

# Aplicación del arco peruano para minado de altos esfuerzos Sublevel Caving – Mina Yauricocha

## Application of the Peruvian Arc for high stress mining Sub Level Caving – Yauricocha Mine

Gamaniel Curasma Ramos<sup>1</sup>, Jaime César Mayorga Rojas<sup>2</sup>

Recibido: 31/07/2023 - Aprobado: 15/09/2023 – Publicado: 15/12/2023

### RESUMEN

Uno de los problemas en la mina Yauricocha es que los tajeos de producción de las cimbras de acero fallan en un periodo menor de 45 a 60 días y la consecuencia es el incremento de los costos de sostenimiento, el retraso de la producción del mineral; porque se tiene que paralizar la explotación para instalar las cimbras de refuerzo, e incluso la pérdida de mineral. De esta manera, se concentra mucho esfuerzo para realizar el mismo minado masivo del método Sublevel Caving.

Para los tajeos de producción es necesario mantener una sección operativa mínima de tres metros, para el ingreso de los cargadores de bajo perfil de 6 y 3 yd<sup>3</sup> de capacidad, que nos permitirá recuperar el mineral. Para lograr este objetivo se plantea aplicar un nuevo diseño de sostenimiento en la minería. El arco peruano es un elemento en forma de arco de concreto armado con fierro de acero estructural de alta resistencia, que se coloca entre las cimbras de acero en los tajeos de producción de la mina Yauricocha. Actualmente se aplica en los tajeos de producción del cuerpo Esperanza, que nos permite recuperar el mineral y ahorrar más de 2300 U\$ por cada 10 metros de minado.

**Palabras claves:** Arco de concreto armado, minado masivo, Sublevel Caving, cimbras de acero, cargadores de bajo perfil, diseño de sostenimiento, tajeos de producción, cuerpo de altos esfuerzos.

### ABSTRACT

At the Yauricocha mine, there is an issue where the steel ribs used in the production stopes fail within a period of less than two months. This leads to an increase in support costs and delays in ore extraction, as the mining operations have to be halted for the reinstallation of the steel ribs. Furthermore, this can even result in ore loss. These problems arise due to the generation of high stresses caused by the massive mining technique known as Sub Level Caving. In the production stopes, it is necessary to maintain a minimum operational section of 3.0 meters to accommodate the entry of the 6-cubic-yard low-profile loaders. This compliance ensures ore recovery. To achieve this objective, a new support design is proposed for mining. The Peruvian arch is a reinforced concrete arch element with high-strength structural steel placed between the steel ribs in the production stopes of the Yauricocha mine. Currently, it is being applied in the production stopes of the Esperanza zone, successfully recovering the ore and yielding savings of over \$2300 per every 10 meters of mining.

**Keywords:** Reinforced concrete arch, massive mining, sublevel caving, steel falsework, low profile chargers, support design, production stopes, high stress body.

1. Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú.

2. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

a. Autor para correspondencia: [gamaniel.curasma@unmsm.edu.pe](mailto:gamaniel.curasma@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2858-109X>

b. E-mail: [jaimemayorga@unmsm.edu.pe](mailto:jaimemayorga@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8423-3343>

## I. INTRODUCCIÓN

El yacimiento polimetálico de Yauricocha es explotado por el método por hundimiento Sublevel Caving (SLC) “es uno de los métodos de minería masiva que se ha implementado durante los últimos 100 años. Se utilizó por primera vez en las minas de diamantes en Sudáfrica. A medida que las estructuras mineralizadas se hacían más estrechas y la posibilidad de hundimiento de la kimberlita se volvió problemática, el método SLC se estableció en las minas de Kimberley en 1979” (Jakubec et al., 2018, pp.73-88). En Yauricocha como parte de la ampliación de sus operaciones, la Sociedad Minera Corona S.A. y subsidiaria de Sierra Metals Inc., tiene planeado continuar profundizando, sobre todo en el cuerpo Esperanza, que es la estructura mineralizada con mayor potencia del yacimiento y buena ley NSR 210 US\$. Para continuar con la profundización se diseñó y se puso en marcha el sostenimiento de arco peruano, que permite soportar los mayores esfuerzos de las excavaciones más profundas de la mina, cuya factibilidad técnica se explica en el presente artículo.

La unidad minera Yauricocha se ubica en el distrito de Alis, provincia de Yauyos, departamento de Lima, aproximadamente a 12 km al sur de la estación Pachacayo del Ferrocarril Central, en el flanco oeste de la cordillera Occidental de los andes y en las nacientes de uno de los afluentes del río Cañete en la sierra central; a una altitud que varía entre los 4 150 y los 4 700 m s. n. m. La geología de la mina Yauricocha se origina en el Cretáceo, a nivel regional la zona está conformada por capas de rocas sedimentarias que presentan una orientación aproximada de NW-SE, así como por la presencia de stocks de origen ígneo intrusivo y extrusivo, que tienen geometrías irregulares y que están distribuidas de manera errática. Al contacto con las capas sedimentarias han formado concentraciones de mineral económico en gran parte de ellos. En el área de Yauricocha se aprecia el Anticlinal Purísima Concepción y el Sinclinal France Chert en la mina central, el Anticlinal Cachi Cachi y el Sinclinal Huamanripa al norte y el Sinclinal Quimpara, inmediatamente al sur de la laguna Pumacocha y al norte de la mina San Valentín. El Anticlinal Purísima Concepción es una estructura local apretada y definida por un sill de basalto de 17 m de espesor. El "trend" de su eje es de aproximadamente N50°W con suave "plunge" de 20° al SE.

Cabe recalcar que el cuerpo mineralizado Esperanza tiene como caja piso a una roca sedimentaria caliza y en la caja techo es intrusivo. Es importante resaltar que la investigación tiene como objetivo principal la recuperación del mineral con el diseño de sostenimiento de arco peruano.

## II. MÉTODOS

Para el presente artículo se empleó la metodología de investigación de enfoque aplicado y experimental, que se centra en realizar un diseño nuevo de sostenimiento para soportar los altos esfuerzos de la mina Yauricocha, que pertenece a la compañía Sociedad Minera Corona – Sierra Metals.

En los diferentes niveles y pisos del cuerpo Esperanza se utilizó el diseño de sostenimiento de arco peruano, y esto requirió mayor esfuerzo en todas las labores, ventanas críticas (draw points) o calles de producción. Para la selección de la muestra se consideraron las labores de explotación, en las que se utilizaron los arcos peruanos en una sección de 3.50 x 3.50 m.

### 2.1 Etapa de trabajo de campo

La observación directa fue la técnica empleada para la recolección de datos; fue la fuente primaria. La calidad pobre del macizo rocoso fue el punto de partida de la presente investigación, para el proceso de caracterización se realizaron mapeos geomecánicos.

### 2.2 Etapa de gabinete

En la etapa de gabinete la fuente secundaria fue la elaboración de planos geológicos, planos de zonificación geomecánica, estudios geomecánicos y ensayos de laboratorio de las rocas que fueron tomadas de las labores de explotación del cuerpo Esperanza (zona de altos esfuerzos).

Asimismo, se realizó el modelamiento geomecánico de los esfuerzos que influyen en el minado por Sublevel Caving en el cuerpo Esperanza, mediante el uso de software del paquete Rocscience, que hace el cálculo de esfuerzos y del factor de seguridad por el método de elementos finitos. Además se empleó el software Map3D para analizar la estabilidad al momento usar el arco peruano.

## III. RESULTADOS

Con el objetivo de obtener toda la información necesaria para la elaboración del modelo geológico y geomecánico, se realizaron diversos trabajos de campo, recopilación de información, trabajos de gabinete y ensayos de laboratorio.

### 3.1 Aspectos litológicos

De la información obtenida de los registros geológicos, mapeos geotécnicos y observaciones de campo, el cuerpo mineralizado Esperanza tiene una orientación NE-SW; hacia el techo las rocas encajonantes, y la roca intrusiva hacia el piso caliza.

### 3.2 Mapeo geomecánico

#### 3.2.1 Distribución de discontinuidades

El análisis y procesamiento de toda la información estructural registrada del área de estudio, se realizó con la metodología de proyección estereográfica, y se utilizó el programa Dips, versión 5.1, que pertenece a (Rocscience, 2023), aplicado para simular aspectos geomecánicos.

Las discontinuidades registradas abarcan en su mayoría diaclasas, fallas, fallas mineralizadas y estratos. En la Figura 1 se aprecia el compósito de contornos.

En la Figura 2 se aprecia que con los resultados obtenidos es posible deducir la existencia de 03 familias de discontinuidades estructurales bien definidas:

Familia 01, sistema dominante, con dirección de buzamiento  $233^\circ$  y buzamiento  $71^\circ$  (S $23^\circ$ E/ $71^\circ$ SW), conformado principalmente por diaclasas y fallas.

Familia 02, sistema con dirección de buzamiento  $6^\circ$  y buzamiento  $82^\circ$  (S $84^\circ$ E/ $82^\circ$ NE), conformado principalmente por diaclasas y fallas.

Familia 03, sistema con dirección de buzamiento  $111^\circ$  y buzamiento  $61^\circ$  (N $21^\circ$ E/ $61^\circ$ SE), conformado principalmente por diaclasas y fallas.

### 3.2.2 Condición estructural de las discontinuidades

En las tablas 1 y 2 se presentan las características estructurales de la masa rocosa involucrada al área de estudio, que fueron establecidas a partir de la información registrada del laboreo minero existente y proyectado. Cabe mencionar que en base a la información registrada los materiales geológicos están asociados a un nivel de fracturamiento regular.

### 3.3 Clasificación de la masa rocosa

Para clasificar el macizo rocoso se utilizaron los criterios desarrollados por (Bieniawski, 1989) Rock Mass Rating - RMR.

Además de los criterios mencionados y como parámetro dentro del cálculo de ambos, para estimar el valor de la calidad de la roca RQD se empleó la relación propuesta por (Priest & Hudson, 1976, pp.135-148), para lo cual se necesitó solo el registro lineal de todas las discontinuidades presentes.

En la Tabla 3 se resumen los resultados de la clasificación geomecánica correspondiente a los dominios estructurales de la zona de estudio.

Todo criterio de diseño aplicado en el presente artículo se basa en una adecuada delimitación del macizo rocoso, de acuerdo con la similitud en sus diversas características y propiedades, para lo cual se ha tomado en consideración lo siguiente:

- Litología
- Calidad de la masa rocosa
- Características de las discontinuidades

En base a la información recopilada para el presente informe se han establecido 5 dominios estructurales los cuales son resumidos en la Tabla 4.

### 3.4 Propiedades de la roca

#### 3.4.1 Resistencia compresiva de la roca intacta

La resistencia compresiva de la roca intacta ( $\sigma_c$ ) de cada dominio estructural fue obtenida con los siguientes procedimientos:

- Ensayos de campo y de laboratorio

Ensayos de campo: dentro del área de estudio se realizó una campaña específica con el martillo Schmidt de dureza, todas las pruebas fueron llevadas a cabo de acuerdo con los estándares especificados por la ISRM (International

Society for Rock Mechanics). En la Tabla 5 se resume la resistencia compresiva media de cada dominio estructural.

Ensayos de laboratorio: muestras de rocas representativas fueron enviados a diferentes laboratorios certificados para realizar el ensayo de compresión simple, siguiendo los procedimientos y estándares establecidos en las normas ASTM (American Society for Testing and Materials).

#### 3.4.2 Propiedades físicas, elásticas y mecánicas de la roca intacta

En la Tabla 6 se presentan las propiedades físicas de cada dominio estructural, que se determinaron mediante el análisis de muestras de roca y luego fueron enviadas al laboratorio. Las muestras fueron sometidas a ensayos para evaluar sus constantes elásticas, resistencia al corte directo y resistencia a la compresión triaxial. Todos los ensayos se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos y estándares establecidos en las normas ASTM.

La densidad obtenida para la caliza se encuentra en el rango de 2.60 a 2.73 t/m<sup>3</sup>, intrusivo de 2.55 a 2.84 t/m<sup>3</sup>, mineral de 3.88 a 4.1 t/m<sup>3</sup>.

En la Figura 3 se puede apreciar el comportamiento entre la resistencia compresiva y su módulo de elasticidad de la caliza, que proporciona información sobre la coherencia y la consistencia interna de la caliza.

La constante de roca “mi” es obtenida del ensayo triaxial, su valor es fundamental para la aplicación del criterio de falla de (Hoek & Brown, 1988, pp.32-34), que es empleado en el análisis de estabilidad de las excavaciones. En la Tabla 7 se aprecian los valores obtenidos de la constante “mi”.

#### 3.4.3 Unidades geotécnicas

Con el objetivo de simplificar los modelos empleados en el análisis de estabilidad de las excavaciones han sido definidas diferentes unidades geotécnicas, en la Tabla 8 se presenta el resumen de las diferentes unidades geotécnicas.

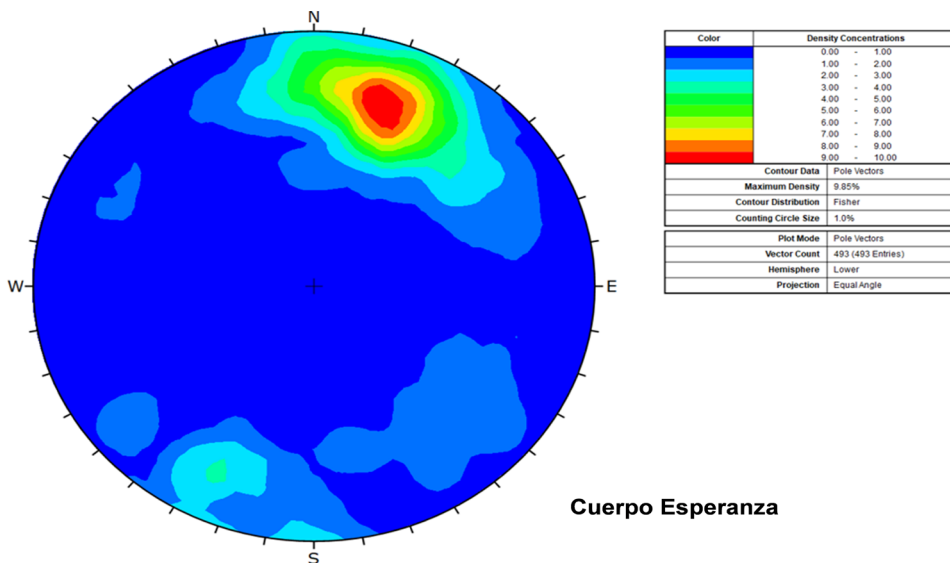
#### 3.4.4 Parámetros de resistencia de la masa rocosa

Tomando como información base el registro de los resultados de los ensayos de laboratorio y con el programa Rocdata, versión 4.0, fue posible estimar las propiedades de la masa rocosa, empleándose para tal fin el criterio de falla generalizado de (Hoek & Diederichs, 2006, pp.203-215).

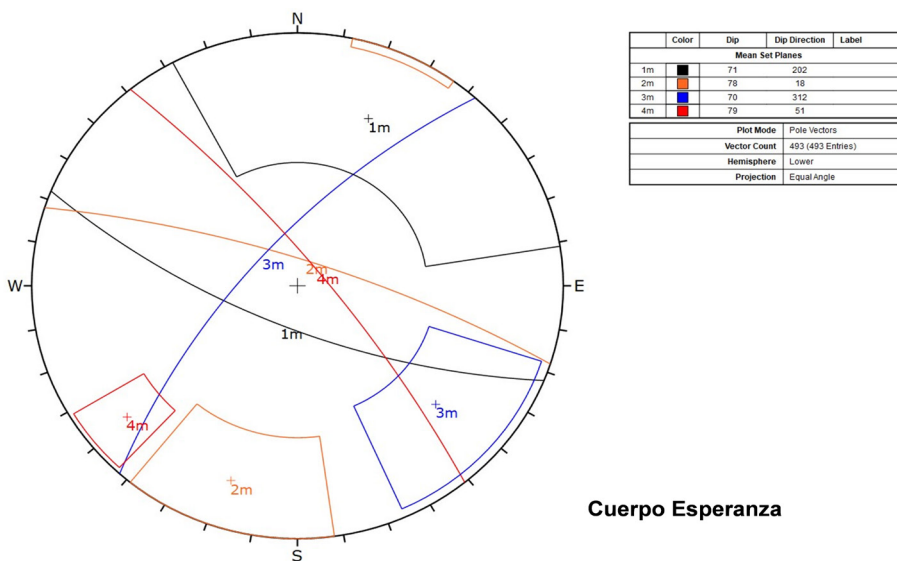
Los datos de ingreso al programa fueron:

- Resistencia compresiva uniaxial de la masa rocosa ( $\sigma_c$ )
- Calidad de la masa rocosa
- Constante “mi” de la roca intacta
- Peso específico de la roca intacta
- Factor de disturbancia de la voladura
- Profundidad a la que se ubica la excavación

**Figura 1**  
Diagrama estereográfico compuesto de contornos



**Figura 2**  
Diagrama estereográfico compuesto de círculos máximos



**Tabla 1**  
Condición estructural de las discontinuidades en la caja piso

Parámetro	Dominio estructural			Unid.
	Caliza	Contacto piso	Mineral	
Espaciamiento	<0.06	<0.06	<0.06	m
Persistencia	3 - 10 m	3 - 10 m	10 - 20 m	m
Apertura	0.1 - 1.0 mm	<0.1 mm	<0.1 mm	mm
Rugosidad	Lig. Rugosa	Suave	Suave	-
Relleno	Duro >5 mm	Suave <5 mm	Suave >5 mm	-
Alteración	Mod. alterada	Muy alterada	Muy alterada	-
Cond. de agua	Húmedo	Húmedo	Húmedo	-

**Tabla 2***Condición estructural de las discontinuidades en la caja techo*

Parámetro	Dominio estructural		Unid.
	Contacto techo	Intrusivo	
Espaciamiento	<0.06	0.06 a 0.2	m
Persistencia	10 - 20 m	3 - 10 m	m
Apertura	1 - 5 mm	1 - 5 mm	mm
Rugosidad	Suave	Lig. rugosa	-
Relleno	Suave >5 mm	Suave >5 mm	-
Alteración	Muy alterada	Muy alterada	-
Condiciones de agua	Goteo	Goteo	-

**Tabla 3***Clasificación geomecánica de la masa rocosa*

Dominio estructural	Rango RMR	Promedio RMR	Promedio índice Q
Caliza	42 - 47	44.5	1.06
Contacto piso	32 - 39	35.5	0.39
Mineral	23 - 26	24.5	0.11
Contacto techo	19 - 22	20.5	0.07
Intrusivo	39 - 44	41.5	0.76

**Tabla 4***Zonificación geomecánica – Rock Mass Rating*

Dominio estructural	Promedio RMR	Clase de roca	Calidad de masa rocosa
Caliza	44.5	III-B	Regular
Contacto piso	35.5	IV-A	Mala A
Mineral	24.5	IV-B	Mala B
Contacto techo	20.5	IV-B	Mala B
Intrusivo	41.5	III-B	Regular

**Tabla 5***Resistencia compresiva ( $\sigma_c$ ): Ensayo de martillo Schmidt – Caliza*

Medición	Resistencia (Mpa)	Nivel	Piso
01	80	920	0
02	85	970	8
03	65	970	8
04	95	1020	16
05	50	1020	16
06	73	1020	16
07	75	1020	8
08	85	1020	8
09	80	1070	11
10	60	1070	11
11	40	1070	11
12	80	1070	5
13	65	1070	5

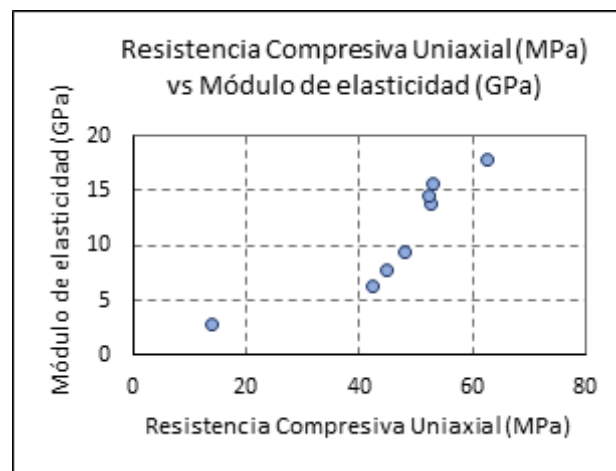
**Tabla 6**

*Ensayo de propiedades físicas*

Dominio estructural	Densidad (g/cc)	Porosidad aparente (%)	Peso específico aparente (KN/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (GPa)	Constante de Poisson	Resist. compresiva no confinada (MPa)	
	Seca	Húmeda					
Caliza	2.64	2.65	1.00	25.90	12.0	0.25	65
Contacto piso	2.70	2.71	1.83	26.49	10.0	0.30	40
Mineral	4.05	4.10	5.24	39.73	2.8	0.36	20
Contacto techo	2.61	2.64	2.82	25.60	10.0	0.30	40
Intrusivo	2.66	2.67	1.36	26.09	16.0	0.25	120

**Figura 3**

*RCU (MPa) vs módulo de elasticidad (Gpa) de caliza*



**Tabla 7**

*Constante "mi" de la roca intacta criterio de falla de Hoek & Brown*

Dominio estructural	Constante mi Hoek y Brown
Caliza	10.5
Contacto piso	8.0
Mineral	19.0
Contacto techo	25.0
Intrusivo	30.0

**Tabla 8**

*Unidades geotécnicas del cuerpo Esperanza*

Dominio estructural	Codificación: Unidades geotécnicas
Caliza	UG-01
Contacto piso	UG-02
Mineral	UG-03
Contacto techo	UG-04
Intrusivo	UG-05



En la Tabla 9 se resumen las propiedades de resistencia correspondientes de los diferentes dominios estructurales presentes en cuerpo Esperanza.

### 3.5 Esfuerzos in situ

Los esfuerzos in situ fueron obtenidos utilizando el concepto de carga litostática, en el cual el esfuerzo vertical " $\sigma_v$ " es calculado a partir del peso unitario de la roca sobreyacente " $\gamma$ " y la profundidad " $z$ " debajo de la superficie.

El esfuerzo horizontal " $\sigma_h$ " se obtiene del producto del esfuerzo vertical " $\sigma_v$ " y la constante " $k$ " determinada con el criterio de (Sheorey, 1994, pp.23-34). En la Tabla 10 se presentan los parámetros considerados para la determinación de los esfuerzos in situ.

### 3.6 Esfuerzos in situ

La presencia de agua en la masa rocosa tiene un efecto adverso en las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas. Su principal efecto es la presión que ejerce en las discontinuidades estructurales, de este modo disminuye la resistencia al corte y favorece la inestabilidad en las labores subterráneas.

En la caja techo se evidencia la presencia de agua por filtración a través de discontinuidades, que han influido en el incremento de carga húmeda de las ventanas de explotación en las zonas actuales de explotación nivel 1070, piso 11 y piso 5; debido a esto se han presentado empujes de carga en el nivel 1070, piso 5.

En la Tabla 11 se puede apreciar las condiciones de agua subterránea asociadas a las unidades geotécnicas que fueron resumidas en la Tabla 8.

### 3.7 Sublevel Caving

El método de hundimiento por subniveles aprovecha la mala calidad asociada del cuerpo mineralizado, para su aplicación se ejecutan cruceros o ventanas de explotación a través del cuerpo mineralizado fuertemente fortificadas (uso de cimbras H6, 20 lb/pie) con una sección de 3.5m x 3.5m y separadas entre sí 5.5 m.

La explotación se realiza en retirada desde los extremos (norte y sur) hacia el centro del cuerpo mineralizado y en retirada en una misma ventana.

- La aplicación de este método cumple ciertas condiciones:
- Cuerpos verticales y masivos
- Minerales de baja resistencia, quebradizos y bien estratificados
- Límites regulares del yacimiento
- Terreno superficial donde puedan permitirse desplazamientos y desplomes, sin crear problemas de seguridad para infraestructuras y personal graves
- Debido a la pérdida de mineral (alta dilución) este método es aplicable a minerales de valor medio

- El yacimiento debe tener una gran potencia y poseer una gran extensión horizontal
- El laboreo de desarrollo y preparación deben estar asociados a un macizo rocoso de calidad Regular (RMR III-B)
- Las principales características en la aplicación de este método son las siguientes:
- El método es descendente y facilita la entrada en producción
- Es flexible al poder adaptarse a la geometría del cuerpo mineralizado
- Se puede alcanzar una dilución de hasta el 15%
- Permite el avance de labores de desarrollo y preparación en diferentes niveles
- La fortificación o sostenimiento aplicado en las ventanas es pesada
- La recuperación puede alcanzar hasta el 75%

### 3.8 Análisis de estabilidad controlada por estructuras labores de preparación

Tomando como base el arreglo estructural de la masa rocosa, se ha podido calcular la estabilidad de las cuñas formadas en el contorno de la excavación.

El cálculo se hizo con el programa Unwedge, Dips, RS2, de (Rocscience, 2023), con este programa se obtuvo una apreciación detallada de todas las cuñas con posibilidad de generar estabilidad en la excavación diseñada.

En la Tabla 12 se aprecian las dimensiones y orientación de las labores de preparación que cumplen con los parámetros de diseño.

En la Tabla 13 se observa que de acuerdo con el análisis de estabilidad controlado por estructuras de las labores de preparación: subniveles y ventanas, convergen en factores de seguridad (FS) favorables,  $FS > 1.2$ , lo cual indica que el sostenimiento aplicado es el más adecuado.

En tramos donde el laboreo se encuentra asociado a un macizo rocoso de calidad Mala (RMR IV-A).

### 3.9 Diseño del pilar de seguridad caja piso mineral

Las labores de preparación para el minado del cuerpo esperanza, subniveles, estocadas, chimeneas y cruceros se encuentran asociadas a un macizo rocoso de calidad regular, RMR de 36 a 40.

Con el fin de asegurar la estabilidad local y global de todas las labores aledañas al cuerpo durante el minado, se debe realizar un adecuado dimensionamiento de los pilares de seguridad.

Para tal fin se utilizó la herramienta de cómputo Phase2, versión 8, del paquete de Rocscience. Los resultados son discutidos a continuación.

#### 3.9.1 Modelo de análisis dimensional – diseño de pilares de seguridad

En la Figura 6 se presenta el modelo de análisis bidimensional que emplea la metodología de elementos finitos (MEF), basado en el comportamiento de postrotura de los materiales de tipo elasto-plástico en un estado bidimensional.

Al culminar el minado de la ventana se observa un relajamiento entorno al contacto caliza – mineral, que converge en factores de seguridad (FS) desfavorables  $FS < 1.0$ , por lo cual se debe asegurar el bloqueo al ingreso de cada ventana ya minada y ver el FS de pilares.

### 3.10 Diseño del pilar de seguridad caja piso mineral

En el modelo de análisis de estabilidad controlada por esfuerzos se ha empleado la metodología de elementos finitos basado en el comportamiento postrotura de los materiales de tipo elasto-plástico en un estado bidimensional.

La herramienta de cálculo empleada ha sido el programa RS2 perteneciente a (Rocscience, 2023). El uso de este programa nos permite obtener resultados en el cálculo de los esfuerzos actuantes y desplazamientos generados en torno a las excavaciones simuladas con Map 3D y a el esfuerzo in situ de acuerdo con Overcoring y el Map 3D hacen match:

- Esfuerzo principal del material es (E-W), Magnitud de 20 a 30 Mpa

- La zona de SLC es material brechado o quebrado, el esfuerzo vertical es la que se pronuncia a medida que se profundiza el minado

¿Cuánto tiene que soportar el área de la zona plástica cuyo factor de seguridad (sf) es  $\geq 1.2$ ?

- $(SF \times \text{Ancho labor} \times \text{avance}) \times \text{densidad}$
- $(1.60 \times 3.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}) \times 2.7 = 15.12$  toneladas
- En la Figura 7 (izquierda) se puede apreciar el modelo 3D del cono de subsidencia producido por el método de minado Sublevel Caving y en la Figura 8 (derecha) se aprecia el análisis de rigidez de las cimbras en las labores de explotación que son afectadas por altos esfuerzos.

### 3.11 Diseño del arco peruano

El cuerpo mineralizado Esperanza, debido a la profundidad de su génesis, casi estaba perdido porque las cimbras no soportaban lo suficiente, pero gracias a la investigación para poder soportar los grandes esfuerzos se diseñó el arco peruano y se logró recuperar dos ventanas importantes de 70m de largo, por lo tanto, se recuperó 69k t valorizados en \$8.4 millones, con esta demostración se da una solución para recuperar en niveles profundos y así continuar con la explotación y recuperación al 100% de la reserva.

- Esta es la razón por la cual en la actualidad se sigue aplicando porque se obtienen buenos resultados, el diseño se explica en la Figura 9.

**Tabla 9**

*Parámetros de resistencia de la masa rocosa*

Descripción de la propiedad	Unidad geotécnica					Unid
	UG 01	UG 02	UG 03	UG 04	UG 05	
RMR (1989)	44	35	25	21	42	-
Índice Q (1974)	1.69	0.61	0.19	0.12	1.35	-
GSI	44	35	25	21	42	-
RCU ( $\sigma_c$ )	65	40	20	40	120	MPa
Densidad (d)	2.7	2.65	3.5	2.6	2.65	t/m3
Peso específico (PE)	0.026	0.026	0.034	0.025	0.026	MN/m3
Módulo de elasticidad (Ei)	12	10	2.8	10	16	GPa
	12 000	10 000	2 800	10 000	16 000	MPa
Constante de poisson ( $\mu$ )	0.25	0.3	0.36	0.3	0.25	-
Constante mi de la roca intacta	10.5	8	19	25	30	-
Factor de disturbancia de la voladura	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-
Constante mb de la masa rocosa	1.14	0.61	0.97	1.09	3.00	-
Constante S de la masa rocosa	0.003	0.004	0.001	0.001	0.001	-
Constante a de la masa rocosa	0.51	0.52	0.53	0.54	0.51	-
Módulo de deformación (Em)	7.08	4.22	2.37	1.88	7.31	GPa
Resistencia Compresiva Uniaxial ( $\sigma_{cm}$ )	6.30	2.67	0.88	1.49	10.71	MPa



**Tabla 10**

*Esfuerzos in situ*

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unid.
Cota de superficie	C. Sup.	4 700	msnm
Cota media de la excavación	C. Excav.	4 820	msnm
Profundidad de la excavación	Prof.	880	m
Densidad de la roca	$\delta$	2.65	t/m3
Módulo de deformación	Em	7.30	GPa
Esfuerzo vertical	$\sigma$	22.0	MPa
Constante	k	0.4	-
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h$	8.2	MPa

**Tabla 11**

*Condiciones de agua subterránea*

Unidad geotécnica	Condición de agua subterránea
UG-01	Seco a húmedo
UG-02	Goteo
UG-03	Goteo a flujo
UG-04	Goteo a flujo
UG-05	Goteo

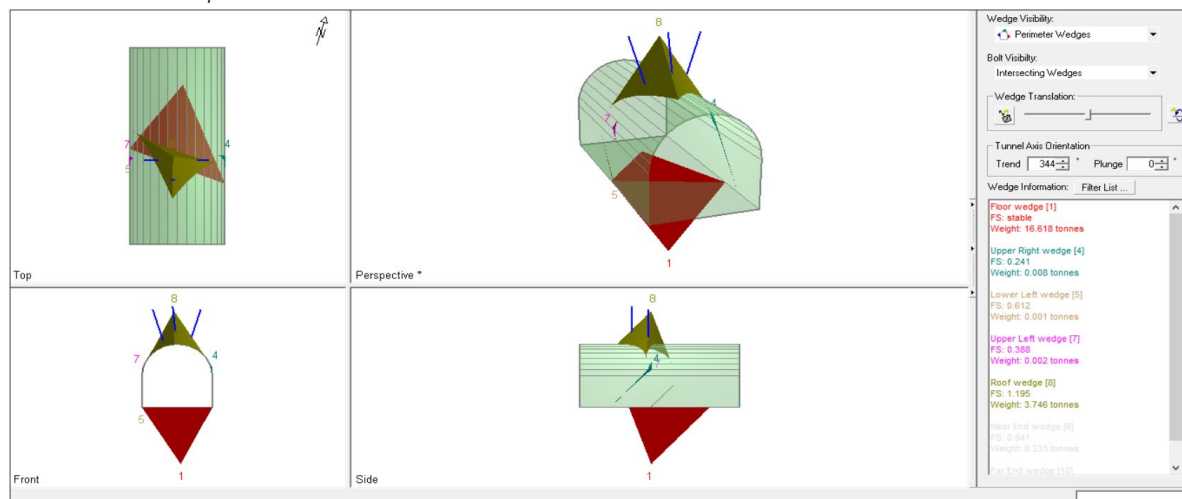
**Tabla 12**

*Parámetros de diseño de las labores de preparación*

Labores	Dimensiones		Orientación
	Ancho (m)	Alto (m)	
Subniveles	3.5	3.5	344°
Ventanas	3.5	3.5	77°

**Figura 4**

*Estabilidad controlada por estructuras en Subniveles*

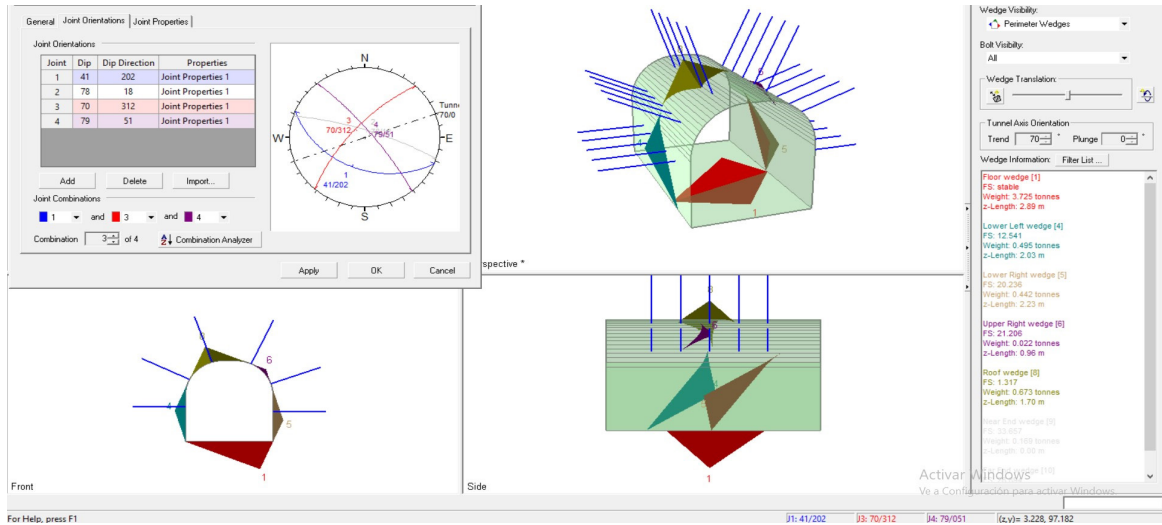


**Tabla 13**

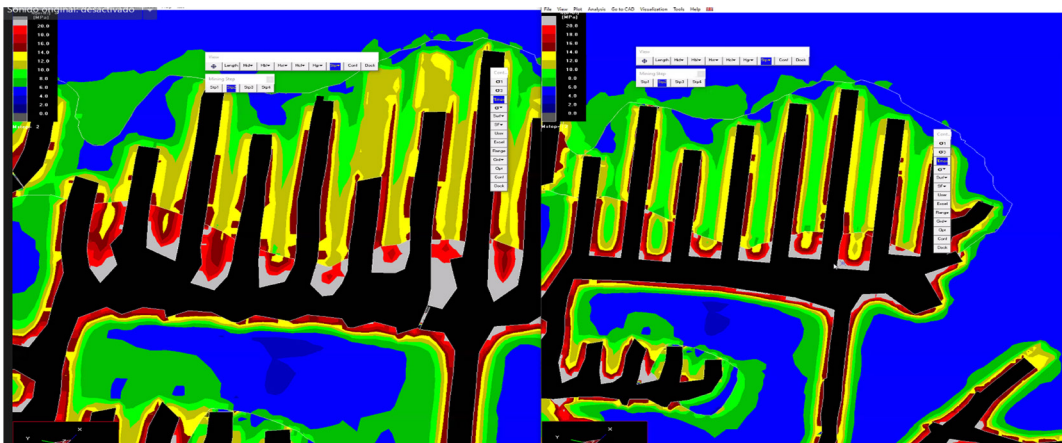
*Parámetros de diseño de las labores de preparación*

Labores	Factores de seguridad	Tipo	Condición
Subniveles	> 1.2	Temporal	Estable
Ventanas	> 1.2	Temporal	Estable

**Figura 5**  
Estabilidad controlada por estructuras en ventanas

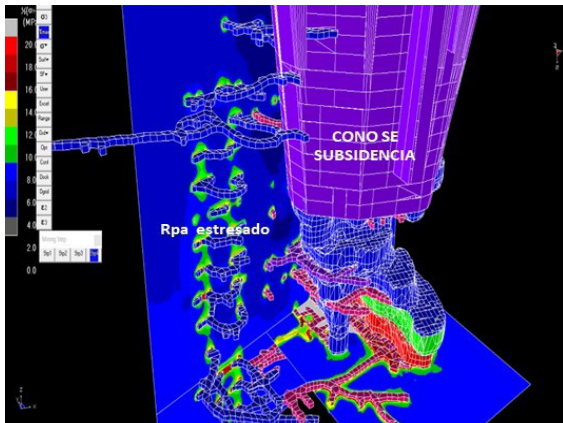


**Figura 6**  
Factor de seguridad – diseño del pilar de seguridad

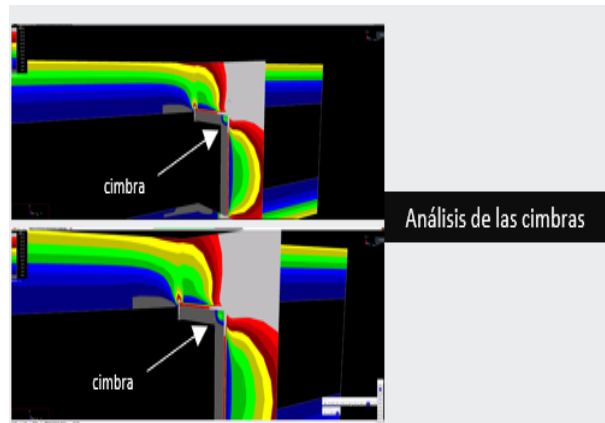


Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad del pilar y su influencia en el subnivel durante el minado del tajo, que convergen en factores de seguridad (FS) favorables respecto a la sección mostrada FS > 1.2 con un ancho de plastificación de la roca entorno a la excavación de 1.8 metros.

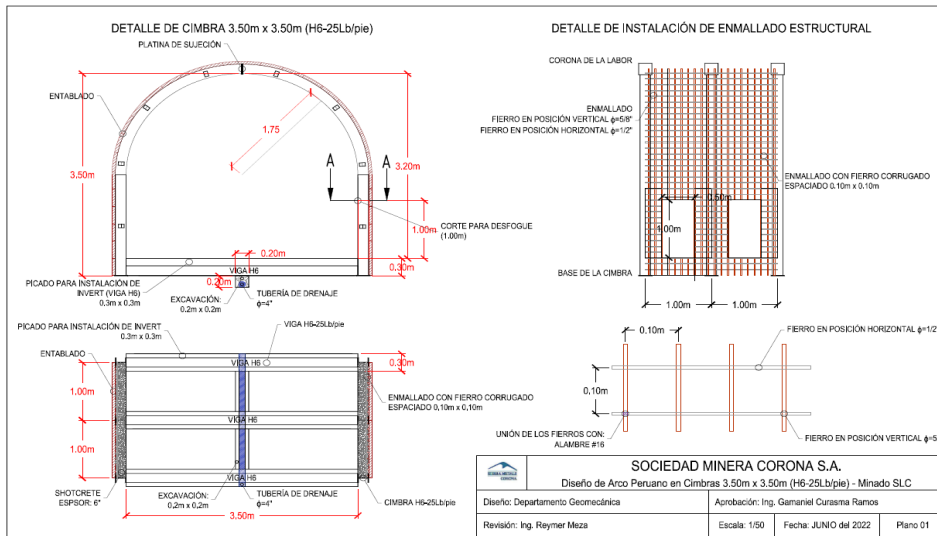
**Figura 7**  
Modelo tridimensional del cuerpo Esperanza – mina Yauricocha



**Figura 8**  
Análisis de rigidez de cimbras para cuerpo Esperanza – mina Yauricocha



**Figura 9**  
Diseño y detalles de instalación del arco peruano



## IV. DISCUSIÓN

### 4.1 Aplicación del arco peruano

Los arcos peruanos son estructuras de acero estructural que se instalan en las cimbres de acero de viga H6, previamente instaladas en los tajos de producción, tal como se aprecia en la Figura 10.

En la Figura 11 se aprecia el arco peruano post lanzado de shotcrete, con un espesor de 6", que cubre completamente a la estructura de acero con resistencias a la compresión uniaxial, mayores a 36 MPa a los 28 días de fraguado.

### 4.2 Ahorro económico

En la Tabla 14 se muestra el costo de instalación de las cimbres de acero en una longitud de 10 metros de minado que es de 27 632 U\$, que incluye la instalación de 4 cimbres

adicionales nuevas para el reemplazo de aquellas dañadas por los esfuerzos.

En la Tabla 15 se muestra que, con el uso del arco peruano para la misma longitud de minado, se tiene un costo de 25 311 U\$, lo que nos indica un ahorro de 2 320 U\$ por cada 10 metros de longitud de minado.

Según la tabla mostrada el arco peruano, además de generar una reducción de costos de sostenimiento, nos ofrece un factor de seguridad >1.2 y más resistencia contra la gran cantidad de esfuerzos altos.

En la mina Yauricocha, cuerpo Esperanza, donde se aplica el método de minado Sublevel Caving, no se encuentran estudios previos similares a la presente investigación, por lo tanto, se destaca la originalidad e innovación al insertar en la mina Yauricocha un nuevo diseño de sostenimiento para soportar altos esfuerzos.

**Figura 10**  
Instalación de la viga de acero del arco peruano en tajos de producción



**Figura 11**  
Arco peruano instalado en tajo de producción



Tabla 14

Costo de sostenimiento con cimbra de refuerzo

Long de Minado	Cimbras H6	Costo Unidad	Costo Total	Cimbras Adicionales	Costo Adicional	Costo final
metros	Unid	U\$	U\$	Unid	U\$	U\$
10	10	1,974	19,737	4	7,895	27,632

Tabla 15

Costo sostenimiento con arco peruano

Long de Minado	Cimbras H6	Costo Unidad	Costo Total	Arco Peruano	Costo Arco Peruano	Costo Final
metros	Unid	U\$	U\$	Unid	U\$	U\$
10	10	1,974	19,737	1	5,574	25,311

## V. CONCLUSIONES

Dado el objetivo “aplicar un nuevo diseño de sostenimiento para recuperar el mineral de las ventanas de explotación expuestas a altos esfuerzos por el minado masivo de Sublevel Caving”, se concluye que el arco peruano es un elemento estructural que controla de forma afectiva los esfuerzos producidos por el minado masivo y su performance superior a las cimbras, permite reducir el costo de sostenimiento, ampliar la vida de las ventanas de explotación, evita los atrasos de la extracción y mantiene la seguridad de los trabajadores y los equipos.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Para un gran líder y compañero de trabajo vicepresidente de operaciones de Sierra Metals, al Ing. James León, también un agradecimiento especial para el gerente de unidad el Lic. Henry Aubert, Ing. Sandro Guarniz (gerente de proyectos) por su apoyo para el desarrollo de esta investigación y del presente artículo.

## VII. REFERENCIAS

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Philadelphia: John Wiley & Sons, Inc. <https://pdhonline.com/courses/c552/Rock%20Engineering%20-%20Rock%20Mass%20Classifications%20and%20Properties.pdf>
- Hoek, E., & Brown, E. (1988). The Hoek-Brown failure criterion—a 1988 update. *Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechechanics Symposium*, University of Toronto, Toronto, 32-34. [https://www.researchgate.net/profile/E-Brown-2/publication/247896456\\_The\\_Hoek-Brown\\_failure\\_criterion\\_-\\_a\\_1988\\_update/links/54da95b00cf2ba88a68d4bd5/The-Hoek-Brown-failure-criterion-a-1988-update.pdf](https://www.researchgate.net/profile/E-Brown-2/publication/247896456_The_Hoek-Brown_failure_criterion_-_a_1988_update/links/54da95b00cf2ba88a68d4bd5/The-Hoek-Brown-failure-criterion-a-1988-update.pdf)
- Hoek, E., & Diederichs, M. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock*

*Mechanics & Mining Sciences*, Volume 43, Issue 2, 203-215. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160905000948>

- Jakubec, J., Lagace, D., Boggis, B., Clark, L., & Lewis, P. (2018). Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, 73-88. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815\\_03\\_Jakubec/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_03_Jakubec/)
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 13, Issue 5,, 135-148. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0148906276908184>
- Rocscience. (2023). 2D and 3D Geotechnical Software. Obtenido de <https://www.rocscience.com/>
- Sheorey, P. (1994). A theory for In Situ stresses in isotropic and transverseley isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 31, Issue 1, 23-34. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0148906294923124>

### Contribución de autoría:

Conceptualización: Gamaniel Curasma Ramos, Jaime Mayorga; Análisis formal: (Gamaniel Curasma Ramos, Jaime Mayorga); Investigación: (Gamaniel Curasma Ramos, Jaime Mayorga); Supervisión: (Gamaniel Curasma Ramos, Jaime Mayorga); Redacción: (Gamaniel Curasma Ramos, Jaime Mayorga); Validación: (Gamaniel Curasma Ramos, Jaime Mayorga)

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.