

# Desplazamientos del terreno producidos por una mina metálica subterránea

Carlos Laín Huerta, Ricardo Laín Huerta y Pedro Ramírez Oyanguren

*Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. E.T.S.I. de Minas de Madrid.*

## Introducción

En este artículo se presentan los resultados del modelo numérico bidimensional realizado para analizar los desplazamientos producidos por una mina metálica subterránea de cámaras y pilares, con recuperación de pilares mediante relleno con pasta.

Este tipo de modelos numéricos mineros requiere como información de entrada, además de la geometría del yacimiento y de los huecos, un conjunto de datos geomecánicos que se deben determinar en laboratorio e "in situ", tanto para los macizos de roca y mineral como para la pasta utilizada en el relleno de las cámaras. Hay que estimar los parámetros de los criterios de rotura de los macizos rocosos, incluidas las zonas de falla, y del cuerpo mineralizado. Excepto en el caso de la pasta, para la que se ha utilizado el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, en el resto de los macizos se ha empleado el de Hoek-Brown

Se ha elaborado un modelo bidimensional elastoplástico de una sección vertical de la mina, en la zona donde las excavaciones tienen mayor extensión. Este modelo es necesario para predecir los desplazamientos que experimentará el entorno de los huecos en el período final de explotación de la mina, es decir, cuando se hayan recuperado los pilares.

## Propiedades mecánicas de los macizos rocosos y de mineral

Uno de los principales problemas que tiene planteados la Mecánica de Rocas es el paso de las propiedades de las rocas relacionadas con su rotura obtenidas en el laboratorio a las de los macizos rocosos "in situ". El criterio de rotura más utilizado actualmente para los macizos rocosos es el Hoek-Brown (1997), que se expresa mediante la siguiente fórmula:

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

donde,

$\sigma_1^i$  y  $\sigma_3^i$  son las tensiones principales máxima y mínima en la rotura.

$m_b$  es el valor de la constante m de Hoek-Brown para el macizo rocoso.

s y a son constantes que dependen de las características del macizo rocoso.

$\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta.

Para obtener los parámetros  $m$ ,  $s$  y  $a$  es necesario conocer las características geomecánicas del macizo rocoso que se pueden expresar mediante el GSI (Hoek, 1994), que es un índice de la calidad del mismo que hay que estimar a partir de observaciones "in situ". El valor de  $\sigma_c$  se ha obtenido mediante ensayos en el laboratorio y ha resultado ser de unos 30 MPa para la roca estéril y de unos 110 MPa para el mineral.

También se puede evaluar la calidad de los macizos rocosos mediante el índice  $Q'$  de Barton et al. (1974), a partir de la observación de testigos de sondeos y de estaciones geomecánicas en galerías. Este índice se obtiene de la misma forma que el conocido índice  $Q$  de los mencionados autores, pero suprimiendo los parámetros correspondientes al agua ( $J_w$ ) y al estado tensional ( $SRF$ ), es decir:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \quad (2)$$

donde,

$J_n$  depende del número de familias de juntas.

$J_r$  y  $J_a$  dependen de la rugosidad y alteración de las juntas.

En el caso presentado en este artículo la calidad de los macizos rocosos y de la masa mineral varía mucho de un lugar a otro del yacimiento, en función principalmente de su fracturación. Los valores medios estimados han sido los siguientes:

**TABLA 1**  
Calidades geotécnicas medias de los macizos de rocas y minerales

UNIDAD GEOTÉCNICA	CALIDAD DEL MACIZO	$Q'$
Macizo rocoso de estéril	Media	7
Macizo de mineral	Muy buena	61

Como se puede ver en la tabla, el macizo rocoso de mineral es mucho mejor que el de estéril.

Se entiende que las anteriores calidades de macizos se refieren a zonas no cizalladas, o sea, no afectadas por fallas. En las zonas del yacimiento en las que existen fallas, con bandas miloníticas, los valores de los índices de calidad son considerablemente inferiores.

Los valores de los índices de calidad geotécnica  $GSI$  de los macizos se han estimado a partir de la  $Q'$  mediante la siguiente fórmula:

$$GSI = 91n Q' + 44 \quad (3)$$

De esta forma se han obtenido los siguientes valores de  $GSI$ :

- Macizos rocosos de estéril,  $GSI = 62$
- Macizo de sulfuros masivos,  $GSI = 81$

El *GSI* de la banda de cizalla se ha estimado a partir del *GSI* del macizo rocoso de estéril y se ha obtenido para dicha zona un valor de 47.

A partir de los valores de *GSI* de los macizos rocosos y de los  $m_i$  de la roca y del mineral, obtenidos mediante ensayos triaxiales en el laboratorio, se han calculado los de  $m_b$  y  $s$  de los macizos mediante las siguientes fórmulas (Hoek et al. 2002):

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (4)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (5)$$

Los módulos elásticos, en GPa, de los macizos rocosos se han calculado mediante la siguiente fórmula (Hoek et al. 2002):

$$E_m = (1 - D/2) (\sigma_c/100)^{1/2} \cdot 10^{(GSI-10)/40} \quad (6)$$

En las fórmulas (4), (5) y (6) *D* es el denominado factor de daños que depende fundamentalmente de la descompresión producida por la excavación y de los daños causados en el macizo rocoso por las voladuras. Se ha supuesto que este parámetro tiene un valor de 0,5 en la mina subterránea analizada.

En la Tabla 2 se recogen los valores de pico de los macizos de la mina obtenidos para los mencionados parámetros:

**TABLA 2**  
Parámetros geotécnicos de pico de los macizos

Litologías	<i>GSI</i>	$m_b$	$s$	$E_m$ (MPa)	$\mu$	Resistencia a tracción (MPa)
Macizo rocoso de estéril	62	4,1087	0,00571	9,484	0,20	0,04
Macizo de mineral	81	16,5902	0,06370	46.212	0,20	0,41
Banda de cizalla	47	1,7473	0,00046	3.398	0,25	0,01

Los valores del coeficiente de Poisson,  $\mu$ , de la Tabla 2 se han tomado del artículo de Hoek (1994) en el que para cada intervalo de valores del *GSI* se le asigna al macizo rocoso un coeficiente de Poisson.

La resistencia a tracción de los macizos se ha calculado mediante la siguiente fórmula, obtenida a partir de (1):

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{cl}}{2} \left( m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (7)$$

Los anteriores valores de los parámetros geotécnicos de los macizos corresponden al pico de su resistencia, pero para la modelización numérica se necesitan también los valores residuales, o sea, la resistencia y deformabilidad que tendrán los macizos una vez que han plastificado, o sea, cuando han experimentado lo que se denomina rotura dúctil con reblandecimiento. Para estimar los parámetros correspondientes a las condiciones residuales se han seguido las indicaciones de M. Cai et al. (2006). Según estos autores, al romper el macizo rocoso el tamaño de bloque se reduce en promedio a  $10 \text{ cm}^3$  y el parámetro que expresa la resistencia al corte de las juntas de separación de los bloques se reduce a la mitad. Siguiendo este criterio se han obtenido los  $GSI$  que figuran en la Tabla 3, en la cual se muestran también: los parámetros  $m_b$  y  $s$  de Hoek-Brown, los parámetros elásticos y las resistencias a tracción de los macizos rocosos en condiciones residuales.

**TABLA 3**  
Parámetros residuales de los macizos

Litologías	$GSI$	$m_b$	$s$	$E_{\sigma}$ (MPa)	$\mu$	Resistencia a tracción (MPa)
Macizo rocoso de estéril	35	1,0343	0,00008	1787	0,3	0,00
Sulfuros masivos	42	2,5900	0,00022	4895	0,25	0,01
Banda de cizalla	28	0,7070	0,00003	1138	0,3	0,00

Se ha estimado que la deformación plástica que se produce en los macizos al pasar del estado de pico al residual es del orden del 3%. El ángulo de dilatación se ha supuesto nulo.

Un parámetro que es importante para los cálculos es la densidad de los terrenos de recubrimiento, ya que de ella dependen las tensiones naturales verticales que existen en el yacimiento antes de la apertura de los huecos mineros. De los ensayos de laboratorio se deduce que las rocas tienen una densidad de  $2.750 \text{ kg/m}^3$ , de ahí que se haya atribuido una densidad media de  $2.700 \text{ kg/m}^3$  a los terrenos de recubrimiento.

### Propiedades de la pasta

A partir de ensayos de laboratorio se han obtenido para la pasta las siguientes propiedades medias a los 28 días:

- Cohesión, 190 kPa
- Ángulo de fricción,  $16^\circ$
- Módulo elástico, 22 MPa
- Coeficiente de Poisson, 0,35
- Densidad,  $2900 \text{ kg/m}^3$

Como los resultados de los ensayos presentaban una considerable dispersión, se ha variado en el modelo tanto la cohesión como el módulo elástico de la pasta entre los siguientes límites:

$$127 \text{ kPa} < c < 254 \text{ kPa}$$

$$15 \text{ MPa} < E < 30 \text{ MPa}$$

### Modelo matemático

Mediante el conocido programa FLAC se ha realizado un modelo numérico bidimensional, en deformaciones planas, de una cavidad minera que se supone se encuentra totalmente rellena

de pasta cementada. En esta sección, el hueco excavado tiene una longitud media de unos 130 m, una altura máxima del orden de 65 m y se encuentra a una profundidad media de unos 450 m. Se ha supuesto que en el borde Norte de la masa mineral existe una banda de cizalla con un buzamiento de 80° y una anchura de 20 m y que el campo tensional natural es de tipo hidrostático.

El mallado utilizado en el modelo se presenta en la Figura 1. Tiene 600 m en horizontal y 700 m en vertical y está compuesto de 42.000 elementos. El borde superior del modelo coincide con la superficie del terreno, supuesta horizontal, y tiene libertad total de movimiento. Los bordes laterales se han fijado en dirección horizontal y el borde inferior del modelo tanto en vertical como en horizontal.

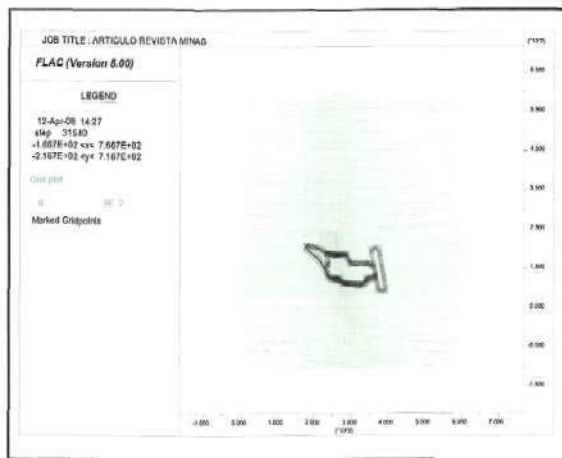
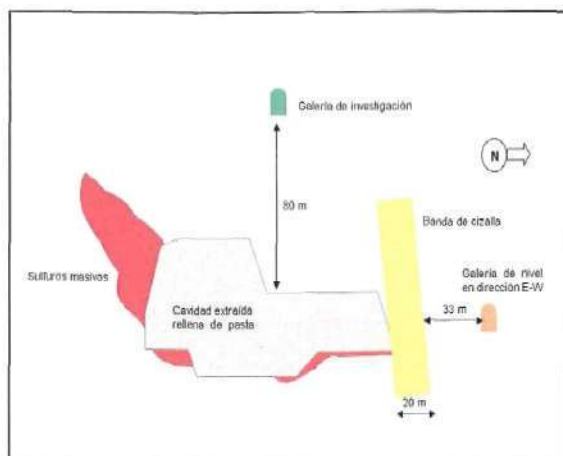


Figura 1. Mallado el modelo

En primer lugar se ha realizado lo que se denomina "pasada elástica" en la que se reproduce el estado tensional del yacimiento antes de comenzar a explotar. A continuación se ha vaciado totalmente la zona que se ha previsto extraer y se ha rellenado con pasta. Aunque el modelo proporciona las tensiones y los desplazamientos en cualquier nodo del mallado, se ha centrado la atención, en lo que a movimientos se refiere, en lo siguiente:

Figura 2. El hueco minero y su entorno



- Desplazamientos verticales sobre el centro de la cavidad, aproximadamente. Desde una galería de investigación geológica situada a unos 80 m por encima del hueco hasta la base del mismo (ver Figura 2).

- Desplazamientos horizontales y verticales en el hastial Norte, a mitad de altura del hueco, donde se sitúa una de las galerías de nivel de la mina, la cual se ha supuesto ubicada, en principio, a 33 m de distancia de la cavidad (ver Figura 2).

Dada la importancia que se supone tiene el relleno de pasta para estabilizar la mina, se han estudiado, mediante el modelo, los siguientes casos en lo que a sus propiedades se refiere:

TABLA 4  
Propiedades de la pasta utilizadas en las simulaciones

Casos	Módulo Elástico (MPa)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
C	15	127	16
C11	18	152	16
C1	20	170	16
C12	22	186	16
C2	25	212	16
C3	30	254	16

En todas las simulaciones numéricas se han utilizado las propiedades de pico y residuales de los macizos anteriormente mencionadas.

### Resultados de las simulaciones

De las simulaciones numéricas se deduce que en todos los casos estudiados el macizo rocoso de techo se plastifica, o sea, rompe, hasta una altura del orden de 200 m por encima del cielo de la cavidad, como se puede ver en la Figura 3, correspondiente al caso C. La masa de rocas rotas que se forma como consecuencia de esta plastificación tiende a caer hacia el hueco relleno de la mina, ejerciendo sobre la pasta una presión vertical que no sobrepasa 2,5 MPa, como se muestra en la Figura 4. Esta presión es sólo aproximadamente la mitad del peso de la columna de roca rota de 200 m de altura; ello es debido al efecto arco que se produce entre el macizo rocoso roto y el que no ha alcanzado la plastificación, como se puede observar en la Figura 4. El macizo rocoso roto sobre el techo del hueco experimenta un descenso que en el cielo de la cámara alcanza un valor máximo de unos 5 m y va disminuyendo en dirección a la superficie (ver Figura 5), la cual experimenta un descenso máximo del orden de 15 cm.

Como consecuencia del descenso del techo roto y también por su propio peso, el relleno de pasta se comprime, de modo que un punto situado dentro de la pasta a media altura de la cavidad desciende más de 2 metros. La base de la cámara apenas sube, ya que su tendencia ascendente se ve frenada por el empuje contrario de la pasta.

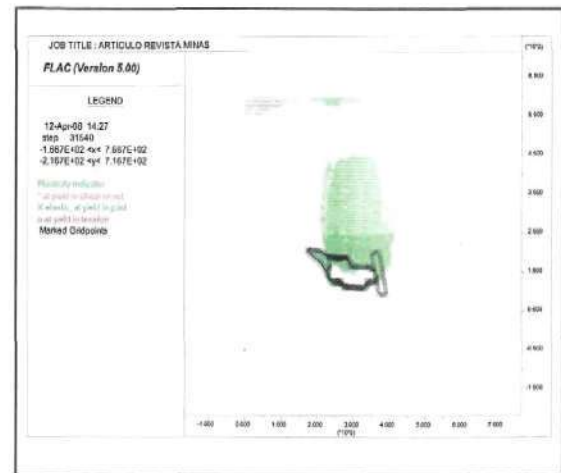


Figura 3. Plastificaciones en el entorno del hueco

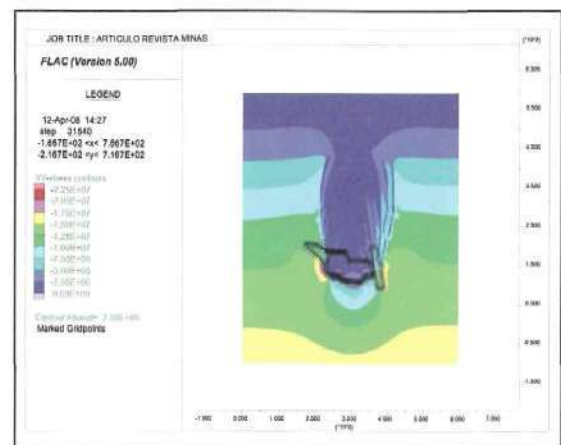


Figura 4. Tensiones verticales

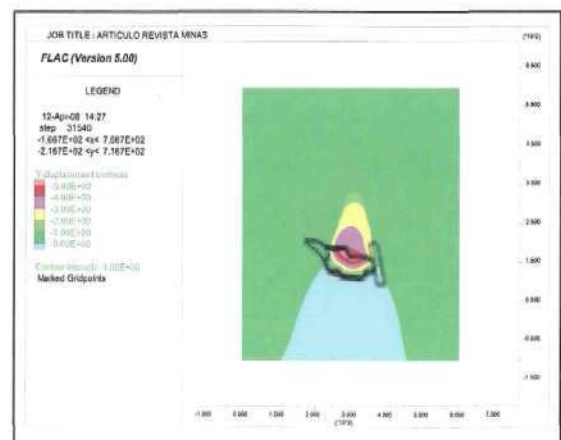


Figura 5. Desplazamientos verticales

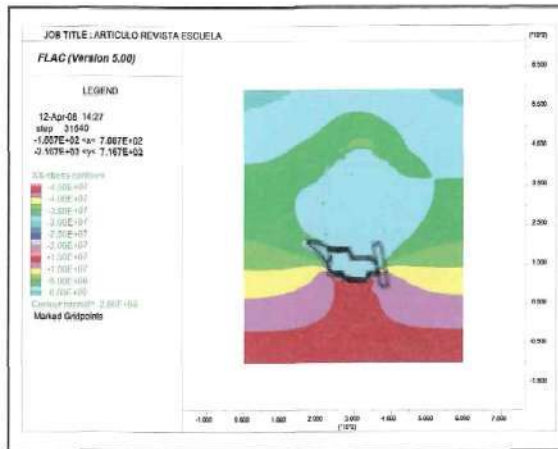


Figura 6. Tensiones horizontales

Como se puede ver en la Figura 3, una parte de la banda cizallada que se encuentra en el borde Norte de la cavidad también se plastifica. Por este motivo, las concentraciones de presiones verticales en dicho borde se alejan del hastial del hueco y aparece una zona de concentración de presiones con una anchura de unos 20 m al Norte de la banda cizallada (ver Figura 4). Según esto, siempre que exista una zona de falla como la supuesta, es conveniente, con objeto de evitar los efectos de las sobrepresiones sobre las galerías de nivel, que éstas se sitúen a más de 20 m al Norte de la mencionada banda.

Las tensiones horizontales se concentran en la base del hueco (ver Figura 6) pero no en el cielo, ya que en éste surge una zona relajada de tensiones, tanto horizontales como verticales (ver Figuras 4 y 6), como consecuencia de la plastificación del macizo rocoso sobre la cavidad. También se concentran las tensiones justo por encima de la zona plastificada como se muestra en la Figura 6, aunque no alcanzan por mucho la magnitud que tienen en la base de la cámara.

Las tensiones horizontales se concentran en la base del hueco (ver Figura 6) pero no en el cielo, ya que en éste surge una zona relajada de tensiones, tanto horizontales como verticales (ver Figuras 4 y 6), como consecuencia de la plastificación del macizo rocoso sobre la cavidad. También se concentran las tensiones justo por encima de la zona plastificada como se muestra en la Figura 6, aunque no alcanzan por mucho la magnitud que tienen en la base de la cámara.

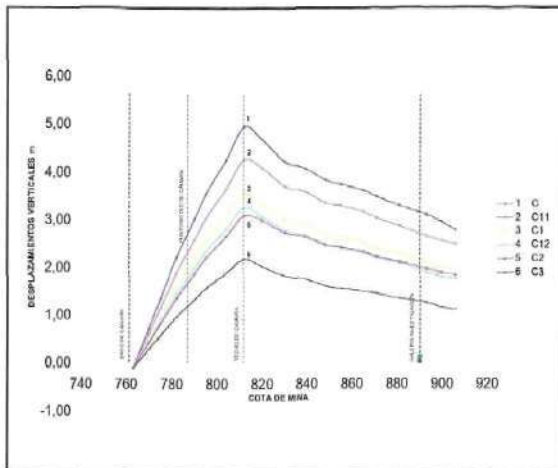


Figura 7. Desplazamientos verticales del techo y de la pasta

Los desplazamientos verticales, del macizo rocoso y de la pasta, desde la base de la cavidad hasta la galería de investigación geológica del yacimiento, que se supone situada a 80 m por encima del cielo de la misma, se muestran en la Figura 7, para las diferentes hipótesis de cálculo. Como se puede ver, a medida que aumentan la cohesión y el módulo elástico de la pasta (curvas 1, 2, 3, 4, 5 y 6) disminuye el descenso tanto de la galería de investigación como del techo de la cavidad; sin embargo, incluso en el caso de la pasta con mayor módulo y cohesión ( $E=30$  MPa y  $c=250$  kPa) de las consideradas, la galería de investigación desciende más de un metro, lo cual es incompatible con su buena conservación, por lo que habría que utilizar una pasta más rígida si se quisiera reducir sustancialmente la rotura y descenso del macizo rocoso que se encuentra sobre el hueco.

Los desplazamientos horizontales de la banda cizallada y del macizo rocoso en el borde Norte de la cavidad se muestran en la Figura 8, en la cual se puede ver también una galería de nivel en dirección E-O, que se ha situado, en principio, a 53 m del hueco y a 33 m de la banda de cizalla. Se observa en esta figura que los desplazamientos son máximos dentro de dicha banda, sobre todo en la zona de la misma que está en contacto con el hueco. En todas las hipótesis sobre propiedades de la pasta realizadas, los desplazamientos horizontales obtenidos en la simulación son similares y en la posición supuesta de la galería en ningún caso al-



canzan los 6 cm. Incluso si ésta se situara más cerca del hueco, por ejemplo a 40 m del mismo en lugar de a 53, los desplazamientos horizontales seguirían siendo prácticamente los mismos.

Los desplazamientos verticales de la banda cizallada y del macizo rocoso en el borde Norte se muestran en la Figura 9, en la que es de destacar la gran magnitud que alcanzan justo en el contacto con el hastial de la cavidad, donde pueden llegar como máximo a 85 cm. Sin embargo a 2 m del hueco se reducen a no más de 10 cm. Esta disminución prosigue, aunque más lentamente, a medida que nos alejamos de la cavidad, de manera que en la posición teóricamente ocupada por el nivel los movimientos verticales no llegan a 3 cm, con la particularidad de que ya desde una distancia de unos 10 m a partir del hueco los desplazamientos verticales no superan dicha cifra. Tampoco en estos movimientos las características de la pasta influyen de forma significativa, por lo que no será mejorando la calidad de ésta como se podrán reducir los movimientos en las galerías de nivel, poco importantes por otra parte.

De los resultados expuestos en las Figuras 8 y 9 se deduce que las galerías de nivel se pueden acercar a las cámaras pero siempre que se mantengan fuera de la banda de cizalla, si existe. No obstante, como se ha indicado anteriormente, en un tramo de 20 m a partir de la supuesta banda de cizalla hacia el Norte, aparecerá una zona de concentración de tensiones verticales de unos 20 m de ancho, por lo que sería conveniente no situar las galerías en ella.

Se han calculado los desplazamientos verticales de la superficie del terreno sobre la sección del hueco analizada para el caso más desfavorable, o sea, para el tipo de pasta menos resistente de los utilizados para las simulaciones numéricas llevadas a cabo en este estudio. En la Figura 10 se puede ver la parte central de la cubeta de hundimiento; no se ha obtenido la cubeta completa porque el modelo no es suficientemente ancho. En esta figura se puede observar que el máximo descenso, que se acerca a los 15 cm, tiene lugar sobre el centro del hueco aproximadamente.

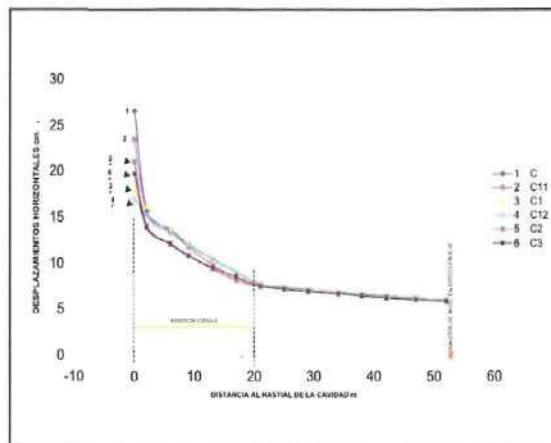


Figura 8. Desplazamientos horizontales en el borde Norte de la cavidad

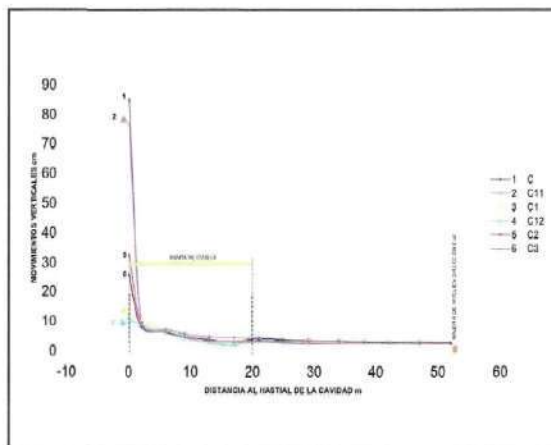


Figura 9. Desplazamientos verticales en el borde Norte de la cavidad



## Conclusiones

Las conclusiones para la seguridad de la mina que se derivan de las simulaciones numéricas son las siguientes:

- La extracción total del yacimiento produciría el hundimiento del cielo de las cámaras, pudiendo alcanzar la rotura del macizo rocoso una altura de 200 m sobre la explotación. Este proceso de rotura y hundimiento solamente se podría frenar de forma substancial mediante un relleno de pasta cementada de gran rigidez.
- En el caso de existir una galería de investigación geológica sobre las cámaras, dentro de la zona plastificada, se vería afectada por el fenómeno de hundimiento anteriormente aludido que alcanzaría también la superficie del terreno la cual descendería, como máximo, del orden de unos 15 cm; un aumento de la rigidez de la pasta disminuiría también este descenso.
- Las galerías de nivel deberían situarse fuera de la banda cizallada que con frecuencia se encuentra en el borde Norte de la mineralización y de la banda de concentración de presiones, de unos 20 m de ancho, que aparece junto al hueco.

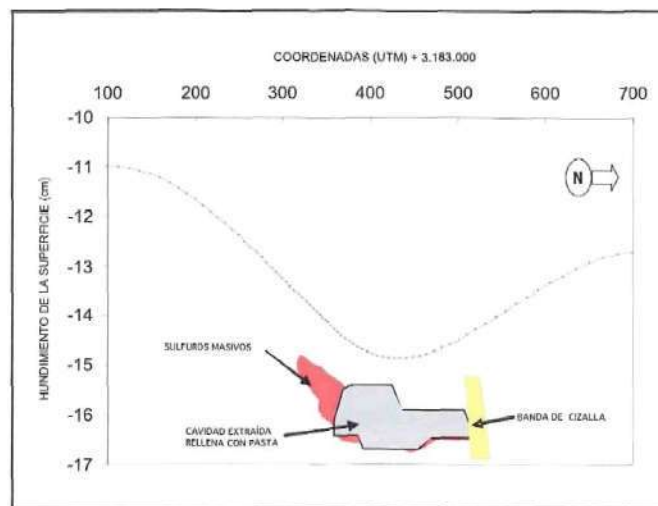


Figura 10. Desplazamientos verticales de la superficie del terreno

## Referencias

BARTON, N.; LIEN, R. y LUNDE, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mechanics. Springer Verlag, Vol. 6.

M. CAI et al. (2007). *Determination of Residual Strength Parameters of Jointed Rock Masses Using the CSI System*. Int. J. Rock Mech. and M. Sci. Vol. 44, pp247-265.

HOEK, E.; BROWN, E.T. (1997). *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 34, Nº 8, pp.1165-1186.

HOEK, E. (1994). *Strength of Rock and Rock Masses*. ISRM. News Journal 2 (2), pp. 4-16.

HOEK et al. (1994). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema.

HOEK et al. (2002). *Hoek Brown Failure Criteria-2002 Edition. Proceedings of NARMS-TAC. Mining innovation and Technology*. University of Toronto pp 267-273.