minería chilena
Fecha: 19/08/2025 Audiencia: 0 Sección: ESPECIALES
Vpe: $1.295.979 Tirada: 0 Frecuencia: MENSUAL
Vpe pág: $1.399.440 Difusión: 0
Vpe portada: $1.399.440 Ocupación: 92,61%

Foto: Gentileza Codelco

La minería subterránea conlleva una serie de retos en términos operacionales.

Una mirada al accidente en El Teniente

Por:Jacopo Seccatore y Javier Arzúa, académicos del Doctorado en Minería del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la Universidad Católica del Norte (UCN).

El macizo rocoso es como un puzle tridimensional de bloques de roca separados por las discontinuidades y que, además, está sometido a esfuerzos que, en algunas ocasiones, pueden superar la resistencia de la roca y provocar nuevas fracturas o movilizar las que ya existen. Esto último es lo que genera lo que todos conocemos como movimientos sísmicos. Acá en Chile los esfuerzos del contacto entre las placas oceánica y continental en algún momento superan la resistencia y se produce un movimiento o fractura. Al igual que en el agua, ese movimiento produce una onda sísmica que se transmite a través del terreno y que es lo que sentimos cuando, como buenos chilenos, preguntamos "¿está temblando?

Aparentemente esto es lo que ocurrió en El Teniente: se produjo un sismo con epicentro en la propia explotación minera, aunque a una profundidad bastante mayor que la de la explotación.

Así, surgen varias preguntas.

¿El sismo se produjo por la propia actividad de la explotación minera?

Desde un punto de vista técnico, es difícil que fuese así; es mucho más probable que el movimiento tuviese un origen principalmente tectónico, pues es sabido que El Teniente tiene problemas de estallidos de roca, lo que nos habla de un entorno sometido a altos esfuerzos.

Podría pensarse que retirar tantos millones de toneladas de mineral y estéril podría haber modificado el estado de esfuerzos, de forma tan significativa como para producir un sismo de magnitud 4,2. Hagamos unas cuentas sencillas, para nada precisas y tirando hacia el peor caso posible, por supuesto. Considerando un movimiento de material (estéril y mineral) anual de 50 Mt y, considerando que el yacimiento tiene en torno a 3 km2 de superficie horizontal, significa que, año a año la variación en el esfuerzo vertical por retirar material (descarga) es de unos 170 kPa al año (tampoco, porque el estéril se deposita en los botaderos en el entorno de la misma explotación).

Teniendo en cuenta, también, que el inicio de explotación por panel caving fue alrededor de 1980, El Teniente lleva explotando de forma masiva el yacimiento desde hace unos 40 años. Evidentemente, no llevan

minería chilena
Fecha: 19/08/2025 Audiencia: 0 Sección: ESPECIALES
Vpe: $825.529 Tirada: 0 Frecuencia: MENSUAL
Vpe pág: $1.399.440 Difusión: 0
Vpe portada: $1.399.440 Ocupación: 58,99%

esos 40 años con el ritmo de producción actual, pero consideremos que llevan extrayendo esas 50 Mt desde 1980. Con esas hipótesis, la variación en el esfuerzo (relajación) por material removido es de unos 6 a 7 MPa en toda la historia de El Teniente (ni siquiera estamos considerando que esto se ha realizado de forma paulatina en 40 años).

Teniendo en cuenta que, además, el esfuerzo vertical a unos 15-20 km de profundidad (donde se ubicó el hipocentro del sismo) puede ser de unos 450 MPa, podemos darnos cuenta de que es muy poco probable que la explotación minera haya tenido la culpa del movimiento sísmico, pues estamos hablando de que la mina El Teniente ha podido modificar en torno a un 1% del esfuerzo al que está sometido el hipocentro del sismo, considerando toda la historia moderna de la mina y suponiendo que fue algo repentino, la nada misma. Por eso, es mucho más probable que el sismo se produjese de forma natural.

¿El movimiento sísmico pudo haber sido provocado por una tronadura?

En principio no, además de que las autoridades ya han expresado que no se produjeron tronaduras en el momento del evento, las vibraciones inducidas por explosivos no suelen desencadenar sismos. Una tronadura sí cambia el estado de esfuerzos de forma abrupta, pues es una excavación instantánea, es decir, se crea una cavidad que antes no existía en milisegundos. Esto obliga al macizo a un reajuste tensional casi instantáneo, pero estos efectos difícilmente llegarán al hipocentro, ubicado a unos 15 km, y, en caso de hacerlo, llegarán tan atenuados que no implicarán un efecto significativo.

¿Pudo ser un estallido de roca (rockburst en inglés)?

Es poco probable que un estallido de roca haya sido el desencadenante del derrumbe, aunque pudo producirse algún fenómeno de este tipo durante el derrumbe.

Un estallido de roca se produce cuando se incrementan repentinamente los esfuerzos (energía en el fondo), mucho más rápido de lo que la roca es capaz de asumir, siendo necesario convertir ese exceso de energía en lo único que se puede convertir, en energía cinética y en ondas sísmicas, lo que provoca proyecciones de fragmentos de roca desprendidos del macizo, que es lo que, en definitiva, se conoce como estallido de roca.

El estallido de roca produce un fracturamiento de tipo frágil e induce ondas sísmicas

(la forma que tiene el macizo de liberar energía acumulada), pero, en general, son de pequeña magnitud, lo que en el ámbito minero se le llama microsismicidad. Si bien todavía no tenemos la tecnología para predecir un estallido de roca, sí se puede trabajar para que sus efectos sean lo más pequeños posible. En El Teniente, han conseguido reducir los fenómenos de estallidos de roca gracias a lo que se denomina como preacondicionamiento del macizo, que consiste en fracturar previamente el macizo rocoso para reducir, de forma controlada, el nivel de esfuerzos al que está sometido. El Teniente es un referente mundial por su liderazgo en el monitoreo y mitigación de estallidos de roca.

Ahora, ¿Por qué tuvo un desenlace fatal?

Lamentablemente, en una explotación minera no se conoce a la perfección el macizo rocoso en el que se trabaja hasta que se extrae la última tonelada de mineral. Considerando que a El Teniente aún le quedan, al menos, otros 25-50 años de vida, sólo estamos ante un conocimiento medio-alto del macizo rocoso, por lo que no estamos exentos de encontrarnos con sorpresas geológicas no descubiertas y no consideradas en el diseño de la explotación.

La razón final del derrumbe fatal dentro de la mina no se podrá saber hasta que se recopile toda la información disponible del evento y se analice. El desencadenante, sin duda, parece ser el movimiento sísmico. Esta vibración del terreno supuso un incremento repentino (o relajación repentina) de los esfuerzos que alguno de los componentes del macizo rocoso (roca o discontinuidades) no pudo soportar, lo que se tradujo en una falla del terreno, que buscó el camino más fácil para liberar la energía acumulada; desgraciadamente ese camino más fácil fue la galería en la que se encontraban los mineros. No dudo de la existencia de un sinfín de sistemas de monitoreo de última tecnología al interior de la explotación minera, pero si la causa fue el movimiento sísmico (algo repentino y sin aviso previo), estos sistemas no sirven de nada más que para avisar de que HA PASADO algo, este derrumbe fue algo casi instantáneo, muy violento, y con una cantidad de energía involucrada muy significativa, tal y como se desprende de algunas imágenes donde se observa el tren movido del sitio como si fuese de juguete. Los sistemas de monitoreo no podían haber avisado con antelación de la ocurrencia del evento.

¿Cómo podemos prevenir que no vuelva a ocurrir algo así?

La minería, tanto a cielo abierto como subterránea, es una actividad riesgosa porque todavía no conocemos suficientemente bien cómo se comporta el macizo rocoso, así que los mineros estamos expuestos, como decía el doctor Leandro Alejano, a que el macizo rocoso no se comporte como nosotros esperamos, si no como él quiere hacerlo.

Se puede endurecer la normativa para que las explotaciones mineras tengan que disponer de más recursos para aumentar el Factor de Seguridad de las excavaciones, y, aun así, todavía nos seguiríamos encontrando con sorpresas geológicas.

El camino para disminuir este tipo de situaciones es la investigación, tanto por el lado de conocer mejor al macizo rocoso en el que se realiza la excavación (investigación aplicada para mejorar las técnicas de caracterización), como por el lado de conocer mejor los posibles modos de comportamiento de las rocas y los macizos rocosos (investigación básica en laboratorio). mch

Foto: Gentileza UCN

Foto: Gentileza UCN

Foto Izq: Jacopo Seccatore, académico del Doctorado en Minería del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la UCN.

Foto Der.: Javier Arzúa, académico del Doctorado en Minería del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la UCN.