

ANÁLISIS HIDROMECAÁNICO ACOPLADO DE LA MINA A CIELO ABIERTO DE COBRE LAS CRUCES

Jose M. GALERA¹, J. MONTERO², C. PEREZ², L. VEGA² y P. VARONA³

¹ Geocontrol Chile S.A.

² Cobre Las Cruces

³ Itasca Consultores S.L.

RESUMEN

Cobre Las Cruces es una mina a cielo abierto que extrae sulfuros de cobre del mismo depósito paleozoico que las minas de Rio Tinto y Aznalcóllar.

En Las Cruces, el mineral está recubierto de 150 m de la formación terciaria de Margas Azules; el nivel freático se sitúa a unos 30 m de profundidad. Estas margas tienen permeabilidades muy bajas ($k=10E-9$ a $10E-10$ m/s) por lo que en un análisis de flujo, se prevén pequeñas caídas de la presión intersticial debidas a la excavación.

En un análisis hidromecánico acoplado se prevé una caída significativa de la presión intersticial debida a la expansión volumétrica asociada con la excavación de la mina. La distribución de esta presión intersticial más baja permite un diseño de talud más agresivo y económico.

Este trabajo compara la caída de la presión de poro prevista, obtenida del modelo numérico de FLAC3D, y las lecturas piezométricas reales.

1. INTRODUCCIÓN

Cobre Las Cruces es una mina a cielo abierto que extrae sulfuros de cobre del mismo depósito volcánico-sedimentario del paleozoico que las minas de Rio Tinto y Aznalcollar.

En el yacimiento de Las Cruces, el mineral está recubierto de 150 m de las de Margas Azules terciarias conocidas como la formación de “Margas Azules del Guadalquivir” que se comportan como una arcilla sobreconsolidada.

Entre estas margas y el mineral, se encuentra una formación arenosa que constituye un acuífero regional, conocido como “Niebla-Posadas”, con un espesor que varía entre los 5 y 15 m. Debido a la existencia de este acuífero, previamente a la explotación de la mina, se construyó un sistema de drenaje perimetral.

El nivel freático se encuentra a 30 m de profundidad, respecto de la superficie, por lo que al comienzo del proyecto, se planteó la problemática de la presión de poro actuando en las margas. Dado que éstas son bastantes impermeables ($k=10^{-9}$ a 10^{-10} m/s) en un análisis de flujo se estimaron pequeñas caídas de la presión de poro debidas a la excavación de la mina. Además, los sistemas de drenaje tienden a ser ineficientes con unas permeabilidades tan bajas.

En un análisis hidromecánico acoplado se prevé una caída significativa de la presión de poro debido la expansión volumétrica asociada a la excavación de la mina. La distribución de esta presión de poro más baja permite un diseño de talud más agresivo y económico.

Este trabajo compara la caída de la presión de poro prevista, obtenida de un modelo numérico axisimétrico de FLAC 3D, y las lecturas piezométricas reales.

2. DESCRIPCIÓN DE LA MINA

El siguiente apartado describe los principales datos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos.

Mina

La mina de Cobre Las Cruces está situada en Gerena (cerca de Sevilla, en el suroeste de España) y constituye el mayor nuevo proyecto minero de Europa. La mina es propiedad de INMET y Leucadia, siendo explotada por INMET.

La Figura 1 incluye la localización de la mina así como el plano de la mina y la ejecución de labores hasta finales de Julio de 2009.

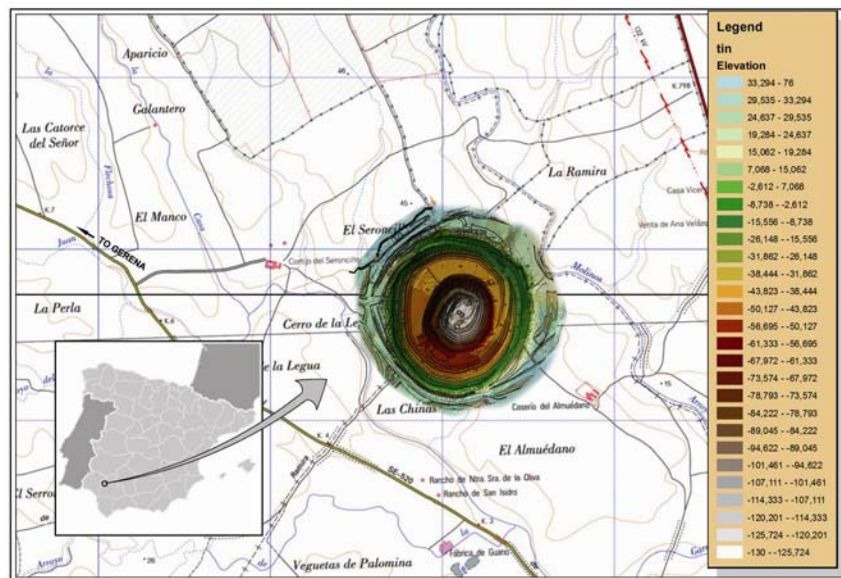


Figura 1 – Mapa de localización que muestra el modelo de elevación digital de la mina a cielo abierto

Esta mina forma parte de la provincia metalogénica de la Faja Pirítica en el suroeste de la Península Ibérica y tiene una reserva estimada en 17.625 Mt. La ley media es de 6.21% Cu. La explotación consiste fundamentalmente en una mina a cielo abierto que mide 1600 m de largo, 900 m de ancho y 250 m de profundo. En un futuro próximo también se prevé la explotación de una pequeña mina subterránea. En esta fase subterránea, el mineral de cobre se recuperará usando los métodos de galería, relleno y corte por subniveles.

La zona mineralizada se encuentra integrada en rocas volcánicas y metamórficas, incluyendo pirritas masivas y otros sulfuros de cobre.

Antes de alcanzar la mineralización es necesario hacer un *pre-stripping* de 120 a 150 m en las arcillas carbonatadas, denominadas Margas Azules del Guadalquivir, que pertenecen a la formación terciaria marina que se remonta al periodo mioceno. Desde el punto de vista geomecánico, estas margas constituyen una litología que presenta una resistencia débil y parámetros deformacionales bajos, así como baja permeabilidad, a pesar de la presencia de discontinuidades. En consecuencia, su comportamiento geotécnico puede considerarse muy pobre y problemático.

Por esta razón, desde la superficie hasta una cota de -150 m, la excavación se ha realizado siguiendo un ángulo medio de talud de 28°, dividido gradualmente en bancos de 10 m de altura y 60° de inclinación, excepto los dos primeros bancos en los que se ha adoptado una inclinación de 45°.

Geología y geotecnia

Aparentemente, las margas parecen ser homogéneas pero, tras un análisis detallado y desde un punto de vista mecánico, se presentan diferencias de comportamiento con la profundidad distinguiéndose los siguientes niveles según su grado de meteorización.

a) **MARGAS METEORIZADAS.** Situadas en superficie hasta alcanzar los 31 m de profundidad, se encuentran muy afectadas por la meteorización. Inicialmente se diferenciaban dos niveles aunque finalmente se establecieron tres, según datos obtenidos durante la excavación de la mina, estableciendo los siguientes sub-niveles:

- MET-1: espesor de 10 m; de color parduzco; se encuentra altamente meteorizada.
- MET-2: espesor de 13 m; se encuentra altamente meteorizada y presenta fracturas por desecación verticales espaciadas 1 m, aproximadamente.
- MET-3, espesor de 8 m; se encuentra moderadamente meteorizada y presenta fracturas por desecación espaciadas 12 m aproximadamente. Los parámetros resistentes de este nivel son parecidos a los del nivel MET-2.

b) **MARGAS FRESCAS:** Situadas a partir de los 31 m de profundidad, ya no presentan señales visibles de meteorización y muestran su típico color gris azulado. Se pueden distinguir los siguientes sub-niveles:

- NIVEL 1 (“marga blanda”): espesor de 49 m; presenta varios conjuntos de juntas subverticales además de planos de estratificación horizontales espaciados 5 m; no hay fracturas por desecación.
- NIVEL 2 (“marga media”): espesor de 30 m; su resistencia es la característica de un tipo de roca blanda 0 a 0-1, mostrando roturas frágiles.
- NIVEL 3 (“marga blanda”): espesor variable entre 5 y 10 m; presenta las mismas características del nivel 1. Lateralmente, desaparece entre los niveles 2 y 3 mostrando propiedades de resistencia y deformabilidad parecidas a las del nivel superior.
- NIVEL 4 (“marga dura”): tiene la resistencia característica de un tipo de roca blanda 0-1. Hay un aumento considerable de la resistencia y dureza de la marga.
- MARGA ARENOSA: espesor de 5 m; se sitúa encima de las arenas del acuífero de “Niebla-Posadas”.

c) **ARENAS:** espesor variable entre 0 y 15 m; se encuentran parcialmente cementadas.

d) **SUSTRATO PALEOZOICO,** constituido por rocas volcánico-sedimentarias.

La Figura 2 resume todos los niveles geotécnicos que se pueden observar en la formación terciaria, mientras que en los Cuadros I y II se presentan los parámetros físicos y geomecánicos, respectivamente, asignados a cada horizonte geotécnico de marga.

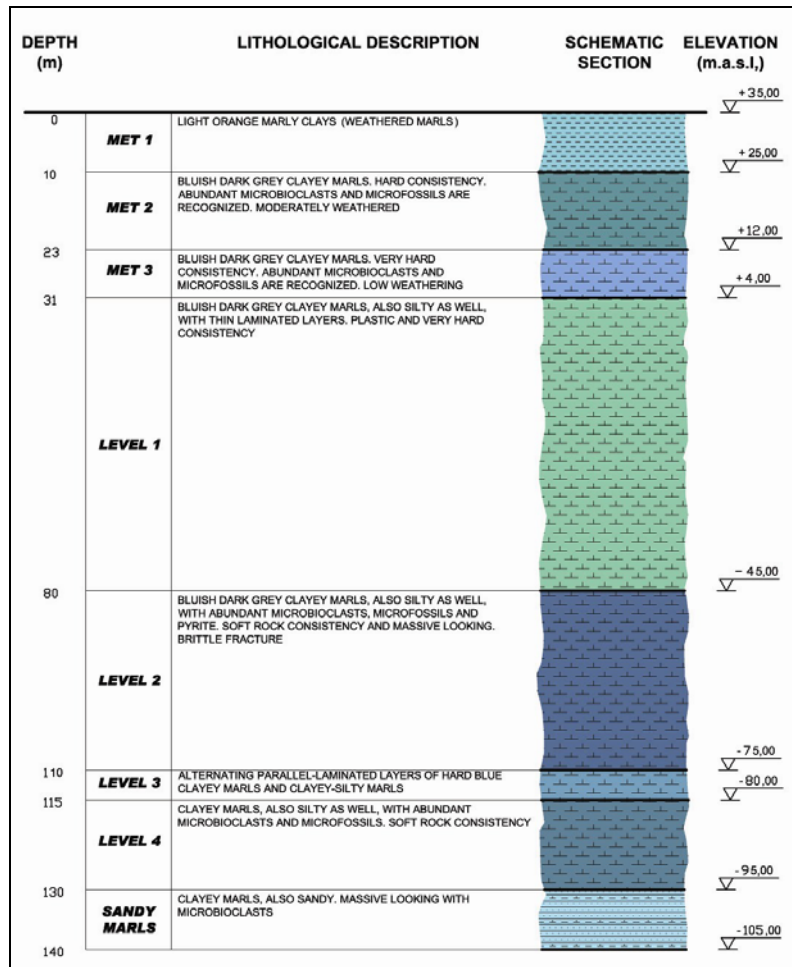


Figura 2 – Perfil geológico

Hidrogeología

El valor de permeabilidad se ha derivado de 12 ensayos de permeabilidad a gran escala en los que se monitorizaba la carga de agua en 55 piezómetros durante ensayos de bombeo a largo plazo. Los sensores se colocaron en las margas, el acuífero y los materiales paleozoicos superiores fracturados.

El valor de permeabilidad obtenido en las margas oscila entre $1E-9$ y $1E-11$ m/s, entre $7E-7$ y $1.5E-8$ m/s para las arenas del acuífero de Niebla-Posadas y entre $1.2E-8$ y $2.3E-8$ m/s para la parte superior de los materiales paleozoicos.

Nivel	Prof. (m)	Peso específico de partículas sólidas (t/m^3)	Densidad Seca (t/m^3)	Contenido de Humedad (%)	Índice de Plasticidad (%)
-------	-----------	---	---------------------------	--------------------------	---------------------------

MET-1	0-10	2,714	1,415	30,3	34,3
MET-2	10-23	2,714	1,459	28,5	30,2
MET-3	23-31	2,714	1,496	27,1	30,8
NIVEL-1	31-80	2,714	1,528	25,5	38,1
NIVEL-2	80-110	2,714	1,585	24,2	39,1
NIVEL-3	110-115	2,714	1,579	24,2	38,5
NIVEL-4	115-130	2,714	1,620	23,1	37,0
MARGAS ARENOSA S	130-140	2,714	1,622	25,7	35,3

Tabla 1 – Principales parámetros físicos para cada nivel geotécnico

Nivel	Prof. (m)	σ_{CI} (kp/cm ²)	m	s	c (kp/cm ²)	ϕ (°)	R ² ($\sigma_1-\sigma_3$)	R ² ($\sigma_N-\tau$)	N° UCS	N° Triaxial C T	N° Corte T
MET-1	0-10	3,5	2	1	1,10	22	0,91	0,80	4	0	9
MET-2	10-23	3,8	4	1	1,50	21	0,21	0,73	7	5	18
MET-3	23-31	3,8	4	0,07	1,50	21	0,49	0,51	11	11	6
NIVEL-1	31-80	4,0	6	0,05	2,1	20	0,61	0,65	73	83	126
NIVEL-2	80-110	4,0	6	0,05	2,7	18	0,81	0,74	0	23	129
NIVEL-4	115-130	6,0	6	0,01	2,8	18	-	0,87	0	0	48

Tabla 2 – Parámetros resistentes para cada nivel geotécnico

Descripción del sistema de drenaje por extracción/inyección de agua

El funcionamiento de la mina requiere el drenaje alrededor de la mina a cielo abierto del acuífero de Niebla-Posadas situado justo encima del mineral durante la explotación. Para alcanzar este objetivo, se ha desarrollado e implementado un sistema de drenaje por bombeo y re-inyección, usando sondeos situados en el exterior y perímetro de la mina. También se han utilizado unos sondeos de bombeo internos. El número total de sondeos de drenaje asciende a 32.

Para evitar alteraciones en el acuífero fuera de la mina, este agua se bombea y conduce a los pozos de inyección colocados a una distancia de entre 2 y 3 km de la mina.

El flujo involucrado en el sistema de drenaje por bombeo y re-inyección oscila entre 100 y 150 l/s. El sistema funciona en un circuito de agua cerrado y estará activo durante todo el periodo de explotación de la mina.

3. DATOS DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO

En el momento de redactar este trabajo, la fase 1 de la mina a cielo abierto ya había concluido mientras que la segunda fase, homotética a la primera, había alcanzado un

avance del 50%.

Como parte del sistema de monitoreo geotécnico de la mina, existe una red piezométrica que actualmente consiste, como se puede observar en la Figura 3, en 14 piezómetros ubicados en el entorno de la excavación. El número total de piezómetros de cuerda vibrante en funcionamiento asciende a 24, colocados en diferentes profundidades entre el acuífero y el nivel freático.

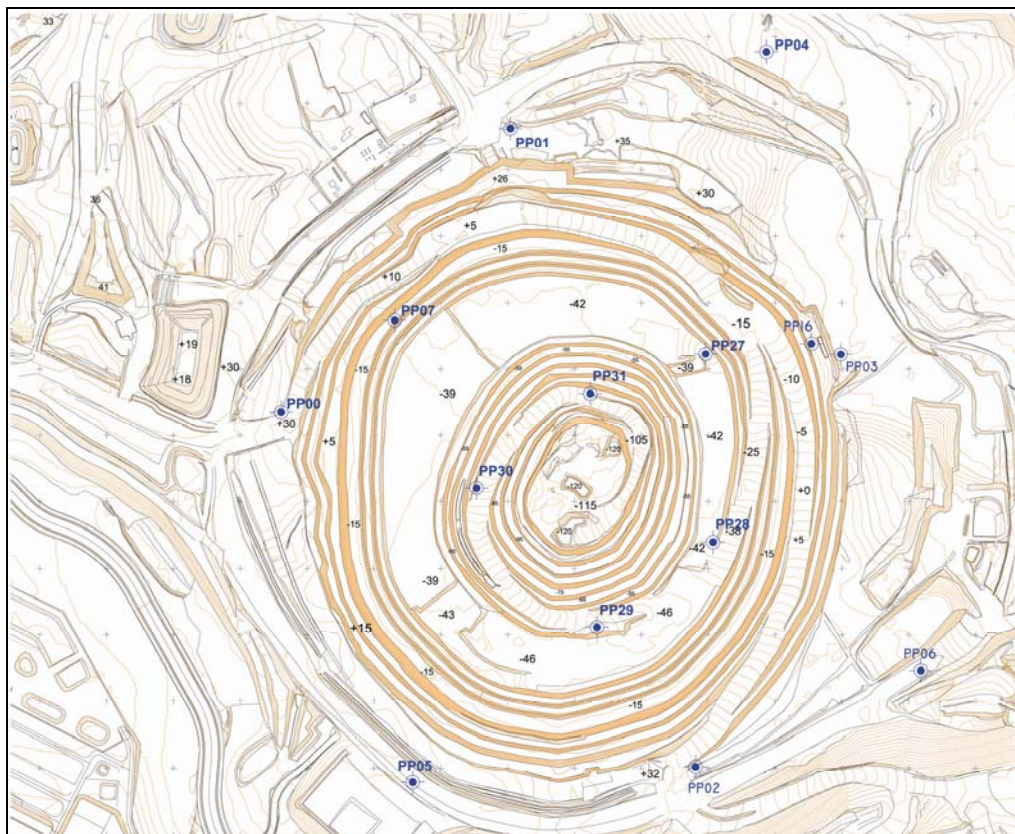


Figura 3 – Red de supervisión piezométrica en la mina

En las Figuras 4a y 4b se muestra la evolución de los piezómetros desde el comienzo de la excavación de mina. Como se puede observar, los sensores colocados en el exterior de la mina muestran una escasa caída de la carga de agua que oscila entre 6.2 y 258.4 kPa. Únicamente el piezómetro n° 7, colocado en el interior de la excavación, muestra una mayor caída alcanzando los 864 kPa. Los piezómetros PP27, PP28, PP29, PP30 y PP31 se han instalado recientemente y no se han podido considerar en este análisis.

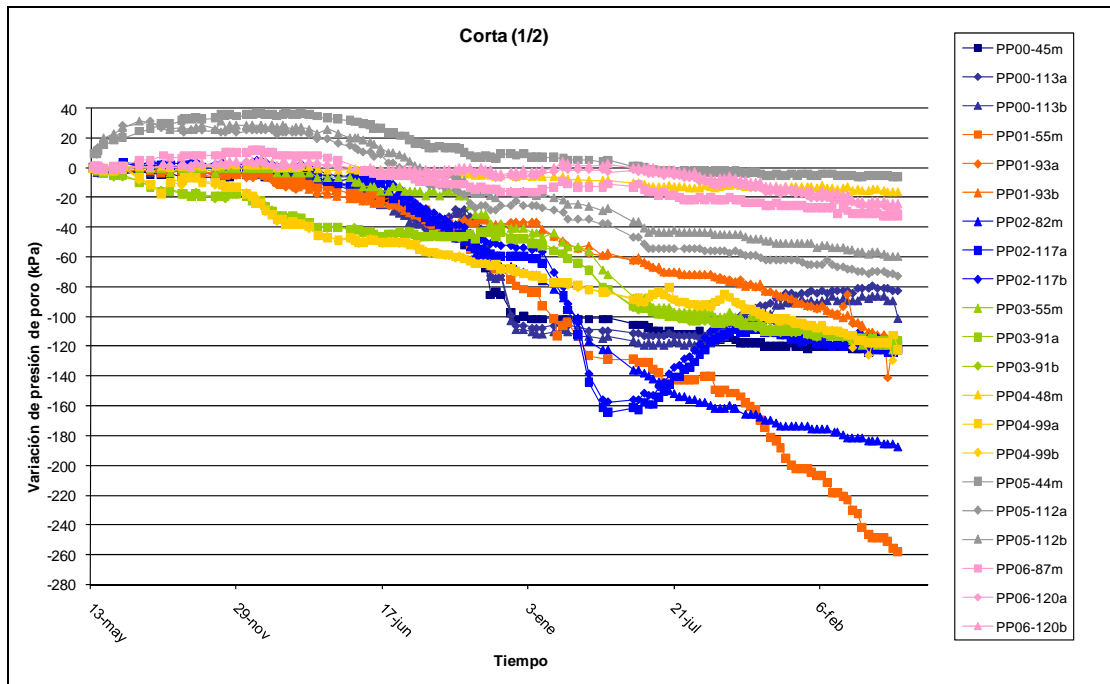


Figura 4a – Evolución de los piezómetros de cuerda vibrante (Corta 1/2)

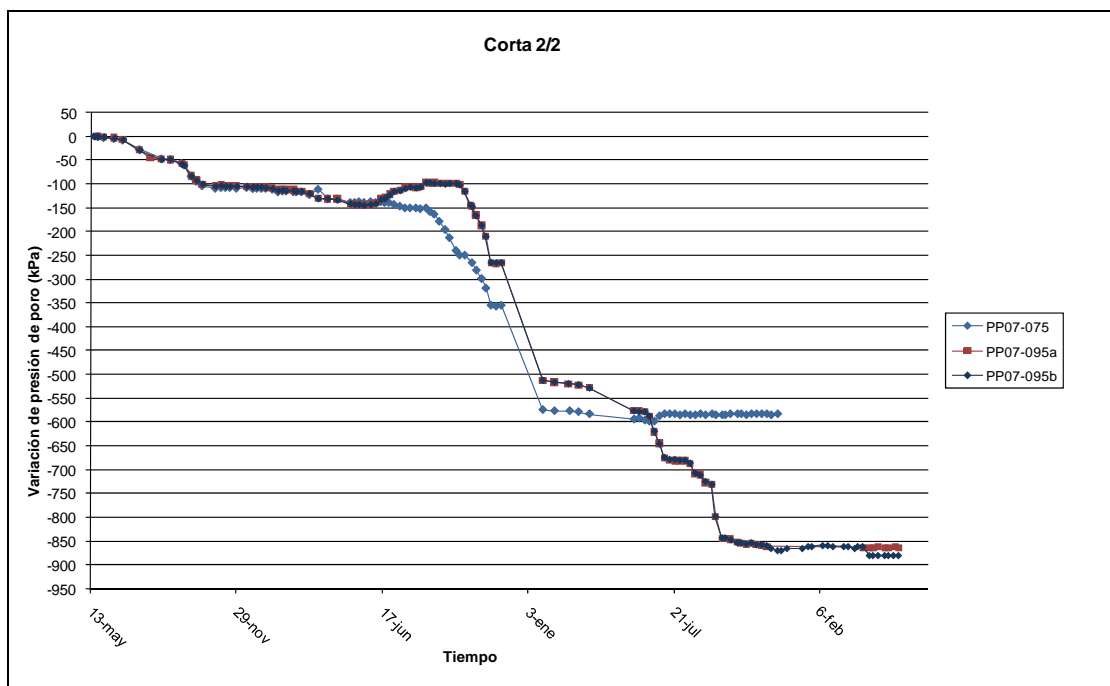


Figura 4b – Evolución de los piezómetros de cuerda vibrante (Corta 2/2)

4. ANÁLISIS HIDROMECAÁNICO ACOPLADO

La secuencia de excavación (en incrementos correspondientes a intervalos de 15 días) y geología se importó en FLAC3D desde la base de datos de la mina siguiendo el procedimiento automatizado descrito por Valera et al.(2003) La Figura 5 muestra la geología considerada en el modelo, consistente en 150x160x25 cubos de 10m de lado. Para cada incremento de tiempo primero se calcula una respuesta mecánica instantánea y luego se lleva a cabo un cálculo hidromecánico acoplado durante 15 días tras el cual se llevará a cabo la siguiente excavación.

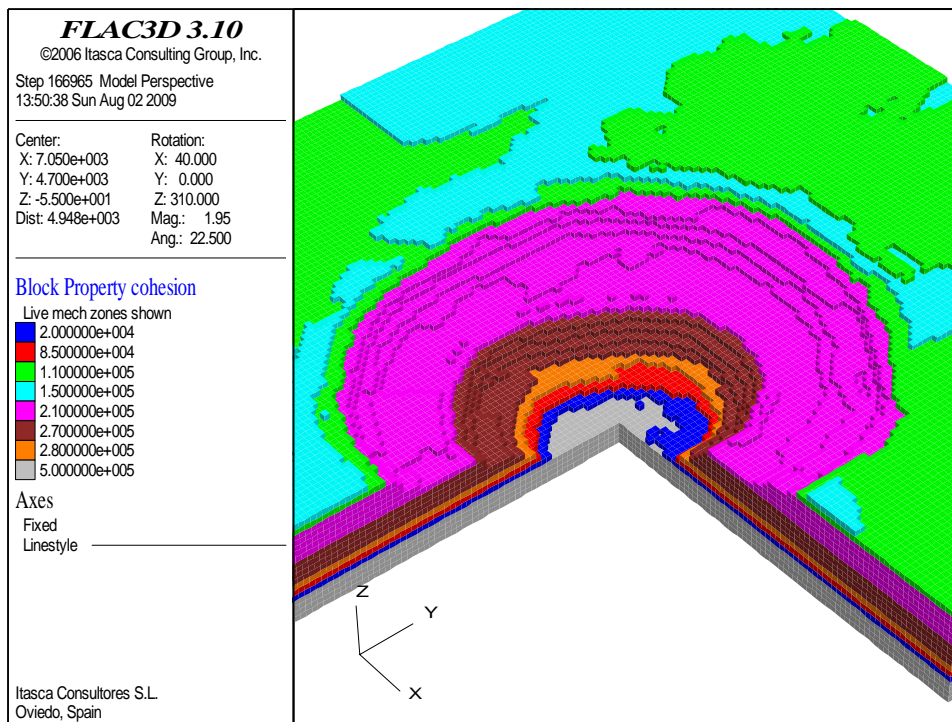


Figura 5 – Modelo numérico: Geología

Durante la respuesta mecánica instantánea la presión de poro descende de acuerdo al coeficiente B de Skempton:

$$B = \frac{\Delta pp}{\Delta \sigma} = \frac{\Delta pp}{\Delta pp + \Delta \sigma'} = \frac{K_w/n}{K_w/n + K} \quad (1)$$

donde Δpp es el cambio de presión de poro, $\Delta \sigma$ es el cambio en el esfuerzo total medio, $\Delta \sigma'$ es el cambio en el esfuerzo efectivo, K_w es el módulo volumétrico de agua (2 GPa para agua pura), n es la porosidad y K el módulo volumétrico de suelo.

La respuesta poroelástica de un suelo blando donde $K \ll K_w/n$ es tal, que la mayor parte del cambio de esfuerzo total durante la descarga se traducirá en una caída de la presión de poro (Figura 6).

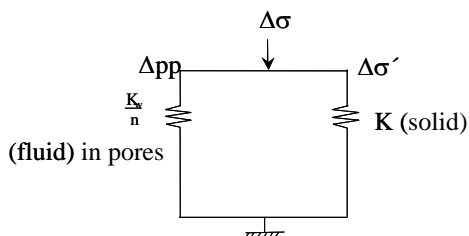


Figura 6 – Distribución del esfuerzo poroelástico

Durante el cálculo de flujo entre las excavaciones, hay un leve aumento de la presión de poro, pero este caso particular es muy pequeño a causa de la baja permeabilidad de las margas azules. La Figura 7 muestra la caída de la presión de poro (expresada en metros de carga de agua) en el momento en que la mina alcanza el acuífero inferior. La caída calculada en las margas azules alcanza los 100 m. Esta figura también explica por qué los piezómetros en el exterior del perímetro de la mina solamente registran caídas moderadas de la presión de poro (alrededor de 20 m o 200 kPa) mientras que dentro de ésta la caída de la presión de poro es más significativa (hasta 100 m).

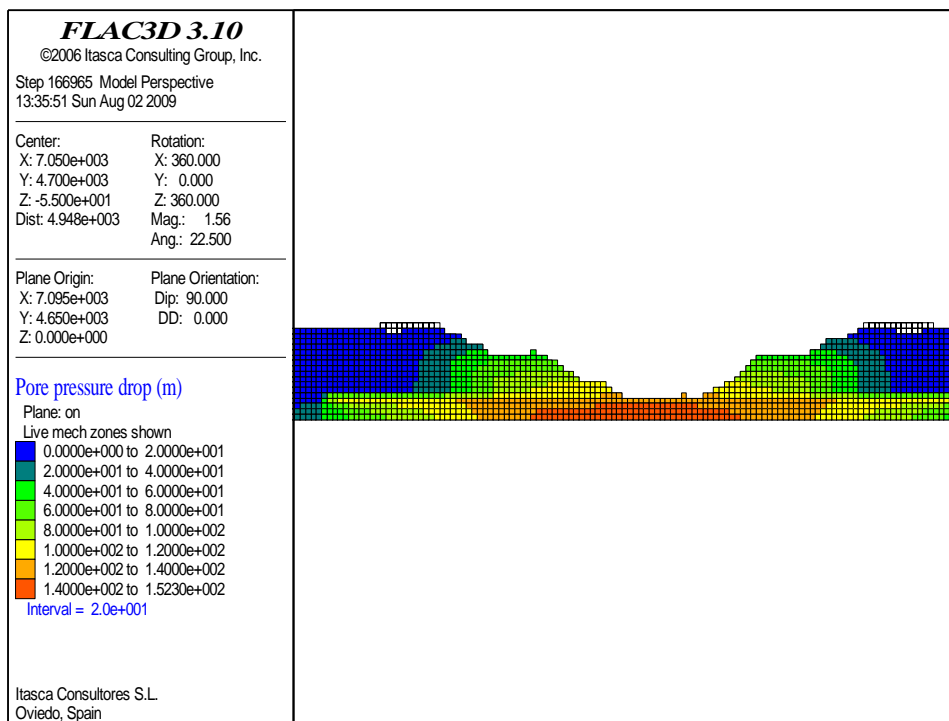


Figura 7 – Caída de la presión de poro

Las caídas de presión de poro calculadas se ajustan razonablemente a los datos medidos, tal y como se puede apreciar en las figuras 8ª y 8b.

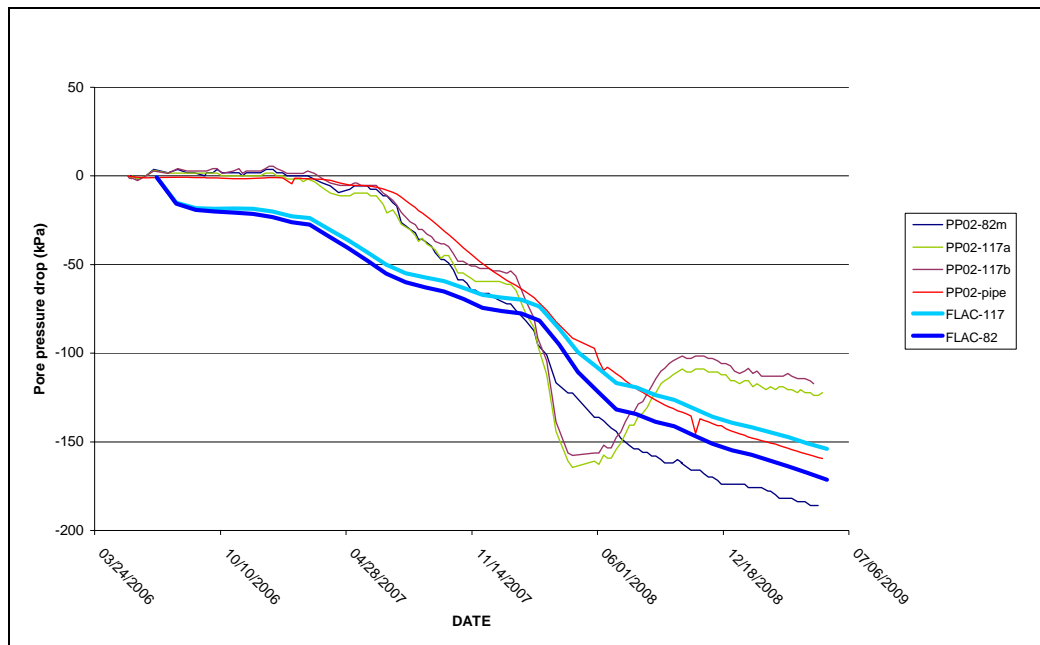


Figura 8a – Evolución del piezómetro de cuerda vibrante PP02 comparado con el cálculo de FLAC3D

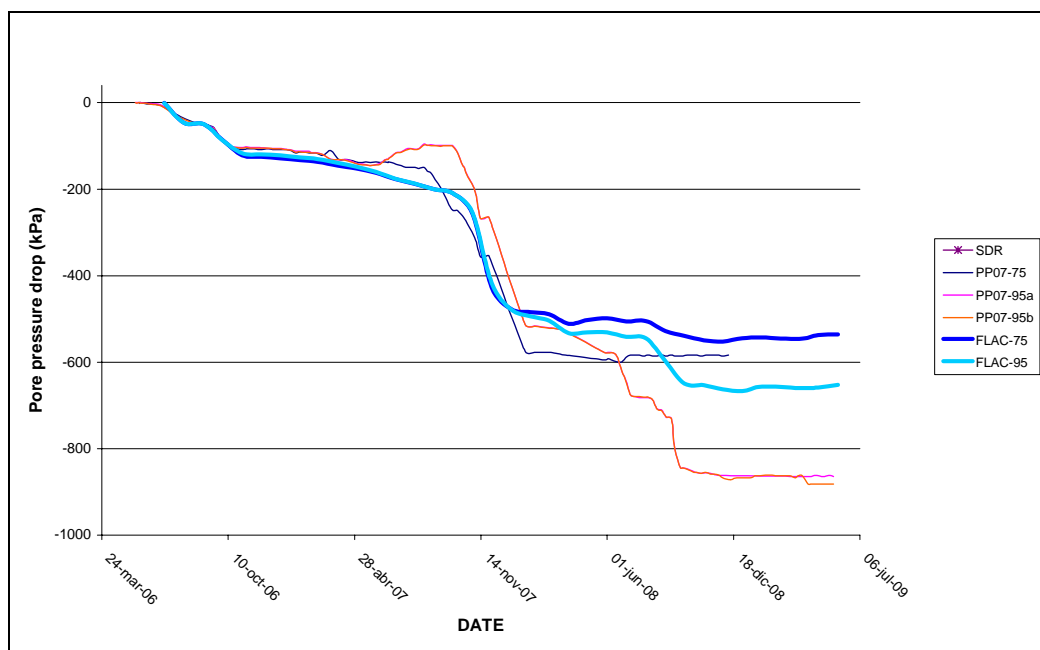


Figura 8b – Evolución del piezómetro de cuerda vibrante PP07 comparado con el cálculo de FLAC3D

5. DISCUSION

Un enfoque clásico de la mecánica de rocas (Duncan et al, 2005), sugeriría un análisis de esfuerzos totales sin drenaje a “corto plazo” con $\phi=0$, y un análisis de esfuerzos efectivos “a largo plazo” con una distribución de presión de poro en condiciones estacionarias. El método aquí mostrado tiene la ventaja de que se puede calcular la estabilidad en términos de esfuerzos efectivos en cualquier momento de la vida de la mina, que normalmente se prolonga a decenas de años, periodos que no pueden considerarse ni corto plazo, ni situación estacionaria. Además, como afirma Lambe et al (1969), una ventaja del análisis acoplado es que proporciona bases para interpretar piezómetros como parte del sistema de control de la mina.

Este trabajo muestra la aplicabilidad de análisis acoplado a rocas blandas, como las margas presentes en la zona cuyos módulos de elasticidad oscilan entre los 100 y 200 MPa. Además esta metodología también se podría aplicar a macizos rocosos más rígidos y con baja porosidad. La Figura 9 muestra el valor de parámetro B de Skempton como una función del módulo elástico de macizo rocoso para porosidades de 0,3 (valor típico en arcillas) y de 0,02, (valor típico para las porosidades secundarias de los granitos). Las líneas continuas representan agua pura con un módulo volumétrico de 2 GPa, mientras que las líneas de puntos representan el gas disuelto en el agua disminuyendo el módulo volumétrico a 0,2 GPa. Los macizos rocosos con módulos elásticos del orden de 5-10 GPa pueden tener un coeficiente B superior a 0,8 en el caso de que la porosidad sea baja.

En resumen, en la mayoría de los macizos rocosos, en los que las permeabilidades son relativamente bajas, se producirán caídas de la presión de poro instantáneas durante la excavación de una mina lo que resulta muy beneficioso para la estabilidad de la misma, mientras que si la permeabilidad es alta, este fenómeno se anulará rápidamente.

Se necesita más trabajo para definir tiempos de consolidación en grandes excavaciones, pero los análisis preliminares indican que se requieren permeabilidades inferiores a $1E-8$ m/s para mantener las caídas de la presión de poro durante la vida activa de una mina media.

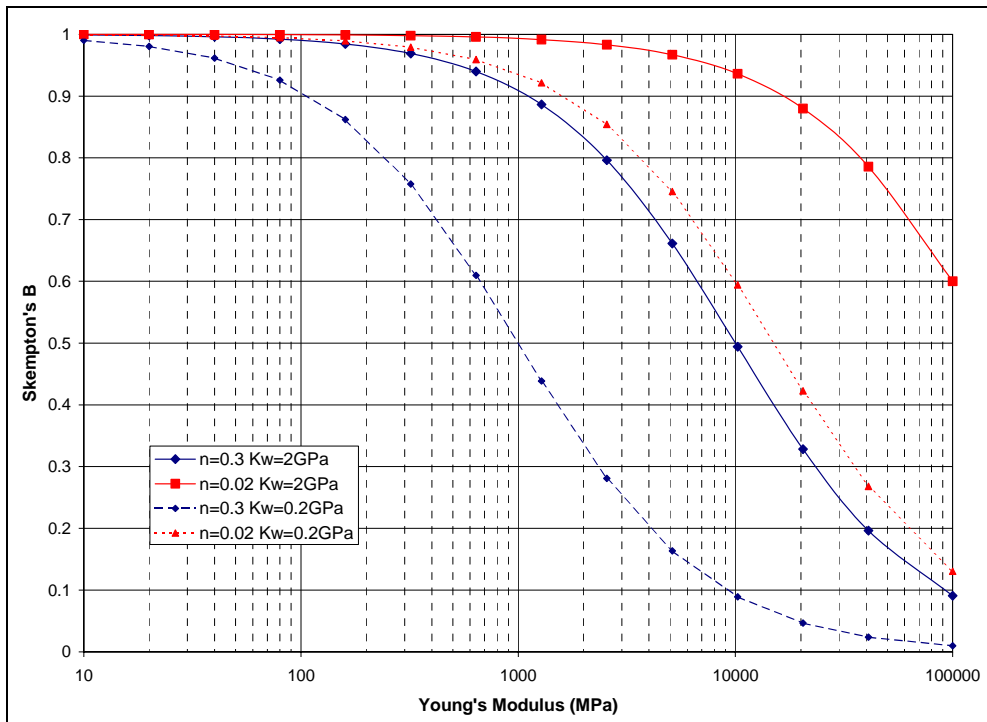


Figura 9 – Caída de la presión de poro

REFERENCIAS

- Itasca Consulting Group, Inc., 2006. *FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Version 3.10)*, Itasca, Minneapolis.
- Varela, A. and Alonso, L.I., 2003. 3D slope stability analysis at Boinás East gold mine. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Brummer et al., Eds., Balkema, Sudbury.
- Skempton, A.W., 1954. The Pore-Pressure Coefficient A and B. *Geotechnique*, 4: 143-147.
- Duncan, J.M. and Wright, S.G., 2005. *Soil Strength and Slope Stability*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken NJ, USA.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1969. *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quisieran expresar su agradecimiento a todo el personal técnico de Cobre Las Cruces que participaron en esta obra antes y durante la excavación de la mina.

También se dan las gracias al Personal de la Dirección de la Compañía por el permiso para publicar esta contribución