

Sistema de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento en la minería subterránea

Silvia Pamela Castañeda Ames¹, Joe Marco Lezama Mendieta², José Antonio Ampuero³

Peñaranda

Escuela de Postgrado de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC, Lima, Perú)

RESUMEN

Frente a los frecuentes accidentes, derrumbes y equipo atrapado durante las labores mineras subterráneas, muestra la necesidad de mejorar la confiabilidad del sostenimiento de la minería subterránea. Este artículo describe la investigación y propuesta para un nuevo sistema de relleno con resistencia controlable usando reciclaje de relave. Primero investigamos los tipos de sostenimiento en el método de minado de corte y relleno en la zona central del Perú, donde encontramos que el relleno cementado más utilizado es un concreto pobre en contenido de cemento y el relleno en pasta solo usa los finos del relave con equipos que demandan una alta inversión para su implementación y operación. El nuevo método propuesto permite utilizar el relave que elimina la planta de concentrados minerales: no sería necesario sacar los finos del relave, solo el agua que es reenviada y reutilizada en la planta de concentrados. La aplicación de este método permite tener una confiabilidad del sostenimiento durante las labores mineras evitando los constantes derrumbes dando seguridad al personal y al equipo; ayuda al cierre progresivo de mina; reduce el espacio de la relavera; permite la recuperación de los pilares de mineral dejados para el sostenimiento de la mina y reduce la dilución del mineral al 2% al tener

¹ Correo: sp_castaneda@yahoo.es

² Correo: joleme_pe@yahoo.com

³ Correo: jose_ampuerop@yahoo.com.ar

Castañeda Ames, S. P., Lezama Mendieta, J. M. & Ampuero Peñaranda, J. A. (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.

Fecha de recepción: 17/09/15

Fecha de aceptación: 28/10/15

paredes auto estables. El relave suele tener característica puzolánicas que permitiría un ahorro de cemento de hasta del 20%. Además, el sistema puede facilitar el cumplimiento de compromisos ambientales y legales de la empresa frente a las comunidades.

PALABRAS CLAVE

Relave, sistema de relleno, sostenimiento, minería subterránea

Mortar tailings filling system to improve sustainability in underground mining

Faced with frequent accidents, landslides and equipment trapped in underground mine workings, demonstrates the need to improve the reliability of the support of underground mining. This article proposes a new filling system with controllable resistance using recycled tailings. First, we investigated the types of support in the mining method and cutting filling in the central region of Peru, where the most frequently used cemented backfill that is a poor concrete cement content and paste filling uses only fine tailings using equipment that require a high investment for its implementation and operation. This new method uses a tailings plant that removes mineral concentrates that doesn't require removing mineral concentrates, rather water is forwarded and reused in the concentrates plant. The application of this method allows a maintenance reliability during mining operations; prevents landslides and improves security for personnel and equipment; facilitates progressive mine closure; reduces the space needed for sludge; allows recovery of the pillars of ore left to sustain the mine and ore dilution can be reduced to 2% with self-stabilizing walls. The tailings pozzolanic features can reduce cement use up to 20%. The system also allows mining companies to fulfilling their environmental and legal commitments made to local communities .

KEYWORDS

Filling, filling system, sustainability, underground mining

Introducción

Muy aparte de la fluctuación del metal en el mundo, Oyarzun & Oyarzun (2011) nos indican que parte de las preocupaciones de los *stakeholders* durante los procesos de las extracciones mineras subterráneas son los continuos deslizamientos o derrumbes durante las labores por la falta de inestabilidad en el sostenimiento que conlleva tener equipos atrapados, retrasos en la extracción de minerales y muertes y/o accidentes del personal minero;. Otra preocupación son las prácticas ambientales de las empresas mineras que preocupa constantemente a los pobladores hacen que impidan el funcionamiento de las empresas mineras en sus comunidades. Estas prácticas arruinan no solo el ambiente por vertimientos de agua contaminada, sino también el paisaje con las relaveras producto de la refinación de minerales, creando una desagradable vista en el paisaje. Otra de estas preocupaciones también son la extensión y cimentación de las relaveras, ya que la continua descarga del relave puede provocar fallas en las estructuras produciendo desastres como los de Stava (1985) en Italia. Este desastre causó contaminación ambiental, pérdida en infraestructura, daños a la población, destrucción del paisajismo y pérdida de 268 vidas humanas (The Stava 1985 Foundation, s.f.). Entre tanto los pasivos ambientales producto de esta actividad como las relaveras es otra de las preocupaciones del minero ya que es de un alto costo en los cierres de mina.

En la minería subterránea se han planteado diversos métodos de relleno para mejorar la confiabilidad del sostenimiento durante las labores mineras. El mejorar el rendimiento de los recursos de las operaciones es una preocupación constante para el minero, y el uso del desecho de relave en las operaciones se ha hecho cada día más frecuente. En algunas minas subterráneas se usa relleno en pasta para los sistemas de relleno; esta pasta lleva en su mezcla un porcentaje de finos de relave; siendo lo más usado en minas como San Rafael (Minsur), Cerro Lindo (Milpo), Iscaycruz (Glencore) y Pallancata (Hochschild). Su control de calidad es más estricto para poder controlar la granulometría especificada en el diseño de mezcla para cada resistencia. Cuentan con un profesional especializado en este tipo de sistema de relleno para que pueda tener la característica de pasta y alcanzar la resistencia requerida por geomecánica.

El presente artículo presenta un sistema de relleno cementado usando relave basado en mediciones de campo y análisis del relleno en una mina subterránea del centro de Perú donde se usa el método de minado de corte y relleno ascendente. La comparación entre valores del antes y después del uso de este método de relleno proporciona una buena representación del sistema para la toma de decisiones en cuanto al ahorro en el costo de operaciones. Además, el uso del

relave en las operaciones ayudara a la reducción del relave para evitar colapsos en las presas y al cierre progresivo de la mina.

La confiabilidad que brinda el nuevo sistema de relleno con mortero de relave no solo ayudará en la estabilidad de las labores en las operaciones siguientes, sino también el uso del relave como parte de la mezcla ayudará a bajar los niveles en la relavera y a mejorará el aspecto paisajístico de la zona, mostrando a la comunidad la responsabilidad de la mina por el cuidado del medio ambiente. Esto constituye un aspecto muy importante, ya que la licencia social en la minería se ha vuelto cada día más conflictiva por temas medioambientales.

Se propone un nuevo tipo de relleno preparando tajos con puentes y pilares reemplazados con mortero de relave previamente, a fin de recuperar totalmente el mineral contenido en estos. De esta manera, se podrá garantizar la colocación total del relave, filtrando el agua y controlar el drenaje obtenido para su recirculación del circuito cerrado en la concentradora después de la masiva extracción de todo el mineral fragmentado contenido de cada tajeo.

Las ventajas obtenidas con este nuevo sistema, para aceptación de los empresarios, es el bienestar del entorno social; la preservación del medio ambiente; y la recuperación del 10% al 15% del mineral cubicado (evitando la dilución del mineral al tener paredes auto estables como pilares. Además, evita que la mina colapse por explosión de las rocas encajonantes con la consecuente pérdida de dinero en equipo atrapado, mineral "enterrado" y hasta de pérdida de vidas humanas.

Finalmente se describe la toma muestra de un caso aplicado en la Minera ICM Pachapaqui como resultado del nuevo diseño de mezcla propuesto de la mejora en la confiabilidad del sostenimiento en las labores mineras.

Fundamento del aporte

Luego de haber revisado la literatura con respecto a los rellenos usados en la minería subterránea, encontramos que la literatura existente no ha tomado en cuenta las bondades de hacerlo con relleno de mortero de relave, más si ha considerado los costos y los beneficios a futuro para las operaciones mineras como lo encontramos en el artículo de Belem & Benzaazoua (2004).

Es precisamente en esta dirección, que está sustentada esta investigación, donde presentamos 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. Delimitamos la investigación y nos centramos en la mediana minería formal, situada geográficamente en la sierra norte del Perú, específicamente en la región de Ancash, y la minería subterránea. Identificamos los métodos de minado de relleno o fortificación y con método de corte y relleno ascendente para la toma de muestras. Esta investigación presenta una metodología de carácter científico, aplicada, cuantitativa y cuasi experimental en el uso del nuevo sistema de relleno con mortero de relave, usando el relave como parte de la mezcla, dando confiabilidad en el sostenimiento de las labores, bajar el nivel de la relavera y evitar accidentes o equipos atrapados durante las extracciones en la minería subterránea.

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

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

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

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

Tr: Tiempo de reparación de la falla

Tt: Tiempo necesario para desplazarla

Ta: Tiempo administrativo necesario

$$T_u + T_r + T_t + T_a = MTTR$$

En el caso del sostenimiento entendemos que falla es el evento donde el sostenimiento se cae o deja de cumplir su función frente al macizo rocoso, por tanto, definimos que confiabilidad del sostenimiento en la industria minera es la capacidad de que el sostenimiento no falle. Decimos

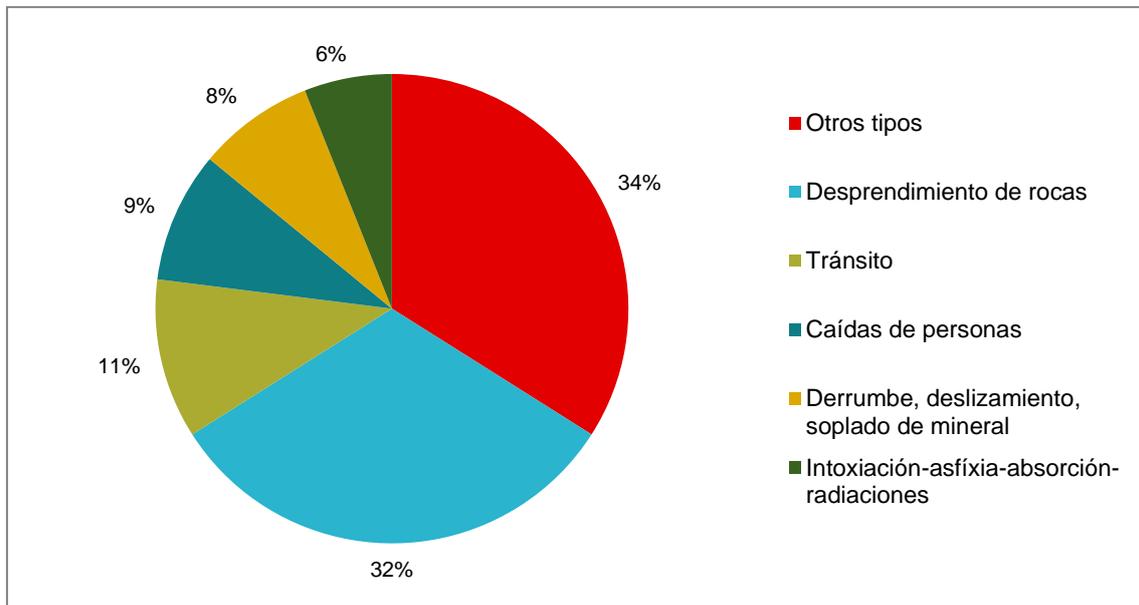
entonces que es la capacidad de hacer frente a las fallas dentro del sostenimiento para avanzar con las siguientes labores, donde los tiempos no deben ser muy largos.

% C_s = Sostenimiento no falle

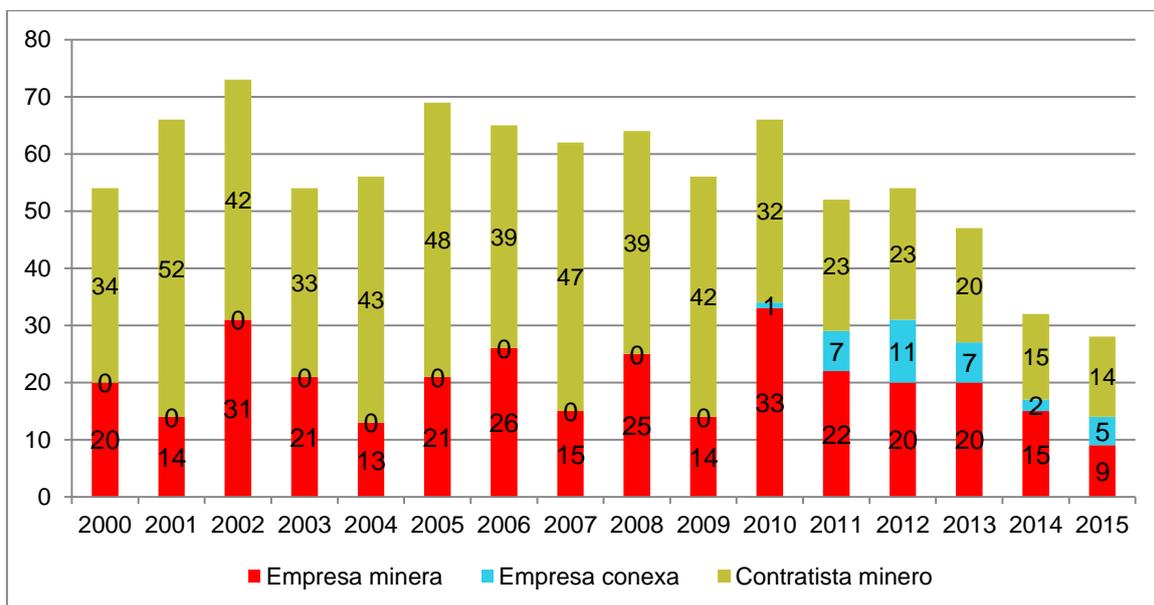
La filosofía moderna en tecnología del concreto es como un terno a la medida: si no se hace un estudio previo con la suficiente profundidad y no se domina los principios básicos de la tecnología del concreto es muy riesgoso en cuanto a las consecuencias en las obras en costos y control de calidad. Se trabajaran con diseños, el primero para las pruebas iniciales y el segundo para el trabajo normal. Los requerimientos de resistencia del relleno, para lograr la estabilidad local y global dependen de dos factores: del sustento teórico para el cálculo y del método y secuencia de avance del minado. Según esto, el rol estructural del relleno cementado será tener un piso para minar debajo; tener una pared para minar al costado; tener un techo para minar encima.

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 2000 y 2015 el 32% de los accidentes mortales son por caída de rocas en minería subterránea según Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) (2015), ocupando el segundo lugar de accidentes mortales ocurridos en labores subterráneas horizontales como galerías, bypass, crucero así como tajo convencionales y mecanizados.

Gráfico 1 Accidentes mortales por tipo, porcentajes 2000-2015

Fuente: Elaboración propia en base a Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2015

Gráfico 2 Evolución accidentes, empresa minera-contratista minero 2000-2015

Fuente: Elaboración propia en base a Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2015

Desde la mediana minería subterránea, de acuerdo al comportamiento de su yacimiento y a los anchos de las estructuras mineralizadas, está en el proceso de reducir costos mediante la migración de la explotación de métodos de minado convencionales a métodos de minado

mecanizados tales con la aplicación de taladros largos con el método de sublevel Stopping en el caso de que las estructuras sean de ancho mayor a tres metros o la aplicación del método de minado de bench a fill cuando las estructuras sean menores a tres metros.

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

Características del problema

La inestabilidad del macizo rocoso genera estallidos de rocas el cual se da por la profundidad del minado, por la geoestructural y los espacios vacíos producto de la excavación en la explotación. La deposición del relave conlleva a un estudio de estabilidad física y química de la relavera y aun ritmo de tratamiento de mineral entre 400 tmh y 4000 tmh. El problema se ha formulado de la siguiente manera:

¿De qué manera se puede mejorar la confiabilidad del sostenimiento de una mediana mina subterránea?

Si el problema se resuelve entonces el tiempo de ciclo desciende y por tal la eficiencia operativa se incrementa y por consecuencia se incrementa la producción. La estabilidad de las labores mineras subterráneas son solucionados con un adecuado sostenimiento que previa evaluación geomecánica supere un factor de seguridad mayor a 2, siendo el más efectivo el uso de *shotcrete* (concreto lanzado) El lento crecimiento de una relavera es favorable por el impacto económico que produce, por tal el reciclaje o uso del relave que se haga parte del sostenimiento nos permite solucionar la problemática actual.

Los estallidos de rocas y la estabilidad de labores son provocados por:

- La profundización del minado.
- Comportamiento geoestructural.
- Espacios vacíos producto del minado.

Este último factor es el que se puede controlar con el uso de relleno que puede ser detrítico así como hidráulico (relave). El ciclo de minado es dependiente operativamente que el sostenimiento sea confiable para no generar cuellos de botella y/o pérdidas en el proceso.

Justificación económica

La mejora en la confiabilidad del sostenimiento de las minas subterráneas permite lograr menores tiempos de ciclo en las operaciones, lo cual aumenta la eficiencia y reduce los costos. Esto mejora los márgenes de la organización, sus las utilidades y logra mayor rentabilidad para la empresa.

Justificación ambiental

Mayor confiabilidad del sostenimiento de las minas subterráneas reduce los tiempos de ciclo, lo cual incrementa la eficiencia operativa, genera menos residuos (relave), usa más eficientemente el recurso del relave, deposita menos relave, disminuye el impacto e indirectamente implica menos uso de madera para el sostenimiento.

Justificación social

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. Adicionalmente, la actividad a realizar para resolver el problema genera más puestos de trabajo.

Aporte del nuevo modelo

Proceso del sistema de relleno con mortero de relave

Características de un mortero

Los morteros se caracterizan por ser una mezcla plástica, es decir, tener una consistencia pastosa. Estos se obtienen con un aglomerante (cemento, yeso o cal), arena y agua. Los morteros reciben su nombre de acuerdo al aglomerante que lleva la mezcla, así se tiene mortero de yeso, de cal, cemento, etc. Todo mortero debe tener las siguientes características:

- Resistencia para soportar las cargas para lo cual se está diseñando.

- Adherencia a las zonas o piezas en los que se va a colocar.
- Durabilidad frente a las condiciones que va ser expuesto.
- Retención del agua para evitar que esta sea absorbida por los materiales o mineras a los que va tener contacto.

Para su mejor especificación, los requisitos del mortero se dividen en dos categorías; el estado fresco y el estado endurecido. El estado fresco condiciona el comportamiento del mortero durante el endurecido, teniendo que considerar:

- La obtención de la mezcla (NTP 334.003:2008): Establece el método para obtener morteros de consistencia plástica por mezcla mecánica.
- Tiempo de Utilización: se refiere al tiempo durante el cual el mortero tiene suficiente trabajabilidad, sin la adición posterior de agua para contrarrestar el fraguado.
- Fluidez del Mortero (NTP 334.057:2011): es un parámetro de la relación agua/cemento, la cual es un indicador de la trabajabilidad, se determina por medio de la mesa de sacudidas.
- Tiempo de Fraguado (NTP 334.006:2003): es el tiempo necesario para el endurecimiento completo del mortero.

El estado endurecido, determina su durabilidad, teniendo en cuenta:

- La resistencia mecánica a la compresión (NTP 334.051:2006): determina la resistencia a la compresión en morteros de cemento Portland, usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado.
- Adherencia (NTP 331.052): depende del tipo de mortero, soporte, preparación y mano de obra.
- Estabilidad dimensional (NTP 399.630:2010): durante el endurecimiento se produce una disminución del volumen llamada retracción.
- Otros factores a tomar en cuenta es su densidad en el estado endurecido, permeabilidad al vapor de agua, y el contenido de sulfatos del agua usada para su elaboración y curado (NTP 339.229:2009)

En este caso vamos a utilizar el relave en sustitución de la arena. Para esto, el relave a usar debe presentar una consistencia fina como la arena, teniendo en cuenta seguir con la norma técnica ASTM C144 que establece los requisitos para los áridos en los morteros. Esta propiedad permite que el material se desplace a bajas velocidades. La consistencia plástica del mortero evita que se sedimente, pero es necesario lavar las tuberías para evitar que el mortero se cimente dejando inservible el sistema de bombeo y tuberías.

El empleo del método de minado por corte y relleno con mortero de relave considera un costo de inversión en equipo equivalente a una planta de concreto simple y aunque el costo de operación para transporte es bajo, el costo más significativo es el costo del cemento (de acuerdo al uso que

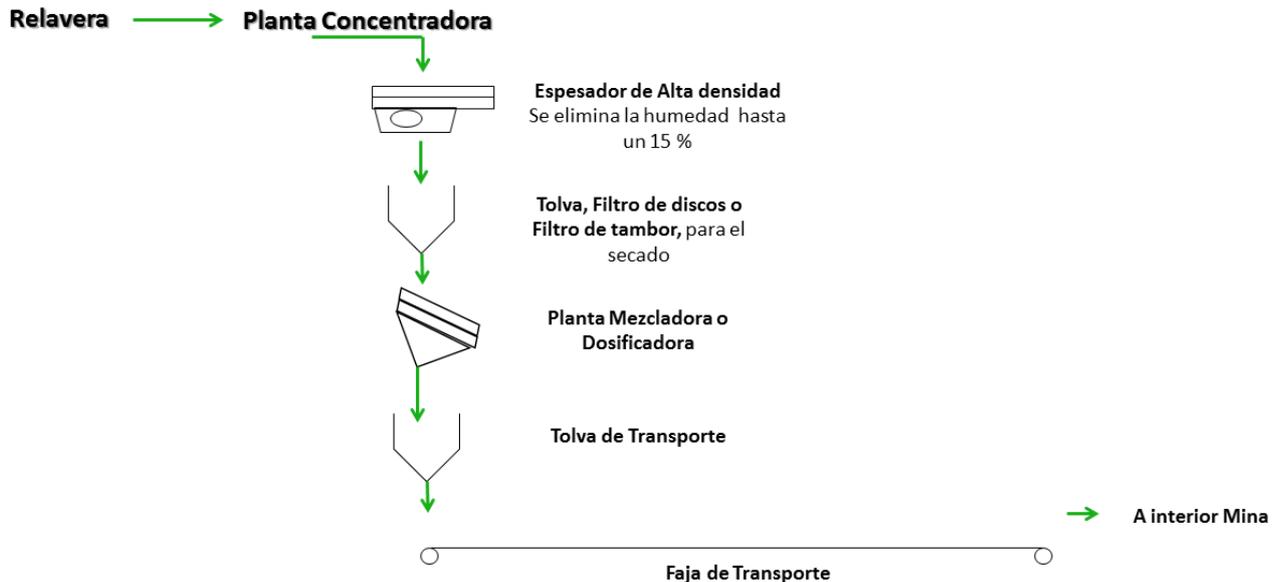
se le dé, como techo, pared o piso). Gracias a sus propiedades mecánicas presenta bajo grado de abrasión a la tubería que lo transporta. Como el mortero tiene bajo contenido de agua, no es necesario acondicionar los drenajes para su eliminación, ni es necesario el filtrado y decantado de agua.

Preparación del mortero de relave

Los relaves procedentes de la planta concentradora se envían a un espesador de alta densidad donde se retira la mayor cantidad de agua. No se necesita sacar los finos del relave, solo sacar el agua el cual se reenvía a la planta concentradora para su reutilización. El relave total obtenido se estima con un contenido de humedad del 15%, el cual se puede depositar en tolvas para su secado natural o colocar a un filtro de discos donde se disminuye el contenido de humedad. El relave total obtenido se coloca en una planta dosificadora y mezcladora donde se agrega cemento y es mezclado. El producto final es enviado a una tolva acoplada a una bomba de pistones, llevando el mortero de relave al interior mina por el sistema de tuberías. El contenido de cemento debe ser tal que obtenga una resistencia con el fin de que pueda ser ocupado como piso de trabajo de al menos 2.0 kg/cm^2 y 4.5 kg/cm^2 cuando se empleara como pared auto estable, o de acuerdo a los requerimientos determinados por el departamento de geomecánica de la mina.

Bombeo del mortero de relave

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

Gráfico 3 Proceso de relleno con mortero de relave

Fuente: Elaboración propia

Diseño de mezcla

Composición

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

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

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

Durante el transporte la exudación del mortero de relave, puede ser favorecida por las vibraciones de la tubería, dependiendo del tipo de mezcla, composición granulométrica del relave y también de las propiedades del cemento. Por este motivo se deben de preferir los cementos con buena capacidad de absorción de agua.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que la retracción del mortero de relave, aumenta con la finura de molido y que un aglomerante hecho de un molido más fino tiene un coeficiente de rozamiento mayor que el de un aglomerante de cemento más grueso para un mismo valor de la relación agua-cemento. Por lo tanto lo más indicado para bombear el mortero de relave, es obtener la finura de molido media, que sería la más indicada, siempre y cuando esté asegurada la capacidad de retención de agua.

La tensión límite de deslizamiento disminuye, al igual que la consistencia del mortero de relave, al aumentar los ultra finos hasta una cantidad de 300 kg/m^3 y asciende al seguir aumentado los ultra finos. Esto es originado por la consistencia pastosa que le da el mortero de relave, el cemento y los ultra finos del relave. Debido a estas circunstancias, la conducción se dificulta hasta llegar a pararse la bomba. En general se puede emplear como árido a todos aquellos materiales que en su estructura en que se va emplear, no afecten perjudicialmente al proceso de fraguado y garanticen una adherencia suficiente al mortero. La composición granulométrica elegida no debe ser variada en el curso del bombeo.

Al igual relación agua-cemento, el mortero de relave de árido fino precisa para recubrir la superficie de éste y rellenar los intersticios, más cemento que aquel que contenga unos áridos más gruesos. Por lo tanto, es conveniente emplear una granulometría lo más gruesa posible y con poco volumen de huecos. Sin embargo, por otra parte, los ensayos de bombeo corroboran la experiencia de obra en el sentido de que un mortero de composición granulométrica fina exigen menor presión para su transporte que otro de áridos más gruesos. Es especialmente importante

que haya suficiente cantidad de finos que pasen la malla # 200 ya que estos forman, con el cemento, la película lubricante adosada a la pared de la tubería e impiden la exudación de la pasta de relave cementado. El exceso de agua disminuye notablemente la resistencia (efecto de la relación agua-cemento) e influye igualmente de manera desfavorable en otras características del relave cementado, por lo tanto no se debe añadir más agua que la necesaria para el transporte por tubería.

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

Procedimiento de diseño

Para realizar el diseño del mortero de relave se debe tener en cuenta lo siguiente:

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

Una vez conocidas las propiedades del relave a usar y los requisitos de resistencia que necesita el diseño de mezcla, se realiza una mezcla base para ver su comportamiento y determinar si se puede realizar el mortero de relave a partir del agregado global (relave sin modificaciones, tal cual se muestreo en la relavera).

Se realizaron dos baterías compuestas de seis ensayos de mezcla con diferentes relaciones agua-cemento y contenido de aditivo, pero manteniendo la misma cantidad de arena base de

acuerdo a los resultados observados en la determinación de la granulometría y características físicas y químicas obtenidos en las muestras de relave traídas de la relavera de Pachapaqui.

Para que tenga las características de bombeabilidad se trabajó con un slump entre 7 y 8 pulgadas, una cantidad constante de relave controlando la exudación a casi cero que nos asegure la sedimentación de la mezcla durante el desplazamiento por interior de la tubería que será transportada desde planta al tajo por rellenar; esto evitara atoros de la línea por sedimentación. Para lograr estas características se recurrió al uso de aditivos que le den las particularidades de fluidez, cohesión y mínima contracción las cantidades variables de cemento agua y aditivo. El aditivo empleado para la elaboración de la mezcla de mortero es el SikaLightcrete que incorpora burbujas de aire microscópicas rodeando a cada partícula del agregado y a su vez tiene la tendencia de atraerse mutuamente proporcionando una fuerte cohesividad a toda la mezcla. Se debe de tener en cuenta que en concretos especiales de baja resistencia como el que estamos diseñando, la ganancia de mayor resistencia a partir de los catorce días es mínima, aun cuando en el tiempo sigue aumentado este valor pero en cantidades muy bajas; por lo que el diseño lo estamos haciendo para que coincida con el ciclo de minado.

El diseño que cumple los requisitos de geomecánica proyectado para el relleno de la mina ICM Pachapaqui es el # 2 y el # 3 Los cuales se establecen como diseño patrón para el inicio del reajuste antes de entrar al relleno industrial. Estos diseños deberán ser reajustados cuando se comience la operación de la mina sacando muestras frescas y muestras endurecidas extraídas en los tajos expuestos para comparar sus resistencias e iniciar los reajustes. En los cuadros que se exhiben en el anexo se tienen los resultados de todos los ensayos con los cuales se tiene una idea del comportamiento de cada una de ellas y la ganancia de resistencia obtenida; la cual se puede aprovechar para seleccionar alguna de ellas cuando se quiera variar los tiempos de los ciclos de minado.

Estos resultados nos da una mezcla Básica; que nos permite realizar nuevos ensayos hasta alcanzar el diseño óptimo de acuerdo al ciclo de minado determinado por el jefe planeamiento de ICM Pachapaqui. Pueden ser dos o tres diseños para ciclos de 7 o 14 días; según se determine.

Ventajas del modelo

Ventajas del método de relleno con mortero de relave

- El método presenta baja dilución ya que es un método selectivo.
- Es posible trabajar vetas de poca potencia pero alta ley. La dilución debida al acarreo del mineral es mínima.
- Puede alcanzar alto grado de mecanización, y su aplicación puede presentar una amplia flexibilidad.
- Se adecua a yacimientos con propiedades físicas mecánicas incompetentes. Aprovecha el material de relave del proceso de concentración.
- Permite una disponibilidad inmediata del mineral.

Desventajas del método

- A los costos de explotación se le debe agregar el costo de la preparación, acarreo y colocación del relleno. El costo disminuiría si se considera la eliminación del costo de la relavera.
- Podría elevar el costo la obtención de una bomba ya que para material pastoso de grano fino, procedente de la preparación, como material de relleno se utilizara la bomba de pistón, que es de válvula de asiento, accionada hidráulicamente, de la serie HSP. Están acondicionadas para rendimientos de hasta 500 m³/h y presiones de transporte de hasta 130 bar.

Mejoras del método de relleno con mortero de relave

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

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

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

relleno de tajos secundarios y para los diques de los tajos primarios, en el caso que no tengan la suficiente cantidad de relave. En este caso se regresará el desmonte a interior mina, reduciendo las áreas destinadas a las desmonteras y al cambio del paisaje natural de la zona. A continuación se señalan otras ventajas a tener en cuenta:

- Cuando se utiliza relave de una planta concentradora el costo de la obtención del material es cero, ya que la planta cubre los costos de transporte y espesado del material.
- Cuando se utiliza el material detrítico producto de las labores de preparación y desarrollo se contribuye a maximizar la vida útil de las desmonteras y asimismo se minimiza el impacto ambiental.
- El transporte en tuberías es mucho más económico, eficiente y rápido que con otro tipo de transporte.
- Al depositarse el relleno en el tajo en forma de mortero tiende a buscar su nivel en forma natural, eliminando así la necesidad de utilizar recursos adicionales para esparcirlo manual o mecánicamente.
- El relleno con mortero de relave por la granulometría del material que es de fácil control, permite una alta resistencia al movimiento de las cajas.
- El relleno con mortero de relave, permite aumentar la eficiencia y productividad en los tajos debido a la disminución del consumo de madera y otros materiales usados como tapones que contribuye a la reducción del costo de minado por la versatilidad que brinda.
- Al usar el relave total se reduce a cero la inversión en este concepto para el plan de cierre de mina.

Los relativos incrementos de costo en depositar el relave en interior de mina, serían compensados al bajarse estos en mitigación ambiental, ventilación, sostenimiento, recuperación de puentes, pilares, de áreas inaccesibles y con la consecuente obtención de la alta productividad.

Aplicación y costos asociados al nuevo método

Aplicación

Se recogen muestras del macizo rocoso y del relave de la mina polimetálica ICM Pachapaqui, que a la cual vamos a realizar el muestreo y aporte del nuevo sistema de relleno. En este caso vamos a utilizar el relave en sustitución de la arena. Para esto el relave a usar debe presentar una consistencia fina como la arena. Teniendo en cuenta seguir con la norma técnica ASTM C144 donde se establecen los requisitos para los áridos en los morteros.

Gráfico 4 Recopilación de muestras para caracterización

Fuente: Elaboración propia. Muestras proporcionadas por el Departamento de Geomecánica de la mina Pachapaqui S.A.C..

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

Gráfico 5 Elaboración de pruebas para el diseño de mezcla

Fuente: Elaboración propia

Para definir el tipo de relleno a utilizar se ejecutaron varias baterías de seis diseños con diferentes composiciones o cantidades de agregados, cemento, agua y aditivos para encontrar la muestra patrón que nos guíe hacia la mezcla ideal que reúna las características de bombeabilidad, contenido mínimo de agua y resistencias requeridas utilizando como materia prima principal el relave total que sale de la planta de concentrados minerales. Se realizaron los diseños de mezcla en laboratorio y se hizo el muestreo de resistencia en los diferentes tajos. Teniendo ya el diseño de mezcla aprobado se realizó el proceso del sistema de relleno en mina, para cinco tajos de muestra. Realizado el transporte y relleno del mortero de relave en los cinco tajos de muestra, se esperaron cuatro y siete días para la verificación de la resistencia en las paredes y pisos rellenados con el mortero de relave, según el diseño para los ciclos de minado. Estos resultados arrojaron una resistencia a la compresión aceptable de 2.4 y 7.2 kg/cm² respectivamente. Se

tomaron los resultados en los tajos de muestra y se hizo una comparación con otros tajos de similares características para hallar la eficiencia en cuanto a confiabilidad y costos del nuevo sistema de relleno propuesto.

Costos asociados

Después de aplicar el nuevo relleno con mortero de relave en diferentes tajos de la mina subterránea, se obtuvo el cuadro con la nueva propuesta con el siguiente comparativo:

Tabla 1 Cuadro comparativo de muestras

	ASPECTO DE EVALUACION											
	Tajo	TM	Leyes				Valor de Mineral (\$/TM)	PROPIEDADES				
			%Cu	%Pb	%Zn	Onz Ag		Costo de Sostenimiento (\$/TM)	MTBF (Horas)	IF	Horas Perdidas	Confiabilidad
Con el sistema de sostenimiento tradicional	Tajo 612	2500	0.03	0.50	1.48	1.56	47.17	2.87	360	Descajes	200	57.38
	Tajo 658	3000	0.30	2.18	6.00	2.09	139.41	2.95	480	Descajes	144	74.08
	Tajo 780	2800	0.80	2.86	3.63	8.06	222.94	2.56	240	Descajes	120	60.65
	Tajo 610	4000	0.06	0.96	2.90	2.68	86.82	2.87	288	Descajes	72	77.88
	Tajo 488	3500	0.19	3.29	5.87	2.00	153.68	3.12	192	Descajes	96	60.65
Con el sistema Relleno en pasta	Tajo 609	4000	0.07	0.80	4.89	2.12	99.75	4.56	No ocurre	No hay descajes	8	100
	Tajo 629	2500	0.10	0.72	3.11	3.60	104.50	4.3	No ocurre	No hay descajes	4	100
	Tajo 346	3000	0.05	0.66	4.09	3.21	108.05	4.45	No ocurre	No hay descajes	5	100
	Tajo 070	3500	0.06	2.25	2.64	3.14	118.42	4.49	No ocurre	No hay descajes	6	100
	Tajo 978	2000	0.45	0.95	2.54	3.49	111.98	4.2	No ocurre	No hay descajes	4	100

Los tajos con el sistema relleno en pasta es mejor que los tajos con el sistema de sostenimiento Tradicional

Fuente: Elaboración propia

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

Tabla 2 Análisis cualitativo costo-beneficio acumulativo asociado a la implementación del mortero de relave

COSTO - BENEFICIO

"PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE RELLENO CON RELAVE PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL SOSTENIMIENTO"

COSTO DE OPERACIÓN		BENEFICIO DE APLICACIÓN DE RELLENO	
DETALLE DE COSTOS OPERATIVOS	MONTO	BENEFICIO	MONTO
Mano de obra 0.3 \$/tn	\$1,500,000.00	AHORRO EN CEMENTO. • Se puede considerar un ahorro en el contenido del cemento, al tener el relave una característica puzolánica que ayuda a ahorrar hasta el 20% de cemento para obtener resistencias similares.	\$2,547,169.81
Consumo de Cemento 2.94 \$/tn	\$14,700,000.00	SEGURIDAD EN LABORES Y EQUIPO ATRAPADO • Mejorar el sostenimiento para las labores subterráneas evitando que la mina colapse por explosión de las rocas encajonantes, con la consecuente pérdida de dinero en equipo atrapado, mineral "enterrado" y hasta de pérdida de vidas humanas.	\$15,723,270.44
Consumo de floculante 1.3 \$/tn	\$6,500,000.00	CIERRE PROGRESIVO DE MINA • Al usar el relave total se reduce a cero la inversión en este concepto para el plan de cierre de mina.	\$23,584,905.66
Consumo de energía eléctrica 0.1 \$/tn	\$500,000.00	ESPACIO DE LA RELAVERA • Mejorar el paisaje de la superficie del entorno de la unidad minera, minimizando el espacio utilizado por la relavera.	\$14,160,043.40
Operación Planta de relave (relave sin costo) 0.1 \$/tn	\$500,000.00	COMUNIDADES • Sensibilizar a la población de los compromisos de la minera en el cumplimiento legal del medio ambiente.	\$12,578,616.35
Preparación de barreras, instalación de tuberías y mantenimiento 0.1 \$/tn	\$500,000.00	RECUPERACIÓN DE MINERAL • La recuperación del 10% al 15% del mineral cubicado (evitando la dilución del mineral al tener paredes auto estables).	\$80,000,000.00
COSTO TOTAL	\$24,200,000.00	COSTO TOTAL DE ALTA PRODUCTIVIDAD	\$198,584,905.66
COSTO TM	\$4.84		

B/C 6.55**Se beneficia 6.55 dolares por cada dolar que se invierte**

Los relativos incrementos de costo en depositar el relave en interior de mina, serían compensados al bajarse estos en mitigación ambiental, ventilación, sostenimiento, recuperación de puentes, pilares, de áreas inaccesibles y con la consecuente obtención de la alta productividad.

Conclusiones

- La presente investigación demuestra una mejora consistente en la confiabilidad del sostenimiento de las minas subterráneas con la aplicación del sistema de relleno con mortero de relave, generándose un valor agregado ambiental que mejora los resultados de la organización.
- Como se aprecia en la Tabla 4 del anexo, en el cuadro comparativo de muestras, los resultados de confiabilidad del sostenimiento se incrementan fuertemente en aquellos tajos donde se aplica el sistema de relleno con mortero en comparación con aquellas en las cuales el sistema no se aplica.
- Se ha demostrado que la aplicación de sistemas de sostenimiento basados en el método de relleno con mortero de relave mejoran la confiabilidad del sostenimiento.
- La utilización de métodos de relleno con mortero de relave permiten mejorar la capacidad operativa del ciclo de minado, reducir los tiempos del ciclo, incrementar la productividad, mejorar los márgenes, en beneficio de la organización y el ambiente.
- Las conclusiones pueden ser aplicados por los productores mineros subterráneos que actualmente cuentan con el problema planteado en la presente tesis.

Recomendaciones

- Se busca transmitir el conocimiento de un nuevo sistema de relleno usando mortero de relave en el método de minado de corte y relleno ascendente en la minería subterránea a través de estudios de campo e investigación de la literatura pertinente al caso. Debido a las limitaciones, se recomienda ampliar el resultado a nivel nacional para lograr una muestra más confiable.
- Se recomienda que las entidades estatales pongan data confiable en sus páginas para un mejor estudio y aportes en la optimización de los diferentes procesos mineros.
- La toma de muestras es muy importante en la definición de los datos de investigación, es por eso que debe hacerse de acuerdo a estándares de calidad (QA/QC).

Referencias

- Belem, T & Benzaazoua, M. (2004). An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines. En E. Villaescusa & Y. Potvin (Eds.), *Ground Support in Mining and Underground Construction: Proceedings of the Fifth International Symposium on Ground Support* (p. 637-650). Perth: Taylor & Francis. Recuperado de <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9780203023921.ch62>.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2015). Estadística de Accidentes Mortales en el Sector Minero. Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/detalle.php?idSector=1&idTitular=170&idMenu=sub151&idCateg=170>.
- Oyarzun, J. & Oyarzun, R. (2011). *Minería Sostenible: Principios y Prácticas*. Santiago: Ediciones GEMM – Aula2punto.net.
- The Stava 1985 Foundation. (s.f.). The failure. Recuperado de: <http://www.stava1985.it/stava1985/html/10/20/60/>.

Anexo: Ensayos de relleno con mortero de relave

Tabla 3 Baterías de prueba número 1

# Muestra	#01	#02	#03	#04	#05	#06
Agua/Cemento	5.0	3.94	2.82	3.13	6.25	2.94
cemento sol T 1	100 kg	120 kg	140 kg	160 kg	80 kg	200 kg
relave	2500 kg	2500 kg	2500 kg	2500 kg	2500 kg	2500 kg
agua	500 l	473 l	395 l	500 l	500 l	587 l
lighcrete	16.5 kg	15 kg	15 kg	16.5 kg	16.5 kg	20 kg
peso unitario kg/m ³	1639	1780	1776	1788	1844	1773
Resistencias a la compresión kg/cm ²						
slump	7" a 8"	7" a 8"	7" a 8"	7" a 8"	7" a 8"	FLUIDO
4 días	1.2	2.7	3.3	4.1	0.9	5.5
14 días	1.96	5.09	5.20	6.01	1.38	10.39
observaciones	todas las muestras presentan una mínima exudación					

Tabla 4 Batería de pruebas número 2

# de muestra	#07	#08	#09	#10	#11	#12
Agua/Cemento	2.14	1.88	1.66	1.5	1.36	1.25
cemento sol T 1	140 kg	160 kg	180 kg	200 kg	220 kg	240 kg
relave	1800 kg					
agua	300 l					
lightcrete %	13%	13%	13%	13%	13%	13%
lightcrete kg/m ³	18.2 kg	21 kg	23.4 kg	26 kg	28.6 kg	31.2 kg
peso unitario kg/m ³	1661	1761	1800	1870	1897	1905
Slump	6" a 7"					
Resistencias a la compresión kg/cm ²						
4 días	5.46	5.71	11.33	13.12	13.93	15.74

# de muestra	#07	#08	#09	#10	#11	#12
7 días	11	12	21	22	23	25
14 días	14	15	22	23	23	25
Observaciones	Todas las muestras no presentan exudación.					

Tabla 5 Batería de pruebas número 3

# de muestra	# 13	# 14
Agua/Cemento	3.0	2.5
cemento sol T 1	100 kg	120 kg
relave	1800 kg	1800 kg
agua	300 l	300 l
lightcrete %	13%	13%
lightcrete kg/m ³	13 kg	15.6 kg
peso unitario kg/m ³	1647	1656
slump	6" a 7"	6" a 7"
Resistencias a la compresión kg/cm ²		
4 días	1.4	2.4
7 días	4.6	7.2

Con esta última batería de pruebas ya nos da un acercamiento de lo que sería la mezcla Patrón con la cual se puede comenzar las pruebas industriales cuando se reinicien las operaciones, se puede observar que ya a los siete días cumple con el requerimiento de resistencia geomecánica y durante la operación con el control de calidad se puede optimizar.