

Análisis de excavación y sostenimiento de la galería de la mina Cobriza usando FLAC

E. Maldonado

Cigeomin Consulting, Lima - Perú

RESUMEN: Este trabajo presenta el comportamiento mecánico del macizo rocoso luego de la excavación subterránea y los análisis de los diferentes tipos de sostenimiento aplicados a las galerías de la mina Cobriza, usando el programa FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua, ITASCA, 2005). El objetivo principal ha sido evaluar la estabilidad de las galerías sin y con sostenimiento a fin de controlar el colapso o rotura del macizo rocoso y prevenir accidentes de personal, maquinarias e infraestructuras durante la etapa de desarrollo y explotación de la mina. Entre los aspectos investigados comprenden la distribución de esfuerzos, deformaciones del macizo rocoso antes y después de sostenimiento de la excavación, identificación de contornos de plastificación y el comportamiento estructural de pernos de anclaje-shotcrete y del sistema “Shot-Fer”. Los resultados de la simulación numérica han mostrado que tanto la galería en lutita pizarrosa con el sistema de sostenimiento “Shot-Fer” y la galería en manto con pernos de anclaje/shotcrete se mantendrán estables.

1 INTRODUCCIÓN

La mina Cobriza se encuentra ubicada en el distrito de San Pedro de Coris, provincia de Churcampá y departamento de Huancavelica, a una distancia de 366 Km al SE de la ciudad de La Oroya y a una altura promedio de 2500 m s.n.m.

La mineralogía en el distrito minero de Cobriza consiste principalmente de calcopirita, hornblenda, arsenopirita y pirrotita, dentro del grupo Tarma. La explotación a mayor escala se reduce a la mineralización de cobre, plata y bismuto en el manto. El método de explotación utilizado es el corte y relleno ascendente mecanizado.

En la mina Cobriza, se viene aplicando diferentes tipos de sostenimiento, así como arcos metálicos con revestimiento de concreto armado, diques de contención, pernos de roca, shotcrete y shot-fer.

Este artículo presenta la evaluación geomecánica del macizo rocoso con y sin sistema de sostenimiento de dos galerías principales de la mina Cobriza, se simula dos escenarios; una sección de galería inclinada o rampa excavada en lutita-pizarrosa con sostenimiento de shotcrete, malla de alambre No 8 y arcos de fierro corrugado de 5/8” de diámetro (Shot-Fer); y otra sección de galería principal de extracción nivel 28 excavada en roca tipo manto sostenida con pernos de anclaje de 1” de diámetro y shotcrete, algunas secuencias de sostenimiento se ilustran en la Figura 1 y 2. Cada caso es analizado más adelante aplicando el programa numérico FLAC.



Figura 1. Perforación para instalación de pernos de anclaje con Jumbo Hidráulico en la Galería Nv.28 de la mina Cobriza.

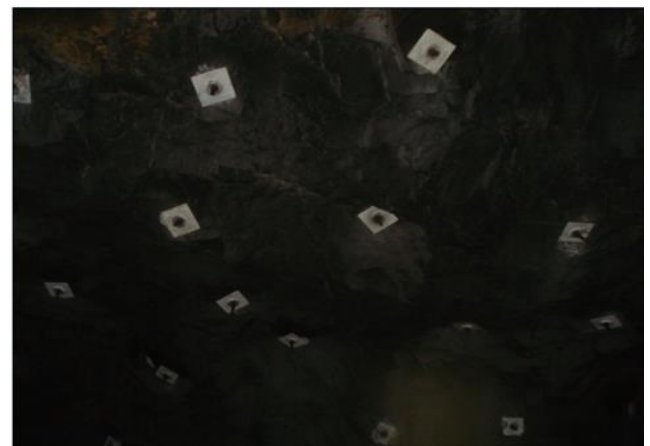


Figura 2. Pernos de acero de 3 m inyectados con lechada de cemento, Galería Nv.28 de la mina Cobriza.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

En el distrito minero de Cobriza, afloran rocas sedimentarias del Paleozoico Superior, que están representados por los grupos Tarma, Copacabana y Mitu. La litología está constituida por secuencias marinas de facies detríticas finas, así tenemos: lutitas pizarrosas, margas, calizas y areniscas. El rumbo de la secuencia varía entre la orientación N 40° - 70° W y el buzamiento de 30° a 50° NE. Las calizas constituyen la unidad más importante por cuanto alojan al manto mineralizado, consiste en intercalaciones de capas de 1 a 30 cm de potencia, totalizando 25m a 30m de potencia (Grupo Tarma). El grupo Copacabana sobreyace en concordancia al grupo Tarma, se trata de una secuencia marina, conformada por una estratificación gruesa de calizas, que se intercalan con pizarras calcáreas y en la base presenta estratos de areniscas intercaladas con pizarras y calizas. El intrusivo mayor es el batolito granítico Cobriza, es de composición alcalina, aflora en el área con un ancho de 3 a 4Km., con rumbo N 45° W y un buzamiento de 75° NE (W.Kobe 1963). En el contacto con el Grupo Tarma causa un metamorfismo inicialmente, lo que se traduce en una leve recrystalización de las lutitas. Los intrusivos menores están representados por diques de composición andesítica y diabásica que se cortan en las diferentes labores de la mina y que se introducen inclusive al grupo Copacabana y al batolito Cobriza. La falla Rosa, Frida, Huaribamba y Pampalca son las fallas más influyentes en el yacimiento minero.

3 MODELO CONSITUTIVO

En el análisis de excavaciones subterráneas sobre macizos rocosos es ampliamente aceptado el criterio de falla Hoek-Brown. Este criterio caracteriza las condiciones de esfuerzos que conducen a falla la masa rocosa, la superficie de falla es no lineal y está basado en la relación entre los esfuerzos principales mayor y menor. El modelo incorpora una regla de flujo plástico que varía como una función del nivel de esfuerzo de confinamiento (Cundall, Carranza & Hart, 2003).

En el presente trabajo, la superficie de cedencia del macizo rocoso corresponde al criterio generalizado de Hoek-Brown (Hoek and Brown, 1980 y 1998) y está definido por la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left\{ m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right\}^a \quad (1)$$

Donde:

σ_1 y σ_3 = Esfuerzo principal efectivo mayor y menor en el momento de rotura,

σ_{ci} = Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta

m_b , S , a = Constantes de masa rocosa que pueden ser obtenidos a partir de GSI (índice de resistencia geológico), m_i (constante de material de roca intacta) y factor de alteración por efecto de la voladura D (Hoek, 2002)

La resistencia a la compresión no confinado se obtiene haciendo $\sigma_3=0$ y está dado por $\sigma_c = \sigma_{ci} s^a$, y la resistencia a la tracción por $\sigma_t = -s \sigma_{ci} / m_b$.

4 ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN FLAC

Un aspecto importante de análisis y diseño geomecánico es el uso de soportes estructurales para estabilizar las masas rocosas. La geometría de la estructura y sus propiedades, y su interacción en macizo rocoso pueden ser modeladas con FLAC. A continuación, se describen los tipos de elementos estructurales asociados al presente trabajo.

4.1 Elementos "Beam"

Elementos que representan barras o vigas. Estos elementos son bidimensionales con tres grados de libertad (x-traslación, y-traslación, rotación) para cada nudo, como se ilustra en la Figura 3. Un elemento típico es definido por su material y propiedades geométricas. Estos elementos son recomendados para representación de materiales resistentes a flexión (FLAC, 2005). En el presente trabajo el arco de acero corrugado de 5/8" de Ø es representado por este elemento.

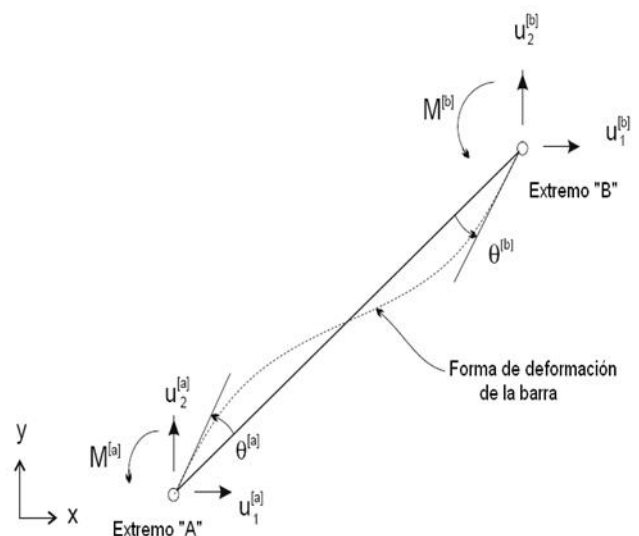


Figura 3. Nomenclatura del elemento viga.

4.2 Elementos “Liner”

Elemento bidimensional con tres grados de libertad (x-traslación, y-traslación y rotación) en cada nudo, estos elementos se pueden unir entre sí y/o a la malla del modelo. Los elementos incluyen un modelo de material elasto-plástico que incorpora resistencia a flexión, momento flector límite y resistencia a fluencia del material. La envoltoria de la falla última para materiales cementados reforzados y no reforzados son similares, sin embargo, materiales reforzados tienen una capacidad residual que permanece después de la falla. Materiales cementados no reforzados típicamente no tienen capacidad residual. Este elemento estructural es recomendado para modelar recubrimientos de la galería, tal como el concreto o shotcrete.

4.3 Elementos “Rockbolt”

Elementos bidimensionales que pueden transferir fuerzas normales y de corte y momentos flectores a la malla del modelo. Estos elementos son usados para modelar una gran variedad de soportes para los cuales las capacidades de tracción son importantes. En adición, los elementos “Rockbolt” pueden tomar en cuenta el efecto de cambios en esfuerzos de confinamiento alrededor del refuerzo, el comportamiento de ablandamiento del material entre el acero y la roca, y la ruptura a tracción del elemento de acero. Estos elementos son bien adaptados para representar rocas reforzadas, en que los efectos no lineales de confinamiento, cemento inyectado o resina al taladro, o rotura a tracción son importantes. En la evaluación de fuerzas axiales que se desarrollan en el refuerzo, los desplazamientos son calculados en puntos nodales a lo largo del eje del refuerzo, como se ilustra en la Figura 4. Las fuerzas desequilibradas en cada punto nodal, así como las fuerzas de corte a través de la interacción cortante a lo largo del cemento inyectado, son estimadas a partir de fuerzas axiales en el refuerzo. Los desplazamientos axiales son calculados de aceleraciones (integradas de la ley de movimiento) usando la fuerza de desequilibrio y la masa agregada a cada punto nodal.

El comportamiento al corte del cemento inyectado es representado por un resorte, que representa la rigidez al corte y otra que representa la resistencia a cohesión del material inyectado en los puntos nodales, así como se muestra en la Figura 4.

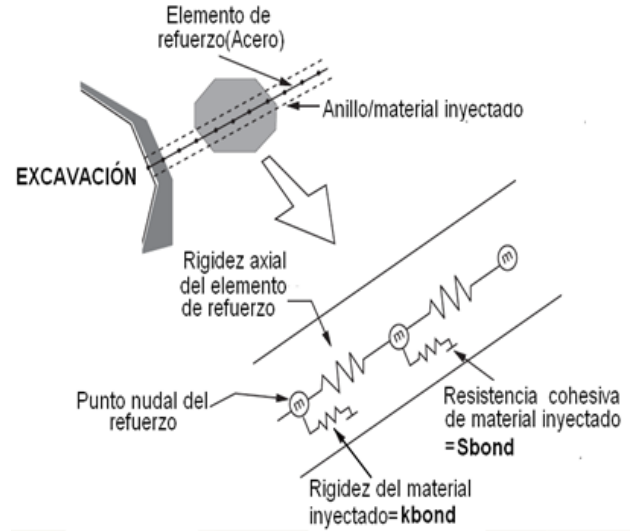


Figura 4. Representación mecánica del elemento de refuerzo considerando el comportamiento al corte del material inyectado al taladro (Itasca,2005).

El desplazamiento relativo entre la interfase de refuerzo de acero-cemento inyectado y cemento inyectado-roca es descrito numéricamente por la rigidez del material inyectado (K_{bond}) y puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$\frac{F_s}{L} = K_{bond}(U_c - U_m) \quad (2)$$

Donde:

F_s = Fuerza de corte que desarrolla en el material inyectado.

K_{bond} = Rigidez del material inyectado

U_c = Desplazamiento axial del refuerzo

U_m = Desplazamiento axial del medio (roca)

L = Longitud del elemento estructural.

La máxima fuerza de corte que puede ser desarrollado en el material inyectado está en función de la resistencia al corte y la resistencia a la fricción del material inyectado, este puede ser calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{F_s^{max}}{L} = S_{bond} + \sigma'_c \times \tan(S_{friction}) \times \text{perímetro} \quad (3)$$

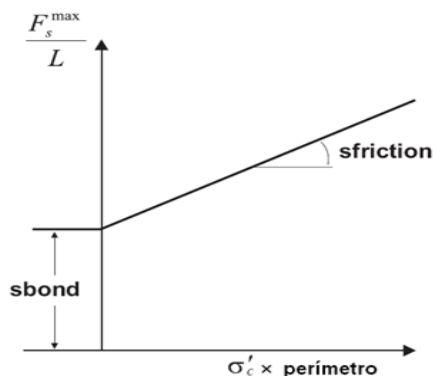
Donde:

S_{bond} = Resistencia al corte intrínseco o cohesión

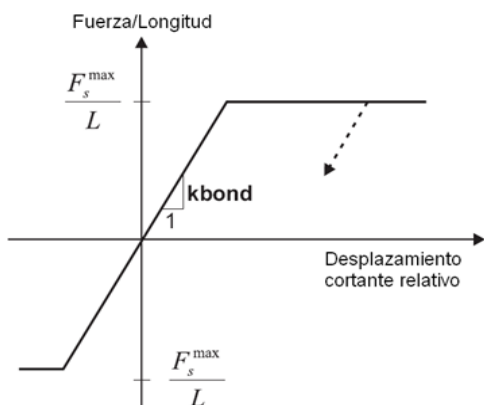
σ'_c = Esfuerzo normal confinante efectiva media del refuerzo.

$S_{friction}$ = Ángulo de fricción.

En la Figura 5 se representa la fuerza máxima del material inyectado al taladro.



a) Criterio de resistencia al corte



b) Fuerza cortante versus desplazamiento.

Figura 5. Comportamiento del material inyectado para elementos de refuerzo (ITASCA, 2005)

5 EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO EN PIZARRA

5.1 Rampa y propiedades de los materiales

En Cobriza los accesos a zonas mineralizadas son a través de galerías inclinadas o rampas en forma de espirales o zig zag, comunican a tajeos y niveles, se hacen aproximadamente a cada 500 m. Existen dos tipos de rampas: Los que fueron ejecutados en 86% en manto y 14% en lutita-Pizarrosa, con echadero de mineral (ore-pass) y la chimenea de servicios al costado de la espiral; y el diseño actual tiene las siguientes características:

Radio de curvatura	: 14 m.
Paso	: 24 m
Gradiente	: 12%
Sección de galería	: 6.00m x 4.00m
Desarrollo en manto	: 44%
Desarrollo en lutita-pizarra	: 56%
Pilar	: 52m

En este caso el echadero del mineral se hace dentro del zig-zag y la chimenea de servicios generalmente se hace al costado del zig-zag. El presente trabajo simula el comportamiento de esta sección de rampa en lutita-pizarrosa. En la Tabla 1 se presente el resumen de las propiedades mecánicas asumidos para el material Lutita-pizarrosa. El factor de alteración “D” ha sido considerado 0.3 por ser una voladura controlada.

Tabla 1. Propiedades de la masa rocosa

Propiedades	Lutita pizarrosa
Masa específica, kg/m ³	2700
Resistencia a compresión uniaxial de roca intacta, σ_{ci} (MPa)	48
RMR	30
GSI	25
Constante de la masa rocosa, “ m_b ”	0.257
Constante de la masa rocosa, “ s ”	0.0001
Constante de la masa rocosa, “ a ”	0.531
Módulo de Young, E (GPa)	1.396
Coefficiente de Poisson, ν	0.25

El tipo de sostenimiento aplicado para Lutita-Pizarrosa fue “Shot-Fer”, constituido por una capa de shotcrete (sistema de mezcla seca con aditivo acelerante Sika de proporción volumétrica 2:1) de 15 cm de espesor, malla de alambre No 8 con cocada de 4”x4” y por arcos de fierro corrugado de 5/8” de diámetro separados a cada 45 cm. Este sistema de sostenimiento ha demostrado gran flexibilidad en su instalación y es de menor costo comparado con arco de concreto armado y cercha metálica. En la Tabla 2 y 3 se detallan las propiedades estimadas para estos materiales de sostenimiento.

Tabla 2. Propiedades de concreto proyectado

Propiedades	Shotcrete
Factor de forma sección Rampa (5/6)	0.8333
Área de sección transversal (m ²)	0.15
Espesor (m)	0.15
Momento de Inercia (m ⁴)	2.93x10 ⁻⁴
Módulo de Young (GPa)	24.50
Relación de Poisson, ν	0.20
Resistencia a la compresión (MPa)	25

Para el análisis en FLAC se ha considerado un factor de forma de la sección de rampa igual a 5/6 y el valor especificado para módulo de Elasticidad deberá ser dividido por $(1-\nu^2)$ para tomar en cuenta la condición de deformación plana (ITASCA, 2005).

Los materiales reforzados tienen típicamente una capacidad residual que permanece después de la falla en la carga última, en tal sentido, para la malla de alambre se estimó una resistencia a tracción pico de 4 MPa y una resistencia a tracción residual de 3.2 MPa.

Tabla 3. Propiedades del acero

Propiedades	Acero corrugado 5/8" Ø
Área de sección transversal(m²)	1.9175x10 ⁻⁴
Momento de Inercia(m⁴)	2.9258x10 ⁻⁹
Módulo de Young (GPa)	200
Relación de Poisson, ν	0.30
Límite de fluencia(kg/cm²)	4280
Resistencia a la tracción(kg/cm²)	6320
Espaciamiento entre arcos de acero (m)	0.45m

5.2 Modelo numérico

La simulación numérica está basada en el método de diferencias finitas explícito utilizado por FLAC. La malla numérica se optó por una discretización más intensa en la región del túnel con el propósito de obtener una mayor precisión en los resultados. La malla tiene un total de 6656 zonas.

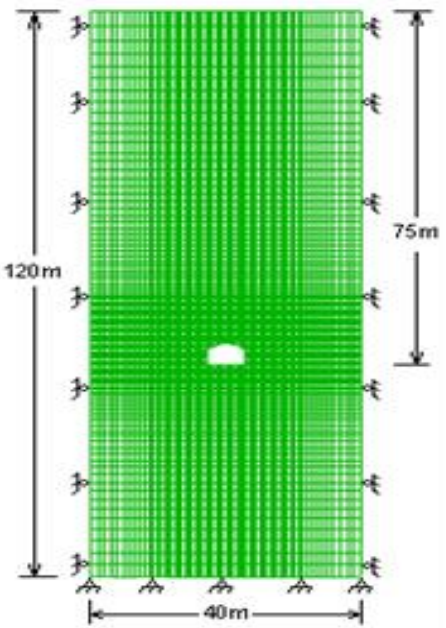


Figura 6. Modelo geométrico para el análisis con FLAC.

El comportamiento del macizo rocoso está representado por el criterio de falla de Hoek-Brown. Los materiales de sostenimiento han sido representados por los elementos “Liner” y “Beam” implementados en FLAC. En la Figura 6 se muestra el aspecto general de la geometría del túnel, las condiciones del contorno para el análisis con FLAC.

6 RESULTADOS

6.1 EXCAVACIÓN

La primera fase de simulación numérica ha sido realizada sin considerar algún sistema de soporte. La Figura 7 ilustra el resultado de análisis numérico, se observa el cambio de la trayectoria de los esfuerzos principales producto de la excavación en el macizo rocoso, es decir, los esfuerzos existentes o en equilibrio se han perturbado, rotado y se han generado nuevos esfuerzos en los contornos de la excavación. En la Figura 8 se muestra el resultado de la configuración de los desplazamientos verticales en los contornos de la excavación, alcanzando hasta de 6 cm de desplazamiento hacia el techo de la galería sin sostenimiento, lo que generaría una inestabilidad del labor subterránea en corto tiempo.

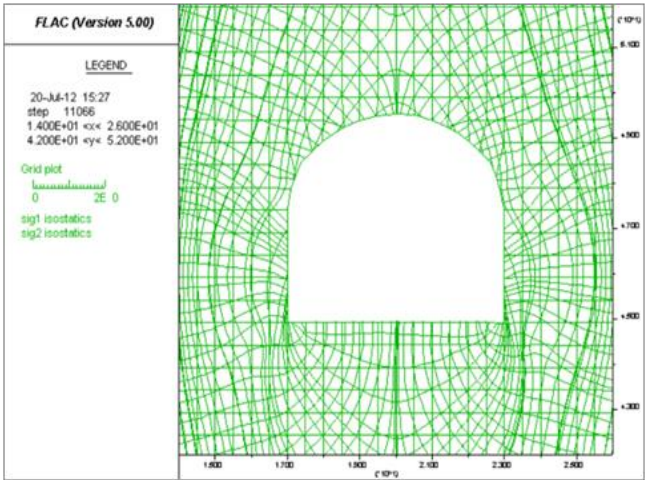


Figura 7. Trayectoria de esfuerzos principales en el contorno de la excavación.

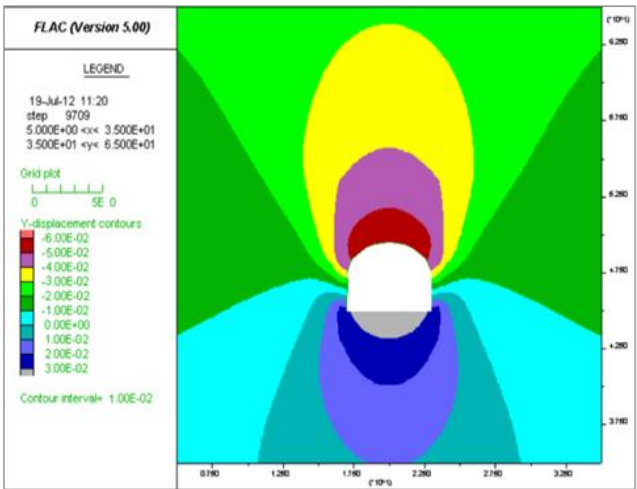


Figura 8. Configuración del desplazamiento vertical después de la excavación.

6.2 Sostenimiento de la rampa

Una segunda simulación numérica se realizó considerando el sistema de soporte “Shot-Fer”. El arco de fierro corrugado de 5/8” Ø fue simulado usando el elemento estructural “Beam” y la capa de shotcrete de 15 cm de espesor reforzado con malla de alambre No 8 fue representado por el elemento estructural “Liner”, ambos elementos implementados en el programa FLAC.

Los resultados del análisis numérico se muestran en las Figuras 9, 10 y 11. La Figura 9 presenta la reducción del desplazamiento vertical a 1.2 cm hacia el techo de la galería debido al desarrollo de resistencia de los elementos estructurales que forman del sistema de sostenimiento. La Figura 10 muestra la distribución del momento flector a lo largo del arco de acero corrugado de 5/8” de diámetro. Finalmente, en la Figura 11 se presenta la historia de desplazamientos verticales relativos del techo de la galería que alcanza hasta 1.2 cm y el desplazamiento horizontal relativo de la pared hasta 0.4 cm, dichos valores sugieren que la galería permanecerá controlada y algo estable durante la operación de la mina, sin embargo, requerirá de un plan de inspección, monitorio, mantenimiento periódico.

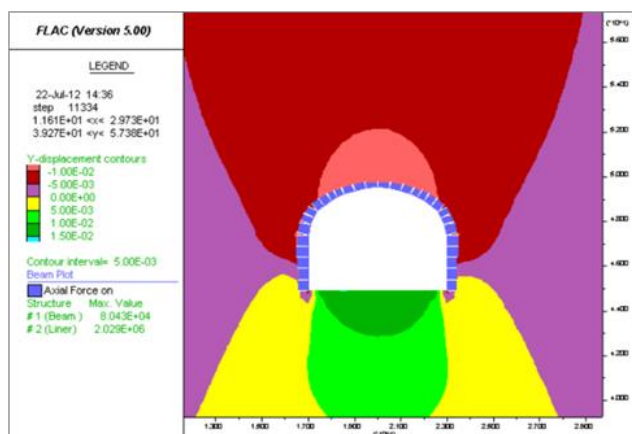


Figura 9. Distribución axial de fuerzas en el sistema de sostenimiento y desplazamientos verticales relativos.

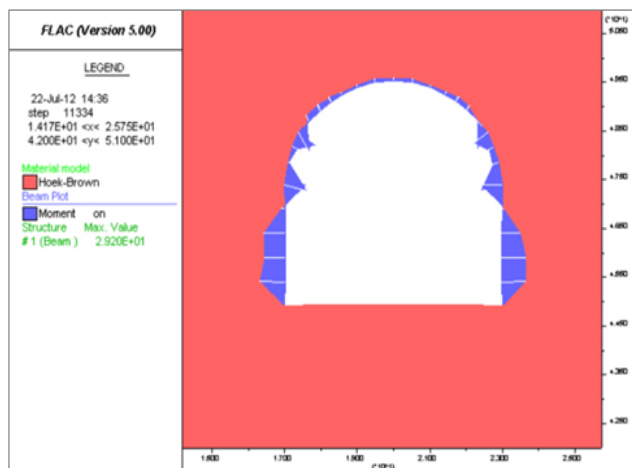


Figura 10. Distribución del momento flector en el elemento viga.

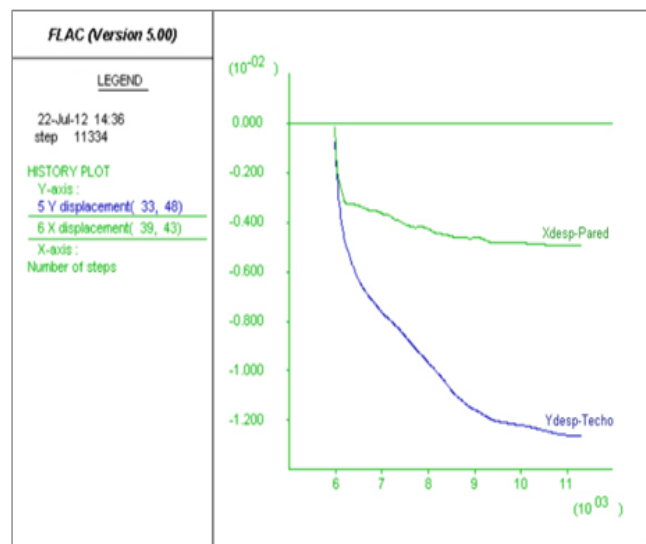


Figura 11. Historia de desplazamientos relativos en el techo y pared de la galería después del sostenimiento.

7 EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO EN MANTO

7.1 Galería y Propiedades de los Materiales

Las galerías en Cobriza generalmente se desarrollan paralelas a la dirección del manto y en el mismo manto, cerca al contacto con caja piso. La galería principal de extracción es el nivel 28, por donde se extrae el mineral de la mina hacia la planta concentradora de Pampa de Coris, por ferrocarril. Esta galería tiene 0.04% de gradiente promedio, sección de 12 m de ancho por 5 m de altura promedio, a través de ésta circulan Locomotoras y equipo pesados.

El manto está constituido por la zona mineralizada, siendo en el Nivel 28 el ensamble mineralógico predominante la pirrotita-hornblenda, calcopirita, magnetita, arsenopirita y pirita.

Algunos tramos de la galería nivel 28 han sido estabilizados con pernos de roca de 1” de diámetro inyectados con lechada de cemento, dichos pernos han sido instalados en forma sistemática a cada 2 m en taladros de 2” Ø x 10 pies de longitud. Este sistema de sostenimiento fue complementado con una capa de 4” de espesor de shotcrete (mezcla seca). Una sección de esta galería con el sistema de sostenimiento mencionado se evalúa en el presente trabajo.

En la Tabla 4 se resume las propiedades mecánicas asumidos para el material de manto. Para el análisis de este caso, el factor de alteración D (Hoek, 2002) se consideró 0.6 por efecto de las voladuras.

La Tabla 5 resume las propiedades asumidas para pernos de anclaje de 1” de diámetro.

Tabla 4. Propiedades del macizo rocoso

Propiedades	Manto
Masa específica, kg/m ³	3600
Resistencia a compresión uniaxial de roca intacta, σ_{ci} (MPa)	130
RMR	60
GSI	55
Constante de la masa rocosa, " m_b "	2.215
Constante de la masa rocosa, " s "	0.0019
Constante de la masa rocosa, " a "	0.504
Módulo de Young, E (GPa)	9334.65
Coefficiente de Poisson, ν	0.23

Los constantes elásticos, Módulo de rigidez al corte (G) y módulo de deformación volumétrica (K) se obtienen a partir de la Eq. 4 y Eq. 5.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

Tabla 5. Propiedades del perno de roca

Propiedades	Acero Ø 1"
Área de sección transversal(m ²)	5x10 ⁻⁴
Perímetro(m)	0.0785
Módulo de Young (GPa)	200
Límite de fluencia(kg/cm ²)	4280
Resistencia a la tracción(kg/cm ²)	6320
Espaciamiento entre pernos(m)	2.0
Longitud del perno(m)	3.0

El material entre la roca y el acero está constituido por inyección de lechada de cemento con rigidez de adherencia al corte de 1.5x10¹⁰ N/m/m y resistencia cohesiva de adherencia de 8x10⁵ N/m.

7.2 Modelo numérico

La simulación numérica de excavación y sostenimiento fue llevada a cabo con el método de diferencias finitas explícito (Itasca, 2005). El modelo constitutivo de Hoek-Brown ha sido adoptado para el macizo rocoso.

El perno de anclaje ha sido representado por el elemento estructural "Rockbolt" y la capa de shotcrete de 10 cm de espesor ha sido representada por el elemento "Liner".

En la Figura 12 se muestra la geometría del problema con malla de diferencias finitas de 84 x 120 zonas y las condiciones de contorno.

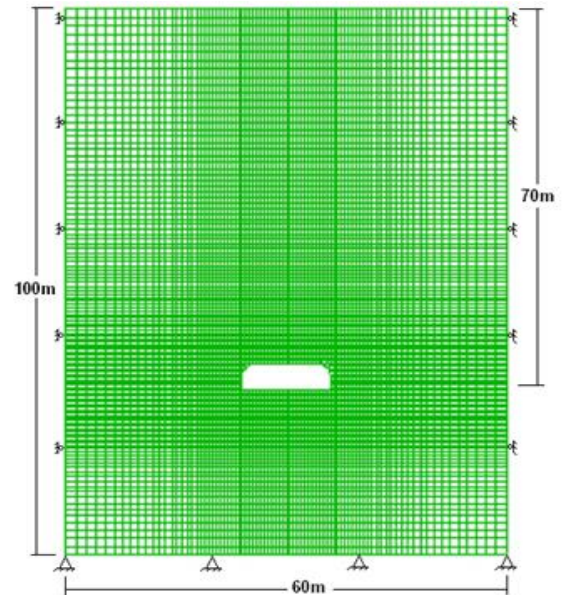


Figura 12. Malla para análisis numérico con FLAC.

7.3 Resultados

En la primera etapa, una excavación de una galería sin sostenimiento de 12 m de ancho y 5 m de alto en macizo rocoso de tipo manto ha sido simulada para verificar el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones en el contorno de la excavación.

En la Figura 13 se muestra la distribución de los desplazamientos verticales residuales en los contornos de la galería después de la excavación. Sobre la base de los resultados, se estima que el desplazamiento vertical relativo alcanza hasta 3.2 cm hacia el techo de la galería lo que conllevaría a una posible rotura del macizo rocoso. En la Figura 14 se aprecia las zonas con mayor incremento de deformaciones hacia las paredes de la galería. La máxima deformación al corte alcanzado es 0.004%, que representa una reducida deformación. Por otro lado, se aprecia pequeñas zonas de plastificación del macizo rocoso en los alrededores de la excavación.

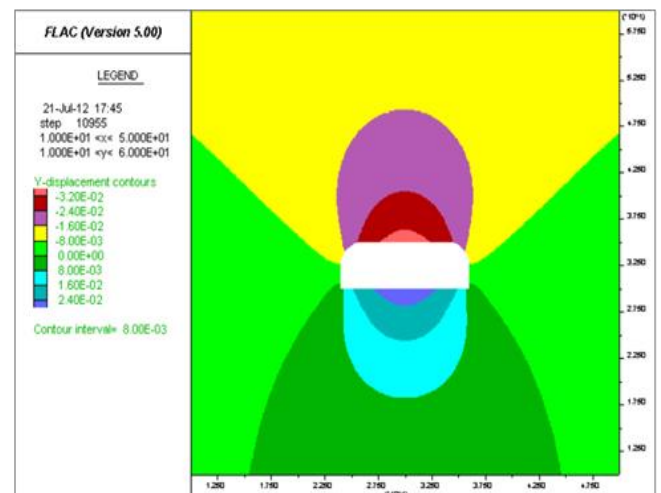


Figura 13. Desplazamiento vertical en el contorno de la excavación con FLAC.

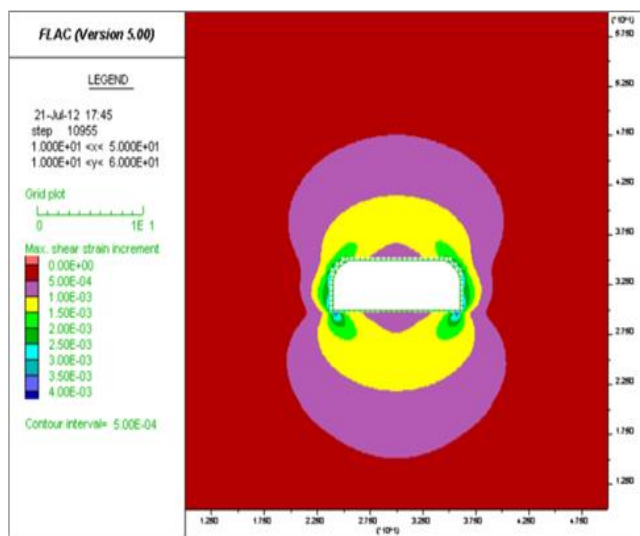


Figura 14. Contornos de incrementos de deformación al corte.

Finalmente, se realizó la simulación numérica considerando la excavación con sostenimiento, aplicando pernos de anclaje y shotcrete. Los resultados muestran que el desplazamiento vertical se reduce hasta 3 mm hacia el techo de la galería, debido al aporte de pernos de anclaje a la resistencia del macizo rocoso hacia el techo central de la excavación, alcanzando una evolución de 21.5 KN de fuerza axial de perno de anclaje en el eje central de la galería.

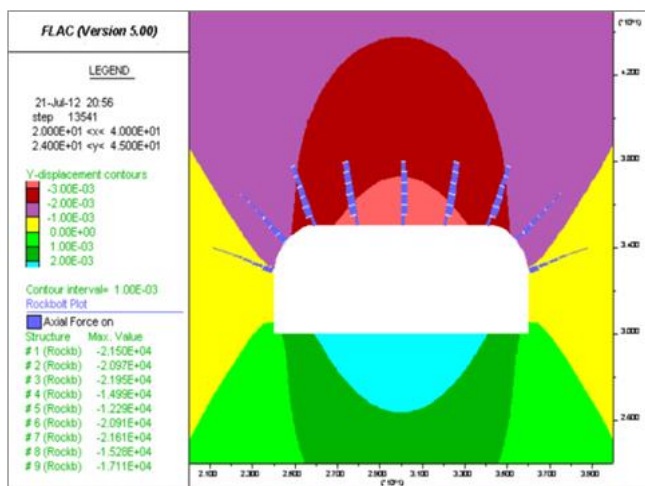


Figura 15. Distribución de fuerzas axiales en pernos de anclaje

8 CONCLUSIONES

El programa computacional FLAC ha sido usado para simular la excavación y sostenimiento de las galerías de la mina Cobriza, construidas tanto en pizarra como en manto. La resistencia del macizo rocoso fue modelada usando el criterio de falla Hoek-Brown y los sistemas de sostenimiento han sido representados por elementos estructurales implementados en FLAC.

Las simulaciones numéricas han permitido identificar el comportamiento de los esfuerzos principales, deformaciones, zonas de plastificación y despla-

mientos relativos producto de la excavación y sostenimiento de la galería. El conocimiento de estos mecanismos es esencial para el diseño de la galería.

Para el caso de la galería inclinada (rampa) construida en lutita-pizarrosa, los resultados numéricos muestran que después de la excavación, el desplazamiento vertical del techo de la galería alcanza hasta 6 cm, dicho valor nos sugiere que el sostenimiento es esencial para la estabilización de esta galería inclinada. En la segunda etapa de simulación, considerando un sistema de sostenimiento “Shot-Fer”, se reduce el desplazamiento vertical del techo de la galería hasta 1.2 cm, lo que indica que la galería estaría estabilizada con el sostenimiento aplicado.

Finalmente, los resultados del modelamiento numérico de la excavación sin sostenimiento en manto muestran que el desplazamiento vertical del techo de la galería alcanza hasta 3.2 cm; y al aplicar el sistema de sostenimiento con pernos de anclaje y shotcrete se logra reducir a 3 mm, lo que indica que el aporte de resistencia en los contornos de excavación de los sistemas de sostenimiento es esencial para controlar y evitar la rotura de macizos rocosos en las galerías. Se recomienda un plan de inspección, monitoreo y mantenimiento periódico para garantizar la estabilidad de las galerías.

9 REFERENCIAS

- B.H.G Brady and E.T Brown, Rock Mechanics for Underground Mining, Klumer Academic Publishers, USA (2004).
- C.Bueno, F.Jusselino, G.Salinas, J.Roland, Chotcrete, Características y consideraciones de uso en la mina Cobriza-Doe Run Perú S.R.L, ACI-Perú(2006).
- E.Hoek, C.Carranza-Torres, B.Corkum, El criterio de rotura de Hoek-Brown(2002).
- E.L. Salazar Dulanto, Sostenimiento de la mina Cobriza - Centromin Perú S.A, Tesis de grado, UNI, Lima (1993).
- F.Laigle, A.Saitta, Numerical simulation of radial bolting, Application to the tartaguille railway tunnel. Proceedings of the international FLAC symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota, USA (2003), pp 153-160.
- F.E. Toledo Garay, “Shot-Fer” nueva Alternativa para el sostenimiento de túneles y Labores mineras, XVII Convencion de Ingenieros de Minas, Huaraz (1984)
- ITASCA Consulting Group. Fast Lagrangian Analysis of continua, Version 5.0. Itasca consulting group, Inc. MN, Minneapolis (2005).

- P.Cundall, C.Carranza -Torres & R.Hart, A new constitutive model based on the Hoek-Brown criterion. Proceedings of the international FLAC symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota, USA (2003), pp 17-25.
- P. Darling, SME Mining Engineering Handbook, Third Edition (2011).
- R. Goodman E., Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, USA (1989).