

DEPOSICIÓN DE RELAVES

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La presente invención se relaciona con un método para recuperar el agua y formar geomorfologías estables con los relaves mineros.

La mayor parte del agua consumida en una operación de minería en roca dura, como en el caso de la recuperación de metales base o preciosos, está contenida en los relaves de flotación o lixiviación tan finamente molidos. La molienda fina es necesaria para liberar el componente de valor contenido en la mena, para obtener recuperaciones satisfactorias. Los relaves así obtenidos son espesados para la recuperación parcial del agua, y dado que la suspensión espesa sometida a licuación se mantiene susceptible de licuación, se depositan hidráulicamente en diques construidos para tal fin denominados depósitos de relaves (TSF, por sus siglas en inglés).

Las partículas de relave tienen por lo general un diámetro inferior a 150 micrones, y debido a su baja permeabilidad no pueden ser fácilmente tamizados o filtrados para retirar el agua arrastrada.

Aun en casos en que se realiza la filtración de los relaves, el apilamiento y almacenamiento del producto filtrado puede ser problemático, ya que los relaves filtrados son de difícil manejo y carecen de integridad estructural. Tanto filtración como el apilamiento mecánico son operaciones sumamente costosas, y de todos modos generan un residuo que sigue siendo difícil de almacenar en muchos terrenos.

Por ello, dos objetivos de larga data de la industria minera en roca dura tales como el cobre o el oro o los PGM u otros metales base son, en primer lugar, recuperar el agua consumida en los relaves y, en segundo lugar, encontrar un método de bajo costo para apilar los relaves en forma seca y estable.

Las industrias agrícola, de la construcción y la estabilización de suelos han utilizado desde hace tiempo el concepto de la distribución por mechas para eliminar el agua de los suelos de baja conductividad hidráulica.

Se genera un drenaje por capas o mecha drenante (ya sea vertical o lateral) insertando una capa continua de material de mayor conductividad hidráulica en el suelo con drenaje insuficiente, para dar lugar a que el agua se transfiera de las área de suelo de baja conductividad hidráulica a la capa de drenaje más porosa, de la cual pueda fluir hasta un punto en el que se la pueda descargar. La mayoría de los drenajes por capas utilizan un geotextil permeable al agua alrededor de un núcleo central poroso, a fin de habilitar el flujo selectivo del agua del suelo saturado a la mecha porosa.

También se utiliza arena como material de mecha drenante, (con frecuencia denominado drenaje francés), puesto que tiene una elevada conductividad hidráulica (alrededor de 2 órdenes de magnitud mayor que el suelo de bajo drenaje). Un canal de arena facilita el drenaje estable del suelo de bajo drenaje (por ej., arcilla) hacia el drenaje de arena, desde el cual puede fluir hacia el punto de desagüe. El efecto de mecha de la arena insaturada parece “extraer” el agua del suelo saturado circundante.

Para eliminar el agua de los relaves mineros, se pueden aplicar principios similares al del drenaje por mechas.

Sin embargo, la distribución de tamaños de los relaves mineros es tal que éstos tienen una baja conductividad hidráulica (por lo general de 10^{-4} a 10^{-6} cm/seg) y, por ende, cuando están presentes en un volumen grande, se mantienen “permanentemente” por encima de la saturación; el contenido de agua en el cual se puede producir la licuación de los relaves si se aplica un esfuerzo externo.

El contenido final de agua de los relaves asentados es por lo general de alrededor de 0,5-0,55 m³ de agua por tonelada de relaves.

En efecto, en muchas jurisdicciones, las autoridades insisten en una cubierta impermeable en la base y los laterales del depósito de relaves (TSF), para impedir la fuga de agua continua del TSF hacia el entorno circundante

Debido a los volúmenes implicados, los fallos ocasionales de los muros de contención de los TSF utilizados para contener residuos de minería son potencialmente catastróficos. Esos fallos han sido causa de pérdidas de vida y daños ambientales en gran escala.

El concepto del uso de drenajes por capas verticales utilizando materiales geotextiles para eliminar el agua de los relaves ha sido probado con éxito para la consolidación de relaves históricos a fin de habilitar la reubicación del material parcialmente seco (Proceedings Tailings y Mine Waste 2015 Vancouver, BC, Octubre 26 a 28 de 2015). Sin embargo, el costo de instalación de un gran número de drenajes por capas verticales, a una distancia de 1 a 3 metros a través de una instalación de almacenamiento de relaves de gran tamaño es prohibitivo. El costo de materiales de cada drenaje vertical por geotextil convencional es significativo, al igual que el costo de reemplazo de cada drenaje.

La aplicación comercial más aproximada al concepto del drenaje por capas en el almacenamiento de relaves es el de una capa de arena o canales de drenaje especialmente fabricados que se colocan habitualmente sobre cubiertas sobre la base del TSF, para habilitar la transferencia del agua lateralmente hasta la ubicación de una bomba de desagote. No obstante, en el curso de un período prolongado, la tasa efectiva de desagüe del TSF de la arena en la base del dique es limitada. Sólo los pocos metros adyacentes a estas vías de drenaje pierden el agua, debido a la baja conductividad hidráulica de los numerosos metros de relaves superpuestos, y a la imposibilidad de acceso de aire para desplazar el agua contenida en los relaves.

Por ello, el drenaje dirigido no ha progresado en toda la industria minera, incluso en las ubicaciones de TSF en que el agua que se podría separar tiene un valor considerable.

Un concepto similar de introducir una capa de alta permeabilidad para asistir en la eliminación del agua de una capa de relaves más fina de baja permeabilidad situada por encima, es el de la filtración por filtros de cinta al vacío reivindicada por Bentley y colegas. (US3767050A). La filtración de una suspensión de relaves de baja permeabilidad se acelera colocando los relaves sobre una capa de arena subyacente.

En otro concepto similar, Ren y col. (US 9188389 B2) distribuyen capas paralelas continuas de los relaves de fina arena petrolífera por la gravedad sobre capas de otro material base de mayor permeabilidad tal como arena obtenida del proceso de refinado de arena petrolífera, para aumentar la integridad estructural de los relaves finos.

Para mantener estas capas paralelas de relaves y arena, que se depositan hidráulicamente y fluyen por la gravedad en toda un área extendida, se tratan químicamente las respectivas suspensiones con anterioridad a la deposición. Este tratamiento químico equipara los ángulos de varamiento de las fracciones de arena y relaves, a fin de mantener una profundidad uniforme de las dos fracciones de la estructura, y para igualar este ángulo con el talud del terreno en el cual se planea realizar la deposición. Este ángulo de varamiento es típicamente superior a 1%, y los límites superior e inferior están restringidos por los ajustes disponibles por medio de la modificación química de las suspensiones respectivas. El espesor de capa que se puede obtener en la estructura estratificada, típicamente inferior a 1 m, está limitado por un período umbral de desagüe indispensable para alcanzar la resistencia de corte necesaria, con anterioridad a la introducción de la siguiente capa. Durante este período de desagüe umbral, la capa de mayor permeabilidad se drena parcialmente, produciendo una base insaturada que queda disponible para desaguar parcialmente la capa de baja permeabilidad, potenciando así la resistencia de corte de la estructura compuesta.

Por separado, se están desarrollando tecnologías de enriquecimiento de gruesos para rechazar la ganga de un tamaño más grueso. Estas tecnologías de enriquecimiento de gruesos incluyen técnicas tales como la flotación de partículas

gruesas (CPF, por sus siglas en inglés) y la lixiviación del residuo de CPF muy gruesas para recuperar el componente valioso de las menas en forma más concentrada, con un tamaño de trituración más grueso.

Esta arena residual de las CPF o de la lixiviación de arenas en pilas (SHL, por sus siglas en inglés) tiene un contenido de metal similar a los relaves convencionales y, por ende es asignada a la eliminación permanente en lugar de a una trituración más fina. Esta capacidad para producir residuos más gruesos sin sacrificar la recuperación, abre un camino para la recuperación parcial de agua del residuo arenoso obtenido. Por ejemplo, el aumento de tamaño de trituración empleando CPF genera una corriente de gangas separada que se puede depositar en forma de residuo de arena de libre drenaje y alta permeabilidad.

El residuo de arena CPF puede ser apilado por separado y drenado para el desagüe hasta obtener alrededor de 90% de sólidos (WO2017/195008), o, de lo contrario, se lo puede mezclar con una proporción de los relaves convencionales para incorporar la mayor cantidad posible de relaves en la arena, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad de la pila (WO2018/234880).

Dado que la recuperación de CPF aún se basa en la exposición parcial de los minerales valiosos y la liberación de las gangas durante la trituración, sólo se produce una exposición adecuada del mineral deseado una vez que se ha triturado la mena a un tamaño inferior a la de la arena mediana (por lo general de alrededor de 3-500 micrones). Cuando el límite superior de la distribución por tamaños está en este tamaño donde se puede obtener una recuperación elevada de CPF, alrededor de 50%-70% del mineral triturado ya está triturado a un tamaño consistente con los relaves convencionales. Por ello, incluso con la mezcla de la arena CPF y los relaves reivindicada en WO2018/234880, se debe sacrificar una de las recuperaciones para obtener una mezcla de drenaje libre, o sólo se puede obtener una eliminación parcial de los relaves mediante la mezcla. Por consiguiente, subsiste el problema del almacenamiento de los relaves.

SÍNTESIS DE LA INVENCIÓN

La presente invención se relaciona con un método para la eliminación de residuos de la trituración y procesamiento de minerales, que incluye los siguientes pasos:

clasificar los residuos del procesamiento en una fracción de arenas permeables al agua y una fracción de relaves;

depositar la fracción de relaves y la fracción de arena para formar una estructura multicapa contenida por al menos un muro de contención donde la fracción de arena forma canales continuos a través de la fracción de relaves para dar lugar a que el agua contenida en los relaves y la arena fluyan por la gravedad a través de los canales de arena, hacia puntos de descarga del agua y

recuperar el agua de los puntos de descarga de agua.

Un muro de contención es una barrera construida por el hombre o natural, hecha de materiales permeables o impermeables, que contiene las capas de relaves depositadas, a fin de permitir la colocación subsiguiente de los canales de arena y el desagüe de la capa de relaves.

Una vez depositados, se cubren los canales de arena con una capa de relaves que se depositan hidráulicamente.

La fracción de arena comprende por lo general partículas de arena con un p80 de más de 150 micrones y preferentemente superior a 300 micrones, y aun más preferentemente superior a 400 micrones, hasta 3000 micrones, y es de libre drenaje.

Libre drenaje quiere decir que las arenas drenan hasta un punto de insaturación bajo la acción de la gravedad sola y preferentemente poseen la capacidad de apilarse hidráulicamente a cualquier altura y hacer que el agua drene por la

gravedad para formar una arena insaturada que por lo general contiene menos de 15% en peso de agua.

La fracción de relaves comprende generalmente partículas con un p_{80} de menos de 200 micrones, típicamente menos de 150 micrones, y tiene un contenido de agua típico de entre 30 y 70% en peso (0,55 – 0,90 m³ de agua por m³ de suspensión de relaves) dependiendo de los sistemas de manejo de relaves utilizados anteriormente.

La fracción de relaves puede ser tratada con aditivos químicos tales como floculantes, antes de la deposición, para generar una capa de relaves más permeable, o cambiar el ángulo de varamiento natural.

Preferentemente, al menos 50% del residuo de arena tiene un tamaño de partícula en el rango de 0,1 a 1 mm, y preferentemente más de 70% y aun más preferentemente más de 90%.

Preferentemente, el residuo de arena contiene menos de 25% de material inferior a 0,75 mm, y preferentemente menos de 15%, y aun más preferentemente menos de 10%.

Se pueden desaguar parcialmente los relaves o la arena finales antes de la deposición.

En un proceso de la invención, se deposita hidráulicamente una capa de relaves y se produce el desagüe al interior de los canales de arena hasta que la capa de relaves alcance integridad estructural adecuada para la colocación de uno o más canales de arena en la superficie de la capa de relaves, tras lo cual se coloca la siguiente capa de relaves hidráulicamente sobre el o los canales de arena, y el proceso continúa hasta construir una estructura multicapa.

Los canales de arena se pueden colocar hidráulicamente o se los puede colocar mecánicamente en forma de sólido drenado.

Los canales de arena se pueden colocar en forma de base sobre la capa de relaves anterior para permitir que el equipo mecánico complete la colocación de la arena a través de toda la superficie de relaves.

Se puede desaguar una capa de relaves anterior mediante drenaje a través de los canales de arena anteriores, o bien mediante una máquina de extrusión mecánica, antes de la colocación de los siguientes canales de arena

Los canales de arena se pueden colocar desde una nave flotante sobre una planta subacuática de almacenamiento de relaves.

En una forma de realización, el muro de contención situado en el extremo de recuperación de agua de la estructura es permeable al agua y el agua drena desde los puntos de descarga a través del muro.

En otra forma de realización de la invención, el muro de contención situado en el extremo de recuperación de agua de la estructura no es permeable al agua y se retira el agua desde la estructura contenida bombeando desde un punto central de descarga de agua.

Preferentemente, hay puntos de acceso de aire provistos para los canales de arena, ya sea en el extremo de deposición de la estructura o por cualquier otro medio de conexión al aire.

Por lo general, los canales de arena se colocan de tal manera que la distancia máxima desde cualquier punto de los relaves hasta el canal de arena más cercano sea inferior a 10 metros, preferentemente de menos de 3 metros, y aun más preferentemente de menos de 2 metros.

Los canales de arena pueden estar conectados en dirección vertical y lateral, para generar una matriz tridimensional de canales permeable dentro de los relaves.

Los canales de arena pueden tener una profundidad de entre 0,05 y 2 m, preferentemente una profundidad de entre 0,2 y 1 m y aun más preferentemente una profundidad de entre 0,3 y 0,7 m.

En etapa de construcción, se depositan los canales de arena continuos completamente sobre una capa de relaves.

Por lo general, la fracción de relaves se deposita hidráulicamente para producir un ángulo de varamiento de aproximadamente 0,5% a 2%, por lo general de 0,5% a 1%, preferentemente de alrededor de 0,5% para producir un talud adecuado para el flujo subsiguiente por la gravedad del agua a través de los canales de arena hasta el punto de descarga.

En una forma de realización de la invención, las fracciones de arena y las fracciones de relaves se depositan sucesivamente en capas, para formar capas de relaves de 1 a 10 m de espesor, y canales de arena que, en promedio, tienen un espesor de 0,05 a 2 m.

En otra forma de realización de la invención, las fracciones de arena se depositan en hileras discretas espaciadas a una distancia, y las fracciones de relaves se depositan sucesivamente en capas, para formar capas de relaves de 1 a 10 m de espesor, y canales de arena de 0,05 a 2 m de espesor, por lo general de 0,05 a 1 m de espesor, y espaciadas a una distancia de 2 a 10 m, generalmente de 2 a 5 m.

En otra forma de realización de la invención, se deposita la arena, o se colocan drenajes por capas de material geotextil o equivalente, de modo tal que se formen drenajes por capas verticales en las capas de relaves entre los canales de arena superior e inferior. Por ejemplo, esto se puede llevar a cabo durante la construcción superponiendo algunos o todos los canales de arena, de tal modo que formen una columna vertical continua de arena a través de los relaves. También se puede lograr esto introduciendo drenajes por capas de material geotextil para interconectar los canales de arena.

En otra forma de realización de la invención, se utiliza arena para construir murallas de arena internas y externas. Las murallas se pueden subdividir para formar diques de anillo (o celdas) de contención separadas, y luego se llena cada celda mediante la deposición hidráulica de relaves hasta la altura apropiada, y se deja drenar el agua hacia los canales de arena subyacentes y salir a través de las murallas de arena permeables hasta el punto de captación del agua. Luego se repite todo el proceso de colocación de los canales de arena y construcción de las murallas, para eventualmente formar la estructura de arena y relaves de la altura y forma deseadas.

Preferentemente, en el proceso, en cualquier momento, sólo las 3 capas de relaves superiores, y preferentemente las dos capas de relaves superiores, y aun más preferentemente la capa de relaves más alta, se saturan con agua, es decir los relaves en los cuales el air aún no ha desplazado al menos parte del espacio poroso que existe entre las partículas sólidas, de tal manera que queden sometidas a licuación en caso de un esfuerzo aplicado. Un suelo saturado es aquél en el cual los espacios de poros están llenos con agua.

Los canales de arena se pueden insertar en una planta existente de almacenamiento de relaves para promover la consolidación de los relaves cerca del muro de contención

La arena se genera preferentemente mediante un proceso de enriquecimiento de gruesos y los relaves se generan por la flotación convencional del mineral.

El proceso de enriquecimiento de gruesos puede ser una flotación de partículas gruesas, tamizado, separación por la gravedad, separación electrostática y separación magnética, generalmente la flotación de partículas gruesas.

Por otro lado, la arena se genera de la lixiviación en pilas y los relaves se generan de la lixiviación por agitación convencional.

La invención cubre asimismo un sitio de desagüe de relaves mineros que comprende:

al menos un muro de contención;

una estructura multicapa contenida por el muro de contención, donde dicha estructura multicapa comprende las fracciones de relaves y las fracciones de arena, donde las fracciones de arena forman canales continuos a través de las fracciones de relaves, para dar lugar a que el agua contenida en los relaves y la arena fluyan por la gravedad a través de los canales de arena y

puntos de descarga del agua.

La fracción de arena comprende generalmente partículas de arena con un p80 de más de 150 micrones y preferentemente más de 300 micrones, y aun más preferentemente más de 400 micrones, hasta 3000 micrones, y es de libre drenaje.

De libre drenaje quiere decir que las arenas drenan hasta un punto de insaturación bajo el efecto de la gravedad solamente y preferentemente poseen la capacidad de apilarse hidráulicamente hasta cualquier altura y hacer que el agua drene por la gravedad para formar una arena insaturada, que generalmente contiene menos de 15% en peso de agua.

La fracción de relaves comprende generalmente partículas con un p80 de menos de 200 micrones, por lo general menos de 150 micrones, y tiene un contenido de agua típico de entre 30 y 70% en peso (0,55 – 0,90 m³ de agua por m³ de suspensión de relaves) dependiendo de los sistemas de manejo de relaves de etapas anteriores.

Preferentemente, al menos 50% del residuo de arena, y preferentemente más de 70% y aun más preferentemente más de 90% está en un rango de tamaño de partícula de 0,1 a 1 mm.

Preferentemente, el residuo de arena contiene menos de 25%, y preferentemente menos de 15%, y aun más preferentemente menos de 10% de material de menos de 0,75 mm.

En una forma de realización el muro de contención, en el extremo de recuperación del agua de la estructura es permeable y el agua drena desde los puntos de descarga a través del muro.

En otra forma de realización de la invención, el muro de contención en el extremo de recuperación del agua de la estructura no es permeable al agua y se retira al agua de la estructura contenida bombeando desde un punto central de descarga del agua.

Preferentemente, se incluyen puntos de acceso de aire para los canales de arena, ya sea en el extremo de deposición de la estructura o por cualquier otro medio de conexión al aire.

Por lo general, los canales de arena se colocan de tal manera que la distancia máxima desde cualquier punto de los relaves hasta el canal de arena más cercano sea inferior a 10 metros, preferentemente de menos de 3 metros, y aun más preferentemente de menos de 2 metros.

Los canales de arena pueden estar conectados en dirección vertical y lateral, para generar una matriz tridimensional de canales permeable dentro de los relaves.

pueden tener una profundidad de entre 0,05 y 2 m, preferentemente una profundidad de entre 0,2 y 1 m y aun más preferentemente una profundidad de entre 0,3 y 0,7 m.

En la etapa de construcción, se depositan los canales de arena continuos completamente sobre una capa de relaves.

Por lo general, la fracción de relaves se deposita hidráulicamente para producir un ángulo de varamiento de aproximadamente 0,5% a 2%, por lo general de 0,5% a 1%, preferentemente de alrededor de 0,5% para producir un talud adecuado para el flujo subsiguiente por la gravedad del agua a través de los canales de arena hasta el punto de descarga.

En una forma de realización de la invención, las fracciones de arena y las fracciones de relaves se depositan sucesivamente en capas, para formar capas de relaves de 1 a 10 m de espesor, y canales de arena que, en promedio, tienen un espesor de 0,05 a 2 m.

En otra forma de realización de la invención, las fracciones de arena se depositan en hileras discretas espaciadas a una distancia, y las fracciones de relaves se depositan sucesivamente en capas, para formar capas de relaves de 1 a 10 m de espesor, y canales de arena de 0,05 a 2 m de espesor, por lo general de 0,05 a 1 m de espesor, y espaciadas a una distancia de 2 a 10 m, generalmente de 2 a 5 m.

En otra forma de realización de la invención, se deposita la arena, o se colocan drenajes por capas de material geotextil o equivalente, de modo tal que se formen drenajes por capas verticales en las capas de relaves entre los canales de arena superior e inferior.

En otra forma de realización de la invención, se utiliza arena para construir murallas de arena internas y externas. Las murallas se pueden subdividir para formar diques de anillo (o celdas) de contención separadas, y luego se llena cada celda mediante la deposición hidráulica de relaves hasta la altura apropiada, y se deja drenar el agua hacia los canales de arena subyacentes y salir a través de las murallas de arena permeables hasta el punto de captación del agua. Luego se repite todo el proceso de colocación de los canales de arena y construcción de las murallas, para eventualmente formar la estructura de arena y relaves de la altura y forma deseadas.

Los canales de arena se pueden insertar en una planta existente de almacenamiento de relaves para promover la consolidación de los relaves cerca del muro de contención.

La arena se genera preferentemente mediante un proceso de enriquecimiento de gruesos y los relaves se generan por la flotación convencional del mineral.

El proceso de enriquecimiento de gruesos puede ser una flotación de partículas gruesas, tamizado, separación por la gravedad, separación electrostática y separación magnética, generalmente la flotación de partículas gruesas.

Como alternativa, la arena se genera de la lixiviación en pilas y los relaves se generan de la lixiviación por agitación convencional.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

- Figura 1** es una representación esquemática de una estructura multicapa de acuerdo con una primera forma de realización de la invención;
- Figuras 2A y 2B** son representaciones esquemáticas de una estructura multicapa de acuerdo con una segunda forma de realización de la invención;
- Figuras 3A y 3B** son representaciones esquemáticas de una estructura multicapa de acuerdo con una tercera forma de realización de la invención;
- Figuras 4A y 4B** son representaciones esquemáticas de una estructura multicapa con celdas de acuerdo con una cuarta forma de realización de la invención y
- Figura 5** es un gráfico que ilustra los resultados de los ensayos de laboratorio de carga hidráulica decreciente y tiempo de asentamiento de los relaves de cobre chilenos, que exhibe la relación permeabilidad / relación de vacío, con respecto a la predicción de liberación de agua de los relaves en consolidación.

DESCRIPCIÓN DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN PREFERIDAS

La presente invención aprovecha la fracción de arena del residuo generado en el enriquecimiento de minerales en una novedosa estructura de almacenamiento de relaves, para recuperar la mayor parte del agua contenida, y potenciar la

estabilidad geotécnica de la estructura compuesta, habilitando a la vez que continúe la práctica actual de colocación hidráulica de bajo costo de los relaves.

Mediante la deposición de residuos gruesos y finos en una estructura que contiene canales continuos de arena permeable a través de capas de los relaves, se puede drenar la mayor parte del agua contenida en los relaves hacia la arena de manera similar a la filtración convencional por la gravedad. Los canales de arena se depositan para permitir que el agua migre por la gravedad hacia un punto de descarga

Los canales continuos de arena permeable se colocan de tal manera que la longitud media de trayecto del agua desde cualquier parte de los relaves hasta el canal de arena más cercano facilite la transferencia del agua desde los relaves a cualquier velocidad aceptable al canal de arena, desde donde se la puede descargar. Esta distancia desde cualquier punto de los relaves hasta el canal de arena más próximo, es inferior a 10 m, y por lo general inferior a 5 metros, y permite el desagüe eficiente de los relaves durante un período de semanas y meses. Cuanto más corta sea la distancia desde los relaves hasta el canal de arena desaguado, más rápido será el desagüe.

La invención utiliza la mena que se ha molido para recuperar el mineral de valor contenido en la misma, separando el residuo en fracciones de arena y de relaves. No se requieren materiales adicionales, ya que el material necesario para la estructura de residuos se puede generar como parte del proceso de enriquecimiento. No obstante, se puede utilizar otro material permeable, como por ejemplo roca de desecho o materiales de cubierta tales como arcilla o geotextiles para complementar los muros de contención o los canales de arena.

El agua es recuperada de la estructura por medio de la migración a lo largo de estos canales de drenaje de arena, para drenar a través de las murallas permeables o se la puede extraer bombeando desde un central punto de descarga del agua. El agua es capturada para la recuperación y reutilización, o

para su descarga controlada de regreso al ambiente, sujeta al cumplimiento de las normas pertinentes de calidad del agua descargada.

En el caso de relaves con baja permeabilidad, se pueden agregar floculantes químicos antes de la deposición de los relaves para aumentar su conductividad posterior y, por ende, su caudal de desagüe.

La velocidad de drenaje hasta un canal de arena es más rápida durante las etapas iniciales del drenaje de relaves, y luego continua más lentamente en un período de meses e incluso años, a medida que el agua de los relaves circundantes es progresivamente desplazada por el aire.

El desagüe rápido inicial da lugar a que cada capa de relaves alcance una integridad estructural adecuada para la colocación de los canales de arena en la superficie de la capa de relaves. A continuación se puede colocar la siguiente capa de relaves hidráulicamente sobre los canales de arena, y continuar el proceso para construir una estructura multinivel.

El drenaje final de la estructura habilita resistencias comparables a las del suelo insaturado.

Con el amurallado apropiado para contener la capa (o capas) superior de deposición, se puede adaptar la deposición de residuos al terreno natural, permitiendo así una mayor flexibilidad para seleccionar la ubicación de la eliminación de los residuos.

Como se indicó, se pueden mantener recuperaciones elevadas de los elementos de valor y a la vez generar la arena de la mina, mediante el uso de técnicas de enriquecimiento de gruesos. Los ejemplos de estas técnicas de enriquecimiento de gruesos son la flotación de partículas gruesas (CPF, por sus siglas en inglés), o la lixiviación de arena en pilas (SHL, por sus siglas en inglés). Estas técnicas producen suficiente arena de un tamaño y cantidad adecuados.

Por ejemplo, cuando se aplica la CPF al enriquecimiento de los minerales de cobre, metales del grupo platino, oro o hierro, dependiendo de las características de liberación de la mena específica durante la trituración, ésta genera un residuo de arena en una relación de (arena/arena más relaves) de entre 20 y 50% de la mena original. El residuo de arena obtenido del enriquecimiento de gruesos se encuentra típicamente en un rango de tamaño de 100-600 micrones, y los finos que de otro modo podrían reducir la conductividad hidráulica ya han sido separados de la arena por la fluidificación que tiene lugar en el proceso de CPF. Por ello, la arena residual de CPF es un residuo permeable y de libre drenaje.

El 20-50% de la arena de CPF permeable provee suficiente material para dar lugar a la transferencia del agua hasta los puntos de captura, y también para generar el amurallamiento que pueda ser necesario.

La arena que surge del enriquecimiento de gruesos y es colocada en los canales debe tener un tamaño adecuado para usar como material de canalización para el desagüe de los relaves.

- La arena tiene una alta conductividad hidráulica y es muy permeable al aire para desplazar el agua intersticial. Se puede transferir el agua a grandes distancias, incluso con una carga hidráulica moderada.
- La arena es de un tamaño suficientemente pequeño para ser depositada hidráulicamente, y de todos modos se asienta lo suficientemente rápido para depositarse en una ubicación de canal indicada, o simplemente diseminarse para formar una capa continua, aunque no necesariamente uniforme, sobre la superficie de los relaves.
- La densidad aparente de la arena es similar a la de los relaves; por ende, se restringe la mezcla de las capas de arena y de relaves durante la deposición y drenaje (por ejemplo, la densidad aparente de la arena o relaves en el caso de un mineral de cobre, medida en el punto de saturación, es por lo general de entre 2,1 y 2,5 tonelada/m³)

- Los tamaños relativos de la arena y los relaves significan que los relaves no pueden ocupar fácilmente los intersticios de la arena; por ende, se limita la mezcla de las capas de arena y de relaves durante la deposición y el drenaje posterior.
- Las interfaces entre la arena y los relaves forman una zona de “filtrado” eficaz. Este filtrado permite que el agua drene selectivamente de los relaves a la arena, como lo haría a través de una capa de arena en un dispositivo de filtro mecánico (por ej. US3767050A).

Aunque la arena se genera preferentemente por un proceso separado de enriquecimiento de gruesos, también es posible engrosar la trituración del proceso existente de enriquecimiento o lixiviación, y luego separar la fracción de arena requerida del resto del residuo del procesamiento para formar una fracción de arena y una de relaves.

Los canales de arena se depositan de manera tal que dé lugar al ingreso continuo de aire, para promover el flujo del agua por la gravedad desde los relaves almacenados a un número manejable de puntos de recolección y desagote del agua convenientemente ubicados, o bien a través de la muralla permeable a los puntos externos de recolección. El drenaje continuo de las capas de relaves sumergidas de la estructura es asistido por la presión de las capas de relaves y arena superpuestas.

Al finalizar la vida útil de la mina, se puede sellar el ingreso de aire para evitar la generación de ácido a largo plazo.

Cabe señalar que en el proceso reivindicado por Ren y col. no se tiene en cuenta el acceso de aire ni los puertos de drenaje para facilitar la recuperación del agua, ni otros mecanismos para el desplazamiento continuo del agua de las capas sumergidas dentro de la estructura. Debido a la baja permeabilidad de las capas superpuestas, sólo se limita la expulsión continua de una mayor cantidad de agua de las capas de alta permeabilidad una vez que se las cubre. Por ello, si bien el

tratamiento químico de Ren y el diseño estratificado paralelo aumenta la Resistencia a punto cedente de la estructura de relaves de arenas de petróleo para conformarse a la Directiva canadiense 74, sigue siendo insuficiente la recuperación del agua de los relaves mineros que se pueden obtener por otras técnicas tales como filtración y apilamiento en seco de los relaves. Más aun, no podría aplicarse un proceso a grandes rasgos similar en concepto al de Ren en la minería en roca dura convencional, ya que no se genera arena suficientemente permeable como parte de la vía de procesamiento y trituración. Si la trituración fuera suficientemente gruesa para generar suficiente arena, la recuperación convencional de los minerales de valor sería acotada.

El método de la presente invención puede reducir las pérdidas de agua en los relaves de los niveles actuales de alrededor de $0,5 - 0,55 \text{ m}^3/\text{tonelada}$ de relaves, a típicamente alrededor de $0,1$ a $0,15 \text{ m}^3/\text{tonelada}$ de residuo. Como las pérdidas de agua en los relaves representan la mayor parte del total de agua consumida por una operación de minería en roca dura, esta capacidad para recuperar el agua de los relaves representa un salto considerable en el consumo de agua total de la mina.

Métodos para el Diseño y Preparación de la Pila

La presente invención consiste en múltiples pasos que constituyen el método para recuperar el agua y crear geomorfologías estables con los relaves

- Generar un residuo de arena separado de tamaño adecuado y una fracción de arena del mineral que se está procesando,
- Depositar el residuo de arena y las fracciones de relaves por separado, para formar canales continuos de arena dentro del volumen total de los relaves
- Estructurar los canales de arena para dar lugar a que el agua fluya por la gravedad hacia puntos de descarga del agua

- Recuperar el agua de estos puntos de descarga para dar lugar al drenaje continuo de los relaves.
- Progresivamente acumular la estructura de canales de arena / relaves y utilizar el peso de la arena superpuesta y los relaves para acelerar el desagüe de los niveles inferiores de relaves almacenados.

Aunque no se limitan a los casos específicos, se presentan diversos ejemplos para ilustrar algunos de los diseños posibles de la estructura y los diversos métodos mediante los cuales se puede construir la estructura.

Los muros / murallas de contención que contienen la estructura general pueden asumir múltiples formas.

En una forma de realización, se puede utilizar la invención dentro de una estructura similar a un dique como la utilizada históricamente para el almacenamiento de los relaves. Esta alternativa permite una elevada recuperación de agua. Sólo una proporción modesta del total de relaves está sujeta a licuación en cualquier momento, reduciendo así el potencial de ingreso de agua en el muro del dique, eliminando el potencial de falla catastrófico del muro. Esta forma de realización aumenta la seguridad de la construcción en etapas anteriores del muro del dique. Ante el cierre final de la mina, los relaves existentes dentro del dique de contención se habrán desaguado y la instalación de almacenamiento será comparable a un suelo insaturado detrás de un talud de retención estable.

En otra forma de realización, se puede utilizar el exceso de arena para construir murallas de arena internas y externas. Estas murallas se pueden subdividir para formar celdas o “paddocks” de contención separadas para la estructura. A continuación se llena una celda mediante la deposición hidráulica de los relaves hasta la altura apropiada, y se deja drenar el agua hacia los canales de arena subyacentes para salir a través de las murallas de arena permeables hasta el punto de descarga del agua. Seguidamente se repite la totalidad del proceso de

colocación de canales de arena y construcción de las murallas para eventualmente formar la geoforma de arena y relaves de la altura y forma deseadas.

La estrategia de celdas habilita el moldeado de las murallas de almacenamiento para adecuarse a las áreas y el terreno que se ha de rehabilitar. Por ejemplo, se puede regenerar la vegetación de la geoforma estable para rehabilitar la superficie de tierra agotada por la minería, o para otra aplicación que resulte útil o estéticamente agradable para la comunidad local.

En ambas formas de realización, se colecta el agua tanto del escurrimiento superficial durante la deposición hidráulica como de los puntos de descarga de los canales de arena. A continuación se puede bombear el agua hacia una instalación adecuada de almacenamiento de agua, para su reutilización o eliminación.

En la etapa de construcción, se depositan los canales de arena continuos completamente sobre una capa de relaves. El ángulo de varamiento natural de los relaves, por ejemplo 0.5%, otorga un talud adecuado para el flujo por la gravedad del agua a través del canal de arena. No es necesario que la superficie superior de los canales de arena depositados sea paralela a la superficie inferior, que se forma con el ángulo de varamiento de los relaves depositados

Los canales de arena continuos también pueden adoptar diversas formas.

En una forma de realización, se puede depositar la arena en hileras discretas de arena espaciadas a una distancia de pocos metros y cubriendo alrededor de 20% del área de los relaves o, en otra forma de realización, se deposita la arena de tal manera que los canales se unan, y de esa manera formen una capa de arena continua aunque no necesariamente uniforme a través de la superficie de los relaves.

El elemento clave de diseño para cualquiera de estas formas de realización es la continuidad de los canales de arena, para habilitar el drenaje sin obstáculos a través del canal de arena hasta el punto de descarga del agua.

También son posibles las variaciones de la profundidad tanto de los canales de arena como de las capas de relaves en la estructura.

El diseño preferido para una mina determinada ha de estar en función de las conductividades hidráulicas de la arena y los relaves de finos, además del terreno a rellenar.

La profundidad de la arena en cada canal es por lo general de más de 0,05 m y preferentemente más de 0,5 m, para garantizar tasas de drenaje adecuadas a través de la arena hasta el punto de descarga, y para evitar la “colmatación” del canal de arena. Esta profundidad del canal de arena se puede obtener dentro de las limitaciones de la cantidad de arena generada por el enriquecimiento de gruesos, y no hay restricciones en cuanto al límite superior de la profundidad de arena en un canal.

La profundidad de cada capa de relaves dependerá de la conductividad hidráulica de los relaves y del tiempo disponible antes de la adición de la siguiente capa de relaves. La velocidad de consolidación está en función de la conductividad hidráulica y, en la mayoría de las formas de realización, esto define el tiempo mínimo aceptable para el drenaje de los relaves, antes de la adición de la siguiente serie de canales de arena. Esto, a su vez, determina la velocidad máxima de construcción de la estructura, que puede operar sin necesidad de un muro de dique de contención completamente diseñado.

Debido a la presión de los relaves superpuestos, el agua puede fluir hacia los canales de arena situados por encima o debajo o al costado de los relaves.

En el caso de los relaves típicos de un recurso de cobre, la distancia mínima desde cualquier punto de los relaves hasta el canal de arena más próximo es por

lo general de 1-4 metros. Sin embargo, en el caso de los relaves más finos en que es aconsejable el desagüe, se puede reducir la profundidad de la capa de relaves. A la inversa, en el caso de relaves de más fácil desagüe, la profundidad óptima de la capa de relaves puede aumentar, digamos 10 m o incluso más.

Por lo general, el diseño de la estructura ha de ser tal que la mayor parte del período de desagüe, el caudal de eliminación de agua está restringido por la migración dentro de la capa de relaves, no por la transferencia a través de los canales de arena hasta un punto de captura.

Para garantizar la continuidad de los canales de arena, una alternativa posible es la deposición de estos canales de arena en un diseño de sándwich de múltiples capas y contenidos por un muro de arena, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 1. La estructura de sándwich de múltiples capas ilustrada en la Figura 1 comprende relaves depositados en capas 10, con arena depositada en los canales de arena 12 depositados entre las mismas, contenidos por un muro de arena o roca porosa 14. El agua 16 drena a lo largo de los canales de arena 12, a través del muro de arena porosa 14 y se la colecta en una captura de agua 18. Los relaves contenidos en la capa de relaves 10A en la base de la estructura se consolidan por completo, en tanto que los relaves contenidos en la capa de relaves 10B en la parte superior se saturan.

En una segunda alternativa, se puede generar una serie de canales de arena laterales discretos a través del punto medio de la TSF. Esto está ilustrado esquemáticamente en la Figura 2. Con referencia a la Figura 2A, se depositan capas de relaves 10 sobre las capas porosas de arena 12, con acceso de aire 22 en las capas de arena 12. Con referencia a la Figura 2B, la arena se deposita en hileras discretas de arena espaciadas a pocos metros, para formar así canales discretos 12 in las capas de relaves 10. Volviendo a hacer referencia a la Figura 2A, el agua 20 fluye desde las capas de relaves 10 al interior de los canales de arena 20 y luego fluyen por la gravedad G desde un extremo de deposición D a un extremo de recuperación del agua W de la estructura multicapa.

Un tercer diseño alternativo incorpora el uso adicional de drenajes de canalización vertical, para interconectar los canales o las capas de arena en tres dimensiones a fin de promover una transferencia más rápida del agua a través de la arena y es el ilustrado en la Figura 3. Con referencia a la Figura 3A, las capas de relaves 10 se depositan sobre los canales porosos de arena 12, con acceso de aire 22 en los canales de arena 12. Con referencia a la Figura 3B, la arena se deposita en hileras discretas espaciadas a pocos metros para formar así canales discretos 12, con drenajes de canalización verticales 24, en las capas de relaves 10. Volviendo a hacer referencia a la Figura 3A, el agua 20 fluye desde las capas de relaves 10 al interior de los canales de arena 20 y los drenajes verticales 20, y mediante flujo por la gravedad desde un extremo de deposición D a un extremo de recuperación del agua W. Hay una bomba de desagote 26 situada en el extremo de recuperación del agua D para descargar el agua 28 de la estructura multicapa. Esta estructura 3D es especialmente ventajosa para áreas de deposición de relaves de gran tamaño, o donde los canales de arena son delgados, y donde el tiempo necesario para el flujo lateral del agua a través de los canales de arena hasta un punto de captura del agua puede ser excesivo. Los drenajes verticales 24 facilitan el drenaje descendente a través de la pila y a través de múltiples canales de arena 12 hasta una capa de arena en la base de la pila, que luego puede ser desagotada 28.

En el caso de cualquiera de los posibles diseños geométricos, la superficie de filtrado efectiva para el desagüe de los relaves hacia los canales de arena es grande en comparación con cualquier proceso de filtración mecánica concebible.

En otro grupo de formas de realización, la deposición de los canales de arena sobre una capa de relaves se puede realizar por medios alternativos.

Los canales de arena pueden ser colocados hidráulicamente, donde el agua portadora deposita y arena, y luego drena libremente hasta el punto más bajo para su recuperación. La baja conductividad hidráulica de los relaves subyacentes minimiza todo impacto que la colocación hidráulica pueda tener sobre el contenido de agua total de los relaves de la estructura subyacente parcialmente desagotada.

La colocación progresiva de espigas o deflectores hidráulicos de arena en puntos estratégicos a través de una TSF de gran tamaño permite la cobertura hidráulica de la capa subyacente de relaves en el ángulo de varamiento natural de la arena. Cuando el varamiento de la arena tiene la profundidad indicada, se corre la espiga de deposición o deflector hidráulico de arena para generar la siguiente parte de la red interconectada de canales de arena. Los canales de arena recién depositados otorgan la estabilidad necesaria del suelo para el equipamiento indispensable para mover las espigas o los deflectores hidráulicos de arena. La deposición continua de relaves puede seguir en otras áreas de la TSF, de tal manera que los relaves se depositen junto y sobre los canales de arena.

Esos deflectores hidráulicos de arena pueden ser adquiridos en el comercio. Se puede arrojar una arena de un tamaño p80 de 350 micrones y un contenido de agua de alrededor de 40% de sólidos hasta una distancia de alrededor de 50m para depositar los canales de arena.

Por otro lado, la deposición de la arena se puede realizar en forma mecánica, como por ejemplo mediante camiones y topadoras, o bien mediante deflectores mecánicos de arena.

Una vez formados, se cubren los canales de arena con una capa de relaves, depositada hidráulicamente de manera tal que se minimice el movimiento de los canales de arena durante las primeras etapas de la deposición de relaves.

Para cualquier método de deposición, el acceso Seguro a la superficie de los relaves de la capa más reciente es ventajoso para facilitar la deposición de los canales de arena.

Para lograr esto, se puede dividir el área total de relaves en celdas (“paddocks”), de tal manera que la deposición de los relaves pueda tener lugar en el primer paddock mientras se está drenando un segundo paddock del agua superficial para prepararla para la colocación mecánica de la arena. Este drenaje puede acelerarse mediante equipos tales como el Amphirool (referencia 7, 8). El tercer

paddock es donde se está llevando a cabo la deposición de arena. Se ilustra esquemáticamente un ejemplo de esto en la Figura 4. Con referencia a la Figura 4A, en esta forma de realización hay tres paddocks P1, P2, y P3. En P1, se deposita arena y se levantan murallas. En P2, se drena el agua y se prepara una superficie estable de relaves y en P3 se depositan los relaves 10. Con referencia a la Figura 4B la estructura comprende capas de relaves 10, canales porosos de arena 12 con acceso de aire 22, y el agua 20 drena desde los canales 12. Volviendo a hacer referencia a la Figura 4A, se recupera el agua superficial 30 en P1, se recupera el agua superficial y del canal 32 en P2, y el agua del canal 34 se recupera en P1. Una vez que cada paddock ha completado su ciclo de deposición o drenaje, se puede hacer rotar el orden de las actividades.

En otra alternativa de colocación, utilizada típicamente donde la superficie de los desechos de relaves subacuáticos está “anegada”. Un vehículo anfibia deposita la arena, que cae a través de la capa superpuesta hasta la superficie de los relaves para crear los canales de arena. Una vez formado un canal de arena continuo hasta el punto de recolección, se puede tapar la arena con otra capa de relaves. Una vez depositados, los relaves forman un sello al agua en la superficie del dique, se puede desaguar el canal de arena sumergido, junto con sus capa de relaves subyacente y superpuesta. Aunque no se obtiene un desagüe total, esta alternativa aumenta la densidad de los relaves subacuáticos subyacentes.

En todas las formas de realización, dentro de las capas apiladas de relaves y arena, se filtra con eficacia el agua intersticial de los relaves en la interfaz de los relaves y el lecho de arena, clarificando el agua para su reutilización o desecho.

También hay formas de realización en las cuales se utiliza la estructura para obtener objetivos adicionales a las metas primarias de recuperación de agua en forma estable

Se pueden incorporar técnicas de detección a la instalación; como por ejemplo fibra óptica y tecnología de detección remota por medio de drones, para

monitorear el contenido de humedad de la instalación en tiempo real, aportando un nivel de confianza con respecto a la integridad geotécnica.

Este control mejorado implica que el área de deposición de relaves también puede ser diseñada como almacenamiento intermedio de agua, ajustando el caudal de requerimiento de agua desde los puntos de captura.

En una segunda forma de realización de este tipo, se puede utilizar la invención para rellenar zonas agotadas por la minería, o donde se debe formar un paisaje determinado para aplicaciones estéticas o prácticas. Los ejemplos podrían ser la fusión con la topografía natural o la formación de tierra agrícola, o bien la creación de áreas de recreación para uso de la comunidad local.

La invención se puede utilizar asimismo para complementar prácticas de TSF existentes, o para estabilizar TSF históricas. Las zonas críticas de las TSF históricas están situadas adyacente y dentro de los muros del dique, donde las zonas de relaves insaturados pueden causar el fallo del muro del dique, que luego libera grandes volúmenes de los relaves contenidos.

El exceso de arena procedente del enriquecimiento de gruesos puede ser colocado selectivamente en canales de desagüe a través de la TSF histórica, por ejemplo mediante excavación y relleno del agujero con arena permeable. Mediante el desagüe de estos canales, se puede reducir el contenido de agua de los relaves cerca del muro.

Si se desea un desagüe y compactación más extenso en una TSF histórica, la cortina de arena de los drenajes verticales se puede replicar en la tercera dimensión, alejándose del muro del dique.

Para una TSF operativa, simplemente se pueden colocar los canales de arena descritos en la presente invención en canales de desagüe situados en las proximidades del muro. Con una “cortina bidimensional” de canales de arena de drenaje en la proximidad del muro del dique, el agua debe fluir desde las

potenciales zonas insaturadas a un punto de captura del agua, de donde puede ser extraída de la TSF. De esa manera, la invención puede desaguar la zona más sensible para seguridad del dique de relaves, permitiendo así el uso seguro de métodos de construcción del dique realizados anteriormente.

Como ya se mencionó, un proceso preferido de enriquecimiento de gruesos es la flotación de partículas gruesas (CPF).

En el caso de un proceso de flotación de partículas gruesas:

- se tritura la mena en un dispositivo triturador;
- se clasifica el mineral triturado en un dispositivo de clasificación para obtener una fracción clasificada adecuada para seguir triturando, una fracción clasificada adecuada para la flotación de gruesos y una fracción clasificada adecuada para la flotación de finos;

- la fracción adecuada para la flotación de gruesos es sometida a flotación de gruesos para obtener un concentrado intermedio y un residuo de arena gruesa;

- se utiliza el residuo de arena gruesa como fracción de arena para formar los canales continuos a través de la fracción de relaves;
- se muele el concentrado intermedio a un tamaño adecuado para la flotación de finos;

- a continuación se somete a la fracción clasificada adecuada para flotación de finos y la fracción intermedia molida a flotación de finos para obtener relaves finos que son espesados y depositados de la manera antes descripta.

Por medio de este proceso de enriquecimiento de gruesos se mantienen recuperaciones elevadas del componente de valor de la mena, y se genera un residuo de arena en la cantidad y tamaño adecuados.

BENEFICIOS QUE OTORGA LA PRESENTE INVENCION

Los beneficios de la invención se pueden comparar con la filtración y apilamiento en seco, o bien con un método de TSF convencional para la eliminación de relaves.

En climas cálidos y muy secos, el apilamiento en seco de los relaves se lleva a cabo colocando hidráulicamente delgadas capas (por lo general de menos de 30 cm) de relaves no segregantes de un espesante de alta densidad o espesante en pasta y luego dejando que sequen en el curso de un período de semanas mediante procesos evaporativos, antes de agregar la siguiente capa fina de relaves. No se recupera el agua usando esta técnica y la altura de la estructura es limitada. Usando el método de la presente invención la estructura multicapa de relaves puede tener decenas de metros de altura, más de 50m o más de 100 m de altura.

Otro método de apilamiento en seco consiste en filtrar los relaves hasta que tengan un contenido de agua aceptable (típicamente de alrededor de 15% en peso), luego transportar mecánicamente los sólidos hasta una zona de eliminación y apilar los relaves parcialmente desaguados. Esta técnica recupera la mayor parte del agua, aunque es costosa y los relaves filtrados aún son susceptibles de “extrusión” si las tasas de evaporación son insuficientes. Esos relaves filtrados requieren grandes extensiones de tierra plana o la colocación dentro de la estructura de un dique para contener los relaves filtrados.

Con respecto a cualquiera de estos métodos de apilamiento en seco, la presente invención ofrece múltiples ventajas. Estas incluyen el bajo costo de la colocación hidráulica de los relaves, la recuperación de la mayor parte del agua, una tasa de elevación aumentada de la pila y la estabilidad geotécnica necesaria para construir una estructura de residuos más alta, así como un método que es menos sensible a la variación operativa y climática.

Con respecto a una TSF convencional TSF, la presente invención también ofrece múltiples ventajas.

La ventaja principal es una reducción del consume total de agua. El agua intersticial contenida en los relaves es la principal forma de pérdida de agua en cualquier mina. Dependiendo de las pérdidas evaporativas, el consume de agua en los relaves utilizando la presente invención se reduce al menos a la mitad, y más probablemente se reduce a alrededor de 20% de la pérdida de agua en la TSF convencional. Particularmente en zonas con deficiencia de agua, esto ofrece el potencial de diseñar y operar una mina con un consumo de agua mucho menor por unidad de metal producido.

Una segunda ventaja importante es la altura de los relaves insaturados presentes en cualquier momento dado durante la deposición, eliminando el potencial de fallo del muro y licuación catastrófica de la masa de relaves contenida. Esta capacidad para generar relaves insaturados reduce la superficie del terreno que en última instancia va a ser afectada para la colocación de los residuos, y en el caso de algunas minas, permite la colocación de almacenamientos de relaves en un sitio mucho más próximo a la planta de procesamiento. También da lugar a una aplicación más segura de las murallas de contención proceso arriba.

Una tercera ventaja es una instalación de relaves mineros permanentemente estable. El contenido de humedad y las características de drenaje de la invención permiten el acceso y restablecimiento de la vegetación de la superficie de la estructura. Los relaves se habrán desaguado lo suficiente para comportarse de manera similar a otras partes de suelo insaturado alrededor de la mina. El contenido de sulfuros se habrá reducido en el residuo de arena mediante el enriquecimiento de gruesos. Al final de la vida útil de la mina, se puede eliminar todo potencial adicional de drenaje de ácido de la mina desde los relaves, sellando el acceso de aire a los canales de arena en los relaves.

Una cuarta ventaja es la oportunidad de rellenar las áreas agotadas por la mina. En el caso de la minería en franjas, esto habilita un proceso sucesivo de minería y

colocación de los canales de arena y capas de relaves en las áreas agotadas histórica o recientemente. En el caso de la minería en pozo profundo, existe el potencial de recuperar y reemplazar la arena y los relaves que han sido almacenados por separado en el pozo agotado al final de la vida útil de la mina.

Una quinta ventaja es la capacidad para depositar relaves y tal vez tanto arena como relaves hidráulicamente, sin filtración y transporte anteriores, y de todos modos obtener un almacenamiento de relaves “seco con uso eficiente del agua”. Los costos de capital y operativos de la deposición hidráulica que posibilita la presente invención son significativamente menores que la filtración y apilamiento utilizando transportadoras o camiones.

Una sexta ventaja es la de producir una geoforma de valor mientras se desechan residuos mineros de manera segura y ambientalmente consciente. Esto podría tomar la forma de recreación de la flora original, o de tierra agrícola o recreativa, o simplemente geoformas estéticamente más agradables.

Una séptima ventaja es la flexibilidad para situar el almacenamiento de relaves en terreno adyacente a la planta de procesamiento, en lugar de encontrar un valle adecuado para la eliminación de los relaves en una planta de almacenamiento de relaves convencional. Al hacerlo de esa manera, se elimina el elevado costo del muro de contención de los relaves que debe estar diseñado para contener una suspensión licuable a perpetuidad.

Una octava ventaja es el uso de parte de los canales de arena para almacenar el agua para su uso posterior, y por ende moderar la variación climática estacionaria u otra variabilidad en el acceso al agua.

EXPERIMENTAL

Se llevaron a cabo experimentos para recuperar los valores usando una mezcla de flotación de partículas gruesas y flotación, y por ende generar una fracción de residuo de arena de la flotación de partículas gruesas y las fracciones de relaves

de la flotación de un mineral de cobre chileno, y un mineral del grupo de metales del platino (PGM, por sus siglas en inglés) de Sudáfrica.

En el caso de ambos minerales, se llevaron a cabo ensayos de flotación de partículas gruesas con un tamaño de partícula en que la recuperación global del metal era comparable con la obtenida por la molienda más fina y la flotación convencional.

Se recuperó 25% del mineral de PGM en la fracción de arena, y se recuperó 35% del Cu en forma de arena.

La distribución de tamaños de las dos fracciones, como se consigna en la tabla siguiente, ilustra la remoción eficaz de finos del componente de arena que tiene lugar durante la flotación de partículas gruesas, dando lugar a una permeabilidad elevada de ambas arenas.

La relatividad de los tamaños de las dos fracciones cumple con el “Criterio de Filtro de Terzaghi” para zonas discretas coexistentes, sin que la permeabilidad de la arena se vea inhibida por la infiltración de una cantidad excesiva de finos en los relaves.

	Tamaños del mineral de Cu (micrones)	Tamaños del PGM (micrones)
P80 de la arena	600	280
P10 de la arena	150	120
P80 de los relaves	200	100
P10 de los relaves	3	3
	Permeabilidad del mineral de Cu (m/s)	Permeabilidad del mineral de PGM (m/s)
Relaves	$4.4 \cdot 10^{-7}$	$7.2 \cdot 10^{-8}$

Se llevaron a cabo ensayos de tiempo de asentamiento, asentamiento drenado y carga hidráulica decreciente para caracterizar tanto la arena como los componentes de relaves de ambos minerales.

En la Figura 5 se ilustra el impacto de la relación de vacíos de los relaves de cobre en la permeabilidad obtenida durante estos ensayos.

Se modelaron los resultados de los ensayos con ambos sistemas para calcular el espesor máximo de una capa de relaves que se puede colocar, y mantener a la vez un tiempo de consolidación aceptable para el apilamiento hidráulico en seco de una estructura.

Este modelado demuestra que se debe producir el 90% de la consolidación dentro de los 3 meses en el caso de una capa de 3 m de espesor de relaves de cobre y en el caso de una capa de 10 m de espesor de relaves de PGM.

El desagüe continuo satura la arena y los relaves, convirtiendo a la estructura en suelo geotécnicamente estable.

También se llevó a cabo un ensayo piloto tridimensional en mayor escala para validar el modelado de laboratorio.

Se colocaron tres capas de relaves de 0,35 m de espesor y 2 capas de 0,2 m de arena de los relaves de PGM en un tanque Perspex cuadrado de 1 m² y se las dejó desaguar desde 5 puntos de descarga situados en cada borde de cada capa de arena. Se midió la velocidad de consolidación, las presiones de poro, el contenido de agua y los caudales de descarga para confirmar el modelado en una escala ligeramente mayor.

El ensayo a mayor escala demostró la capacidad para mantener los relaves en zonas discretas durante la deposición.

Este ensayo también demostró el desagüe de los relaves adyacentes hacia la capa de arena y la migración hacia los puntos de descarga del agua, para obtener velocidades de consolidación consistentes con el modelado expuesto.

El agua recuperada de la capa de arena carecía de limo.

REFERENCIAS

1. Proceedings Tailings y Mine Waste 2015 Vancouver, BC, 26 al 28 de octubre de 2015
2. WO2018/234880
3. WO2017/195008
4. US3767050A
5. ICOLD (International Committee of Large Dams) 121 (2001), Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences (Sección 2, página 17 - "The filter under-drainage system is a critical facility that has often been overlooked in the past, resulting in dangerously high phreatic surfaces within the body de los tailings dam. As is well known, the outer slopes of a tailings dam are very sensitive to the level of the phreatic surface. Capillary rise above the measured position of the phreatic surface can make los tailings in this zone to be close to full saturation. This condition can produce unexpectedly large rises of the phreatic surface from remarkably small amounts of rainfall.")
6. US 9188389 B2.

El contenido de las Referencias precedentemente citadas se incorpora a la presente como referencia.