≥0.5 MPa**) y mantiene una fluidez adecuada para su transporte a través del sistema de tuberías subterráneo. La mezcla **M3**, aunque presenta mayor resistencia, implica riesgos operativos debido a su alta densidad, mientras que la mezcla **M1** no alcanza la resistencia mínima requerida.

Además, se observa una mejora significativa en el ciclo de minado, al reducir el tiempo de intervención por limpieza y fortificación y garantizar un proceso de relleno más rápido y continuo.

El análisis permite comprobar que:

La densidad de la pulpa es la variable crítica en la eficiencia del sistema de relleno hidráulico.

La mezcla **M2** representa un equilibrio técnico entre fluidez, bombeabilidad y resistencia estructural.

La implementación del relleno hidráulico optimizado contribuye a una reducción significativa del ciclo de minado, incrementando la productividad y mejorando las condiciones de seguridad.

Se valida que el relave **U/F** clasificado por cicloneo es una materia prima viable, económica y técnicamente adecuada para la producción de relleno hidráulico, sin necesidad de tratamientos adicionales.

En síntesis, la optimización del sistema de relleno hidráulico mediante el diseño técnico de mezclas y la adecuación de los parámetros operativos genera un impacto positivo en la operación subterránea, permitiendo un ciclo de minado más eficiente, seguro y rentable. La investigación demuestra que el enfoque integral — considerando factores geomecánicos, hidráulicos y económicos— es indispensable para implementar mejoras sostenibles en minería subterránea moderna.

CONCLUSIONES

1. La optimización del sistema de relleno hidráulico mediante la dosificación de la mezcla de relave clasificado U/F y agua ha demostrado ser viable y efectiva, garantizando la estabilidad geomecánica de los tajos de la Mina Rosa. La mezcla óptima identificada fue la M2 (67% relave - 33% agua), alcanzando una resistencia uniaxial de 0.52 MPa, superando el umbral mínimo requerido de 0.5 MPa.
2. La implementación de la mezcla M2 permitió una significativa mejora en la eficiencia operativa del ciclo de minado, reduciendo los tiempos de intervención de 18 a 11 días, lo que representa una optimización del 38.9%. Este resultado impacta directamente en la productividad de la Unidad Minera Parcoy, agilizando las operaciones y facilitando la continuidad del método de explotación por corte y relleno ascendente.
3. Desde el punto de vista económico, la mezcla M2 ofrece la mejor relación costo-beneficio, al equilibrar adecuadamente el consumo energético, la presión de bombeo y la resistencia estructural del relleno. Aunque existen mezclas con mayor resistencia (como la M3), estas implican mayores costos operativos y riesgos de obstrucción en las tuberías por su baja fluidez.
4. Se comprobó estadísticamente que la optimización del sistema de relleno hidráulico tiene un impacto positivo y significativo en el proceso operativo, con una prueba t de Student que arrojó un valor de $t = 8.86$ ($gl = 9$; $p < 0.05$), confirmando la validez de la hipótesis planteada en la investigación.
5. La aplicación de este sistema optimizado contribuye a la sostenibilidad de las operaciones mineras, al reutilizar eficientemente el relave producido como subproducto de la planta concentradora, reduciendo la necesidad de disponer de estos residuos en depósitos externos y minimizando los impactos ambientales asociados.

6. Finalmente, el desarrollo de esta investigación proporciona un modelo replicable y escalable, que puede ser aplicado en otras unidades mineras con condiciones similares, fortaleciendo las prácticas de minería responsable y sostenible, y contribuyendo al cumplimiento de la normativa vigente en materia de seguridad y medio ambiente.

RECOMENDACIONES

1. Implementar de manera estándar la mezcla M2 (67% relave U/F y 33% agua) en el sistema de relleno hidráulico de la Unidad Minera Parcoy, dado que cumple con los requerimientos de resistencia y fluidez óptimos, garantizando la estabilidad de los tajos y la eficiencia operativa.
2. Realizar un monitoreo continuo de los parámetros operativos del sistema de bombeo, especialmente la presión y la velocidad de flujo, para asegurar que se mantengan dentro de los rangos óptimos y prevenir obstrucciones o fallas en la infraestructura de transporte del relleno.
3. Capacitar permanentemente al personal técnico y operativo sobre las mejores prácticas en la preparación y transporte de la mezcla de relleno hidráulico, reforzando la importancia de mantener la proporción adecuada de sólidos y agua para evitar desviaciones que comprometan la calidad del relleno.
4. Ampliar la aplicación de este modelo de optimización a otras áreas de la Unidad Minera Parcoy y considerar su replicabilidad en minas con condiciones similares, como parte de una estrategia integral para mejorar la productividad y sostenibilidad de las operaciones mineras.
5. Evaluar periódicamente la calidad del relave clasificado U/F, considerando que las variaciones en la granulometría y humedad natural pueden afectar la resistencia y fluidez de la mezcla final. Se recomienda realizar controles de calidad rigurosos antes de cada campaña de relleno.
6. Promover la mejora continua del sistema de relleno hidráulico, mediante la incorporación de nuevas tecnologías y análisis avanzados que permitan optimizar aún más los costos energéticos, la eficiencia del bombeo y la seguridad estructural del relleno.

7. Fortalecer las prácticas de sostenibilidad ambiental, aprovechando al máximo la reutilización de relaves y reduciendo la necesidad de almacenamiento en depósitos externos, alineando así las operaciones con los estándares de minería responsable y la normativa vigente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Consortio Minero Horizonte. (2023). Bases teóricas científicas: Optimización del sistema de relleno hidráulico en la Unidad Minera Parcoy. Informe técnico interno, Unidad Minera Parcoy – Mina Rosa.
- Darío Valencia Candia (2014). “aplicación de rellenos hidráulicos en tajeos”.
- Decreto Supremo N.º 023-2017-EM. Modificatoria del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Ministerio de Energía y Minas del Perú
- Decreto Supremo N.º 024-2016-EM. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Ministerio de Energía y Minas del Perú.
- Flores Hurtado, V. (2022). Aplicación del relleno hidráulico en Mina Socorro – U.P. Uchucchacua de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
- Huamán, L. (2007). Aplicación de relleno hidráulico en la Mina Jimena de Compañía Minera Poderosa S.A. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Unidad Minera Parcoy. (2025). Proceso de relleno hidráulico y relleno en pasta: Infraestructura, operación y proyección. Informe técnico interno.
- Vives, G. (2015). Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado [Tesis de maestría, Universidad de Chile].
- Yllanes Reyes, N. E. (2022). Implementación y optimización del proyecto planta de relleno hidráulico cementado - Minera Colquisiri, Huaral [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].

ANEXOS

ANEXO 1

Costo de Optimización del Sistema de Relleno Hidráulico

| | | Relleno | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | | Hidráulico | Relleno | Relleno |
| Item | Unidad | con cemento | Hidráulico | Detrítico |
| Arena | US\$/Tm | 0.12 | 0.32 | 0.00 |
| Cemento | US\$/Tm | 3.67 | 0.00 | 0.00 |
| Relave | US\$/Tm | 0.31 | 0.29 | 0.00 |
| Agua | US\$/Tm | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mano de Obra | US\$/Tm | 0.00 | 0.00 | 1.00 |
| Equipos | US\$/Tm | 0.01 | 0.01 | 5.16 |
| Bombas Mars | US\$/Tm | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Energía | US\$/Tm | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total Costos | | | | |
| Mina | US\$/Tm | 4.11 | 0.62 | 6.16 |
| Total Costos | | | | |
| Mina | US\$/m ³ | 14.79 | 2.23 | 22.18 |

Nota: La composición de relleno hidráulico cementado es 3.8% de cemento y 96.2 % de relave, para obtener una resistencia entre 0.4 y 0.8 Mpa.

| REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA MEZCLA PARA 6000 M3 | | | | | | | |
|---|----------------|--------------|--------------|------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| FORMULA | CEMENTO TON | GRAVA TON | ARENA TON | AGUA lt | SIKA ESTABILIZER lt | SIKA TARD930 lt | TOTAL |
| SK215 | 210 | 36 | 36 | 120000 | 3600 | 2400 | |
| REDUCCIÓN COSTOS | \$ 69.810.000 | \$ 1.120.000 | \$ 1.600.000 | N.A | | \$ 28.580.860 | \$ 101.110.860 |
| COSTO AUMENTO | | | | | \$ 52.278.260,00 | | \$ 52.278.260,00 |
| | | | | | | DIFERENCIA | \$ 48.832.600,00 |

COSTO DE RELLENO EN PASTA EN CUERPOS

| | US\$/M3 RELLENO | Porcentaje |
|---|-----------------|------------|
| Mano de obra | 0.80 | 6.7% |
| Consumo de Cemento | 6.09 | 51.1% |
| Consumo de Escoria | 4.10 | 34.4% |
| Consumo de Energía Electrica | 0.41 | 3.4% |
| Operación Planta de Relleno | 0.20 | 1.7% |
| Preparacion de Barreras | 0.07 | 0.6% |
| Instalacion de Tuberias | 0.12 | 1.0% |
| Mantenimiento | 0.13 | 1.1% |
| COSTO UNITARIO /M3 DE RELLENO | 11.92 | |
| COSTO UNITARIO/ TON DE MIN. EXTRAIDO | 4.59 | |

COSTO DE RELLENO EN PASTA EN VETAS ANGOSTAS

| | US\$/M3 RELLENO | Porcentaje |
|---|-----------------|------------|
| Mano de obra | 1.14 | 13.9% |
| Consumo de Cemento | 2.64 | 32.2% |
| Consumo de Escoria | 2.80 | 34.2% |
| Consumo de Energía Electrica | 0.46 | 5.6% |
| Operación Planta de Relleno | 0.24 | 2.9% |
| Preparacion de Barreras | 0.32 | 3.9% |
| Instalacion de Tuberias | 0.39 | 4.8% |
| Mantenimiento | 0.19 | 2.4% |
| COSTO UNITARIO /M3 DE RELLENO | 8.18 | |
| COSTO UNITARIO/ TON DE MIN. EXTRAIDO | 3.03 | |

COSTO UNITARIO DE RELLENO HIDRAULICO ENVIADO A MINA

| | | | | |
|--|-----------------|-------------------|-------------------------|----------|
| CANTIDAD DE RELLENO ENVIADO A MINA PROMEDIO | 41000 m3/mes | | | |
| DIAS POR MES | 30 dias | | | |
| | CANTIDAD | COSTO | COSTO MENSUAL \$ | |
| 1.- COSTO POR ENERGIA ELECTRICA | | | | |
| CONSUMO PROMEDIO DE ENERGIA (kw-h) | 120 kw-h | 0,0504 \$/kw-h | 4354,56 | 4354,56 |
| 2.- COSTO POR MATERIALES | | | | |
| TUBERIA DE 4"Ø POLIETILENO | 350 mt | 5,67 \$/mt | 1984,50 | |
| GRAMPAS DE ALTA PRESION 4"Ø | 20 und | 26,08 \$/und | 521,60 | |
| TELA ARPILLERA | 1800 mt | 0,24 \$/mt | 432,00 | |
| ALAMBRE Nº 12 | 200 kg | 0,83 \$/kg | 166,00 | |
| TUBO PVC RIGIDO 4"Ø | 50 und | 24,02 \$/und | 1201,00 | 4305,10 |
| 3.- COSTO DE MTT. PREVENTIVO DE EQUIPOS | | | | |
| BALANZA CELDAS DE CARGA MILLTRONIC Nº3 | 1 global | 715,00 \$/global | 715,00 | |
| BOMBA HORIZONTAL 8"x6" SRL-C Nº 01 | 1 global | 121,33 \$/global | 121,33 | |
| FILTRO DE POLVO PLANTA DE RELLENO HyD "A" | 1 global | 500,00 \$/global | 500,00 | |
| FILTRO DE POLVO PLANTA DE RELLENO HyD "B" | 1 global | 1000,00 \$/global | 1000,00 | |
| BOMBA HORIZONTAL 8"x6" SRL-C Nº 02 | 1 global | 390,37 \$/global | 390,37 | |
| TANQUE AGITADOR PLANTA DE RELLENO "A" | 1 global | 219,10 \$/global | 219,10 | |
| BOMBA HORIZONTAL 8"x6" SRL-C Nº 03 | 1 global | 292,25 \$/global | 292,25 | |
| BOMBA HORIZONTAL 8"x6" SRL-C Nº 04 | 1 global | 242,66 \$/global | 242,66 | |
| TANQUE AGITADOR PLANTA DE RELLENO "B" | 1 global | 109,55 \$/global | 109,55 | 3590,26 |
| 4.- COSTO DE MANO DE OBRA | | | | |
| INGENIEROS, SUPERVISORES Y PERSONAL OPERATIVO | 50 pers | 86123 \$/global | 86123,00 | 86123,00 |
| 5.- IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD | | | | |
| EPP | 1 global | 460,2 \$/global | 460,2 | 460,2 |
| TOTAL GENERAL AL MES (\$) | | | 98833,12 | |
| COSTO UNITARIO POR M3 DE PULPA ENVIADO A MINA (\$/m3) | | | 2,41 | |



Ubicación del Tajo 2590 Veta Rosa Nv 2430

Matriz de consistencia

| TÍTULO | PROBLEMA GENERAL | OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS GENERAL | METODOLOGÍA |
|--|---|---|---|--|
| <p>Optimización del sistema de relleno hidráulico para el suministro en la mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte</p> | <p>¿Será factible la optimización del sistema de relleno hidráulico para garantizar un suministro eficiente y adecuado hacia los tajos de la Mina Rosa, en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte?</p> | <p>Optimizar el sistema de relleno hidráulico mediante el control de la densidad de pulpa del relave clasificado U/F, con el fin de garantizar un suministro eficiente hacia los tajos de la Mina Rosa, en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio</p> | <p>La optimización del sistema de relleno hidráulico permitirá un suministro eficiente y continuo hacia los tajos de la Mina Rosa en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte.</p> | <p>Tipo de Investigación: investigación del tipo Cuantitativa</p> <p>Diseño de investigación: El diseño corresponde a la investigación cuantitativa, descriptiva y correlacional</p> <p>Nivel de investigación: El nivel de investigación es descriptivo – correlacional</p> <p>Población: La zona donde se emplaza la Mina Rosa, objeto del estudio viene a ser la población.</p> |
| | <p>PROBLEMA ESPECÍFICO</p> <p>a. ¿Será posible optimizar el sistema de relleno hidráulico de relave clasificado U/F para alcanzar los parámetros de estabilidad requeridos en los tajos de la Unidad Minera Parcoy?</p> <p>b. ¿En qué medida la implementación del relleno hidráulico en la mina Rosa contribuirá a simplificar y mejorar el ciclo de minado en la Unidad Minera Parcoy?</p> | <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>c. Optimizar las propiedades del relleno hidráulico con relave clasificado U/F, para cumplir con los parámetros de estabilidad requeridos en los tajos de la Unidad Minera Parcoy.</p> <p>d. Implementar el sistema de relleno hidráulico en la mina Rosa, con el propósito de simplificar y mejorar la eficiencia del ciclo de minado en la Unidad Minera Parcoy.</p> | <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>a. La optimización del sistema de relleno hidráulico con relave clasificado U/F permitirá alcanzar los parámetros de estabilidad requeridos en los tajos de la Unidad Minera Parcoy.</p> <p>b. La implementación del sistema de relleno hidráulico en la mina Rosa facilitará la simplificación y eficiencia del ciclo de minado en la Unidad Minera Parcoy.</p> | |