

EVALUACION PRELIMINAR DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LA “PIPA BRADEN”, MINA EL TENIENTE DE CODELCO-CHILE

Santiago Arias S.¹, Patricio Bertholet M.¹, Patricio Cavieres R.², Sergio Gaete B.², Tomás Guendelman B.³ y Jorge Lindenberg B.³

¹ S.A.S. Ingeniería Estructural

² Codelco Chile, División El Teniente

³ I.E.C. Ingeniería S.A.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación preliminar de la estabilidad de la Pipa Braden, ubicada en el yacimiento cuprífero El Teniente, de Codelco Chile, a partir de las tensiones de tipo tectónico que en ella se inducen debido a la acción de solicitaciones gravitacionales y sísmicas. El análisis se realiza con modelos construidos con elementos finitos tridimensionales tipo “Brick” y las condiciones de estabilidad local se evalúan a través de los criterios de fallamiento de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.

SUMMARY

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

This study’s goal was to perform a preliminary evaluation of the stability of the “Braden Pipe”, located in Codelco Chile’s El Teniente copper deposit, starting from the tectonic type tensions that are induced in it, due to the action of gravitational and seismic forces. The analysis is performed through “Brick” type three dimensional finite element models, and the local stability conditions are evaluated using Hoek-Brown and Mohr-Coulomb failure criteria.

ANTECEDENTES GENERALES SOBRE LA PIPA BRADEN

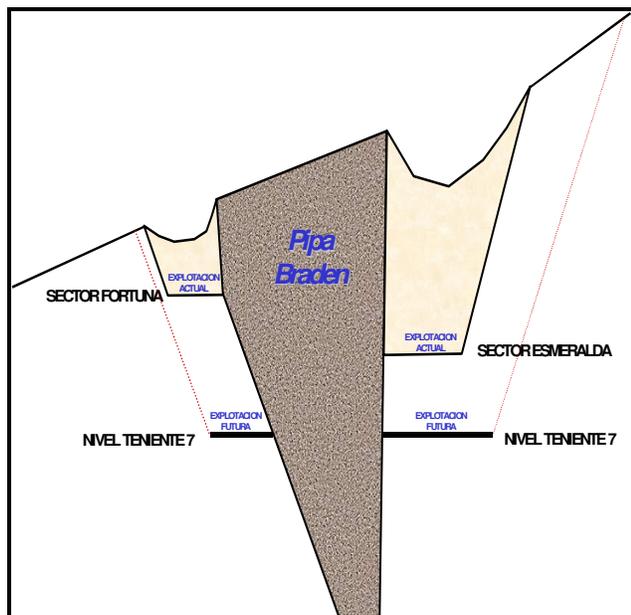
En la zona central del yacimiento El Teniente se emplaza una compleja megaestructura denominada, indistintamente, Brecha Braden, Pipa o Chimenea Braden. Los tipos de rocas más importantes del yacimiento son la Andesita, Diorita, Dacita, pequeños intrusivos de Brechas Hidrotermales y la Brecha Braden. Dentro de este tipo de litologías se encuentran variados macizos rocosos con diferentes grados de fracturamiento y propiedades geomecánicas particulares, existiendo una gran diferencia entre la roca secundaria y la primaria.

Esquemáticamente, el yacimiento El Teniente (Ref.1, Ref.2, Ref. 3) está conformado por un cuerpo central estéril de forma aproximadamente cilíndrica, denominado Pipa (1.0 a 1.2 Km. de diámetro), rodeado de mineralización en una extensión radial variable entre 400 y 800 m. Se considera que las dos unidades litológicas que se caracterizan a continuación, son globalmente

representativas de esta conformación (estudios que se están desarrollando actualmente muestran que la Brecha Braden está conformada por varios tipos de litologías):

Brecha Braden: Parte central de la Pipa, constituida por brechas con fragmentos redondeados a subangulosos de variada composición y tamaño, en una matriz de polvo de roca y cemento de sericita, con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros. Está constituida, en realidad, por un conjunto de subunidades definidas por variaciones de tamaño, clasificación y abundancia relativa de los clastos y por el contenido de turmalina en el cemento. La Brecha Braden limita casi exclusivamente con la Brecha Marginal, con la que presenta contactos gradacionales.

Brecha Marginal: Anillo de brechas de turmalina que se desarrolla en casi toda la periferia de la Pipa Braden. Tiene un ancho promedio de 50 a 60 m, adelgazándose en profundidad hasta unos 5 a 10 m. Está constituida por fragmentos angulosos a subangulosos, con grados variables de alteración cuarzo-sericita-clorita. Debido a que comúnmente presenta homogeneidad litológica de los clastos, se le denomina localmente según su constituyente predominante.



La Pipa Braden tiene forma de cono invertido (Figura 1), con su flanco oriental subvertical y el resto de su contorno convergiendo hacia el centro, con inclinaciones de 60° a 70°. Alcanza en superficie un diámetro del orden de 1.200 m y un desarrollo vertical, reconocido, de unos 1.800 m. Desde 1906 a la fecha, el yacimiento ha sido explotado en los distintos niveles, comenzando así el desconfinamiento de la Pipa. El proceso de extracción continúa casi sin interrupción expandiéndose hacia el lado Norte, en primera instancia, y luego hacia el lado Este, generando con el tiempo, un mayor grado de desconfinamiento en sus bordes y una degradación natural de éstos, por efecto de la subsidencia que generan los sectores productivos.

Figura 1: Sección vertical con orientación SW-NE, representando los polígonos de los sectores Fortuna y Esmeralda (actuales) y nivel Teniente 7 (futuro)

Se debe destacar que a medida que se han profundizado los sectores productivos, mayor es el área desconfinada de la Pipa y menor es el ángulo de subsidencia proyectado en su entorno, por lo tanto, es importante conocer los efectos que pueda generar esta condición sobre toda la infraestructura existente en esta formación. Considerando que la cota más baja en explotación es la 2.120 m, también están en explotación las cotas 2.372 m, 2.428 m, 2.376 m y 2.208 m. Por lo

tanto, a la fecha, ya se hace considerable el efecto de desconfinamiento en las paredes de la Pipa, causando posibles problemas de estabilidad en la infraestructura existente en ella. Finalmente, se debe señalar que se proyecta explotar sectores productivos a la cota 2.070 m, lo que implica que el grado de desconfinamiento de la Pipa será considerable y la infraestructura existente en los niveles más altos correrá un riesgo inminente de estabilidad.

La Tabla N°1 presenta los parámetros geomecánicos principales de la Pipa Braden, suministrados por el Area de Ingeniería de Rocas de Codelco Chile, División El Teniente, actualizados al 30 Noviembre 2000:

Tabla N°1: Parámetros geomecánicos principales de la Pipa Braden

1	Peso Unitario	$\gamma = 2.60$	ton/m ³	
2	Razón de Poisson	$\nu = 0.25$		
3	Angulo de fricción interna	$\phi = 43$	°	
4	Cohesión	$c = 9.0$	MPa	
5	Módulo Elasticidad Estático	$E_{eMR} = 20.0$	GPa	Macizo rocoso
6	Módulo Elasticidad Dinámico	$E_{ci} = 22.3$	GPa	Roca Intacta
		$E_{dMR} = 26.0$	GPa	Macizo rocoso
		$E_{di} = 48.3$	GPa	Macizo Rocosos es 30% mayor que el Estático, y Roca Intacta de Ensayos de Laboratorio
7	Resistencia a la Compresión Uniaxial	$\sigma_{ci} = 74$	MPa	Roca Intacta, Criterio Fallamiento de Hoek-Brown
8	Resistencia a la Tracción	$\sigma_{ti} = 6.0$	MPa	Roca Intacta, $\leq 10\%$ del σ_{ci}
9	Parámetro “m” de Hoek-Brown	$\sigma_{tMR} = 3.0$	MPa	Macizo Rocosos, $\leq 5\%$ del σ_{ci}
		$m_b = 6.8$		Macizo Rocosos, $m_i = 11.6$; GSI = 85
10	Parámetro “s” de Hoek-Brown	$s = 0.19$		Macizo Rocosos, GSI = 85
11	Parámetro “a” de Hoek-Brown	$a = 0.5$		GSI > 25
12	Coficiente de seguridad. Criterio de Ruptura para Solicitaciones Estáticas	$= 1.0$		límite seguro/inseguro
13	Coficiente de seguridad. Criterio de Ruptura para Solicitaciones Dinámicas	$= 1.0$		límite seguro/inseguro) (Eventuales Sismos)
14	Estimación Valores de $K = \sigma_h / \sigma_v$	$K = \nu / (1 - \nu) = \alpha = 0.333$		Medición de Esfuerzos Túnel Río Blanco: $K_{medido \text{ in situ}} \cong 1.0$
15	Clasificación Macizo Rocosos según	GSI = 85		
		RMR _{Laubscher} = 75		
		RMR _{Bieniawski} = 85		
		RQD = 100	%	
16	Cota Libre de la Pipa al Año 2025	Ten-7 = 2070	msnm	
		Ten-8 = 1980	msnm	

ALCANCE DEL ESTUDIO

El alcance fundamental del estudio consiste en efectuar la evaluación estructural de la Pipa Braden, que corresponde a un macizo rocoso desconfinado, en voladizo, con forma de tronco de pirámide invertida, con las propiedades geomecánicas previamente indicadas, para los estados de carga de peso propio sin confinamiento lateral y acciones sísmicas horizontales, cada 45° grados en planta. Los criterios de fallamiento de Hoek-Brown (Ref. 4, Ref. 5) y Mohr-Coulomb (Ref. 6) se utilizaron para verificar la estabilidad local y total de la Pipa. La Figura 2 ilustra el sistema coordenado de referencia.

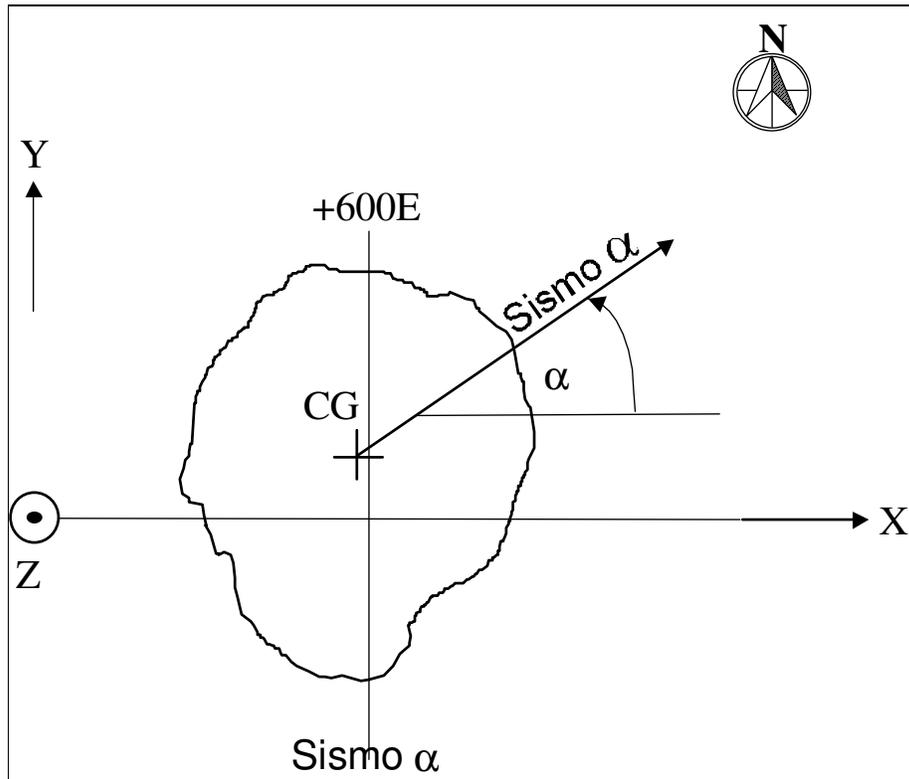


Figura 2: Sistema coordenado de referencia

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Método de análisis: Se ha empleado un modelo matemático tridimensional de elementos finitos isoparamétricos tipo "Brick", de ocho nudos, 6 caras cuadrilaterales alabeadas de aristas rectas. La Pipa se ha discretizado en conformidad a la información contenida en archivos magnéticos suministrada por Codelco Chile, desde la cota superior a 2940 metros, hasta la inferior de 1983 metros. Los diferentes modelos empleados en el estudio hacen referencia específica al nivel respectivo en que se ha supuesto empotramiento perfecto.

En esta etapa se ha privilegiado, dentro de un margen razonable de precisión, la construcción de un modelo eficiente, con baja demanda de tiempo de proceso, a fin de estudiar el efecto de los principales parámetros a los que dicho modelo es sensible. En tal sentido, resulta indispensable garantizar un nivel adecuado de precisión de la malla escogida, para lo cual se realizó un estudio de convergencia de desplazamientos para dos estados de carga independientes, observándose que una malla de $8*8*18$ (Figuras 3 y 4) elementos finitos tipo brick, entre dos cotas verticales separadas cada 50 metros, aproximadamente, tiene una precisión por defecto de 2% en relación a una malla de $16*16*18$ elementos finitos, que sería la recomendada para un estudio de detalle posterior

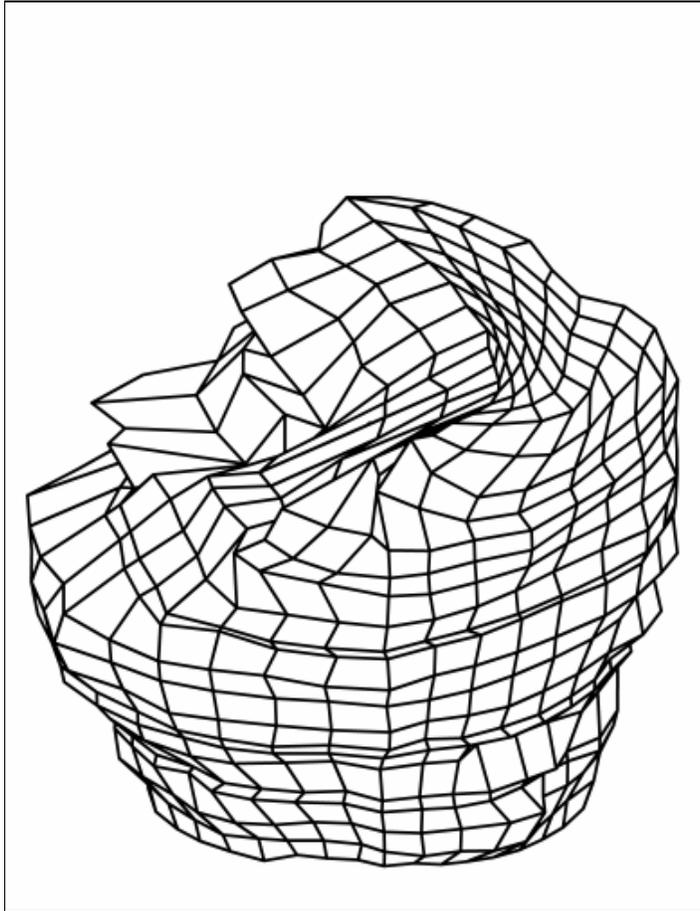


Figura 3: Modelo tridimensional de elementos finitos de la Pipa Braden

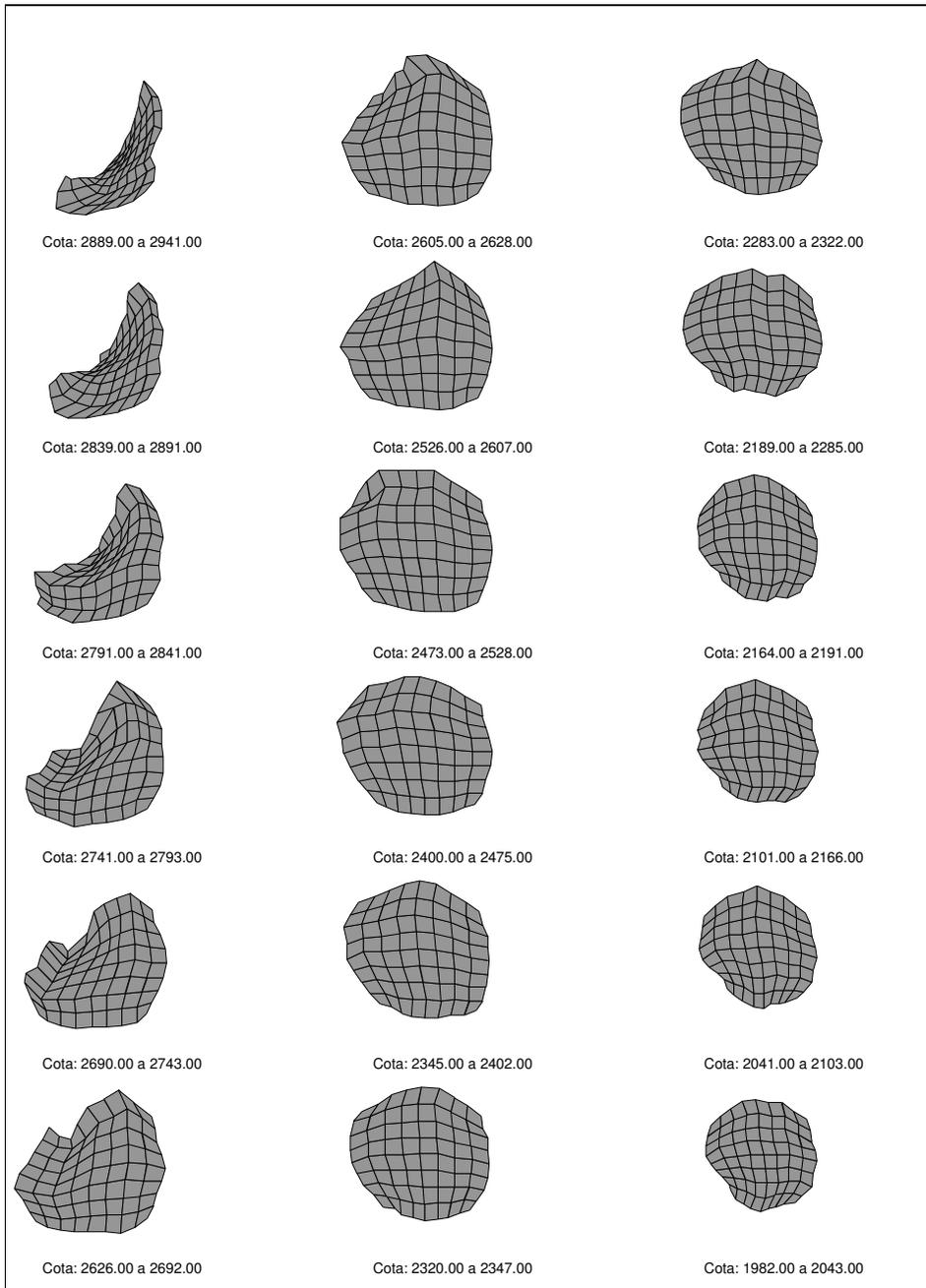


Figura 4: Secciones transversales a diversas cotas de la Pipa Braden

Modelos de análisis: Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en este primer estudio de estabilidad de la Pipa Braden, se han construido los modelos de análisis descritos en la Tabla N°2, relacionados con distintas interpretaciones de sus condiciones actuales y para las diferentes alternativas de explotación de la mina:

Tabla N°2: Características geométricas de los modelos de análisis

No.	Modelo	Descripción
1	PIPA8X8A-1	Constituido por la Pipa propiamente tal, sin confinamiento lateral. Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 1983 m.s.n.m.
2	PIPA8X8A-2	Constituido por la Pipa propiamente tal, con confinamiento lateral. Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 1983 m.s.n.m.
3	PIPA8X8B	Similar al anterior, pero reteniendo la sección transversal de la Pipa desde la cota 2474 hacia abajo, hecho que se lograría con una explotación de la mina acorde con esta hipótesis. Con esta solución se lograría paliar los efectos nocivos de la excentricidad vertical que se manifiestan en la PIPA8X8A, lo que debería ser respaldado con estudios técnico-económicos apropiados, considerando los niveles reales a que se encuentre explotada la Mina (Ten-6, Ten-4, Esmeralda, otros). Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 1983 m.s.n.m.
4	PIPAROCA	Pipa completa, con conexión a cordón rocoso en 450 metros de largo en planta, según un eje desviado a 135° con respecto al eje X. Esta conexión se manifiesta a partir de la cota 2840 (100 metros por debajo de la cúspide de la Pipa) y se extiende hasta la cota de empotramiento. En este modelo se interpreta la conexión al cordón rocoso a través de la inclusión de apoyos fijos según X e Y, en los nudos que correspondan. Se aplica un estado de carga compuesto por el peso propio de la Pipa, más la acción de un sismo lateral estático, incidente en un ángulo de 225° con respecto al eje X. Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 1983 m.s.n.m.
5	PIPA2691	Corresponden al modelo PIPA8X8A. . Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 2691 m.s.n.m.
6	PIPA2474	Corresponden al modelo PIPA8X8A. Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 2474 m.s.n.m.
7	PIPA2190	Corresponden al modelo PIPA8X8A. Cota superior: 2940 m.s.n.m. Cota de empotramiento: 2190 m.s.n.m.

Estados de carga: La Tabla N°3 describe los diez estados de carga considerados:

Tabla N°3: Estados de carga

N°	Descripción
1	Peso propio con confinamiento lateral (sólo para el modelo PIPA8X8A)
2	Peso propio sin confinamiento lateral
3	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 0° con respecto al eje X
4	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 45° con respecto al eje X
5	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 90° con respecto al eje X
6	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 135° con respecto al eje X
7	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 180° con respecto al eje X
8	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 225° con respecto al eje X
9	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 270° con respecto al eje X
10	Peso propio sin confinamiento lateral + sismo lateral a 315° con respecto al eje X

Para los diferentes casos de análisis se han empleado los valores dinámicos para la roca intacta, obteniéndose los períodos fundamentales de vibración, a partir de los cuales, y para las condiciones de zona sísmica y tipo de suelo existentes, se ha evaluado la ordenada de pseudo aceleración espectral elástica que establece la Norma Sísmica Chilena NCh433.Of96, lo que conduce a estimar un corte basal del orden del 5% del peso total. La sollicitación sísmica se aplica en forma estática, con fuerzas laterales resultantes del producto de la masa concentrada en diferentes niveles y la aceleración horizontal dada por una ley lineal, nula en la cota 1983, y de 10% en la cota 2940.

ANALISIS DE RESULTADOS

El resultado detallado de este estudio consta en el Informe Técnico entregado a Codelco Chile (Ref. 7). Se consignan a continuación sólo los resultados considerados más relevantes.

1. El desconfinamiento lateral de la PIPA hasta el N.+1983 (Ten-8), según requerimiento de explotación futura, indica en varias secciones transversales que las tensiones de compresión en la roca están fuera del criterio de fallamiento de Hoek-Brown (falla frágil de la roca) y en algunos sectores incluso existen tensiones de tracción inadmisibles, superiores a la envolvente de fallamiento de Hoek-Brown. Estos resultados no se ven afectados si se empotrara al nivel Ten-7, dado el tamaño en altura de los elementos finitos considerados.
2. El efecto con mayor incidencia en los resultados proviene de la excentricidad de las cargas verticales (peso propio). Si al estado anterior de desconfinamiento total se le suma la acción transversal sísmica, para direcciones cada 45°, comprendidas entre 135° y 315°, varias secciones y sectores quedan fuera del criterio de fallamiento de Hoek-Brown.
3. En todas las secciones y sectores donde el criterio de fallamiento de Hoek-Brown revela compresiones mayores que las máximas admisibles, la roca entrará en régimen de

plastificación o de comportamiento anelástico, generándose planos de ruptura con desprendimiento de bloques de roca y disminución de la rigidez de la Pipa. Existiría, en tal caso, peligro de fallamientos bajo la acción de sismos futuros.

4. Situaciones similares a las indicadas, y con mayor compromiso de fallamientos se observa en aquellas secciones y sectores donde la existencia de estados tensionales por tracción sobrepasan la capacidad de la envolvente de fallamiento de Hoek-Brown.
5. Lo indicado, especialmente en relación con la Pipa desconfiada total, estaría justificando en parte el fenómeno de agrietamiento con desprendimiento de rocas en la parte superior de la Pipa, fenómeno que se viene observando desde antes del año 1994.
6. El efecto de mayor importancia en este estudio lo constituye la excentricidad de la Pipa que, para una explotación hasta la cota N. +1983, genera un importante momento flector basal por efecto del peso propio. Este efecto también se manifiesta en los desplazamientos laterales, los que para sismos severos, podrían poner en peligro la estabilidad general de la Pipa (efecto P- Δ).
7. Para la PIPA8X8B, se determina que prácticamente todas las secciones y sectores tiene estados tensionales por compresión en la roca dentro del criterio de ruptura de Hoek-Brown.
8. La distribución tensional bajo compresión excéntrica demuestra claramente que las secciones planas antes de la flexión no se mantienen planas después de la flexión. Por lo tanto, la deformada de los planos conforman una superficie alabeada. Lo anterior demuestra que estructuras como la Pipa Braden (de relación alto/ancho del orden de 1) no pueden analizarse con las expresiones simplificadas de la Resistencia de Materiales. El Método de Elementos Finitos resulta adecuado para este tipo de problema.
9. Los modelos PIPA2691 y PIPA2474, para todos los estados de carga, cumplen con el criterio de fallamiento de Hoek-Brown.
10. El modelo PIPA2190 muestra sectores traccionados en la zona N 45°W de la Pipa, alcanzándose en la cota N.+2528 aproximadamente (Ten Sub-B) y en algunos sectores de borde, tensiones fuera del criterio de fallamiento de Hoek-Brown (falla frágil de la roca). La situación indicada revela inestabilidad a la tracción de la roca en el sector N 45°W de la Pipa.
11. El modelo PIPAROCA muestra importantes sectores Oeste con tensiones de tracción sobre 60 Mpa hasta la cota N.+2473 aproximadamente y comportamiento fuera del criterio de fallamiento Hoek-Brown (falla frágil de la roca) en sectores Sur (270° respecto a X).
12. Un estudio estimativo de la profundidad de la roca de la Pipa bajo el Nivel +1983 (Ten-8) comprometida con las solicitaciones máximas derivadas de su empotramiento a esa cota, indica que la profundidad comprometida alcanza el Nivel +1550, aproximadamente.

CONCLUSIONES

1. Como consecuencia de este primer estudio se logran identificar los principales parámetros geotécnicos de la Pipa y las dimensiones de la malla de elementos finitos que garantizan una adecuada convergencia de resultados.
2. Los resultados de los diversos análisis estructurales han logrado identificar y cuantificar las zonas de la Pipa que sobrepasan las tensiones de fallamiento.
3. En una segunda etapa, y como producto de los resultados de esta primera, se efectuará un estudio de tipo no lineal, empleando una malla refinada, propiedades constitutivas anisotrópicas y parámetros geológicos y sismológicos variables. Además se considerará la pérdida de masa lateral que sufre la Pipa Braden debido al fenómeno de subsidencia generado por la explotación perimetral y en profundidad en el entorno de ella.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la autorización de la publicación de este trabajo a Codelco Chile – División El Teniente.

REFERENCIAS

1. Uribe, F.V., “Caracterización Geológica y Geotécnica de la Chimenea de Brechas Braden”, Informe GL-116 Suptcia. Geología, División El Teniente, 2000.
2. Floody, R.D., “Estudio de Vulnerabilidad Geológica-Geotécnica de Chimenea Braden. Fase I: Geología Complejo de Brechas Braden”, Informe de Avance GL-044/00, Suptcia. Geología, División El Teniente, 2000.
3. Karzulovic, A.L. y Díaz, J.A., “Evaluación de las Propiedades Geomecánicas de la Brecha Braden en Mina El Teniente”, Memorias IV Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas, ISRM International Symposium, Santiago, Chile, 1994.
4. Hoek, E., “Reliability of Hoek–Brown Estimates of Rock Mass Properties and their Impact on Design”. Inst. Rock Mech. Min. Sci. Vol 34 N°8.
5. Hoek, E., “Rock Engineering: The Application of Modern Techniques to Underground Design”, April 1998.
6. Parry, R.H.G., “Mohr Circles. Stress Paths and Geotechnics”, 1997.
7. Arias, S., “Evaluación Estructural Estática Pipa Braden”, Informe Final, Contrato 4500187788, Codelco Chile, División El Teniente, Abril 2001.