

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Trabajo de Investigación

**Transportabilidad del relleno en pasta a largas
distancias en la empresa Nexa Resources, 2019**

Rubén Darío Vidal Salinas

Para optar el Grado Académico de
Bachiller en Ingeniería de Minas

Huancayo, 2019

Repositorio Institucional Continental
Trabajo de investigación



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTO

Mi eterna gratitud a la Universidad Continental y a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas por permitirme recibir conocimientos de minería moderna en los años de estudios de pre grado.

Mi sincero agradecimiento a toda la plana docente y autoridades de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas por la didáctica y compartir sus conocimientos en la ingeniería de minas.

A la Empresa Nexa Resources, a su gerente: Ing. Antonio Padrón, por su valioso apoyo incondicional y facilidades prestadas en la Unidad Minera Cerro lindo, durante el desarrollo de mi trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Con todo el amor dedico este trabajo
a mi esposa y a mis hijos por quienes me esfuerzo
para superarme, apoyarlos y darles lo mejor.

INDICE

AGRADECIMIENTO
DEDICATORIA
INDICE
INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I	8
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	8

1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	8
1.1.1. Planteamiento del problema	8
1.1.2. Formulación del problema.....	9
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo general.....	9
1.2.2. Objetivo específico	10
1.3. Justificación e importancia	10
1.4. Hipótesis y descripción de variables.....	11
1.4.1. Hipótesis	11
1.4.2. Definición de variables.....	12
CAPITULO II.....	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	13
2.2. BASES TEÓRICAS	17
2.2.1. Método de Explotación	17
2.2.2. Ciclo de minado	18
2.2.3. Relleno en pasta.....	23
2.2.4. Tapones de contención	29
2.3. Definición de términos básicos.....	32
2.3.1. Relleno de Pasta	33
2.3.2. Agua	33
2.3.3. Cemento.....	33
2.3.4. Consistencia.....	33
2.3.5. Compresión	33
2.3.6. Relave Minero	33
2.3.7. Relación agua cemento (a/c).....	33
2.3.8. Resistencia a la compresión.....	33
2.3.9. Tamizado	33
CAPITULO III.....	33
METODOLOGÍA	33
3.1. Métodos y alcance de la investigación.....	34
3.1.1. Métodos	34
3.1.2. Alcance.....	34
3.2. Diseño de la investigación.....	34

3.3. Población y muestra.....	34
3.3.1. La población	34
3.3.2. Muestra	34
CAPITULO IV	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. Introducción del relleno en pasta con aditivo	34
4.2. Ensayos realizados	36
4.2.1. Mezclas patrón.....	36
4.2.2. Mezclas con aditivo	36
4.3. Parámetros operacionales por considerar en la prueba.....	37
4.4. Resultados de densidad de relleno, consistencia (slump) y presión de bombeo:	38
4.4.1. Mezclas patrón:.....	38
4.4.2. Mezclas con aditivo:.....	40
4.5. Tiempo de secado	43
4.5.1. Análisis de resultados.....	45
4.6. Resistencia a compresión:	45
4.6.1. Análisis de resultados:.....	46
CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia de mina mina Cerro Lindo	19
Figura 2. Tabla geomecanica de la mina Cerro Lindo	21
Figura 3. Equipo perforador frontonero en perforación	21
Figura 4. Frente cargado y amarrado	22
Figura 5. Detector de gases	23
Figura 6. Desatador mecánico	23
Figura 7. Scoop para limpieza de frente	24

Figura 8. Diagrama de flow sheet de las plantas de pasta 1 y 2.	25
Figura 9. Filtro de banda.	26
Figura 10. Tanque espesador.	26
Figura 11. Tolva mezclador.	27
Figura 12. Bomba putzmeister.	28
Figura 13. Prueba de slump de la pasta.	29
Figura 14. Estructurado 1er nivel de un muro tapón de concreto.	31
Figura 15. Punto de descarga de la línea de aditivo en el mezclador continuo de Planta.	32
Figura 16. Las densidades registradas en ambas muestras de relleno patrón Fueron 2570 y 2600.	37
Figura 17. Presiones de bombeo registradas en el instante del muestreo de mezclas patrón al tajo de prueba.	40
Figura 18. Densidad del relleno Vs Extensibilidad horizontal	41
Figura 19. Muestras para realizar el secado con vicat.	43
Figura 20. Ensayo de tiempo de secado con herramienta vicat.	45
Figura 21. Muestras de probetas de relleno para la compresión.	46

RESUMEN

En la Unidad Minera Cerro Lindo se usa la tecnología del relleno en pasta para el rellenado de los tajos vacíos producto del minado por el método sublevel stoping, los rellenos de los tajos deben tener una resistencia óptima para garantizar la recuperación de los tajos secundarios y terciarios de acuerdo al secuenciamiento de minado, disminuyendo el riesgo de contaminación de la carga de mineral con el relleno de las paredes de los tajos primarios rellenados.

El presente informe de trabajo de investigación “Transportabilidad del relleno en pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources 2019” tiene por objetivo proponer el logro de transporte de la pulpa de relleno en pasta hacia los nuevos cuerpos de yacimiento mineral ubicados a una distancia mayor a la consideración del proyecto inicial del relleno en pasta en los cuerpos OB1 y OB2.

La transportabilidad de la pulpa de relleno a largas distancias debe satisfacer con el requerimiento principal de rellenar con material de calidad para conseguir una resistencia optima, mitigar la sedimentación del relleno en la parte inferior de la tubería y manejar una mezcla para la presión de bombeo este acorde con la disponibilidad de la bomba putzmeister.

INTRODUCCIÓN

En el Perú la minería ha venido usando la más avanzada tecnología en sus operaciones unitarias, llegando a automatizar algunos de sus operaciones en interior mina, la robotización de equipos que son manipulados a control remoto desde una cabina ubicado en la superficie. Esta son tecnologías en la minería trackless de empresas de clase mundiales que son mecanizados en su totalidad, la Unidad Minera Cerro Lindo es la mina subterránea mecanizada con mayor producción de mineral en todo el Perú, utilizando el método de explotación de sublevel stoping.

Este método de minado al terminar de extraer el mineral en los tajos, deja grandes vacíos que deben ser rellenados con la tecnología de relleno en pasta compuesta en su mayoría por el relave producido por la planta de tratamiento en superficie que es devuelta a interior mina para eliminar vacíos, devolver la estabilidad del macizo rocoso, evitar ocurrencia de subsidencias, hacer posible la recuperación de los tajos secundarios y aminorar el envío de relave a las canchas de relave filtrado en superficie impactando en el medio ambiente.

En la Unidad Minera Cerro Lindo los nuevos cuerpos descubiertos se encuentran a una distancia horizontal mayor a la estimada a un inicio del proyecto de pasta en la mina, la ubicación de las plantas de pasta con respecto de los nuevos tajos que resultaran luego de la preparación y

explotación hacen que el envío de la pasta se vuelva un desafío en la transportabilidad del relleno a largas distancias.

Palabras Clave: Pulpa de relleno, densidad de la mezcla, reología.

CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

El relleno en pasta está formado por relave más agua más cemento y cuando se transporta por tuberías a largas distancias, esta se obstruye. Para evitar eso, se adiciona más agua, pero se malogra el relleno en pasta. Para esto, se pretende usar aditivos que mejoren el transporte de pasta a largas distancias. La trabajabilidad de las mezclas de la pasta de relleno se puede mejorar con menor uso de litigante; disminuyendo la presión de bombeo y reducción de pérdida de presión; reducción de la tasa de desgaste de tuberías; mejorando la colocación del relleno, asimismo teniendo una buena consistencia en la mezcla de relleno mejorada y segregación reducida. El transporte de relleno de pasta es vital para mantener la producción de mina y producción de concentrados en planta concentradora. Cualquier obstrucción de las tuberías de relleno trae como consecuencia el derrame de las mismas en las instalaciones mineras y repercute en procedimiento administrativo sancionador por la autoridad en la materia que es Osinergmin.

El tratamiento de mineral de 21,500 toneladas por día de mineral, genera un promedio de 20210 toneladas de relave, de los cuales el 60% se deriva para el relleno en pasta para los tajos vacíos y el 40% para disposición superficial. Los aditivos ayudan a reducir la pérdida de presión por mayor distancia de transporte y/o flujo mejorado. En la industria minera se tienen diferentes empresas que ofrecen diversos tipos de aditivos para cambiar las propiedades físico y químicas de los relaves mineros, los mismos que se

utilizan previa caracterización de los relaves y pruebas a nivel laboratorio que recién se implementara a nivel industrial.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema General

¿Cuál es la dimensión predominante en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources?

1.1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el indicador predominante de la mezcla de agua en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources?
- ¿Cuál es el indicador predominante de los aditivos en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources?
- ¿Cuál es el indicador predominante de las tuberías en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar cuál es la dimensión predominante en transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources.

1.2.2. Objetivo específico

- Determinar cuál es el indicador que predomina de la dimensión mezcla de agua en la transportabilidad de relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources.
- Determinar cuál es el indicador que predomina en la dimensión aditivos en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources.
- Determinar cuál es el indicador que predomina en la dimensión tuberías de transporte en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources.

1.3. Justificación e importancia

Esta investigación ayudara a comprender la distribución de tensiones en los rellenos de pasta y calcular la estabilidad en las paredes de pasta. Asegurará la disminución de los espacios vacíos en interior mina, asegurará la producción de mineral y el tonelaje de tratamiento programado en la Planta Concentradora.

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

La mejora en la confiabilidad del sostenimiento de las minas subterráneas permite una reducción en los tiempos de ciclo. Esto aumenta la eficiencia operativa, lo cual aumenta la rentabilidad y los impuestos para la contribución social.

En su relevancia práctica, una vez que la resistencia ha sido determinada, las variables de la mezcla del relleno de pasta pueden ser optimizadas para proporcionar la mezcla deseada y lograr dicha resistencia con el uso más bajo de cemento. Esto sugiere que el relleno debe ser a bajo costo. Estos costos pueden ser importantes dentro de los gastos de explotación de la mina. La optimización de diseños de mezcla puede ofrecer importantes ahorros de costo.

En cuanto a la metodología del trabajo de investigación, se involucran actividades de diseño de muestreo, actividades de campo para extraer las muestras representativas y la caracterización del relave y determinar pruebas experimentales. Será punto de partida para muchos colegas que no tienen claro este tipo de metodologías que se emplean en la investigación de proyectos mineros.

El costo de la obtención del material de relave en una planta concentradora es cero, es la planta concentradora quien cubre el costo por concepto de transporte y espesado del material. El transporte del material a través de las líneas de tuberías son las más económicas, eficiente y rápido que con otras alternativas de transporte. Una característica de la pasta es el ángulo que forma en la depositación del tajo, de esta manera la pasta se va esparciendo formando un ángulo de depositación y con eso se elimina la necesidad de utilizar recursos adicionales para esparcir manualmente o mecánicamente el material. Utilizar el relave producido por planta concentradora para el relleno de los tajos se estaría ahorrando cero inversión en el plan de cierre de mina.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis

1.4.1.1. Hipótesis General

La dimensión predominante en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources es la mezcla de agua.

1.4.1.2. Hipótesis específicos

- El indicador que predomina en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources es la dimensión uso de aditivos.
- El indicador que predomina en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources es la dimensión tuberías de transporte.

1.4.2. Definición de variables

1.4.2.1. Variables independientes

Transportabilidad del relleno de pasta

1.4.2.2. Indicadores Independientes

Densidad de la pulpa (Tn/m³)

Porcentaje de cemento (%)

Volumen de relleno bombeado (m³)

1.4.2.3. Variables dependientes

Relleno en pasta a largas distancias

1.4.2.4. Indicadores dependientes

Distancia horizontal (metros)

Presión de bombeo (Bares)

Desgaste de tuberías (mm)

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

(Lain Huerta, 2015) realizo una investigación: Estudio de las dimensiones tensionales y de la resistencia de los rellenos de pasta de la Mina subterránea de aguas teñidas, Huelva, España. Trabajo para optar grado de Tesis Doctoral.

En su trabajo de Tesis ha considerado que para usar el relleno tipo de pasta para el sostenimiento de las labores en la minería subterránea se debe tener un estudio técnico de memoria descriptiva de cálculo de los parámetros de diseño de la mezcla, optimización de bombeo y eficiencia en el transporte hacia interior mina, el relleno en pasta dentro de la operación minera es muy importante por representar hasta el 20%.

En cuanto al uso del relleno de pasta, indica, es una tecnología relevante en las operaciones en la minería subterránea y se está convirtiendo en una oportunidad de mejora usual para su aplicación en muchas unidades mineras del mundo. El material de relleno se vierte en tajos vacíos previamente extraídas todo el mineral en su interior para formar una plataforma estable para el trabajo de las siguientes operaciones unitarias y de soporte en las paredes adyacentes. También ayuda en el sostenimiento para los muros y pilares, esto ayuda a prevenir el desprendimiento de carga o bloques del techo del tajo y permite la recuperación de un pilar, todo esto favorece en aumentar la productividad.

Cuando se tenga la resistencia óptima para el rellenado de los tajos, los parámetros operaciones se someten a pruebas para reducir el consumo de cemento y disminuir los costos en su consumo, el objetivo es enviar un metro cubico de pasta al menor costo posible, en la tesis de Lain Huerta el costo de operación del relleno en pasta oscila entre los 3 y 30 euros por metro cubico enviado a interior mina, estos costos influyen enormemente en el costo general de la operación mina. En porcentajes del total del costo de operación mina, el costo de relleno en pasta varía entre el 10 y 20 %, y de esto el costo por consumo de cemento representa hasta un 75% de los costos del relleno. Tener un buen diseño de mezcla desde la planta de pasta puede proyectar al cierre del año un ahorro de costo importante.

Este antecedente aporta importantes ensayos de laboratorio como instrumentos idóneos para evaluar la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias.

(G., y otros, 2015). Estudio experimental de la respuesta geomecánica de relaves en pasta cementados utilizados para el relleno de caserones. Obras y Proyectos 17, 6-12. The University of Western Australia.

De este trabajo de investigación, la idea concreta es que la tecnología de relleno de tajos con pasta cementados con contenido de relaves se ha extendido en el sector minero del método de explotación subterránea a nivel mundial. Esta tecnología moderna ofrece una lista de ventajas para la operación y desde el punto de vista medio ambiental. En la aplicación de esta tecnología de pasta en el vertimiento de los tajos se han encontrado con las fallas o colapsos de los taponos que sirven para la contención de relleno, se ha registrado y estudiado para la instrumentación geotécnica de un tajo vacío real, este estudio permite cuantificar las presiones horizontales totales y presiones horizontales en que se desarrollan en la primera etapa de rellenado. El fraguado entre las etapas de relleno que se realizan al rellenar un tajo, favorece en la consolidación del relleno y la generación del efecto del arco entre el relleno y la roca, esto disminuye la tasa de incremento de las presiones que se ejerce sobre el tapon de contención a medida el relleno va subiendo de altura.

Dentro del contexto de esta resolución, declara la existencia de responsabilidad administrativa de la Empresa Minera Los Quenuales S.A. al haberse acreditado que realizó el transporte de relaves a través de una línea de tubería metálica en un tramo de 5.5 kilómetros sin contar con un sistema de contención ante derrame de relaves a lo largo de toda esta línea; conducta tipificada como infracción administrativa en el artículo 32 del Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero-Metalúrgica, aprobado mediante Decreto Supremo Nro. 016-93.EM. El referido Decreto Supremo, en su artículo 3 indica que tiene como objeto: a) Establecer las acciones de previsión y control que deben realizarse para armonizar el desarrollo de las actividades minerometalúrgicas con la protección del medio ambiente. b) Proteger el medio ambiente de los riesgos resultantes de los agentes nocivos que pudiera generar la actividad minerometalúrgica, evitando sobrepasen los niveles máximos permisibles. c) Fomentar el empleo de nuevas técnicas y procesos relacionados con el mejoramiento del medio ambiente. En su artículo 5 indica, “el titular de la actividad minero-metalúrgica, es responsable por las emisiones, vertimiento y disposición de desechos al medio ambiente que se produzcan como resultado de los procesos efectuados en sus instalaciones. A este efecto es su obligación evitar e impedir que aquellos elementos y/o sustancias que por sus concentraciones y/o prolongada

permanencia puedan tener efectos adversos en el medio ambiente, sobrepasen los niveles máximos permisibles establecidos.”

En su artículo 9, capítulo II, describe: “el titular de la actividad minera metalúrgica presentara dos ejemplares del Programa de Adecuación y Manejo Ambiental- PAMA,

ante el Ministerio de Energía y Minas.” Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero-Metalúrgica, aprobado mediante Decreto Supremo Nro. 016-93/EM. La normativa de Evaluación y Fiscalización ambiental nos proporciona un marco obligatorio a cumplir en cuanto a la aplicación de procedimientos de prevención y manejo de desechos al medio ambiente, lo que, a finalidad de mi investigación le da un complemento de proceso a establecer en el transporte de relleno de pasta por tuberías a larga distancia”.

(Ministerio de energía y minas, 2014), Resolución de Consejo Directivo Osinerming Nro, 375-2016.

Con fecha 11 de Setiembre 2014 la Policía Nacional del Perú comunica a Osinerming la denuncia hecha por parte de las autoridades locales del distrito de Orcopampa, sobre un derrame de relaves que afecto el rio Orcopampa y los pastizales de la parte baja del Depósito de Relaves Nro. 4 de la Unidad Minera Orcopampa, de Buenaventura.

Del análisis que efectúa el Ente sancionador, en su punto Nro. 4, anota de la supervisión efectiva realizada: “La causa de la fuga de relaves, fue por el soplado de la empaquetadura de la unión de la brida de la tubería de transporte de relaves y por la presión del relave transportado, lo cual el chorro de la pulpa de relave levanto la tapa de madera del canal de contingencia (...). El derrame derramado ha llegado hasta el canal de agua fresca que se encuentra a 3.00 m aproximadamente en línea recta (...), es por ello que el agua contaminada con relaves fue conducido a través del canal hasta la zona de pastizales (...).”.

Se desprende entonces, que la minera Buenaventura no controló debidamente el riesgo de derrame de relaves por la apertura de las tapas de madera instaladas como cubierta del canal de contingencia, para las tuberías de transporte de relaves. Este problema potencial debió ser controlado oportunamente, debido a la presión con la que operan los sistemas de transporte de relave por tubería, hecho que era de conocimiento del titular minero.

Al margen de las normas de seguridad y control del medio ambiente impuesto por los entes fiscalizadores, enmarcamos la necesidad de implantar un adecuado sistema de control del transporte y almacenamiento de los relaves mineros. De allí la importancia de un idóneo y eficaz sistema de transporte del relleno de pasta por tuberías a larga distancia, primero, por una razón de seguridad materiales y ambientales y sus consecuentes sanciones económicas que, en muchos casos son bastante altas, que para este antecedente asciende una multa de 500 UIT. (A., y otros, 2015). Sistema de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento en la minería subterránea. Sinergia e innovación, 3(2), 17-41. Lugar de aplicación de la investigación: Minera Cerro Lindo, Chincha, Perú.

Muy aparte de la fluctuación del metal en el mundo, Oyarzun & Oyarzun (2011) nos indican que parte de las preocupaciones de los stakeholders (partes interesadas) durante los procesos de las extracciones mineras subterráneas son los continuos deslizamientos o derrumbes durante las labores por falta de inestabilidad en el sostenimiento que conlleva tener equipos atrapado, retrasos en la extracción de minerales y/o muertes y/o accidentes del personal minero; otra preocupación son las prácticas ambientales de las empresas mineras que preocupa constantemente a sus pobladores hacen que impidan el funcionamiento de las empresas mineras en sus comunidades. Esta investigación presenta un innovador sistema de relleno con mortero de relave, dando una solución de bajo costo y cumpliendo con los requisitos de resistencia obtenidos por métodos mecánicos. En cuanto a su metodología de carácter científico, aplicada, cuantitativa y cuasi experimental en el uso del nuevo sistema de relleno con mortero de relave, usando el relave como parte de la muestra, dando confiabilidad en el sostenimiento de las labores, bajar el nivel de relavera y evitar accidentes o equipos atrapados durante las extracciones en la minería subterránea. En cuanto a la confiabilidad en el sostenimiento en las labores mineras subterráneas, teniendo como marco teórico principal, la minería subterránea, los métodos de minado, los métodos de sistema de relleno, el sostenimiento y la confiabilidad.

El problema de la investigación: El sostenimiento en las minas subterráneas es el proceso de ejercer estabilidad física a las excavaciones subterráneas mediante el uso de diferentes elementos de sostenimiento salvaguardando vidas y equipos mineros. Entre el 2000 y 2015 se tiene registrado que el 32 % de los accidentes mortales ocurridos son por caída de rocas en minería subterránea, según el Ministerio de Energía y Minas del Perú, (MINEM, 2015), ocupando el segundo lugar de accidentes mortales ocurridos en labores subterráneas horizontales como galerías, bypass, crucero, así como tajos convencionales y mecanizados. El aporte de la presente investigación y que está comprometida con nuestra variable Transporte de relleno de pasta: demuestra una mejora consistente en la confiabilidad del sostenimiento de las minas subterráneas con la aplicación del sistema de relleno con mortero; la utilización de este método permite mejorar la capacidad operativa de la mina, reducir los tiempos del ciclo minero, incrementar la productividad, mejorar los márgenes, en beneficio de la organización y del ambiente.

(Cantorin, 2013). La pasta es un fluido no Newtoniano, con alta concentración de sólido en su composición. En este trabajo de investigación se utilizó los relaves totales generados en la planta concentradora como componente principal, se mezcla con cemento y escoria metalúrgica molida y agua, para obtener una pasta con valores de resistencia a la compresión uniaxial, a un determinado tiempo de curado. La pasta se

transporta a través de tuberías de acero al carbono y tuberías de HDPE hacia interior mina.

Al realizar diversas pruebas de laboratorios como instrumentos de medición se ha obtenido, la reducción de consumo de cemento en el diseño de la mezcla hace que la resistencia a la compresión es menor, lo que aumenta es el costo de preparación de los tajos, que incluye mano de obra, barreras y tuberías. El costo de mantenimiento se incrementa por el tiempo de uso de los equipos de planta de relleno y el consumo de escoria disminuye en menor proporción que el cemento. La aplicación de relleno en pasta cumple una función estructural, restablece la estabilidad del macizo rocoso y por consiguiente permite la recuperación total y segura de pilares de mineral existentes en la mina, así como la continuidad del minado a niveles inferiores. Hay beneficios ambientales, ya que el agua residual, resultante de los procesos de separación solidoliquidado se recupera y se vuelve a utilizar en la planta de relleno y en la planta concentradora. Esta recopilación de procesos, en función de mi trabajo de investigación acerca del transporte de relleno en pasta a largas distancias, proporciona una idea concreta de lo provechoso que es la utilización de los recursos ya usados y adaptarlos en los nuevos procesos de relleno de pasta y tratamiento de relaves; nos permite realizar un estudio analítico previo que permita conocer las propiedades de los relaves cuando participan en una mezcla con cemento y luego proyectar los costos operativos y su mejor resultado en el cuidado del medio ambiente y seguridad del material humano de las mineras.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Método de Explotación

El método de minado para una explotación subterránea exige que el yacimiento deba cumplir ciertos factores como la resistencia del mineral y de la roca encajonante, entre estos su dimensión, forma, profundidad, ángulo de buzamiento, posición del depósito. La información del macizo rocoso es importante para el dimensionamiento de las labores de explotación y facilita en la elección de un método de minado.

2.2.1.1. Método de Sublevel Stopping

El método se denomina sublevel stopping que consiste en cubicar los cuerpos mineralizados formando paralelepípedos para ser minados de forma ascendente de acuerdo a un programa establecido por año.

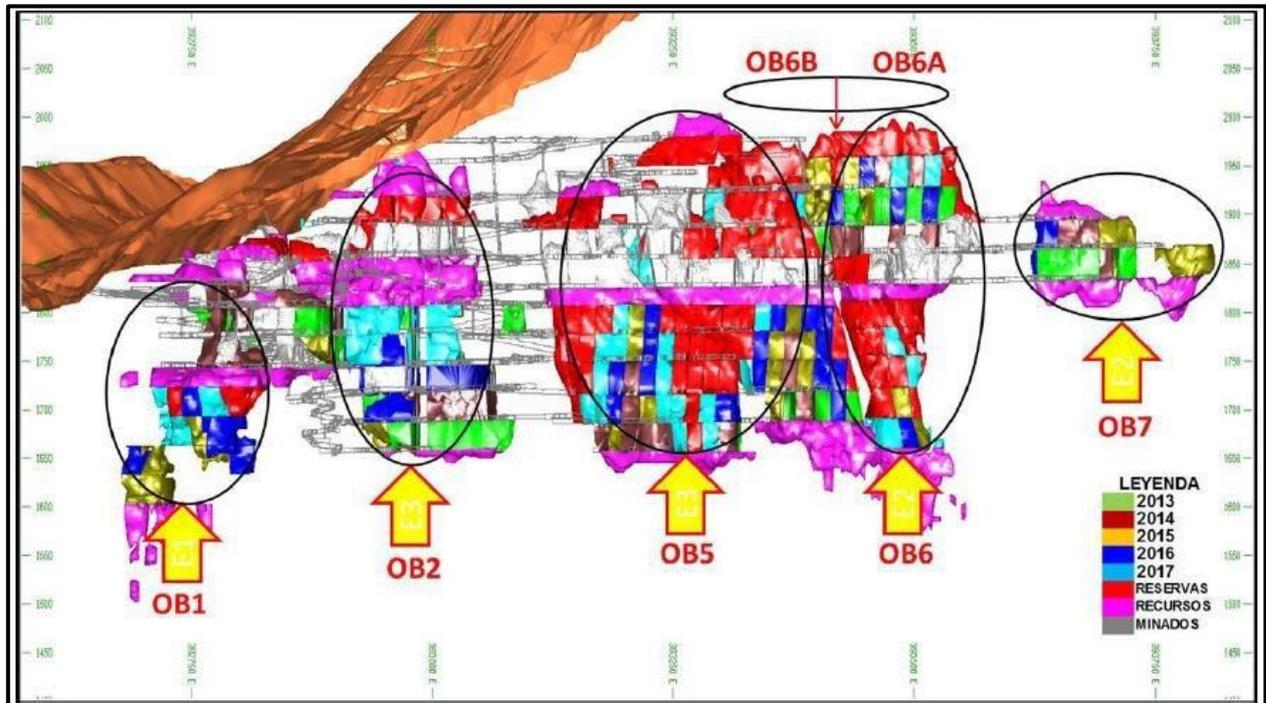


Figura 1. Secuencia de mina mina Cerro Lindo.

En la Unidad Minera Cerro Lindo el método de minado es Sub-level Stopping (taladros largos) ascendente secuencial debido a la geomorfología de los cuerpos mineralizados y al tipo de yacimiento. Es un método de producción masivo ya que se mueve gran volumen de tonelaje.

Este método consta de la ubicación de los tajos de 30 metros de alto, 25 metros de ancho y 40 metros de largo. En estos bloques se pueden realizar las perforaciones en mallas pasantes o en mallas negativas y positivas.

Los paralelepípedos se van formando de tal manera que el diseño principal era de hacer una cruz o una "T" lo que corresponde para cada tajo tanto en la parte superior como inferior, la galería más larga se llama galería central o principal mientras que la galería transversal se la llamara galería Slot. Básicamente todos los tajos tienen la misma matriz y cada nivel tiene la misma configuración.

2.2.2. Ciclo de minado

El ciclo de minado en la Unidad Minera Cerro Lindo consta de: sostenimiento, perforación, voladura, ventilación, desate mecanizado, limpieza y transporte, para el método de explotación de “sublevel stoping”.

2.2.2.1. Sostenimiento

El sostenimiento aplicado en la Unidad Minera Cerro Lindo son el shotcrete vía humedad de espesor que llegan de 2”, 3” y 4” según la evaluación geomecanica en la labor que amerite, estos se refuerzan con fibras sintéticas para alcanzar 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 los cruces, selladas, en la preparación de tajos en el nivel superior e inferior se colocan los cables boletín de 6.5 m a 15 m cuando el terreno lo requiera y previa evaluación geomecanica.

Existen labores que cruzan zonas de rocas de RMR bajo a muy bajo, este terreno de baja calidad de roca requiere el sostenimiento de shotcrete, perno helicoidales y malla electro soldada.

MINA CERRO LINDO DEPARTAMENTO DE GEOMECÁNICA (GEOLOGICAL STRONG POINT INDEX) (ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA)		CONDICIONES				METODOLOGÍA DE APLICACIÓN																																																					
Sostenimiento de labores mineras SECCIONES 2x20 - 3x20 m		CONDICIONES BUENA (MUY RESISTENTE, FRESCA) SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES MUY/RUGOSA E INALTERADAS, CERRADAS. R: (100 A 200 MPa) (SE ROMPE CON 3 A MAS GOLPES DE PICOTA) REGULAR (RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA) DISCONTINUIDADES RUGOSAS, LEVEMENTE ALTERADA, MANCHAS DE OXIDACION, LIBERACION ABERTA. R: (50 a 100 MPa) (SE ROMPE CON UNO O DOS GOLPES DE PICOTA) POBRE (MODERADA, RESISTENTE, LEVE, MODER. ALTERADA) DISCONTINUIDADES LISAS, MODERADAMENTE ALTERADA, LIBERACION ABERTA. R: (25 A 50 MPa) (SE ROMPE CON UNO O DOS GOLPES DE PICOTA) MUY POBRE (BLANDA, MUY ALTERADA) SUPERFICIE MUY O COMPLETAMENTE SUAVES, MUY ALTERADA, LIBERACION ABERTA. R: (10 A 25 MPa) (SE ROMPE CON UNO O DOS GOLPES DE PICOTA)				METODOLOGÍA DE APLICACIÓN <table border="1"> <thead> <tr> <th>INDICE G.S.I.</th> <th>INDICE RMR</th> <th>INDICE Q</th> <th>TIPO DE SOPORTE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>LEVEMENTE FRACTURADA BUENA (LF/B)</td><td>75-85</td><td>40-100</td><td>A</td></tr> <tr><td>LEVEMENTE FRACTURADA REGULAR (LF/R)</td><td>65-75</td><td>12-40</td><td>A</td></tr> <tr><td>LEVEMENTE FRACTURADA POBRE (LF/P)</td><td>55-65</td><td>5-12</td><td>B</td></tr> <tr><td>MODERADAMENTE FRACTURADA BUENA (MF/B)</td><td>65-75</td><td>12-40</td><td>A</td></tr> <tr><td>MODERADAMENTE FRACTURADA REGULAR (MF/R)</td><td>55-65</td><td>5-12</td><td>B</td></tr> <tr><td>MODERADAMENTE FRACTURADA POBRE (MF/P)</td><td>45-55</td><td>1-5</td><td>C</td></tr> <tr><td>MUY FRACTURADA BUENA (MFB)</td><td>35-45</td><td>0.4-1</td><td>D</td></tr> <tr><td>MUY FRACTURADA REGULAR (MFR)</td><td>25-35</td><td>0.1-0.4</td><td>E</td></tr> <tr><td>MUY FRACTURADA POBRE (MFP)</td><td>15-25</td><td>0.05-0.1</td><td>F</td></tr> <tr><td>INTENSAMENTE FRACTURADA REGULAR (IF/R)</td><td>35-45</td><td>0.4-1</td><td>D</td></tr> <tr><td>INTENSAMENTE FRACTURADA POBRE (IF/P)</td><td>25-35</td><td>0.1-0.4</td><td>E</td></tr> <tr><td>INTENSAMENTE FRACTURADA MUY POBRE (IF/MP)</td><td>15-25</td><td>0.05-0.1</td><td>F</td></tr> </tbody> </table>		INDICE G.S.I.	INDICE RMR	INDICE Q	TIPO DE SOPORTE	LEVEMENTE FRACTURADA BUENA (LF/B)	75-85	40-100	A	LEVEMENTE FRACTURADA REGULAR (LF/R)	65-75	12-40	A	LEVEMENTE FRACTURADA POBRE (LF/P)	55-65	5-12	B	MODERADAMENTE FRACTURADA BUENA (MF/B)	65-75	12-40	A	MODERADAMENTE FRACTURADA REGULAR (MF/R)	55-65	5-12	B	MODERADAMENTE FRACTURADA POBRE (MF/P)	45-55	1-5	C	MUY FRACTURADA BUENA (MFB)	35-45	0.4-1	D	MUY FRACTURADA REGULAR (MFR)	25-35	0.1-0.4	E	MUY FRACTURADA POBRE (MFP)	15-25	0.05-0.1	F	INTENSAMENTE FRACTURADA REGULAR (IF/R)	35-45	0.4-1	D	INTENSAMENTE FRACTURADA POBRE (IF/P)	25-35	0.1-0.4	E	INTENSAMENTE FRACTURADA MUY POBRE (IF/MP)	15-25	0.05-0.1	F
INDICE G.S.I.	INDICE RMR	INDICE Q	TIPO DE SOPORTE																																																								
LEVEMENTE FRACTURADA BUENA (LF/B)	75-85	40-100	A																																																								
LEVEMENTE FRACTURADA REGULAR (LF/R)	65-75	12-40	A																																																								
LEVEMENTE FRACTURADA POBRE (LF/P)	55-65	5-12	B																																																								
MODERADAMENTE FRACTURADA BUENA (MF/B)	65-75	12-40	A																																																								
MODERADAMENTE FRACTURADA REGULAR (MF/R)	55-65	5-12	B																																																								
MODERADAMENTE FRACTURADA POBRE (MF/P)	45-55	1-5	C																																																								
MUY FRACTURADA BUENA (MFB)	35-45	0.4-1	D																																																								
MUY FRACTURADA REGULAR (MFR)	25-35	0.1-0.4	E																																																								
MUY FRACTURADA POBRE (MFP)	15-25	0.05-0.1	F																																																								
INTENSAMENTE FRACTURADA REGULAR (IF/R)	35-45	0.4-1	D																																																								
INTENSAMENTE FRACTURADA POBRE (IF/P)	25-35	0.1-0.4	E																																																								
INTENSAMENTE FRACTURADA MUY POBRE (IF/MP)	15-25	0.05-0.1	F																																																								
ESTRUCTURA LEVEMENTE FRACTURADA TRES O MENOS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI (RQD = 75 - 100) (2 A 6 FRACTURAS POR METRO) MODERADAMENTE FRACTURADA MUY BIEN TRABADA, NO DISTURBADA, BLOQUES CUBICOS FORMADOS POR TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES ORTOGONALES (RQD = 50 - 75) (8 A 12 FRACTURAS POR METRO) MUY FRACTURADA MODERADAMENTE TRABADA, PARCIALMENTE DISTURBADA, BLOQUES ANGULOSOS FORMADOS POR CUATRO O MAS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (RQD = 25 - 50) (12 A 20 FRACTURAS POR METRO) INTENSAMENTE FRACTURADA PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO FRAGMENTOS ANGULOSOS O IRRREGULARES (RQD = 0 - 25) (MAS DE 20 FRACTURAS POR METRO)		APLICACIÓN SIN FACTORES INFLUYENTES <ul style="list-style-type: none"> Para la aplicación de esta tabla geomecanica es preciso identificar y eliminar condiciones de riesgo de caída de rocas en los huecos y techo de las excavaciones subterráneas que se va a mapear. Se identifica los parámetros estructurales determinando la cantidad de fracturas por metro lineal, haciendo uso del flexómetro o cinta métrica. La resistencia de la roca se determina por definición de la cantidad de golpes de picota con las que se rompe o identifica la roca. Esta clasificación se complementa observando la presencia de la alteración en las paredes de las fracturas o el tipo de relleno (granular, limoso, arcilloso), forma de la fractura (lisa plana, lisa ondulada, rugosa, rugosa plana, rugosa ondulada, y lisa estrada) y espaciamiento de las fracturas. Cada recuadro de calidad del macizo rocoso presenta dos campos aplicándose el sostenimiento designado en el campo superior cuando no se presentan factores influyentes. FACTORES INFLUYENTES QUE DETERIORAN LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO <ul style="list-style-type: none"> Presencia de Agua de infiltración. Orientación desfavorable de las fracturas Presencia de fallas y estructuras mayores Manifestaciones de liberación de esfuerzos inducidos Detonación en la colocación del sostenimiento Cuando se tiene los factores indicados se aplicará el sostenimiento que indica el campo inferior de recuadro. Los controles estructurales que identifican la presencia de cuñas o bloques, deben ser tomados en cuenta para establecer criterios de colocación de Sostenimiento de mayor avance/ Pernos Helicoidales >7", Cable Bolting MEASURAS PREVENTIVAS Y DE CONTROL <ul style="list-style-type: none"> Una medida importante es aplicar la voladura controlada para evitar daños al macizo rocoso. El mapeo geomecánico deberá realizarse conforme avance la excavación y colocación del soporte de acuerdo al tipo de sostenimiento recomendado en la tabla. Considerando que nuestro minado es por sublevel stoping, las condiciones de estabilidad cambian por los esfuerzos inducidos generados por el minado, por lo tanto la fortificación será reevaluada El perno de anclaje debe ser colocado inmediatamente luego de culminado el talado El perno sistemático será definido por el Geomecánico, basado en la caracterización del macizo rocoso, Pernos Helicoidales para Roca tipo I - (IIA - IIB - IVA) y Pernos de Fricción o Expansivos (Roca tipo IVB - V). Capacitar permanentemente a todo el personal de operaciones en la aplicación de la Tabla geomecanica La Tabla Geomecánica forma parte de un proceso de mejora continua por lo que periódicamente se evaluarán sus aplicaciones y se implementarán ajustes. CRUCEROS DE PRODUCCIÓN <ul style="list-style-type: none"> Los cruces que se utilizarán como futura tapa de producción, se aplicará como sostenimiento final el Cable Bolting. 																																																									

Figura 2. Tabla geomecanica de la mina Cerro Lindo

2.2.2.2. Perforación

En la Unidad Minera Cerro Lindo, se utiliza equipos perforadores frontoneros para los labores de avance desarrollo, estos equipos hidráulicos tienen 2 brazos perforadores para cumplir con la operación en una sección de 5 mt x 4.5 mt. La aplicación de equipos con la tecnología de última, favorece en la evolución de los metrajes perforados y permite el cumplimiento del metraje programado.



Figura 3. Equipo perforador frontonero en perforación.

2.2.2.3. Voladura

Se realiza el carguío con el equipo anfoloader (cargador neumático mecanizado).

Accesorios de voladura: fanel de periodo corto (15m): carmex (guías ensamblada).

Explosivos: cordón detonante (pentacord 5p): emulsión 3000 (2" x12") agente de voladura: anfo.



Figura 4. Frente cargado y amarrado.

2.2.2.4. Ventilación

El sistema de ventilación de la U.M. Cerro Lindo está constituido por labores de ventilación, ventiladores primarios, Extractores primarios y ventiladores auxiliares. Todos estos componen una compleja red que actualmente ingresa a la mina 2'000 000 de CFM logrando cubrir el requerimiento actual de 1'700 000 CFM esta cantidad sin considerar el requerimiento por voladura debido a que esta se realiza durante el cambio de guardia.



Figura 5. Detector de gases.

2.2.2.5. Desate mecanizado

El desatado se realiza con la finalidad de hacer caer las rocas sueltas que se encuentran en los hastiales, las coronas, etc. con los desatadores electrohidráulicos SCALER BTI.

En esta área se realiza el desatado en los frentes ciegos como cruceros, galerías, rampas, etc. y desatado en las labores donde las condiciones son inestables por seguridad, como también las ventanas de los tajos vacíos para la preparación de los tapones de contención de relleno.



Figura 6. Desatador mecánico.

2.2.2.6. Limpieza y transporte

El acarreo entre scoops y volquete, es el lugar llamada cámara de carguío diseñada a las condiciones del tajo de extracción del nivel inferior, en donde el scoops carga el material y lo vierte en el camión, siendo este último el que va a mover el material hasta las parrillas que están en el Nivel 1820 o en algunos casos cuando las parrillas están en mantenimiento el mineral es movido a superficie en el Botadero 100, donde va a pasar al siguiente proceso el cual es el chancado.



Figura 7. Scoop para limpieza de frente.

2.2.3. Relleno en pasta

2.2.3.1. Planta de Relleno en Pasta

El relleno en pasta es un fluido no Newtoniano, con alta concentración de sólidos. Para su producción se utiliza el relave total generado por la planta concentradora que se mezcla con cemento y agua para obtener una pasta con valores de resistencia a la compresión uniaxial, a un determinado tiempo de curado y que cumpla con los parámetros operacionales para un buen bombeo y transporte a largas distancias.

Su bajo contenido de agua hace que esta mezcla tenga una consistencia espesa, las partículas de diferentes tamaños no se segregan ni sedimentan mientras la pasta es bombeada a través de las líneas de relleno hasta los tajos a rellenar.

La U.M. Cerro Lindo cuenta con dos plantas de relleno en pasta, las cuales realizan la preparación del relleno de forma independiente, desde la recepción del relave proveniente de la planta metalúrgica hasta realizar el bombeo hacia los tajos a rellenar.

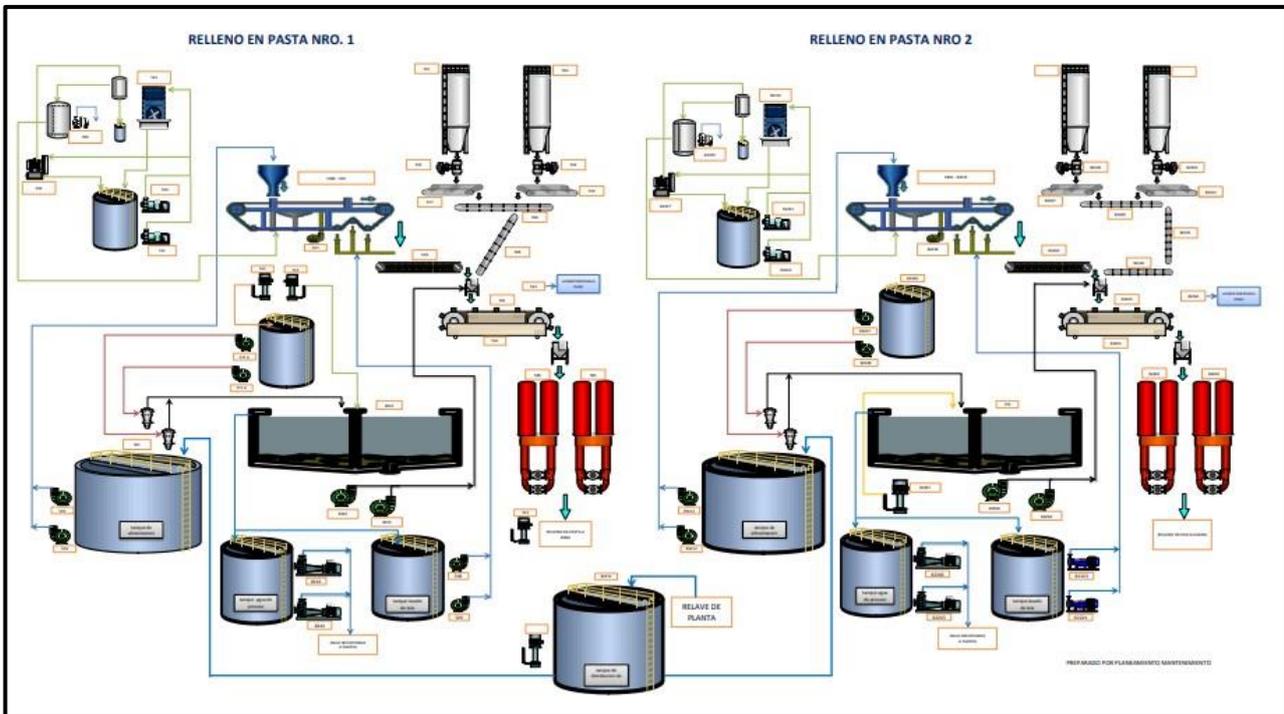


Figura 8. Diagrama de flow sheet de las plantas de pasta 1 y 2.

2.2.3.1.1. 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.

2.2.3.1.2. Tanque espesador

El agua obtenida del proceso de filtrado es derivada hacia el espesado donde se va a separar el agua de los componentes solidos sedimentados para luego ser reutilizada y los sedimentos regresan al proceso de filtrado.



Figura 10. Tanque espesador.

2.2.3.1.3. Mezclador (Mixer)

En este equipo se produce la mezcla entre el relave, cemento y agua. Este tipo de equipos tienen un sistema donde el llenado y vaciado se realiza a través de válvulas mix proof (a pruebas de fugas), de esta forma es posible realizar en simultaneo el llenado, vaciado y la limpieza de diferentes tanques al mismo tiempo.



Figura 11. Tolva mezclador.

2.2.3.1.4. Bomba putzmeister

Es una bomba de desplazamiento positivo con capacidad para bombear 105 m³/h de pasta de 83.8 % sólidos que reporta una reología correspondiente a un asentamiento de 175 mm (7" slump). Accionada hidráulicamente con motor de 450 Kw., trabaja a unos 7.7 strokes/min con presión de 60 a 80 bares.

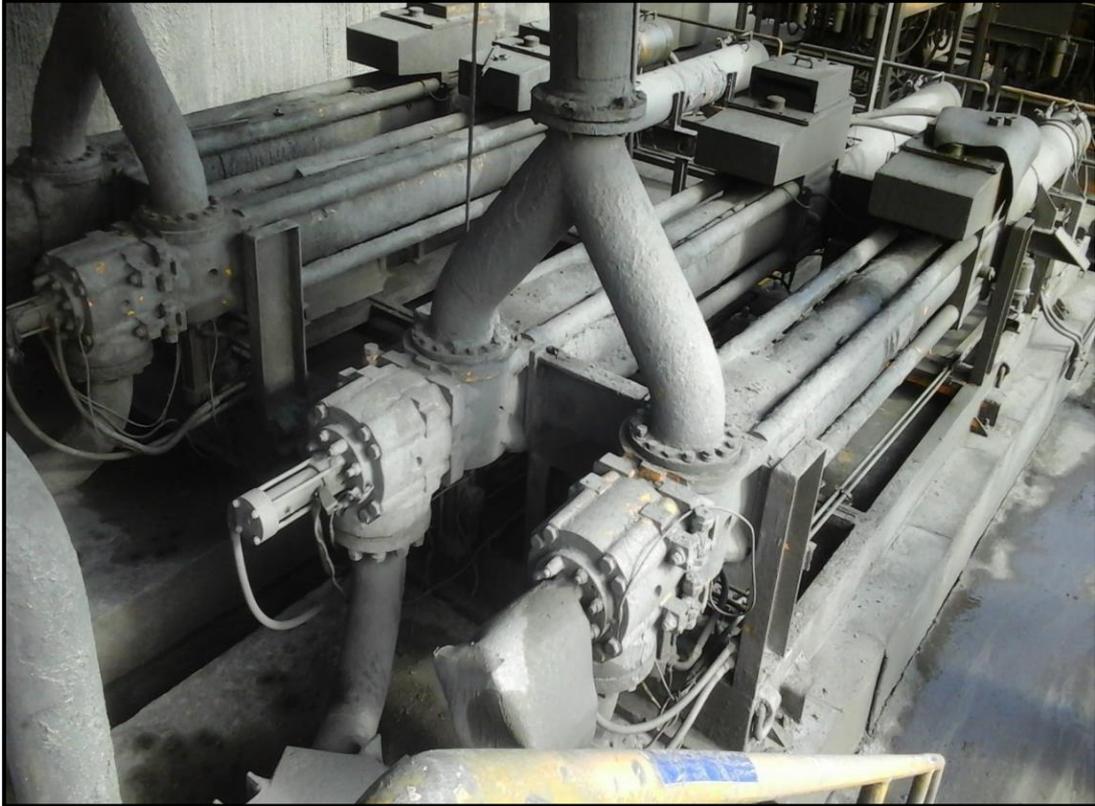


Figura 12. Bomba putzmeister.

2.2.3.2. Pasta

Es una mezcla compuesta en su mayoría por relave de planta concentradora, cemento y agua para alcanzar una resistencia con un tiempo de fraguado. Para aumentar su contenido de sólidos, la pulpa de relaves tiene que pasar por dos procesos de separación solido-liquido. Es utilizado el 100% de relaves generado por planta concentradora para la composición de la mezcla.



Figura 13. Prueba de slump de la pasta.

2.2.3.3. Reología de la pasta

Los fluidos presentan movimientos que llevan una deformación a partir de unos principios físicos que son estudiados por la reología. Es el movimiento del fluido, el esfuerzo al corte, viscosidad y la gradiente de velocidad el que determina el comportamiento para estos principios.

Para una transportabilidad de la pasta, el slurry cuenta con una reología propia del mineral del yacimiento VMS que es un factor importante en la selección de una bomba, ubicación de la planta de relleno en pasta y el sistema de transporte.

2.2.4. Tapones de contención

En la Unidad Minera Cerro Lindo se usan los tapones tipo muros de concreto para la contención del relleno en el interior del tajo.

2.2.4.1. Muros de concreto

El relleno en pasta permite la disposición del relave, dando continuidad al ciclo de minado. Para rellenar un tajo es necesaria la construcción de muros de contención, es por ello la importancia del análisis de su ciclo de construcción.

Una vez se termina la explotación del tajo se procede a realizar el protocolo de entrega, en el cual se establecen las condiciones en las cuales se debe de encontrar la ventana de extracción del tajo, para poder iniciar la construcción del muro de contención; estas condiciones son:

- Iluminado: Mejora la visibilidad en el área de construcción
- Dique de seguridad: Limita el área de trabajo hacia el lado del tajo, lo cual impide la exposición de los trabajadores hacia el espacio vacío.
- Desate: Elimina las rocas suelta o bancos.
- Sostenimiento con shotcrete: Asegura la corona y los hastiales
- Raspado de piso: La construcción del muro se debe realizar en roca firme.

De igual manera durante la construcción del muro de contención se deben cumplir los siguientes estándares:

- Pernos de 5/8" de espesor y 9' de longitud espaciados cada 40 cm. en el piso, hastiales y corona.
- Longitud inyectada del perno 5' y longitud en voladizo 4'
- Estructurado de aceros de 1/2" formando doble malla, espaciamiento entre aceros verticales y horizontales de 20 cm. y espaciado entre malla y malla de 20 cm.
- Espesor del muro 35 cm.
- Construcción en dos tramos, primer tramo 2.8 m de alto y el segundo tramo la longitud restante de la ventana.

El tiempo de construcción de un muro va a variar de acuerdo a:

- El equipo usado para la perforación; el piso se perforará siempre con jackleg, la perforación de los hastiales y la corona dependerá de la disposición del bolter.

De comenzarse la perforación de los hastiales con jackleg, la perforación de la corona también se debe culminar con jackleg.

- El uso del bolter, que brinda una mejor calidad de perforación en cuanto a limpieza y orientación de los taladros, lo que facilita el cumplimiento del estándar de inyección de los pernos.
- El trabajo en el segundo nivel, que se puede realizar sobre andamios o sobre un dique plataforma, esto dependerá si es que se utilizara la jackleg para completar la perforación de la corona.
- La inyección de los pernos, que se puede realizar de forma manual o con el uso de una bomba Ictus.
- Las dimensiones de la ventana, si la ventana es muy grande demanda más tiempo desde la perforación hasta el tiempo de vaciado, porque implica más preparaciones de mezcla.
- La disposición de los agregados y cemento, cuando no se cuenta con labores cercanas para depositar los materiales, el tiempo de preparación de mezcla se prolonga debido a que el mixer debe realizar mayor desplazamiento.
- La disponibilidad de energía eléctrica, la falta de está no paraliza el proceso solo lo prolonga, debido a que, hace más lento el corte de los listones de madera y planchas de triplay para el encofrado y los aceros de construcción y los alambres para el estructurado.



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



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

2.2.5. Propiedades físicas del relleno

2.2.5.1. Densidad de la mezcla

Es la relación entre la densidad de la pulpa de pasta y el contenido de agua en la mezcla. El slurry está compuesto por varios elementos como el relave, cemento y agua, para ello no se tiene una gravedad específica fija.

Su cálculo se procede con el uso del método de la fiola.

$$G_e = \frac{P_1}{-P_2 - (P_4 - P_5)} (P_3)$$

Donde:

P1: Peso del mineral

P2: Peso de la fiola

P3: Peso de la fiola + peso del agua

P4: Peso de la fiola + peso del mineral + peso del agua

P5: Peso de la fiola + peso del mineral

2.2.5.2. Velocidad de percolación

Se define como la rapidez o velocidad con la que el agua circula a través de la de la masa granular del relleno por efecto de la gravedad.

$$V_p = \frac{L \cdot Q}{H \cdot A}$$

Donde:

V_p: Velocidad de percolación

L: Altura de masa granular

Q: Caudal (cm³/hr)

A: Área de la sección (cm²)

H: altura donde el nivel del agua es constante

2.2.5.3. Velocidad crítica de deposición

La velocidad crítica de deposición varía ligeramente según el origen de la pulpa, está dado por una velocidad de empuje ligeramente superior a la fuerza gravitacional.

$$\frac{\rho_s}{V_s} = F_L * \sqrt{2 * g * D * \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho} \right)}$$

Donde:

F_L: Factor constante de Durand.

g: Aceleración de la gravedad (9.8 m/s²) D:

Diámetro interno de la tubería (metro) ρ_s:

Densidad de los sólidos del slurry (kg/m³) ρ_l:

Densidad del fluido de transporte (Kg/m³)

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Relleno de Pasta

El relleno en pasta es un fluido con alta concentración de sólidos, se compone por una mezcla con cemento, relave y agua, para obtener una pasta con valores de resistencia a la compresión para el relleno de labores subterráneas.

2.3.2. Agua

Elemento fundamental en la preparación de la mezcla de la pasta, permite aumentar o disminuir la densidad de la mezcla, la cantidad a utilizar depende también del diseño de mezclas.

2.3.3. Cemento

Producto comercial que tiene propiedades hidratantes al actuar con el agua, la cantidad se especifica en el diseño de mezclas.

2.3.4. Consistencia

Grado de humedecimiento de la mezcla, depende de la cantidad de agua usada y se mide a través del ensayo de Slump.

2.3.5. Compresión

La resistencia a la compresión es la carga máxima para una unidad de área soportada por una muestra antes de fallar (agrietamiento, rotura), se medirá en valores expresados en kg/cm².

2.3.6. Relave Minero

Son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas, la cantidad de relave a utilizar depende de la dosificación del agregado fino.

2.3.7. Relación agua cemento (a/c)

Es la relación principal que influye en la resistencia del concreto, siendo determinada en el diseño de mezclas.

2.3.8. Resistencia a la compresión

Es el máximo esfuerzo que puede soportar las probetas de concreto, el cual se mide en kg/cm².

2.3.9. Tamizado

Método por donde se pasan los agregados o sólidos por un tamiz de un tamaño concreto para producir una mezcla homogénea con un tamaño de granulo específico.

CAPITULO III METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcance de la investigación

3.1.1. Métodos

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

3.1.2. Alcance

El presente trabajo de investigación esta direccionado a satisfacer las expectativas de la transportabilidad del relleno en pasta a largas distancias en la mina Cerro Lindo, por lo tanto, el alcance del presente tiene la mezcla, dosificación y bombeo de la pulpa en el proceso de relleno de los tajos de la Unidad Minera Cerro Lindo.

3.2. Diseño de la investigación

No experimental

3.3. Población y muestra

3.3.1. La población

Nexa Resources, Chincha, Perú.

3.3.2. Muestra

Unidad Minera Cerro Lindo

CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Introducción del relleno en pasta con aditivo

Se realizó una prueba de relleno en pasta con aditivo MasterRoc MF 501 en la Planta de Pasta, desde donde se relleno el tajo 200 del nivel 1820. Después que el relleno es bombeado desde Planta N° 2, el tiempo de llegada del relleno al tajo es 10 a 15 minutos.

En esta prueba se buscaron dos objetivos:

1. Mantener la consistencia del relleno en pasta de tal manera que se mantengan las presiones de bombeo actuales con facilidad de transporte del relleno en pasta.
2. Incrementar la densidad de relleno desde ~2+580 (producción actual en planta) hasta 2800, lo que va a permitir el incremento de la resistencia.

Dichos objetivos se lograron con el uso del aditivo Master Roc MF 501.

En la prueba industrial se emplearon 5000 litros de Master Roc MF 501, el cual se transportó a través de mangueras desde la posición de los IBC's hasta el punto de descarga en el mezclador continuo. La descarga de aditivo al mezclador continuo inició a las 9:00 y culminó a las 18:20.

Durante la prueba, se nos solicitó recoger muestras de relleno con 3 dosis diferentes de cemento: 3, 4 y 5%. Se recogieron 9 muestras con 3%, 2 muestras con 4% y 2 muestras con 5%. La mayor cantidad de muestras de 3% se debe a que en la mayor parte del tiempo la planta de relleno trabaja con esa dosificación de cemento.

El punto de descarga del aditivo se ubicó en el techo del mezclador, a unos 40 cm delante de la pared delantera de la tolva.



Figura 16. Punto de descarga de la línea de aditivo en el mezclador continuo de Planta.

4.2. Ensayos realizados

4.2.1. Mezclas patrón

Los parámetros medidos durante la prueba industrial fueron los siguientes:

- Densidad de mezcla (balanza Marcy, en superficie)
- Consistencia (Slump, medido en el cono de Abrams, en superficie)

Se recogieron 2 muestras del mezclador continuo, en cada una de las cuales se midieron los parámetros indicados anteriormente. En el momento de dicho muestreo, la planta trabajaba con dosis de cemento = 3%.

El propósito de evaluar muestras patrón fue sólo para conocer la consistencia objetivo con que se debe bombear el relleno al tajo, con presiones de bombeo normales. Asimismo, se registró la densidad del relleno patrón para establecer qué incremento de densidad alcanzaría posteriormente la mezcla de relleno con la adición del aditivo Master Roc MF 501.

4.2.2. Mezclas con aditivo

Los parámetros medidos en cada muestra, durante y después de la prueba industrial, fueron los siguientes:

Durante la prueba industrial:

- Densidad de mezcla (balanza Marcy, en superficie e interior mina).
- Consistencia (Slump, medido en el cono de Abrams, en superficie).

Después de la prueba industrial:

- Tiempo de secado (ensayo con aguja de Vicat en laboratorio de interior mina, Norma técnica ASTM C191).
- Resistencia a compresión (ensayo de probetas cilíndricas de 4x8" en laboratorio de interior mina, Norma técnica ASTM C33).

Se registraron 13 muestras, en cada una de las cuales se midieron los parámetros indicados.

Cada muestra consta de 12 especímenes cilíndricos de 4x8" moldeadas en el tajo para ensayo de resistencia a compresión más un espécimen (truncocónico) en recipiente plástico para ensayo de secado. Se tomaron en total 169 probetas.

4.3. Parámetros operacionales por considerar en la prueba

El aditivo Master Roc MF 501 es un líquido con formulación homogénea; su empleo en el relleno en pasta otorga los siguientes beneficios:

- Incrementa la fluidez con una misma densidad de pasta; por lo que es posible subir la densidad sin incrementar las presiones de bombeo.
- Dispersa mejor los granos de cemento para alcanzar mayores resistencias; por lo que es posible disminuir el contenido de cemento.

Es importante que la alimentación del cemento al mezclador, así como el caudal de agua y relave filtrado sean lo más constante posible para lograr la máxima performance del aditivo.

Pueden ocurrir variaciones en la consistencia; esto se debe a factores como:

- Variación del caudal de descarga de agua al mezclador continuo. Cuando el caudal de agua que ingresa al mezclador disminuye, las presiones de bombeo se elevan.

- Aspectos granulométricos del relave. Cuando la granulometría del relave es muy fina, se debe abrir más la válvula de agua para mantener las presiones de bombeo en niveles permisibles, lo que hace disminuir la densidad y resistencia del relleno.

Algunos factores observados en la planta N° 2 desde donde se realizaron estas pruebas industriales influyen directamente en la presión de bombeo de relleno:

- La alimentación de agua al mezclador continuo no cuenta con dispositivo alguno que mida en tiempo real el caudal que ingresa al mezclador.
- Se ha observado que el caudal de agua no es constante, varía dependiendo de la cantidad que se envíe desde planta concentradora a la planta de relleno.
- También hay ocasiones donde el agua llega a planta de relleno con excesivo contenido de sólidos, lo que en algunos casos llega a obstruir la línea de alimentación de agua al mezclador continuo.
- El dosificador de cemento que cae al mezclador -al parecer- tiene errores en su funcionamiento, se ha observado que hubo minutos en que no se descargaba cemento al mezclador; a pesar de que se podía leer en el panel de control que efectivamente estaba descargando cemento.

Lo descrito anteriormente influye significativamente en incrementos de la presión de bombeo de relleno e incrementos en la demanda de caudal de aditivo para mantener la presión de bombeo en niveles aceptables.

4.4. Resultados de densidad de relleno, consistencia (slump) y presión de bombeo:

4.4.1. Mezclas patrón:

Respecto al ensayo de consistencia, se notó que la usada para el bombeo al tajo de prueba era muy fluida (revenimiento vertical $\geq 11 \frac{3}{4}$ "). Cuando se tienen consistencias

muy elevadas es mejor medir la extensibilidad pues dos mezclas con consistencias similares pueden tener características de fluidez completamente diferentes como se puede observar en las fotos. Se decidió considerar como parámetro de medición de consistencia a la extensibilidad horizontal de cada mezcla de relleno.

En las siguientes imágenes se señalan con flechas rojas las mediciones de extensibilidad que se realizaron a las 2 mezclas patrón. Las mediciones se realizaron en ambas direcciones diagonales de la plancha metálica de 1 m de lado que se empleó para el ensayo:



Figura 17. Las densidades registradas en ambas muestras de relleno patrón fueron 2570 y 2600.

La variación en la extensibilidad de las dos muestras patrón evidencia que, a pesar de tratarse de la misma mezcla, la consistencia (slump) no es constante. Hay varias razones que pueden explicar tal variación, como cambios en la granulometría del relave (exceso de finos reduce la extensibilidad), caudal inconstante de agua industrial que alimenta al mezclador continuo (reducción del caudal de agua reduce la extensibilidad), etc.

En el lapso de medición de ambas consistencias de mezcla mostradas anteriormente, las presiones de bombeo oscilaron entre 50 y 100 bar (en el eje de las abscisas de la siguiente figura se puede ver la hora de registro del panel de control de planta).

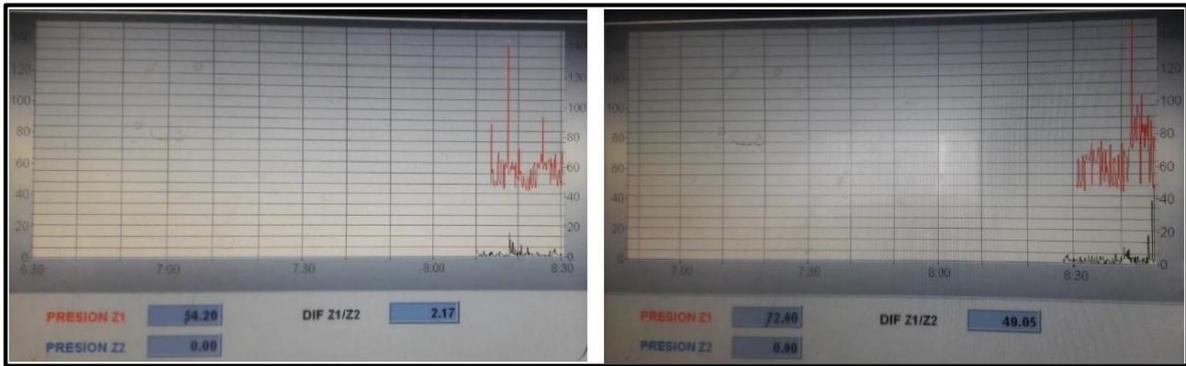


Figura 18. Presiones de bombeo registradas en el instante del muestreo de mezclas patrón al tajo de prueba.

4.4.1.1. Análisis de resultados

El pico más alto de presión de bombeo observado en la imagen derecha anterior (hasta 100 bar) corresponde a la mezcla con menor extensibilidad (68 cm).

La variación de extensibilidad y el incremento de presión de bombeo observado en el tiempo en que se recogieron ambas muestras del relleno patrón requiere un manejo constante de las válvulas de alimentación de agua al mezclador continuo. Cuando la presión de bombeo sube, se deben abrir las válvulas de alimentación de agua para bajar la presión de bombeo hasta niveles seguros de operación. Esta operación disminuye la densidad y resistencia del relleno.

Las presiones de bombeo registradas en el muestreo de ambas mezclas patrón fueron consideradas como los límites máximos de presión que se debía alcanzar con las mezclas que incluirían aditivo. Por tanto, para no sobrepasar dichas presiones máximas de bombeo, se estableció que la extensibilidad mínima de cualquier mezcla con aditivo despachada al tajo de prueba debía ser \geq a 68 cm.

4.4.2. Mezclas con aditivo:

En la siguiente tabla 1, se muestran los registros de alimentación de relave y cemento al mezclador continuo que indicó el panel de control de la planta 2, durante todo el tiempo que descargó el aditivo al mezclador. También se especifican el caudal de descarga de aditivo y las densidades de relleno registradas en cada una de las 13 muestras extraídas de relleno con MasterRoc MF 501:

Tabla 1. Muestras de las mezclas obtenidas.

Dosis cemento (% cake de relave)	Alimentación cake de relave (ton/hr)	Alimentación cemento (ton/hr)	Caudal MasterRoc MF 501 (lt/minuto)	Dosis promedio MF 501 (% peso cemento)	Densidad de relleno (kg/m ³)	
					Superficie	Interior mina
3%	307 - 358	7 - 13	5.9	3.7%	2690	2590
3%	287 - 356	8 - 13	6.1	3.6%	2720	2640
3%	326 - 351	8 - 13	8.8	5.2%	2770	2700
3%			10.1		2810	2770
5%	277 - 338	16	10.6	4.1%	2790	2760
5%			10.6		2840	2730
4%	299 - 348	12 - 16	10.6	4.7%	2890	2750
4%			10.6		2800	2750
3%	317 - 354	8 - 12	10.6	6.6%	2800	2760
3%			9.7		2830	2700
3%			9.7		2830	2730
3%	308 - 352	8 - 13	9.7	5.8%	2780	2650
3%			9.7		2780	2810

El siguiente Gráfico relaciona la extensibilidad y densidad promedio de mezclas registradas en la prueba industrial. Ambos parámetros fueron medidos en superficie (en la descarga del mezclador continuo). Se comparan registros de mezclas patrón y mezclas con aditivo. Se insertaron en el gráfico dos líneas horizontal y vertical que indican el límite mínimo de extensibilidad horizontal que debe tener cualquier mezcla bombeada al tajo de prueba para no generar presión de bombeo excesiva (línea vertical), así como la densidad mínima objetivo del relleno (línea horizontal). El área sombreada indica el cumplimiento de ambas condiciones.

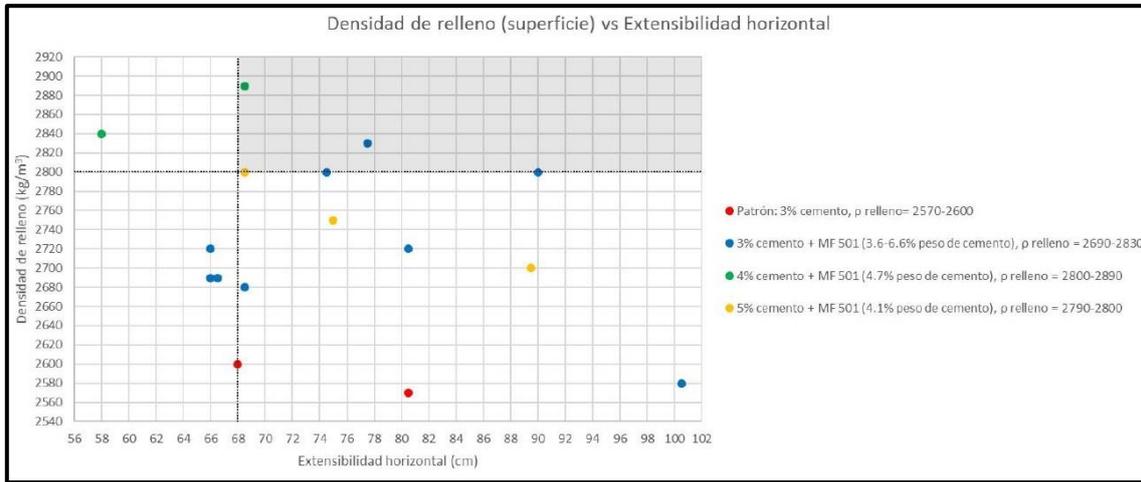


Figura 19. Densidad del relleno Vs Extensibilidad horizontal

4.4.2.1. Análisis de resultados

En la Tabla 1 se observa que la densidad de relleno registrada en interior mina siempre es menor a la densidad registrada en superficie. Este hecho se debe al asentamiento de sólidos cuando el relleno es transportado por tubería. Dicho asentamiento de sólidos se produce cuando la velocidad de transporte del relleno es menor a la velocidad crítica de asentamiento de sólidos.

En el Gráfico 1, se aprecia que las mezclas con aditivo aumentaron significativamente la densidad del relleno con respecto a la mezcla producida actualmente en Planta N° 2. El rango de densidades registradas de la mezcla patrón (puntos rojos) fue entre 2570 y 2600. La inclusión de aditivo en el relleno (puntos azules, verdes y amarillos) aumentó la densidad a un rango entre 2680 y 2890.

En el Gráfico 1, las 3 dosis de cemento empleadas (3, 4 y 5%) en la prueba industrial con aditivos cumplieron el requisito de densidad ($= 2800$) y extensibilidad (≥ 68 cm). Se aprecia que 10 de las 13 muestras de mezcla con aditivo alcanzaron una extensibilidad mayor a 68 cm, mientras que 6 de las 13 muestras de mezcla con aditivo alcanzaron densidad mayor a 2800. Los casos donde no se cumplió los requisitos de densidad y slump se deben a incrementos súbitos de presión de bombeo (debido a las razones antes expuestas) que obligaron a abrir la válvula de agua. En cualquier caso, todas las mezclas con aditivo representan una mejora significativa en densidad de relleno respecto a la producción actual.

En general, las densidades más elevadas registradas están directamente relacionadas con una mayor demanda de caudal de aditivo. A continuación, para cada dosis de cemento usada, se especifica las densidades de relleno y caudal de aditivo empleado para mantener las presiones de bombeo en rangos permisibles:

- Para las mezclas con 3% de cemento e inclusión de aditivo (puntos azules en el anterior gráfico), se empleó un rango de caudal de aditivo de 5.9 a 10.6 lt/minuto, alcanzando un rango de densidades de relleno en superficie entre 2680 y 2830.
- Para las mezclas con 4% de cemento e inclusión de aditivo (puntos verdes en el anterior gráfico), se empleó caudal de aditivo de 10.6 lt/minuto, alcanzando un rango de densidades de relleno en superficie entre 2840 y 2890.
- Para las mezclas con 5% de cemento e inclusión de aditivo (puntos amarillos en el anterior gráfico), se empleó un caudal de aditivo de 10.6 lt/minuto, alcanzando un rango de densidades de relleno en superficie entre 2700 y 2800.

El día de la prueba industrial, el operador de planta indicó que el relave que descargaba al mezclador contenía excesiva cantidad de finos, ya que en reiteradas oportunidades hubo súbitos incrementos de presión de bombeo bajo condiciones constantes de descarga de cemento y aditivo al mezclador continuo (se detalla en Tabla 2).

En el tiempo que descargó el aditivo al mezclador continuo, hubo hasta 3 ocasiones donde, a pesar de que el panel de control de alimentación de cemento al mezclador continuo estaba configurado para descargar dosis de 3, 4 y 5%, la descarga de cemento al mezclador se cortó (no había descarga de cemento al mezclador). Sin presencia de cemento en el mezclador, el aditivo no tiene ningún efecto de hacer “más fluido” el relleno. Por tanto, este hecho también es una causa de incremento en la presión de bombeo.

4.5. Tiempo de secado

Los resultados corresponden sólo a muestras de relleno con MasterRoc MF 501.

Para facilitar el muestreo del relleno en los moldes de secado, se reemplazó el molde estándar que estipula ASTM C191 (molde troncocónico que debe ser sellado completamente a lo largo de su superficie de contacto con una base de vidrio) por un recipiente plástico hermético de volumen similar.



Figura 20. Muestras para realizar el secado con vicat.

Es importante indicar que la condición de curado de los especímenes de secado en los ensayos realizados fue no-drenada (el agua del relleno permanece dentro del recipiente hasta que se evapora por completo). Esta condición es conservadora, ya que la condición de curado en el tajo es drenada (el agua evacúa por drenes de los muros de contención en la parte baja del tajo y también por las discontinuidades de la roca).

Por otra parte, el peso propio de la masa de relleno presente en el tajo acelera el drenaje de agua debido a la presión vertical que ejerce sobre el propio relleno. Dicha presión vertical se incrementa a medida que la altura de relleno se incrementa. Por tanto, se prevé que el tiempo de secado del relleno en el tajo será menor al registrado en los ensayos de secado realizados.

No fue posible el moldeo de muestras patrón (relleno sin aditivo), debido a que el tiempo que duró la prueba industrial con aditivo fue mayor al tiempo de la guardia del personal de laboratorio de relleno en mina. Sólo fue posible el recojo de muestras con diferentes dosis de cemento y aditivo a lo largo de la prueba industrial.

A continuación, se muestran los resultados de tiempo de secado obtenidos después de monitorear continuamente los especímenes moldeados. Se realizaron registros de penetración en los especímenes desde la primera hora después de su moldeo hasta que secó la totalidad de los especímenes (penetración cero):

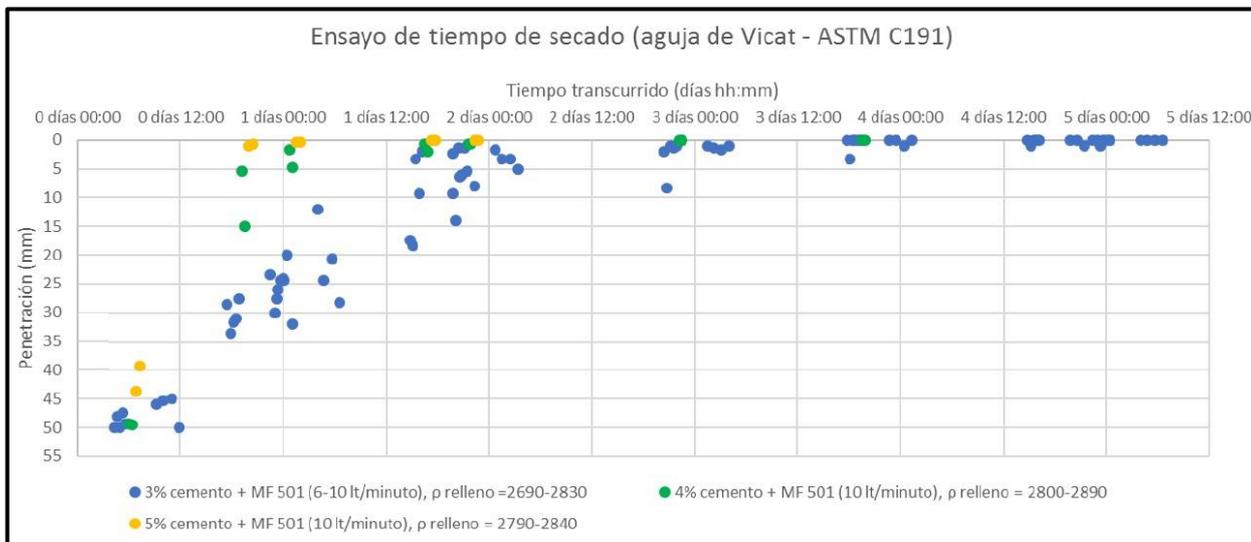


Figura 21. Ensayo de tiempo de secado con herramienta vicat.

4.5.1. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos, se infiere lo siguiente:

- Las mezclas con 3% de cemento secaron hasta 72 horas después del moldeo de especímenes. Por tanto, se prevé un tiempo de secado del relleno con esta dosis de cemento menor a 3 días en las condiciones de curado del tajo.
- Las mezclas con 4% de cemento secaron hasta 48 horas después del moldeo de especímenes. Por tanto, se prevé un tiempo de secado del relleno con esta dosis de cemento menor a 2 días en las condiciones de curado del tajo.
- Las mezclas con 5% de cemento secaron hasta 24 horas después del moldeo de especímenes. Por tanto, se prevé un tiempo de secado del relleno con esta dosis de cemento menor a 1 día en las condiciones de curado del tajo.

4.6. Resistencia a compresión:

Por cada una de las 13 muestras extraídas, se moldearon 12 probetas cilíndricas de 4x8", para ser ensayadas a edades de 7, 28, 60 y 90 días.

Las probetas plásticas de curado tienen una abertura en la base de ellas, lo que indica un curado drenado de los especímenes. Este tipo de curado, en comparación con el

curado no-drenado, se aproxima más a las condiciones reales de curado del relleno en el tajo.

El recojo de muestras en interior mina se realizó en el punto de descarga de la tubería de relleno en el tajo de prueba. Se acondicionó un área de curado provisional para las probetas, que se ubicó al lado de la zona de descarga de la tubería de relleno. En dicha área se dispusieron todas las probetas usadas en el moldeo de especímenes. Después del moldeo de los especímenes, se esperó por 2 días hasta que los especímenes sequen en el lugar provisional mencionado. Luego de ello, todos los especímenes fueron trasladados al laboratorio de relleno, donde se desmoldaron y siguieron con su proceso de curado hasta la edad de ensayo.



Figura 22. Muestras de probetas de relleno para la compresión.

4.6.1. Análisis de resultados:

- Con respecto a las mezclas con 3% de cemento:

Los especímenes (íconos azules) muestran una tendencia de incremento de resistencia a medida que la densidad del relleno se incrementa.

Los especímenes moldeados alcanzaron densidades en superficie entre 2770 y 2830, obteniendo resistencias entre 0.20 y 0.40 MPa a 7 días.

A edad de 28 días no se observó incremento significativo de resistencia con respecto a 7 días. Los especímenes mantuvieron esencialmente el mismo nivel de resistencia que a 7 días.

- Con respecto a las mezclas con 4% de cemento:

Los especímenes moldeados (círculos verdes) alcanzaron densidades en superficie entre 2800 y 2890, obteniendo resistencias entre 0.50 y 0.60 MPa a edad de 7 días.

A edad de 28 días sí se observó incremento significativo de resistencia con respecto a 7 días. Los especímenes alcanzaron resistencias entre 0.65 y 0.85 MPa, sobrepasando el requisito de resistencia requerida.

- Con respecto a las mezclas con 5% de cemento:

Los especímenes moldeados (círculos amarillos) alcanzaron densidades en superficie entre 2790 y 2840, obteniendo resistencias entre 1 y 1.05 MPa a 7 días.

A edad de 28 días, los especímenes alcanzaron resistencias entre 2.05 y 2.25 MPa.

Las resistencias obtenidas a 7 y 28 días sobrepasan considerablemente la resistencia requerida por Geomecánica. Por tanto, se debe limitar la dosis de cemento de las mezclas que incluyan MasterRoc MF 501 a menos de 5%.

CONCLUSIONES

1. Se determinó el indicador que predomina en la dimensión de la mezcla de agua en la transportabilidad de relleno de pasta a largas distancias con el incremento de la densidad del relleno sin aumentar las presiones de bombeo actuales, desde una densidad inicial de ~2580 (sin aditivo) hasta densidad final mayor a 2800, para mezclas con 3, 4 y 5% de cemento. Tal incremento de densidad se alcanzó con dosis de aditivo de 6.6, 4.7 y 4.1% (en peso de cemento), respectivamente.
2. Se determinó el indicador que predomina en la dimensión de la mezcla de aditivo en la transportabilidad de relleno de pasta a largas distancias con Las mezclas con 5% de cemento y dosis de aditivo de ~4.1% (en peso de cemento)

prácticamente duplicaron la resistencia de relleno requerida (0.6 MPa a 28 días) a edad de 7 días y triplicó la resistencia requerida a edad de 28 días.

3. Se determinó el indicador que predomina en la dimensión de tuberías de transporte en la transportabilidad del relleno de pasta a largas distancias en la empresa Nexa Resources de acuerdo a la densidad y slump enviado a interior mina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A., Castaneda, Mendieta, Lezama y P., Ampuero. 2015. Sistema de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento en la minería subterránea. Chíncha: s.n., 2015.

Benzaazoua, Fall y. 2003. 2003.

Cantorin. 2013. Método de relleno de pasta en la Unidad Minera San Rafael. San Rafael: s.n., 2013.

G., Suazo y A., Fourie A. y Hasan. 2015. Estudio experimental de la respuesta geomecánica de relaves en pasta cementados utilizados para el relleno de caserones. Western, Australia: s.n., 2015.

Lain Huerta, Carlos. 2015. Estudio de las dimensiones tensionales y de la resistencia de los rellenos de pasta de la Mina Subterránea de aguas tenidas. Huelva : s.n., 2015.

Ministerio de energía y minas. 2014. Orcopampa: s.n., 2014.

Ministerio del Ambiente. 2013. Organismo de evaluación y fiscalización ambiental. Junín: s.n., 2013.