

Angel Mateo<sup>1</sup>, Edwin Asencios<sup>2</sup>, Bryan Oré<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Autor, Av. Pedro Ayala 245. Santa Cruz de Flores, Cañete, Lima, Perú (amateo@colquisiri.com.pe)

<sup>2</sup> Coautor, Calle Gregorio Montes N° 176, San Juan de Miraflores, Lima, Perú (easencios@colquisiri.com.pe)

<sup>3</sup> Coautor, Jr. Cotosh Mz. L1, Lt. 34, Urb. Mangamarca baja, San Juan de Lurigancho, Lima, Perú (bore@colquisiri.com.pe)

## RESUMEN

La operación de Minera Colquisiri S.A. está ubicada en la provincia de Huaral, inicia sus operaciones en el año 1985. Su sostenibilidad se basa en su sistema integrado de gestión (SIG) y una armoniosa convivencia con la agricultura. Es un yacimiento del tipo sulfuros masivos volcanogénicos (SMV), donde predomina cuerpos de mineral lenticulares, predomina el tipo de roca IIIB, a IIIA. Actualmente viene explotando el cuerpo Sofía D como principal cuerpo mineralizado, con una producción diaria de 1600MT, la cual es procesada en la planta concentradora de minerales polimetálicos. Cuenta con un depósito de Relaves operación y recircula el agua del proceso de sus operaciones en su totalidad.

El método de minado aplicado es el sublevel stoping con relleno cementado. La secuencia del minado establecido es minar los tajeos primarios y posteriormente los tajeos secundarios, los tajeos primarios tienen una dimensión de 20-25 metros de largo, 12-16 metros de ancho y 25 metros de altura, previo estudio geomecánico y análisis de estabilidad para garantizar la explotación de tajos en condiciones estables. Este método de minado permite recuperar el total de las reservas de mineral.

La explotación de mineral es totalmente mecanizada, emplea equipos jumbos con longitud de barra de 14 pies para labores de avance y perforación de cámaras, equipos Longhole de perforación con longitud de perforación de 17 metros largo (verticales y en paralelo), cargadores de bajo perfil a control remoto de 6 yd<sup>3</sup>, los cuales alimentan a volquetes de 40 ton de capacidad.

La voladura de los tajos de producción se realiza en 3 etapas: La primera, en la cual se dispara la chimenea, luego el slot, y finalmente las filas de producción utilizando detonadores electrónicos.

El espacio vacío del tajeo generado por la explotación del mineral es rellenado con un concreto de baja resistencia que corresponde a una mezcla de agregados

clasificados con cemento, los agregados corresponden a desmante de mina que son previamente triturados en una planta de chancado. El requerimiento de resistencia compresiva requerido es de 0.60Mpa a 60 días.

Para la producción de relleno cementado se tiene instalado una planta de concreto de 100m<sup>3</sup>/hr de capacidad, la cual trabaja con Agregados finos,

Agregados gruesos (con una proporción de 35 y 65% respectivamente), cemento (4.6% respecto al peso de agregado) y agua. Estos elementos son mezclados y luego depositados directamente a los volquetes para su colocación en campo mediante tolveo hasta tener un avance de 60-70% del volumen y un 30-40% se realiza con apoyo de scoop constante debido al tiempo de fraguado.

## 1. Introducción

El método de explotación Sub level stoping aplicado en minera Colquisiri consiste en minar los tajeos primarios y posteriormente minar los tajeos secundarios. Este método de explotación permite tener una alta recuperación de mineral.

El objetivo del presente documento es proponer una alternativa de explotación de mineral para cuerpos masivos utilizando el método de Sublevel Stoping utilizando Relleno Hidráulico Cementado (en adelante RHC) para la recuperación de pilares en su totalidad.

## 2. Ubicación, acceso y clima

La Mina María Teresa se encuentra ubicada al Norte de la ciudad de Lima a 8 km al Oeste de la ciudad de Huaral, en el distrito y provincia de Huaral, departamento de Lima. El área principal de las instalaciones de la mina se encuentra en las siguientes coordenadas UTM (GWS84):

Norte	:	8'728,360
Este	:	252,140

La altitud promedio es de 150 msnm.



Fig. 1. Ubicación de la Mina (U.E.A.) María Teresa.

El acceso es a través de la carretera Panamericana Norte, desde la ciudad de Lima 82 km hasta la ciudad de Huaral, y de esta a la mina es a través de una carretera afirmada de 11 km.

El clima es cálido con temperaturas elevadas durante el verano, en el invierno se presentan precipitaciones reducidas con un incremento de la humedad, durante el año el promedio de la humedad relativa es de 93 %.

### 3. Marco Geológico

#### 3.1. Geomorfología

La zona de la mina está ubicada en una cadena de cerros bajos adyacentes a las llanuras costeras que forman parte del cono aluvial del río Chancay, cerca al litoral.

Morfológicamente es de suave pendiente, con hondonadas, colinas aisladas y depresiones. Estructuralmente los llanos costeros están formados por rellenos en depresiones tectónicas alineadas a la costa; y litológicamente por gravas, arenas y arcillas aluviales, así como acumulaciones de diverso espesor de arenas eólicas.

#### 3.2. Geología Regional

Regionalmente afloran 2 agrupaciones litológicas principales (Figura 2):

Secuencia volcanosedimentaria, que consta de dos secuencias distintas. La secuencia inferior, que corresponde a la Formación Pamplona y Atocongo, que es una sucesión sedimentaria de calizas, limolitas y areniscas finas de tonalidades grises a rojizas. Ambos son de origen marino. La secuencia superior, que es el Grupo Casma del Cretáceo Superior (Maastrichtiano), y

regionalmente es una secuencia volcanosedimentaria marina, pero en el área de la Mina María Teresa solo son volcánicos submarinos, evidenciado por brechas hialoclásticas de composición andesítica, así como la presencia de lavas almohadilladas.

El Batolito de la Costa, formado por varias superunidades intrusivas siendo la más antigua la Superunidad Patap que está conformada por gabros y gabrodioritas equigranulares, la segunda, es la Superunidad Jecuán que consta de granodioritas o monzogranitos, ambas superunidades tienen dataciones referenciales, se ha estimado que están en 110 y 120Ma, respectivamente (Romero et al., 2008).

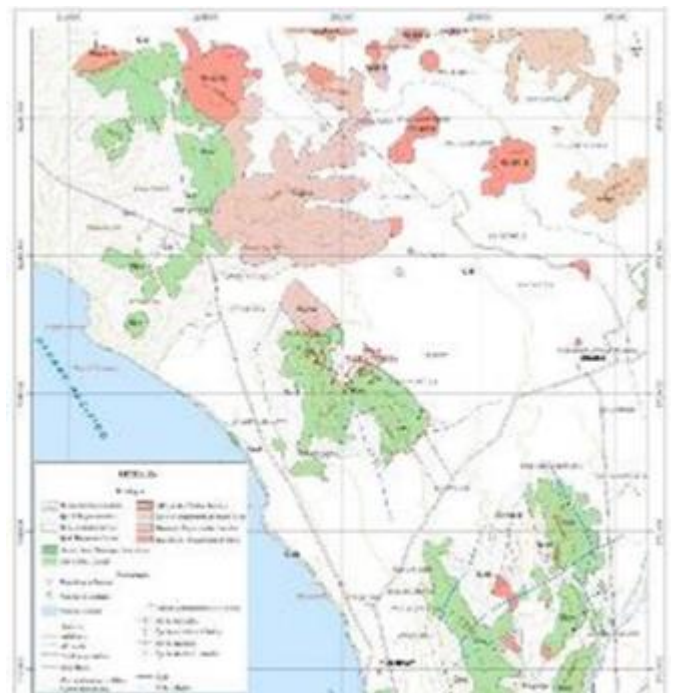


Fig. 2. Geología regional.

#### 3.3. Geología local

La litología principal son rocas volcánicas y subvolcánicas de composición andesita basáltica a andesítica, que en parte forman diques de dirección N150E subverticales. Algunas rocas extrusivas son félsicas. La secuencia es atribuida al Cretáceo terminal (Romero et al., 2008). El conjunto es cortado por diques dacíticos a riódacíticos, también de dirección N150E y subverticales. Según el diagrama Zr-Y-Nb de Wood (1980), estas rocas, incluyendo los diques félsicos, pertenecen a la serie calco-alcalina. Las andesitas basálticas y andesitas muestran textura afanítica, localmente porfídica con fenocristales milimétricos de plagioclasa y anfíbol. En general, no se reconocen límites claros entre diferentes coladas volcánicas. Texturas amigdaloidales y autobrechas son frecuentes. En la parte superior de la secuencia volcánica se observan pillow lavas y hialoclastitas, en

parte dentro de brechas caóticas, típicas de colapso de un edificio volcánico.

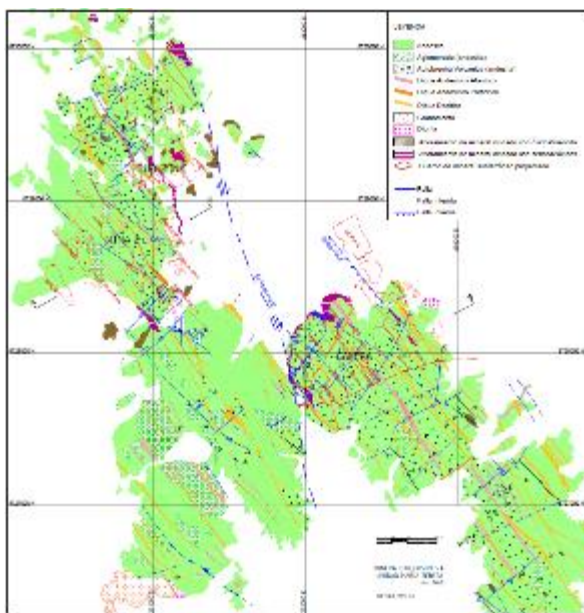


Fig. 3. Plano geológico local

Afloramientos de granodiorita, diorita y tonalita de decenas a centenares de metros de diámetro se observan al E del yacimiento y están alienados en la misma dirección que los diques (N150E).

Se han reconocido dos fallas principales en el área. La falla de rumbo El Abra, subvertical y de orientación aproximadamente N160E y con 2 m de panizo ha desplazado el sector de Calera unos 500 m hacia el S respecto Mina 2 y Bubulina (Fig. 1). En Calera, la disposición de la mineralización y roca encajante requiere de la existencia de la falla inversa Sofia con orientación N140E que desplaza el bloque W sobre el E unos 90 m en sentido vertical. Fallas inversas regionales de esta dirección andina han sido descritas por Romero (2007) en la región costera del Perú central.

### 3.4. Mineralización y alteración

El yacimiento de María Teresa está principalmente constituido por cuerpos de sulfuros masivos lenticulares, cuyos ejes longitudinales tienen una orientación preferente N150E (Fig. 3). Los cuerpos tienen forma irregular, en parte con "raíces" a favor de estructuras N150E de alto ángulo buzando tanto al E como al W (Fig. 4), que se interpretan como canales de alimentación (feeders) que localmente muestran stockwork y estructuras bandeadas de sericita. La mineralización es casi exclusivamente por reemplazamiento, en parte masivo, de las lavas de composición de andesita basáltica y andesita y, en menor medida, de sills y diques de la misma

composición. Los cuerpos gradan lateralmente y, en profundidad a mineralización en vetillas con leyes más bajas.

Una característica descollante es que los cuerpos de sulfuros masivos al W de la falla Sofia se ubican a cotas que definen un "nivel prospectivo" subhorizontal a la escala del yacimiento (entre las cotas 25 y 200 m.s.n.m. en Calera y entre las cotas -20 y 200 en Mina 2 y Bubulina; Fig. 4). Al E de la falla Sofia, el nivel prospectivo, en el que se encuentra el cuerpo Sofia D, está hundido unos 90 m (Fig. 4).

Uno de los cuerpos de mayor volumen que aporta a la producción es el cuerpo Sofia D, su geometría es lenticular cuya longitud en dirección de su eje mayor (N150E) es de 700 m., 200 m. de ancho, alturas que van desde 70 m. al SW, hasta unos pocos metros al NE. El contacto techo al SW del cuerpo está limitado por la falla inversa Sofia y al NE tiene pendiente suave de 20-30° hasta el contacto con el intrusivo granodiorítico. Siguiendo el lineamiento (N150E) al NW de Sofia D entre las cotas +20 y -40 m.s.n.m. se encuentra una nueva zona mineralizada en exploración de más de 300m. de longitud denominada cuerpo Sofia E.

Los principales minerales económicos son esfalerita, tetraedrita-tenantita (con contenido de Ag, y más As que Sb), calcopirita, galena. Se han identificado también proporciones menores de bourbonita, arsenopirita y trazas de covellita alterando calcopirita. Pirita y, en partes, barita de grano fino a grano medio son abundantes. Los cuerpos de sulfuros masivos presentan típicamente al piso vetilleos irregulares de cuarzo-pirita±esfalerita gradando hacia el techo a bandas y lentes masivos de pirita-esfalerita-galena (Fig. 4). El cuerpo Sofia D y el cuerpo Sofia E, al E de Calera, es principalmente de sulfuros masivos con una zonación clara de Cu (en calcopirita) a Zn-Pb-Ba de piso a techo.

Las reservas minerales están en 4'500,000 TM con 1.8 oz/tm. Ag, 0.82 % Pb, 7.6 % Zn, 1.2 % Cu.

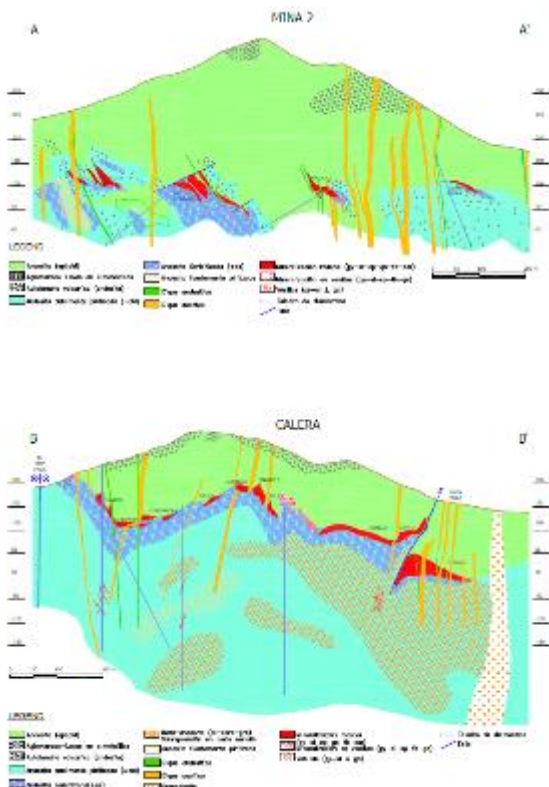


Fig. 4. Secciones geológicas

## 4. Geomecánica

### 4.1. Zonificación geomecánica

El macizo rocoso de minera Colquisiri se zonifica en 3 dominios estructurales (DE), teniendo en cuenta sus características estructurales y mecánicas similares.

- En el mineral, se presentan principalmente los dominios: DE-II, DE-III A y DE-III B (con predominio del DE-III A). Además, existe una mínima presencia del DE-IV A en su mayoría ubicada en el extremo NW superior del Cuerpo Sofía D.
- En la caja inmediata, se presentan principalmente los dominios: DE-II, DE-III A y DE III B (con predominio del DE-III A). Con respecto al mineral, existe un mayor porcentaje del DE-II y un menor porcentaje del DE-III B. Además, existe una mínima presencia del DE-IV A en su mayoría ubicada en el extremo NW superior de la caja inmediata.
- En la caja alejada, se presenta principalmente los dominios: DE-II y DE-III A (con predominio del DE-III A). Además, los dominios DE-III B, DE-IV A y DE-IV B ubicados en su mayoría en zonas alledañas a superficie.

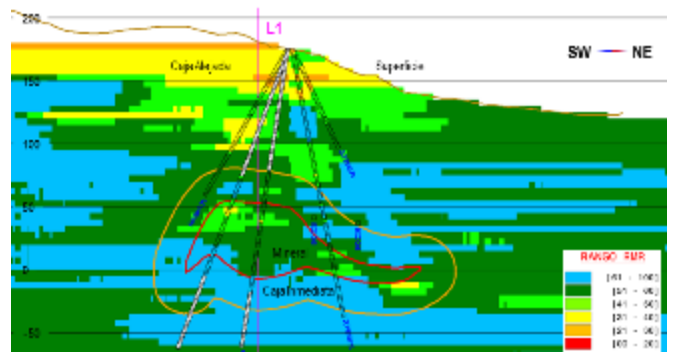


Fig. 5. Zonificación geomecánica cuerpo Sofia D (Fuente: Estudio geomecánico DCR Ingenieros S.R. Ltda, 2018)

### 4.2. Dimensionamiento de Tajeos

Para el dimensionamiento de tajeos se realizó mediante el método gráfico de estabilidad.

Dimensionamiento de tajeos en roca de tipo IIIA.

Tajo	Dimension Tajo			N°			
	Long	h	Ancho	Techo	Pared Sur	Pared Norte	Pared O E
Dimension Maxima	20	25	12	5.70	13.92	5.42	3.73
<b>IIIA</b>	Q'	A	B	C	N		
Techo Tajeo	3.39	1	0.84	2.0	5.70		
Pared Sur Tajeo	3.39	1	0.93	4.4	13.92		
Pared Norte Tajeo	3.39	1	0.2	8.0	5.42		
Pared Este Tajeo	3.39	1	0.2	5.5	3.73		
Pared Oeste Tajeo	3.39	1	0.2	5.5	3.73		

Fuente: Departamento de planeamiento MCS, 2022

### Grafico de Estabilidad

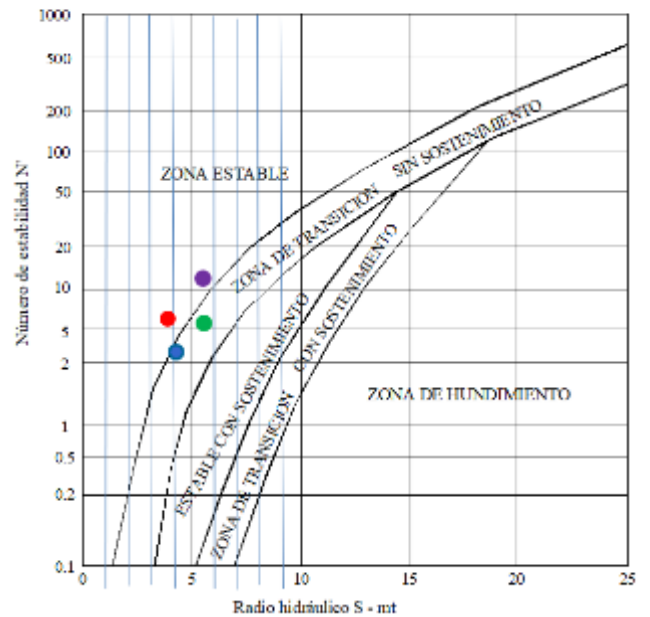


Fig. 6. Analisis de estabilidad paredes y techo del tajeo (Fuente: Departamento de planeamiento MCS, 2022)

Como se evidencia en el análisis los tajeos son estable sen macizo rocoso de tipo IIIA, que es el tipo de roca que predomina en el DE del mineral.

## 5. Sub Level Stoping en Minera Colquisiri

Este método se aplica en yacimientos masivos, mantos de gran potencia y vetas angostas, generalmente se aplica en yacimientos verticales, de buzamiento mayor a 60° que tengan formas y dimensiones regulares y calidad de mineral rentable, consiste en arrancar el mineral a partir de subniveles, que pueden ser divididos en cámaras separados por pilares que posteriormente se pueden recuperar.

La roca circundante y mineralizada deben tener buenas condiciones de estabilidad, ser suficientemente competentes o autoportante, firmes y estables.

Este método es bastante versátil, productivo y seguro, con buena recuperación y selectividad del mineral, que permite obtener una explotación sostenida y a gran escala; con bajos costos operativos frente a otros métodos de minado, esto básicamente por su alta productividad.

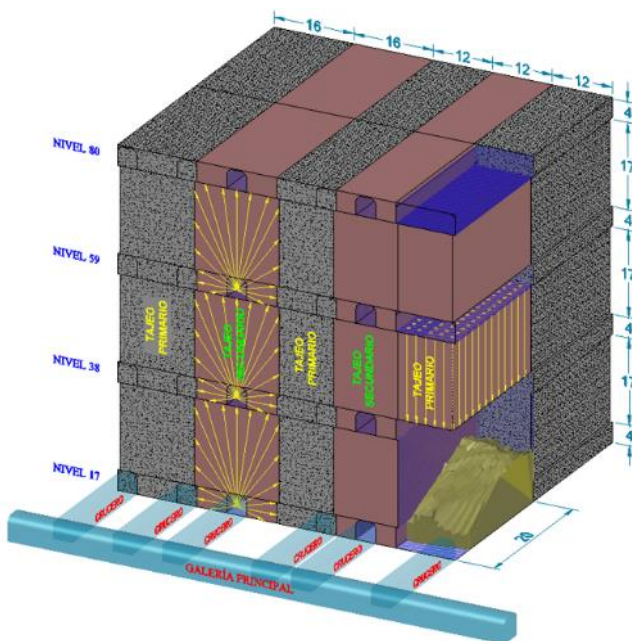


Fig.7. Aplicación del Sublevel Stopping en Minera Colquisiri

### Características

- Método de alta producción
- Se aplica a cuerpos con cajas competentes con dimensiones regulares
- Producción por tajo de más de 20.000 ton/mes.
- Método no selectivo
- Método de bajo costo

### 5.1. Preparación y Desarrollos

La preparación del minado comprende niveles y subniveles de extracción, dimensionados conforme a los requerimientos de los equipos, la ventilación, y la geomecánica de las labores. Estos niveles y subniveles servirán como puntos de extracción del mineral luego de la voladura de producción.

Las labores de desarrollo comprenden labores permanentes como rampas, galerías principales, estocadas, cámaras de carguío y chimeneas de ventilación. Estas labores cumplen funciones vitales para una adecuada extracción de material.

### 5.2. Perforación y Voladura

#### 5.2.1 Perforación

En los tajos primarios se realizan taladros verticales, con longitud de 15 diámetros de 64 mm y con burden-espaciamiento de acuerdo a las características del macizo rocoso. Para un control de límites de tajeo y verticalidad de sus paredes se realizan taladros de precorte con un espaciamiento de 0.6 metros.

Para tajos secundarios se realizarán perforaciones radiales con burden-espaciamiento de acorde a las características del macizo rocoso.

La voladura en los tajos primarios y secundarios se realiza en 3 etapas, la primera etapa comprende voladura de la chimenea, segunda etapa voladura de zanja y finalmente voladura de las filas de producción usando detonadores electrónicos.

En esta etapa se garantiza una fragmentación adecuada y verticalidad de las paredes del tajo para garantizar la estabilidad de RCAF al momento de su exposición.

En la siguiente figura se aprecia la configuración estándar tienen los tajos al ser perforados verticalmente. Se utilizan mallas en configuración triangular para optimizar la secuencia de voladura y se utilizan precortes cargados alternadamente para cuidar las cajas que serán expuestas para la recuperación de los pilares (tajos secundarios).

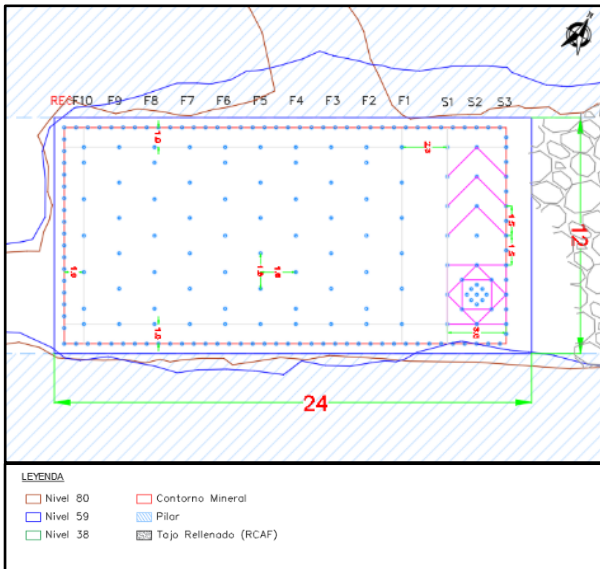


Fig.8. Malla de Perforación Típica en Tajos Principales

Por otro lado, se considera el mapeo geológico

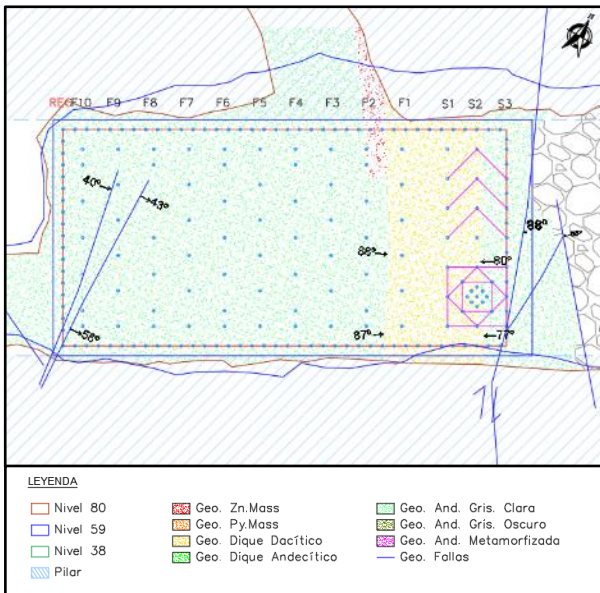


Fig.9. Malla de Perforación con mapeo geológico

Adicionalmente se considera el mapeo geomecánico tanto en ambas cámaras (superior e inferior), esto para considerar operativamente cualquier contingencia por fallas, discontinuidades, tipo de roca, etc. tanto para la perforación de taladros como para la voladura de chimenea, slot o filas de producción. En las siguientes imágenes se aprecia los mapeos considerados en el diseño de las mallas de perforación.

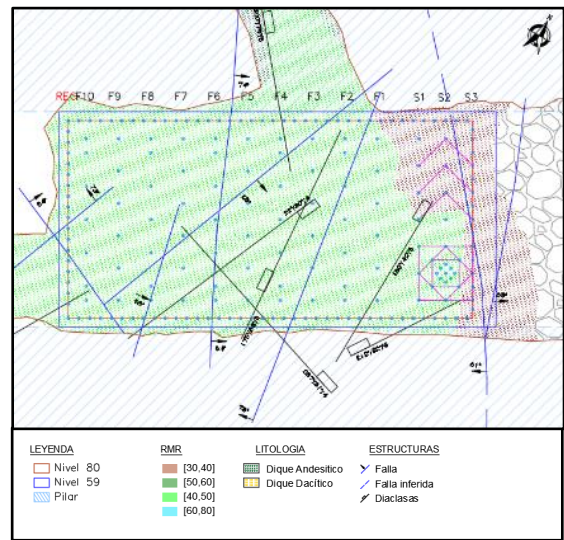


Fig.10. Malla de Perforación con Mapeo Geomecánico (Cámara superior)

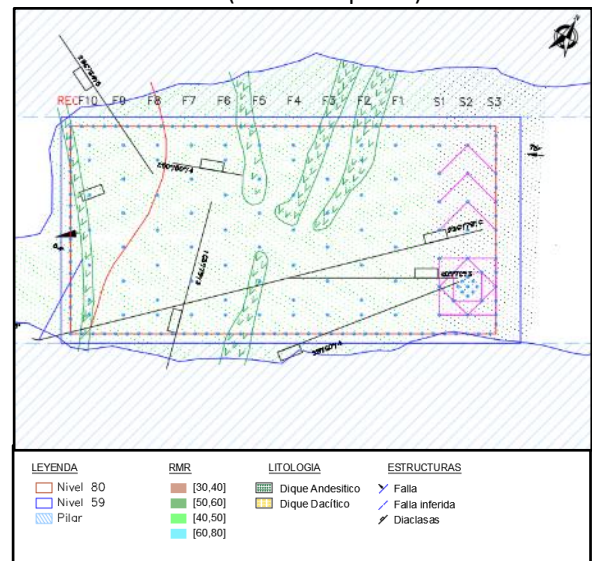


Fig.11. Malla de Perforación con Mapeo Geomecánico (Cámara inferior).

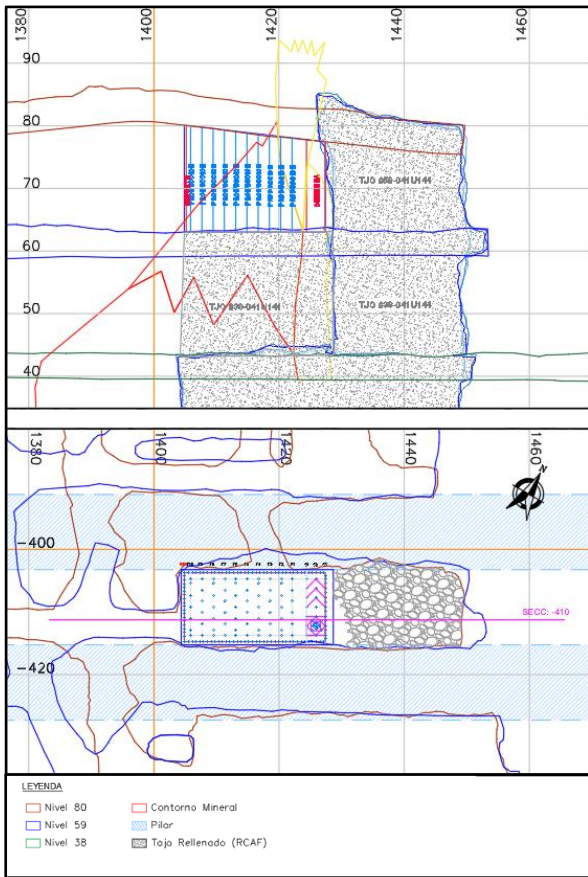


Fig.12. Vista en sección de malla de perforación

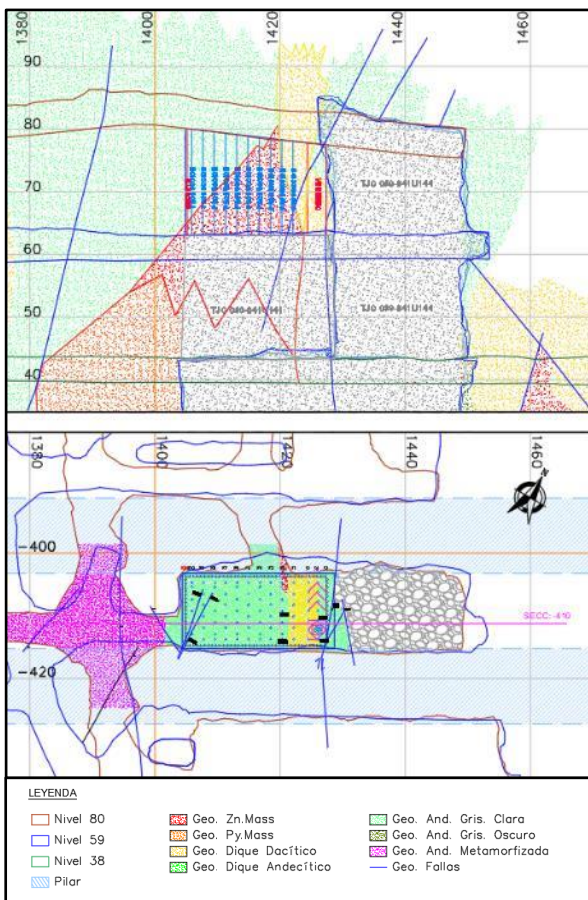


Fig.13. Vista en sección del tajo con mapeo geológico

Para la recuperación de los pilares, la perforación se hará en sentido positivo y en abanico. En la siguiente figura se muestra una simulación de las perforaciones que se realizarán para el tajeo de los pilares. Inicialmente se realizará el desquinche de la cámara superior (Nv. 80) y los realces en el techo que sean necesarios para asegurar la explotación total de las reservas de mineral. Luego se realizan perforaciones en abanico desde el nivel inmediato inferior en sentido positivo de manera secuencial hasta llegar a la base del cuerpo.

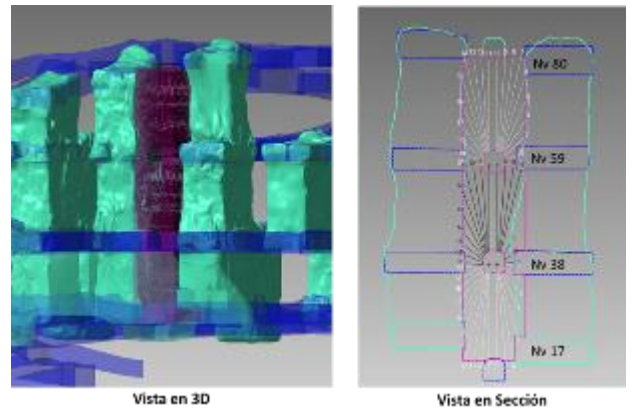


Fig.14. Vista en sección malla de perforación en abanico

### 5.2.2 Voladura

El carguío y el secuenciamiento de los taladros se realizará considerando el tipo de roca y las condiciones geomecánicas de cada tajo. En la siguiente figura se aprecia el carguío estándar para los tajos de producción primarios y su respectivo secuenciamiento. Para el caso de las filas de producción se utilizarán detonadores electrónicos los cuales permiten programar los tiempos de retardo con mucha exactitud, esto para garantizar una óptima detonación.

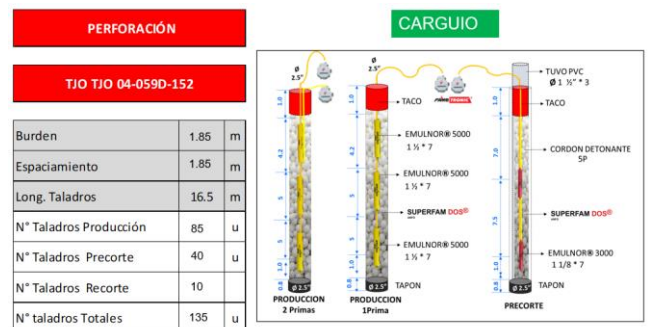


Fig.15. Esquema de carguío de taladros



Fig.16. Secuencia de carguío de taladros

### 5.3. Transporte de mineral

En el transporte de mineral se utilizan volquetes de 25 y 40tm los cuales son alimentados por equipos de bajo perfil como scooptrams dentro de las cámaras de carguío. Posteriormente los volquetes se desplazan a través de la rampa de salida hacia las plataformas de mineral ubicadas en superficie.

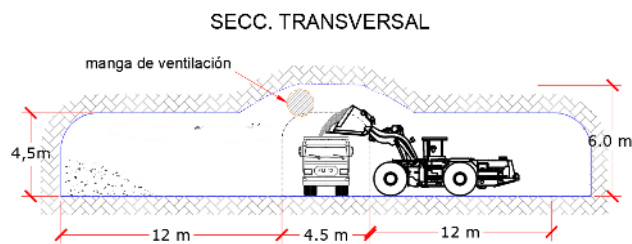


Fig.17. Plano en sección de cámara de carguío

### 5.4. Sostenimiento

En el método sublevel stoping es muy importante tener condiciones de estabilidad tanto en las cajas como en la zona mineralizada de tal modo que sean autoportantes dentro del tiempo estimado que serán expuestas, en su defecto se utilizarán los elementos de sostenimiento necesarios para garantizar.

Tanto los niveles como los subniveles de producción de los tajos se sostienen según el requerimiento y evaluación hecha por el área de Geomecánica. Dentro de los elementos de sostenimiento utilizados para los tajos se tienen: pernos, Split set, mallas electrosoldadas

y cables bolting, según sea el requerimiento por las condiciones estructurales de la roca.

### 5.5. Ventajas y Desventajas

#### Ventajas

- Permite una explotación con equipos mecanizados.
- Alto grado de eficiencia.
- Alta productividad.
- Permite una recuperación superior al 90%.
- Versatilidad en la aplicación de diferentes métodos de perforación.

#### Desventajas

- Su aplicación requiere una inversión mayor frente a otros métodos de minado.
- No es un método selectivo.
- Su aplicación no es recomendable para yacimientos con inclinación menor a 60°
- Presencia de bancos que requieran voladura secundaria.

### 5.6. Secuenciamiento de Minado (Tajeos principales y Secundarios)

La secuencia de explotación para los tajeos principales debe ser secuencial ascendente y en retirada. La preparación incluye el desquinche de cámaras a partir de los cruceros de extracción en ambos niveles (superior e inferior) para realizar una perforación de taladros largos negativos paralelos. Luego de la voladura (y posterior limpieza) de un tajo se procede a rellenar el mismo con Relleno Cementado Agred Fill (en adelante RCAF) hasta recuperar el piso de la cámara inferior. Este nuevo piso de RCAF servirá como receptor del mineral del tajo inmediato superior. Una vez terminada una columna de tajeos explotados (desde el pie hasta la cabeza del cuerpo) se debe seguir con la siguiente columna adyacente en la misma dirección del crucero de acceso. De esta forma se configura el ciclo de minado para los tajeos principales.

Las siguientes imágenes describen el secuenciamiento típico de un tajeo principal:



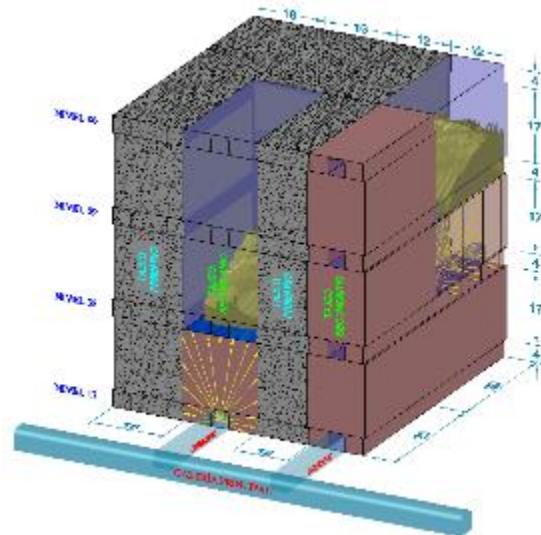
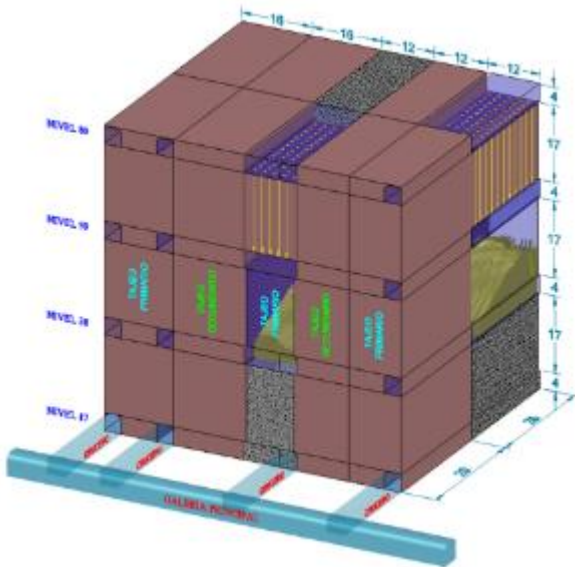
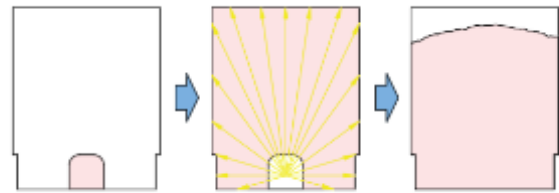
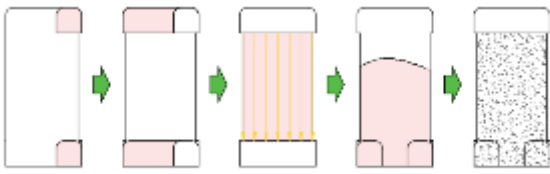


Fig.18. Secuencia de Explotación en Tajos Principales

Fig.19. Secuencia de Explotación en Tajos Secundarios

La secuencia de explotación para los tajos principales debe ser secuencial descendente y en retirada. La preparación consta únicamente de realizar el cruceo de acceso, desde el cual se realizan perforaciones positivas en abanico. En este caso juega un rol muy importante el control topográfico de las cajas que quedaron luego de realizar el minado de los tajos principales puesto que estas cajas serán los límites de esta perforación radial. Luego del disparo y la limpieza del material valioso, se procede con el disparo del tajo inmediato inferior (previamente perforado desde el cruceo del nivel inferior). De esta forma quedarán expuestas las caras de RCAF como nuevos pilares. La columna quedará expuesta en su totalidad desde la cabeza hasta el pie del cuerpo para poder ser rellena con Relleno Hidráulico Cementado. Una vez terminada una columna de tajos explotados se debe seguir con la siguiente columna adyacente en la misma dirección del cruceo de acceso.

Las siguientes imágenes describen el secuenciamiento típico de un tajo secundario:

## 6. Relleno Cementado

La utilización del relleno con resistencia es una actividad del proceso de minado aplicado a cuerpos de gran dimensión con el objetivo de recuperar el 100% de las reservas mineralizadas. La calidad de relleno y la velocidad de colocación controlan la velocidad de producción en el ciclo de minado.

### 6.1. Relleno cementado con agregados (Rock Fill)

En Minera Colquisiri S.A. el relleno cementado con agregados es una mezcla de roca estéril triturada y/o clasificada procedente del desarrollo minero más proporciones de cemento, agregado fino y agua. El cemento como aglutinante de la mezcla permite incrementar la resistencia a los esfuerzos de compresión. He de mencionar que dicho relleno tiene una consistencia seca con slump de 0 a 2" y un porcentaje de vacíos aproximadamente de 8 - 10%. Los factores de éxito dependen de las propiedades físicas del material de relleno, granulometría de los agregados, colocación en tajos y el diseño de mezcla trabajado.

**6.1.1. Características del Rock Fill.**

- Tiempo de fraguado corto mayor a 28 días.
- Mezcla agregados gruesos y finos.
- Mayor rigidez.
- La mezcla tiene consistencia seca, slump de 0-2"
- Tiene una densidad de 1950 - 2200 Kg/m3.

**6.1.2. Ciclo del relleno cementado con agregados.**

- **Preparación de agregados (gravas y arenas) en la planta de agregados:** El material producto de desmonte de mina es movilizado hacia la desmontera temporal de Bubulina, para su clasificación y posterior reducción de tamaño hasta conseguir la granulometría deseada mediante un proceso de zarandas estacionarias y una chancadora primaria (Comesa 24\*36). Por último, el agregado es transportado hacia la cancha de agregados en planta de concreto. Los agregados transportados hacia planta de concreto son AG (TMN 2.5") AF (<3/8").



Fig.20. Producción de agregados en planta Bubulina.

- **Dosificación y preparación de mezcla en la planta de concreto:** Ya con los agregados dispuestos en la cancha de la planta de concreto, se procede con la alimentación de las tolvas de carga mediante un cargador frontal, dichas tolvas cuentan con balanzas en la parte baja, las cuales dosifican la cantidad de agregados según el diseño elegido, los agregados ya dosificados son transportados mediante una faja inclinada hacia el mezclador de 4 m3 con doble eje, donde se adiciona el cemento mediante una perno helicoidal hacia una balanza la cual se encarga de dosificar y el agua mediante bomba centrífuga y un caudalímetro, ya con la totalidad de los materiales dentro del mezclador se procede con el trasegado durante unos minutos hasta

uniformizar la mezcla para su posterior descarga en los volquetes.

F



u

cción de concreto en planta.

- **Transporte y colocación en la zona de tajos:** El transporte del material se realiza mediante volquetes de perfil bajo debido a que el producto es seco con slump de 0 - 2", la colocación será por gravedad hasta completar las 3/4 partes del volumen de relleno, luego se procede con el apoyo de scooptram para la colocación en las zonas más alejadas de la zona de descarga para volquetes.



Fig.22. Deposición de Rock Fill en tajos.

**6.1.3. Diseño de Relleno cementado con agregados.**

<b>Diseño de relleno cementado F'c = 0.6 Mpa (1 m3)</b>	
Cemento Tipo HS (Kg)	80
Agregado Grueso (Kg)	1150
Agregado Fino (Kg)	590
Agua (Lt)	105

Relación A/C	1.31
Porcentaje de cemento (%)	4.60

#### 6.1.4. Control de calidad en estado fresco y endurecido.

- Durante el proceso de relleno, sistemáticamente se toman muestras que son ensayadas para conocer la resistencia a compresión.
- Muestreo de los agregados para determinar contenido de humedad.
- Reajuste de diseño de acuerdo al contenido de humedad que presentan los agregados.
- Análisis granulométrico de los agregados para ver la variación en el uso.
- Determinación del slump del concreto producido.
- Ensayo de rendimiento para verificar el volumen despachado.
- Peso unitario de los agregados.
- Segregación en campo.
- Cohesión y trabajabilidad.



Fig.23. Muestreo de probetas 6 x 12”.



Fig.24. Ensayo de compresión simple.

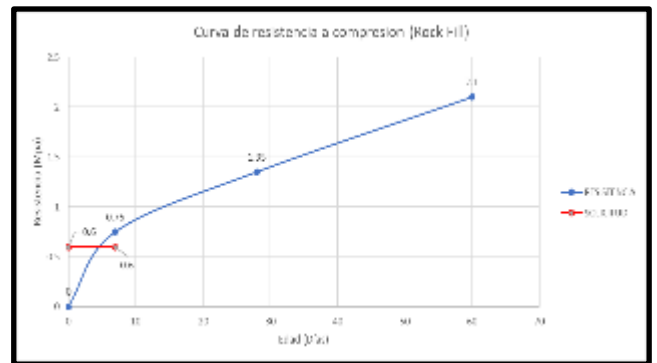


Fig.25. Curva de resistencia hasta 60 días.

#### 6.1.5. Ventajas del relleno cementado con agregados.

- Permite optimizar costos por tonelada métrica del mineral extraído.
- Permite la reducción del ciclo y optimización de costos de minado.
- Reutilización de material remanente producto de la explotación minera (desmonte).
- Incrementa la eficiencia y seguridad en la operación minera.
- Mejora la estabilidad del macizo rocoso, permitiendo mayor recuperación del mineral.
- Disminuye la dilución del mineral al momento de la explotación.

#### 6.1.6. Exposición de paredes en relleno cementado

- Para una exposición segura de las pantallas de relleno se debe tener en cuenta la forma y tiempo de relleno del tajeo a exponer.
- Se debe exponer después del tiempo final de fraguado, en el caso de este tipo de relleno se da a los 28 días.
- La primera fila de perforación para el tajeo adyacente se debe situar como mínimo a .60 y máximo a 1 metro del tajeo relleno.
- La dilución por voladura contigua compromete de 5 a 15 cm la pared de relleno.
- Se debe llevar el control de las juntas frías, de esta forma al momento de exponer tendremos la ubicación de las zonas con más blandas.



F  
ig.26. Perforación de taladros largos al pie de una pantalla de rock fill.



Fig.27. Tajeo después del proceso de voladura.



Fig.28. Pared de relleno expuesto, 300 m<sup>2</sup>

## 6.2. Relleno Hidráulico cementado

El Relleno Hidráulico Cementado, es una solución para rellenar los espacios vacíos dejados en la explotación minera, la facilidad en el transporte y en la deposición de los sólidos hacen que sea un sistema técnicamente y económicamente viable para Minera Colquisiri.

El relleno hidráulico cementado, es una mezcla obtenida mediante la combinación de los relaves totales de la planta concentradora con cemento y agua, esta mezcla debe tener condiciones para alcanzar las resistencias requeridas, también para permitir su transporte como pulpa a través de toda la red de tuberías hasta llegar a los tajeos en el interior de la mina.

En Minera Colquisiri S.A. se viene implementando el relleno hidráulico cementado, para una próxima utilización en la recuperación de los tajos secundarios.

### 6.2.1. Características del RHC.

- El transporte de los materiales, es en forma de pulpa y por tuberías.
- El material de relleno está formado por relaves totales, cemento y agua.
- El transporte puede ser mediante la impulsión de una bomba o por gravedad.
- Tiempo para alcanzar la resistencia de diseño mayor a 60 días.
- No requiere el uso de maquinaria adicional para transporte o colocación en el tajo.
- El porcentaje de sólidos comprende de 60 - 73%.
- La densidad idónea debe estar entre 1800 - 2100 Kg/m<sup>3</sup>.
- Retiene humedad.

### 6.2.2. Ventajas del relleno hidráulico cementado.

- Maximiza la vida útil de las relaveras.
- Permite la recuperación de mineral en pilares y puentes.
- Provee una plataforma de trabajo para continuar con la secuencia.
- Evitar la caída de rocas de nivel a nivel (subsidiencias).
- Minimizar la deposición de relaves en superficie.
- Costo más bajo que el Rock fill, puesto que dejamos de preparar agregados, no utilizamos volquetes para el transporte ni equipos adicionales para la colocación.
- El costo de obtención del agregado es cero debido a que usa el 100% de los relaves producidos por planta.

### 6.2.3. Ciclo del relleno hidráulico cementado.

- **Relaves procesados en planta concentradora:** Comprende los relaves generados por planta concentradora en su totalidad y que son enviados a través de bombas hacia el espesador en planta de relleno hidráulico cementado.
- **Espesamiento de relaves totales:** El proceso de espesamiento se realiza mediante un espesador diseñado para el porcentaje de sólidos con el que se va a trabajar, en esta fase se regula el agua en la pulpa recibida desde planta concentradora con la finalidad de encontrar la densidad idónea para encontrar la resistencia requerida.
- **Mezclado y bombeo de RHC.** Ya con regulación de agua en el espesador y habiéndose encontrado la densidad que se busca para trabajar, se bombea la pulpa desde el espesador hacia el cajón mezclador con la finalidad de adicionar cemento y agua en caso necesario, para luego
- **Transporte de pulpa mediante tuberías:** El transporte de RHC se realizará mediante tuberías de 4" HDPE SDR 9, para no tener problemas durante el transporte de RHC, se debe realizar cálculos de velocidad crítica, asentamiento de sólidos, densidad, viscosidad y presión durante toda la línea troncal.
- **Deposición de relleno en tajos:** La deposición en los tajos se realizará en etapas, se debe realizar una memoria de cálculo de resistencia para los tapones que se son colocados con la

finalidad de contener la pulpa y filtrar el agua excedente. De igual forma se debe instalar los drenajes necesarios para decantar los sólidos.

### 6.2.4. Construcción de la planta.

Actualmente se viene construyendo la planta de RHC, la cual utilizará la totalidad de relaves producidos por planta concentradora para generar pulpa con una densidad adecuada y así producir el relleno hidráulico cementado, en las condiciones según el diseño elaborado en laboratorio.



Fig.29. Planta de Relleno Hidráulico Cementado en construcción.

## 7. Conclusiones

- Sublevel stoping es un método de alta productividad y alto grado de eficiencia, pero requiere de una alta inversión y no es recomendable para yacimientos con un ángulo de buzamiento menor a 60°.
- El método de Sublevel stoping con relleno cementado permite una recuperación total de las reservas de mineral.
- Las condiciones de estabilidad del macizo rocoso definen las dimensiones de los tajos.
- La ejecución de voladura controlada garantiza la verticalidad de las paredes de los tajos primarios, permitiendo un relleno uniforme de los tajos.
- Los estudios geomecánicos previos a la implementación del método de explotación, permiten anticipar posibles condiciones de inestabilidad de las cajas.
- La secuencia de minado para los tajos principales difiere de los tajos secundarios.
- La resistencia requerida del relleno cementado debe ser diseñada de acuerdo con las dimensiones de la pared de tajeo, de tal forma que garantice su estabilidad al momento de su exposición.

- La operación de relleno cementado con agregados nos permite acelerar la secuencia de minado, puesto que el tiempo de fraguado final se alcanza a los 28 días, pero la resistencia requerida en muchos ensayos se cumple pasando los 7 días.
- De los ensayos realizados en las muestras de relleno con agregados, podemos concluir que el éxito de este se encuentra en los controles de calidad que se aplica durante el relleno sistemático.
- La relación agua cemento utilizada en el diseño de relleno con agregados es crucial para la resistencia del mismo, puesto que es inversamente proporcional.
- La durabilidad del relleno cementado se incrementa al trabajar con cementos adicionados que se comportan de mejor manera frente a los ataques por sulfatos.

## 8. Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios por permitirnos ser parte de esta enriquecedora experiencia y por pertenecer a esta familia de profesionales con quienes trabajamos. Gracias a la gerencia de nuestra empresa por permitirnos representar a Minera Colquisiri en tan magno evento. Gracias a todas las jefaturas de las diferentes áreas que nos facilitaron oportunamente toda la información y el apoyo profesional que esta tarea requirió. Gracias a nuestro jefe de área por confiar en nosotros y en nuestro potencial para llevar a cabo y cumplir los objetivos que la operación y esta tarea requieren.

## 9. Referencias

- Thomas, E, Nantel, J.H., Notley, K.R., 1979. Fill Technology In Underground Metalliferous Mines, v.1, p. 001-293.
- Ernesto Villaescusa, Western Australian School of Mines. Geotechnical Design for sublevel open stoping, v.20130923, p. 001-478.
- Palstrom A., 1995.RMI, A rock mass characterization system for engineering purposes, Department of Geology Faculty of Mathematic and Natural Sciences, University of Oslo.
- DCR Ingenieros S.R. Ltda, 2018, Estudio geomecánico del cuerpo Sofia D-MCS.
- A.Romero. A Journal of Geochemical Exploration,V. 98.

### Perfil profesional

Profesional de Ingeniería de Gestión Minera de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, titulado, colegiado y habilitado. Actualmente desempeñando el cargo de Ingeniero de Planeamiento en Minera Colquisiri S.A. con 4 años de experiencia en el área de Planeamiento de Minado, desarrollando proyectos mineros a corto y mediano plazo.

Angel Arturo Mateo Chepe  
Ingeniero de Planeamiento  
Minera Colquisiri S.A.

amateo@colquisiri.com.pe  
+511 5746302 / 974785591

Av. Pedro Ayala 245. Santa Cruz de Flores, Cañete,  
Lima, Perú

### Perfil profesional

Edwin Sebastian Asencios Pimentel

Bachiller en Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Ingeniería y Lean Six Sigma Manager Green Belt por el Instituto de la Calidad PUCP. Con experiencia en diseño, optimización y planificación de métodos de explotación SLS, OCF y R & P. Aplicando la metodología lean Six Sigma en la mejora de procesos y optimización de recursos.

Edwin Sebastian Asencios Pimentel

Analista de Planeamiento  
Minera Colquisiri S.A.

easencios@colquisiri.com.pe  
986245891

Calle Gregorio Montes N° 176, San Juan de  
Miraflores, Lima, Perú

### Perfil profesional

Profesional de Ingeniería civil, Ingeniero titulado en la Universidad César Vallejo, actualmente desempeñando el cargo de ingeniero de calidad en MCSA. Con experiencia en tecnología del concreto, mecánica de suelos, diseño de obra civil en interior mina y tecnología de relleno cementado en minería.

Bryan Alexander Oré Pareja  
Ingeniero de Calidad  
Minera Colquisiri S.A.

bore@colquisiri.com.pe  
918811673

Jr. cotosh Mz. L1, Lt. 34, Urb. Mangamarca baja, San  
juan de lurigancho, Lima, Perú