

Gamaniel Curasma Ramos

<sup>1</sup> Urbanización Chama, Santiago de Surco, Lima, Perú (gamaniel.curasma@gmail.com)

## RESUMEN

El Arco Peruano es un elemento de sostenimiento en forma de un 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 con la finalidad de controlar los altos esfuerzos que se producen por el minado masivo del método Sub Level Caving en la mina Yauricocha. Usualmente los altos esfuerzos del minado dañan de sobre manera a las cimbras de acero y en menos de dos meses de su instalación requieren ser reinstaladas para mantener una sección mínima operativa de 3.0 metros requerida para el ingreso de los cargadores de bajo perfil de 6 yd<sup>3</sup> de capacidad. Esto origina un incremento en los costos de sostenimiento y retrasa la extracción de mineral al tener que paralizar la extracción de mineral para la reinstalación de las cimbras de acero. Es por esa razón que se implementa este nuevo diseño de sostenimiento en la minería, actualmente aplicado en los tajos de producción del cuerpo Esperanza.

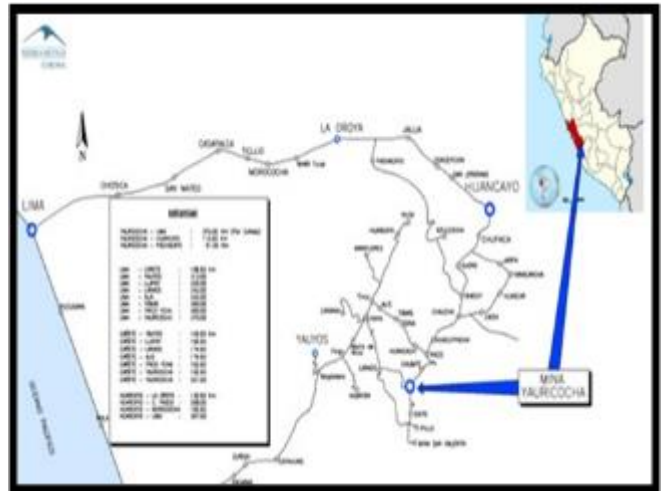
## 1. Introducción

El yacimiento polimetálico de Yauricocha está siendo explotado por el método por hundimiento Sub Level Caving (SLC), y como parte de la ampliación de sus operaciones, 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 para soportar los altos esfuerzos de las excavaciones más profundas de la mina, cuya factibilidad técnica es explicada en el presente artículo.

### Ubicación y acceso

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 4150 y los 4700 msnm.



[Figura 1].- Plano de ubicación de la mina Yauricocha.

## 2. Geología

### Geología regional y local

La geología de la mina Yauricocha tiene como origen en el Cretáceo, a nivel regional la zona está conformada por capas de rocas sedimentarias que presentan una orientación aproximada de NW-SE. 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.

Entre las capas sedimentarias más potentes están la Formación Jumasha, Formación Casapalca y Formación Celendín. Los cuerpos mineralizados están emplazados en la caliza Jumasha y se encuentran agrupados tanto dentro de la caliza como a lo largo del contacto con las lutitas Celendín (France Chert) y en contacto con las masas intrusivas. Son de configuración irregular, presentan forma lenticular con sus ejes mayores paralelos al rumbo general de los estratos (NW-SE) buzan a gran ángulo al NE o son aproximadamente verticales.

### Geología estructural

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, 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 aproximadamente N50°W con suave "plunge" de 20° al SE.

Durante el plegamiento, evento pre y/o contemporáneo al intrusivo, tuvo lugar la primera fracturación desarrollándose fallas longitudinales paralelas al rumbo regional de la estratificación. De todas estas fallas, resalta la falla Yauricocha que aparece a lo largo del contacto caliza Jumasha-lutita Celendín la cual se extiende a gran distancia al SE de la mina Ipillo y continua al N, detrás del cerro Huamanripa, paralelo y a lo largo de la laguna Silacocha.

Este conjunto de fracturas que forman bloques fallados, a través de los dominios litológicos del área, juntamente con la falla Yauricocha representan la fracturación más importante y ejercieron un fuerte control en el emplazamiento de la mineralización.

### 3. Investigaciones geomecánicas básicas

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

#### 3.1. Aspectos litológicos

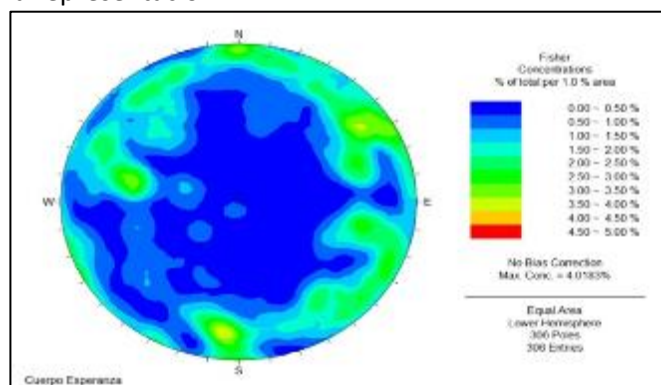
De la información obtenida de registros geológicos, mapeos geotécnicos y observaciones de campo el cuerpo mineralizado Esperanza tiene una orientación NE-SW, siendo las rocas encajonantes hacia el techo roca intrusiva, mientras que hacia el piso caliza.

#### 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 empleando la metodología de proyección estereográfica, haciéndose uso para tal fin el programa Dips versión 5.1, programa que pertenece al paquete geomecánico de Rocscience.

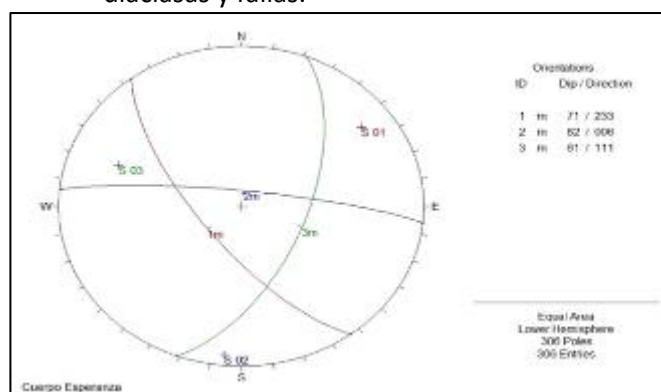
Las discontinuidades registradas abarcan en su mayoría diaclasas, fallas, fallas mineralizadas y estratos, la representación



[Figura 2].- Diagrama estereográfico compuesto de contornos.

De 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° y buzamiento 71° (S23°E/71°SW), conformado principalmente por diaclasas y fallas.
- Familia 02, sistema con dirección de buzamiento 6° y buzamiento 82° (S84°E/82°NE), conformado principalmente por diaclasas y fallas.
- Familia 03, sistema con dirección de buzamiento 111° y buzamiento 61° (N21°E/61°SE), conformado principalmente por diaclasas y fallas.



[Figura 3].- Diagrama estereográfico compuesto de círculos máximos.

##### 3.2.2. Condición estructural de las discontinuidades

Las características estructurales de la masa rocosa involucrada al área de estudio 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.

Parámetro	Dominio estructural			unid.
	Caliza	Contacto piso	Mineral	
Espaciament.	<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 1].- Condición estructural de las discontinuidades en la caja piso.

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 2].- Condición estructural de las discontinuidades en la caja techo.

### 3.3. Clasificación de la masa rocosa

Con el fin de dar una clasificación al macizo rocoso han sido empleados los criterios de clasificación desarrollados por (Bieniawski, 1989) (Rock Mass Rating - RMR versión 1989).

Además de los criterios mencionados y como parámetro dentro del cálculo de ambos, fue estimado el valor de calidad de roca RQD empleándose la relación propuesta por (Priest, 1983), necesitándose únicamente el registro lineal de todas las discontinuidades presentes.

Los resultados de la clasificación geomecánica correspondiente a los dominios estructurales de la zona de estudio son resumidos en la siguiente tabla.

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 3].- Clasificación geomecánica de la masa rocosa.

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 el siguiente cuadro.

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 4].- Zonificación geomecánica – Rock Mass Rating

### 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 siguiendo los siguientes procedimientos:

- Ensayos de campo.
- Ensayos de laboratorio.

Ensayos de campo: Dentro del área de estudio se realizó una campaña específica empleando el martillo Shmidt de dureza, todas las pruebas fueron llevadas a cabo siguiendo los estándares especificados por la ISRM. La resistencia compresiva media de cada dominio estructural es resumida en la siguiente tabla.

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 5].- Resistencia compresiva ( $\sigma_c$ ): ensayo de Martillo Schmidt - Caliza

Ensayos de laboratorio: Muestras de rocas representativas fueron enviados a diferentes

laboratorios certificados, muestras a las que se les realizó el ensayo de compresión simple, todos los ensayos fueron realizados siguiendo los procedimientos y estándares establecidos en las normas ASTM.

Dominio estructural	Resist. compresiva no confinada (MPa)
Caliza	65
Contacto piso	40
Mineral	20
Contacto techo	40
Intrusivo	120

[Tabla 6].- Ensayo de resistencia compresiva no confinada ( $\sigma_c$ ).

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

Con el objetivo de conocer las propiedades físicas de cada dominio estructural, se enviaron muestras de roca al laboratorio, a las cuales se les realizó el ensayo de propiedades físicas, de constantes elásticas, de corte directo y de resistencia a la compresión triaxial, todos los ensayos fueron realizados siguiendo los procedimientos y estándares establecidos en las normas ASTM.

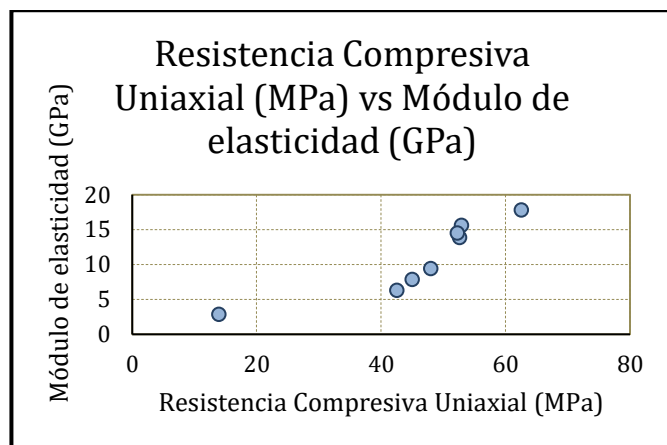
La densidad obtenida para la caliza se encuentra en el rango de 2.60 a 2.73 t/m<sup>3</sup>, intrusivo de 2.55 a 2.84 t/m<sup>3</sup>, mineral de 3.88 a 4.1 t/m<sup>3</sup>.

Dominio estructural	Densidad (g/cc)		Porosidad aparente (%)	Peso específico aparente (KN/m <sup>3</sup> )
	Seca	Húmeda		
Caliza	2.64	2.65	1.00	25.90
Contacto piso	2.70	2.71	1.83	26.49
Mineral	4.05	4.10	5.24	39.73
Contacto techo	2.61	2.64	2.82	25.60
Intrusivo	2.66	2.67	1.36	26.09

[Tabla 7].- Ensayo de propiedades físicas

Dominio estructural	Módulo de elasticidad (GPa)	Constante de Poisson
Caliza	12.0	0.25
Contacto piso	10.0	0.30
Mineral	2.8	0.36
Contacto techo	10.0	0.30
Intrusivo	16.0	0.25

[Tabla 8].- Ensayo de Constantes elásticas



[Figura 4].- RCU (MPa) vs Módulo de elasticidad (GPa) de Caliza.

La constante de roca  $m_i$  es obtenida del ensayo de triaxial, su valor es fundamental para la aplicación del criterio de falla de (Hoek E. &, 1988), el cual es empleado en el análisis de estabilidad de las excavaciones. Los valores obtenidos de la constante " $m_i$ " son detallados en la siguiente tabla.

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

[Tabla 9].- Constante  $m_i$  de la roca intacta - criterio de falla de Hoek & Brown.

### 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, para lo cual se han sido considerados los diferentes dominios estructurales existentes, en el siguiente cuadro se presenta el resumen de las diferentes unidades geotécnicas.

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

[Tabla 10].- Unidades geotécnicas del cuerpo Esperanza.

### 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 haciendo uso del programa Rocdata versión 4.0, ha sido posible

estimar las propiedades de la masa rocosa, empleándose para tal fin el criterio de falla generalizado de (Hoek E. D., 2006).

Los datos de ingreso al programa fueron:

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

Las propiedades de resistencia correspondientes de los diferentes dominios estructurales presentes en cuerpo Esperanza, se resumen en las siguientes tablas.

Descripción de la propiedad	Unidad geotécnica					Unids.
	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/m <sup>3</sup>
Peso específico (PE)	0.026	0.026	0.034	0.025	0.026	MN/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad (Ei)	12	10	2.8	10	16	GPa
	12000	10000	2800	10000	16000	MPa
Constante de poisson ( $\mu$ )	0.25	0.3	0.36	0.3	0.25	-
Constante $m_i$ 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 $m_b$ de la masa rocosa	1.14	0.61	0.97	1.09	3.00	-
Constante S de la masa rocosa	0.0013	0.0004	0.0001	0.0001	0.0010	-
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 11].- Parámetros de resistencia de la masa rocosa

### 3.5. Esfuerzos insitu

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 " $\sigma_h$ " es obtenido del producto del esfuerzo vertical " $\sigma_v$ " y la contante " $k$ " determinada con el criterio de (Sheorey, 1994).

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidades
Cota de superficie	C. Sup.	4700	msnm
Cota media de la excavación	C. Excav.	4820	msnm

Profundidad de la excavación	Prof.	880	m
Densidad de la roca	$\delta$	2.65	t/m <sup>3</sup>
Módulo de deformación	Em	7.30	GPa
Esfuerzo vertical	$\sigma_v$	22.0	MPa
Constante	k	0.4	-
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h$	8.2	MPa

[Tabla 12].- Esfuerzos insitu.

### 3.6. Esfuerzos insitu

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 disminuyendo la resistencia al corte favoreciendo la inestabilidad en las labores subterráneas.

En la caja techo se evidencia la presencia de agua por filtración a través de discontinuidades los cuales han sido influyentes en el incremento de carga húmeda de las ventanas de explotación en las zonas actuales de explotación nivel 1070, piso 11 y piso 5, es debido a esto que se ha venido presentando empujes de carga en el nivel 1070 piso 5.

Tomando en cuenta la información recopilada es que puede establecerse que las condiciones de agua son las siguientes:

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 13].- Condiciones de agua subterránea.

## 4. Sub Level Caving

### 4.1. Metodología

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, las cuales son:

- 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).

Entre las principales características en la aplicación de este método se encuentran los 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 laboreo de desarrollo y preparación en diferentes niveles.
- La fortificación o sostenimiento aplicado en las ventanas es pesado.
- La recuperación puede alcanzar hasta el 75%.

#### 4.2. Análisis de estabilidad controlada por estructuras labores de preparación

Tomando como base el arreglo estructural de la masa rocosa, las dimensiones de la excavación y su orientación con el uso de herramientas de cómputo en el análisis se ha podido calcular la estabilidad de las cuñas formadas en el contorno de la excavación.

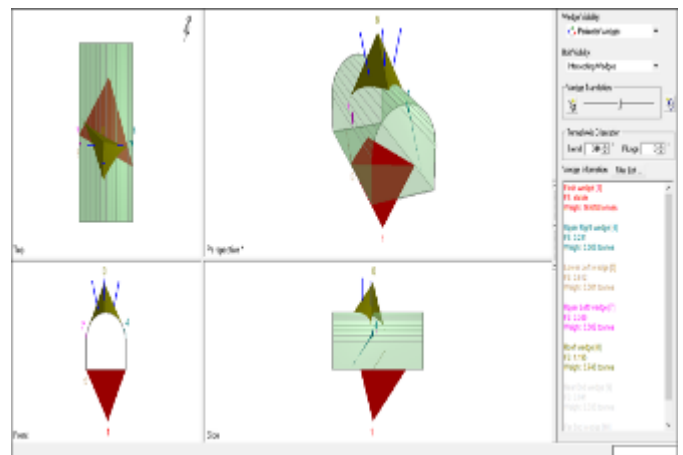
La herramienta de cálculo empleado ha sido el programa Unwedge versión 3.0 perteneciente (Rocscience, Geomechanics Software, 2007) con el uso del programa se ha podido obtener una apreciación detallada de todas las cuñas con posibilidad de generar estabilidad en la excavación diseñada.

Las dimensiones y orientación de las labores de preparación cumplen con los siguientes parámetros de diseño.

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

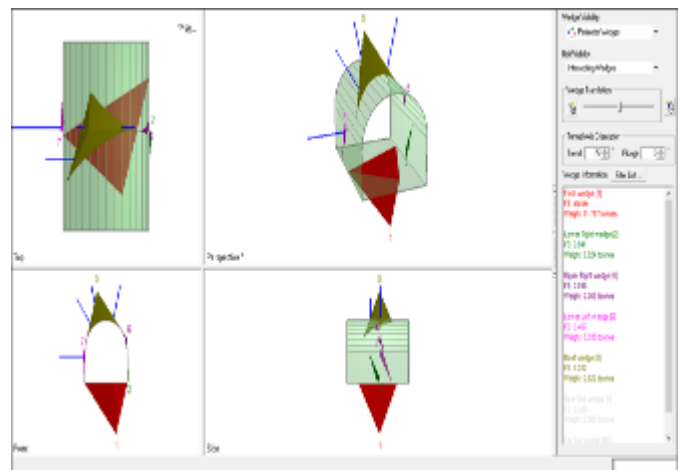
[Tabla 14].- Parámetros de diseño de las labores de preparación.

Las cuñas más significativas ubicadas en las labores mineras diseñadas son mostradas en el siguiente gráfico:



[Figura 5].- Estabilidad controlada por estructuras en Subniveles.

Nota: Los sistemas de discontinuidades formadas entorno a las excavaciones generan cuñas inestables en la corona con un factor de seguridad (FS) de 0.0 a 0.24, los cuales pueden ser controlados con desatado de rocas y al ser aplicado el sostenimiento: Malla electrosoldada + Pernos Splitset 7 pies, pernos expansivos Wanza, FS > 1.2.



[Figura 6].- Estabilidad controlada por estructuras en Ventanas.

Nota: Los sistemas de discontinuidades formadas entorno a las excavaciones generan cuñas inestables en la corona con un factor de seguridad (FS) de 0.0 a 0.09, los cuales pueden ser controlados con desatado de rocas y al ser aplicado el sostenimiento: Malla electrosoldada + Pernos Splitset 7 pies, FS > 1.2.

En el análisis de estabilidad controlado por estructuras de las labores de preparación: subniveles y ventanas, las cuales 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) el área de geomecánica realizará la evaluación del sostenimiento que mejor se adecúe al laboreo

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

[Tabla 15].- Factor de seguridad – estabilidad controlada por estructuras.

## 5. Diseño del pilar de seguridad: Caja piso mineral

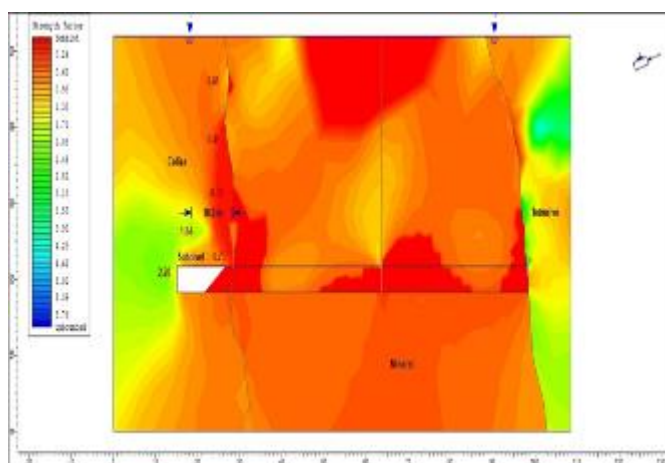
Las labores de preparación para el minado del cuerpo esperanza, subniveles, estocadas, chimeneas y cruceros se encuentran asociadas a un macizo rocoso de calidad Regular, RMR de 36 a 40.

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

Para tal fin se ha hecho uso de la herramienta de cómputo Phase2, versión 8 del paquete de Rocscience, siendo discutidos los resultados a continuación.

### 5.1. Modelo de análisis dimensional – diseño de pilares de seguridad

El modelo de análisis bidimensional emplea la metodología de elementos finitos (MEF) basado en el comportamiento de post-rotura de los materiales de tipo elasto-plástico en un estado bidimensional.



[Figura 7].- 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 el tajo, las cuales 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.

Tomando como base que el modelo fue elaborado para un macizo rocoso de calidad regular, RMR III-B, el ancho mínimo del pilar de seguridad entre el subnivel de preparación y el contacto desmonte-mineral deberá tener un ancho no menor a los 10.0 metros.

Al culminar el minado de la ventana se observa un relajamiento entorno al contacto caliza – mineral lo cual 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.

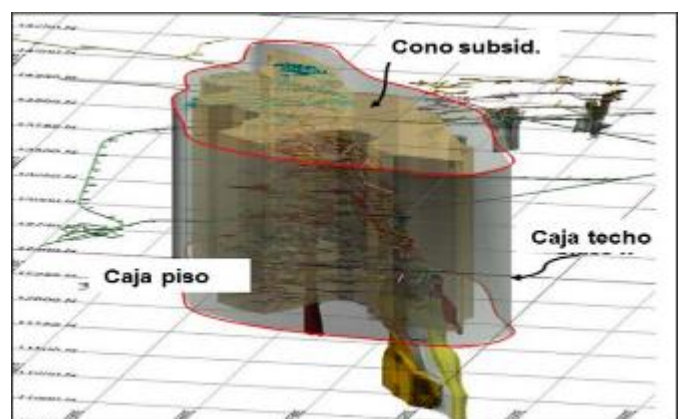
En macizos rocosos asociados a otras calidades diferentes a las analizadas en el presente informe, el departamento de geomecánica deberá realizar un análisis más detallado con el fin de determinar el ancho del pilar de seguridad.

## 6. Análisis de estabilidad de la excavación

### 6.1. Análisis de estabilidad controlada por esfuerzos

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

La herramienta de cálculo empleada ha sido el programa RS2 perteneciente a Rocscience Inc. 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.



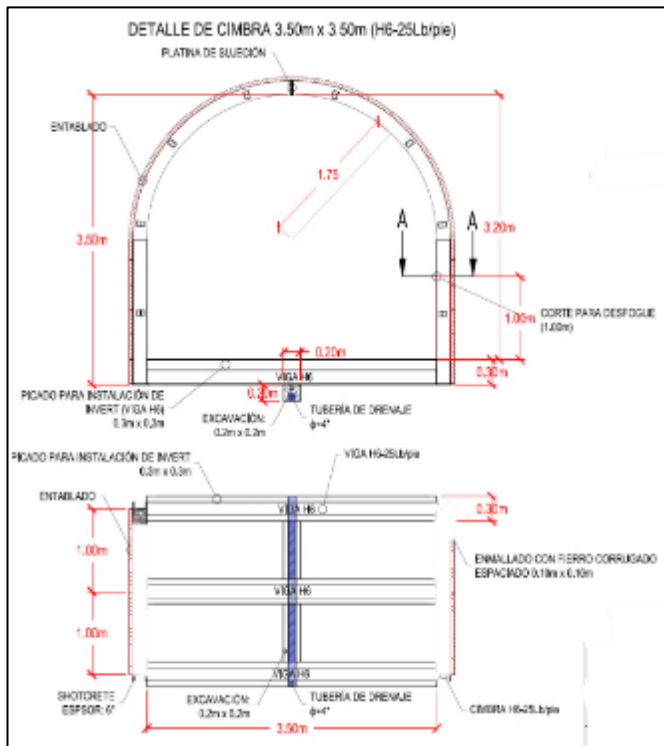
[Figura 8].- Modelo tridimensional de la mina Yauricocha.

## 7. Diseño del Arco Peruano

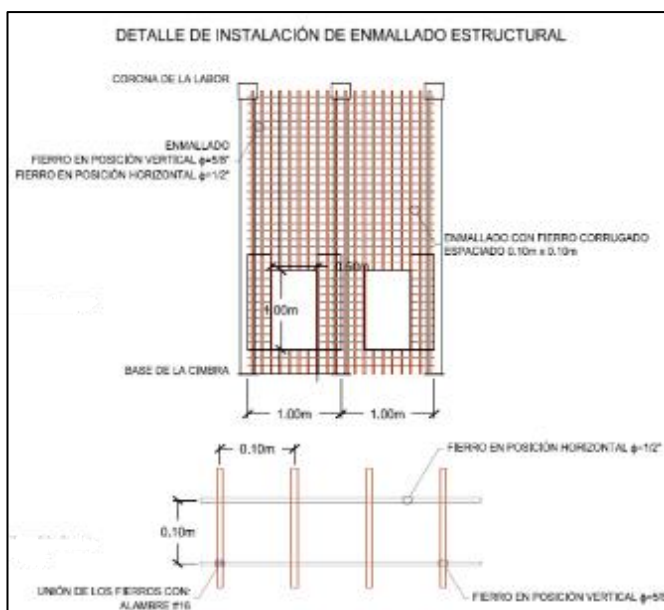
El cuerpo mineralizado esperanza debido a la profundidad de su génesis el mineral ya casi estaba perdido ya que los cimbras no soportaban lo suficiente, pero gracias a la investigación para poder soportar los grandes esfuerzos se diseñó los Arcos Peruano y se

logró recuperar dos ventanas importantes de 70m de largo, por lo tanto, se recuperó 69k tn 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.

Es por ello por lo que a la actualidad se sigue aplicando y tiene buenos resultados, el diseño se explica en la siguiente figura:



[Figura 9].- Diseño y parámetros del Arco Peruano.



[Figura 10].- Detalle de instalación de enmallado estructural.

## 8. Aplicación del Arco Peruano

Los Arcos Peruanos son estructuras de acero estructural que se instalan en las cimbras de acero de viga H6 previamente instaladas en los tajos de producción.



[Figura 11].- Instalación de la viga de acero del Arco Peruano en tajos de producción.

Posteriormente se procede al lanzado de shotcrete en 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.



[Figura 12].- Arco Peruano instalado en tajo de producción.



## 9. Ahorro económico

En el siguiente cuadro se muestra el costo de instalación de las cimbras de acero en una longitud de 10 metros de minado que es de 27,632 U\$ que incluye la instalación de 4 cimbras adicionales nuevas para el reemplazo de aquellas dañadas por los esfuerzos. 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. Ver tabla parte inferior.

Longitud de Minado	Cimbras H6	Costo/Unidad	Costo Total	Cimbras Adicionales	Costo Adicional	Costo Final
metros	Unidades	U\$	U\$	Unidades	U\$	U\$
10	10	1,974	19,737	4	7,895	27,632

[Tabla 16].- Costo sostenimiento con cimbra de refuerzo.

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

[Tabla 17].- Costo sostenimiento con Arco Peruano.

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.

## N. Conclusiones

El Arco Peruano es un elemento de sostenimiento estructural que controla de forma efectiva los esfuerzos producidos por el minado masivo Sub Level Caving (SLC) y su performance superior a las cimbras de acero permite reducir el costo de sostenimiento al reducir la instalación de cimbras dañadas por los esfuerzos además que evita la paralización de la extracción de mineral que es necesaria para la instalación de las nuevas cimbras de refuerzo.

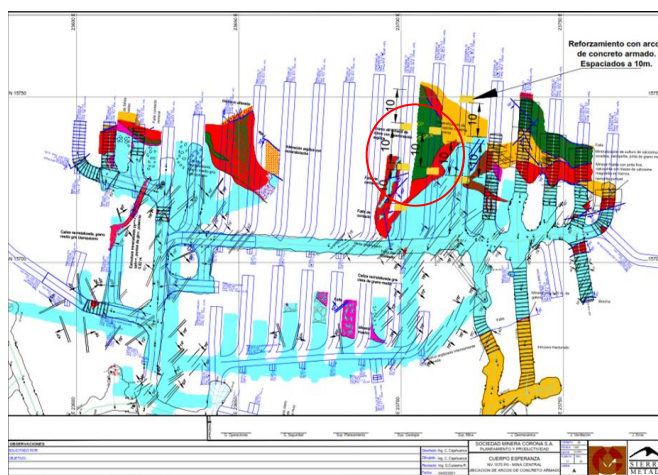
## Agradecimientos

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, por dar su apoyo para la realización de investigación.

## Referencias

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, Inc.
- Cumming-Potvin, D. (2018). *Caving 2018*. Obtenido de A re-evaluation of the conceptual model of caving mechanics: [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815\\_11\\_Cumming-Potvin/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_11_Cumming-Potvin/)
- Hoek, E. &. (1988). *The Hoek-Brown failure criterion. A 1988 update. Rock engineering for underground excavations*. Canadian: Symp. Curran Ed. University of Toronto. .
- Hoek, E. D. (2006). *Empirical Estimation of Rock Mass Modulus*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.
- Jakubec, J. (2018). *Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines*. Obtenido de Caving 2018: [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815\\_03\\_Jakubec/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_03_Jakubec/)
- Priest, S. &. (1983). *Probabilistic stability analysis of variable rock slopes*. Trans. Inst. Min. Metal. Rocscience. (2007). *Geomechanics Software*. <http://www.rocscience.com>.
- Rocscience. (2008). *Geomechanics Software*. Obtenido de Rocscience: <http://www.rocscience.com>.
- Sheorey, P. (. (1994). *A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts.

## Ilustraciones



[Figura 14].- Ubicación de los Arcos Peruanos.



[Figura 13].- Estructura del Arco Peruano.

**Perfil profesional**

Actual Jefe Senior de Geomecánica – Geotecnia en Cia SMC - Sierra Metals Unidad Yauricocha, con amplia experiencia en el sector minero. Con maestría en Geotecnia, Seguridad y Salud Ocupacional, Gestión de Operaciones Minera, Especialización avanzado en Gestión de Seguridad, Salud y Competencias Humanas en Minería, relaciones comunitarias. Especialista en métodos de explotación sublevel caving SLC y Sublevel stoping (minado longitudinal y transversal), amplio conocimiento de estabilidad física de componentes. Consigo innovar continuamente las exigencias de producción, interactuando en todos los niveles y asumiendo el compromiso en trabajo de calidad.

Nombre del autor: Gamaniel Curasma Ramos

Cargo: Jefe Senior de Geomecánica - Geotecnia

Empresa: Sociedad Minera Corona – Sierra Metals Inc

Correo electrónico:

gamaniel.curasma@sierrametals.com

Teléfono / Celular: 915 351 277

Dirección: Alis, Yauyos, Lima – Perú

**Perfil profesional**

Actual Doctor en Ingeniería Ambiental, Magíster en Ciencias Ambientales, Ingeniero Geólogo Senior con 30 años de experiencia en Elaboración y Evaluación de Proyectos Mineros y Ambientales, Programas de Exploración y Desarrollos Mineros. Evaluación Geológica-Económica de Depósitos Epitermales (HS, IS, y LS) de Au-Ag, Pórfidos de Cu-Au-Mo, Skarns (Au-Cu), Sedex, MVT y VMS; con competencias en Planificación, Dirección, Supervisión y Monitoreo de Programas de Exploración desde etapas “grass root” hasta etapas avanzadas; con experiencia en Docencia Universitaria en Pregrado y Posgrado, Gestión Ambiental, Relaciones Comunitarias, Responsabilidad Social y SIG. Conocimientos de GIS (Mapinfo, Arcgis).

Nombre del Coautor: Jaime César Mayorga Rojas

Cargo: Docente Principal de la UNMSM

Empresa: UNMSM

Correo electrónico: jaime.mayorga@unmsm.edu.pe

Teléfono / Celular: 996347691

Dirección: Lizardo Alzamora Oeste Nro. 220 San Isidro

Lima Perú