



Tronaduras mineras

Efectos sobre edificaciones y estructuras

Autor

Nombre del autor(es)
Email: rtorres@bcn.cl
Tel.: (56) 32 226 3160

Nº SUP: 123343

Documentos disponibles en:
<https://atp.bcn.cl>

Resumen

Las labores mineras extractivas requieren la remoción de grandes cantidades de rocas, ya sea para llegar a la veta deseada o para extraer la roca de la veta que contiene un cierto porcentaje del (de los) mineral(es) deseado(s). La manera más rápida de fracturar la roca y prepararla para su extracción es mediante el uso de explosivos. A través de los años, se han logrado la producción de explosivos de uso y transporte seguros y se ha producido un cuerpo de conocimientos respecto a su uso que ha permitido una buena planificación de las explosiones en términos de su potencia y secuenciación temporal para lograr una fragmentación adecuada de la roca. Las explosiones, sin embargo, son extremadamente peligrosas debido a que la liberación de energía es súbita, expansiva e incontrolable desde el momento de la detonación. El potencial de daño a personas, estructuras, edificios y viviendas dentro del radio de alcance de los efectos de las explosiones es alto y se deben extremar las precauciones para proteger vidas y bienes. Una explosión produce, además de la onda expansiva transmitida por el aire, una serie de ondas mecánicas transmitidas a por los suelos. Así entonces, la geología y topología del lugar de faenas y los lugares donde se sitúen bienes que deben ser protegidos (incluidos los depósitos de almacenamiento de explosivos) deben ser cuidadosamente estudiados y grandes cantidades de datos empíricos debe ser recolectados para desarrollar modelos matemáticos con capacidad predictiva, para poder modelar las explosiones de una tronadura¹ y sus posibles consecuencias. En nuestro país la normativa aborda el tema en el Reglamento de Seguridad Minera del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), con las especificidades más bien laxas que el tema impone y a través del Plan de Monitoreo de Vibraciones por Tronaduras del Consejo Minero. El nivel de profundidad y densidad de data que se observa en los trabajos realizados en Chile, dista mucho aún de lo que se realiza en otros países.

¹ Según el Consejo de Competencias Mineras (CCM), una tronadura “consiste en la fragmentación instantánea que se produce en la roca por efecto de la detonación de explosivos depositados en su interior”. Disponible en: <http://bcn.cl/2ckj4>. Diciembre 2019.

Introducción

Este trabajo responde a una solicitud de un miembro del Parlamento de Chile y dice relación con el efecto de las tronaduras en faenas de excavación de suelos -para minería u otros fines- sobre estructuras, edificios o viviendas ubicadas en las vecindades de dichas faenas. Las fuentes utilizadas corresponden a información oficial y legislatura del país e ingeniería y trabajos de investigación publicados en la literatura especializada.

Contexto²

"La actividades industriales que demandan la realización de tronaduras, deben considerar el impacto que el uso de explosivos genera sobre la comunidad, ya sea como daño sobre infraestructuras circundantes o externalidades negativas inducidas sobre residentes (percepción humana) o perturbaciones con carácter de impacto ambiental (fauna protegida, monumentos nacionales, etc.). Es por ello necesario monitorear y controlar el impacto ambiental producido por vibraciones y ondas de presión aérea, y de ser necesario rediseñar la tronadura para mitigar sus efectos

La onda de compresión aérea y las vibraciones producidas por tronaduras pueden provocar esfuerzos internos, sobre estructuras y edificaciones a ellas expuestas y también daño por vibraciones, donde la velocidad de vibración de partícula es el parámetro más representativo del daño y es el que se mide y se compara con estándares o criterios internacionales de vibración, para determinar si se está alcanzando niveles de vibración que dañan una determinada estructura. Instrumentos llamados geófonos, miden las vibraciones máximas -expresadas en Velocidad de Partícula (PPV) y sus frecuencias- para así relacionarlas con los criterios internacionales de daño.

El nivel de vibración generado en una estructura depende en gran medida de su comportamiento dinámico, en particular su frecuencia natural de oscilación. Así, todo programa de medición debe incluir, tanto la velocidad de partícula como la frecuencia de la onda vibratoria. Existen otros factores que influyen en la capacidad de generar daño a estructuras, entre ellos la duración de la vibración, el número de sollicitaciones sobre la estructura, la resistencia de los elementos estructurales y las características del suelo donde se sustentan.

Por otra parte, las ondas son causa potencial de daño a estructuras, así como también, de molestias para las personas. Comúnmente llamadas ruido, son ondas de presión propagadas por el aire, de frecuencia baja y -según sea su magnitud y duración- pueden inducir resonancia en ciertos elementos estructurales, lo que a su vez puede resultar en daño estructural o cosmético, pero más probablemente en molestias a personas. En el caso de tronaduras, estas ondas aéreas provoca un efecto subjetivo negativo en la percepción de la onda de vibración del terreno".

² GeoBlast. "Control de Vibraciones". Disponible en: <http://bcn.cl/2cj6n> (Diciembre 2019).

Normativa chilena

En la última versión del “Reglamento de Seguridad Minera”³ se encuentra una única mención –en el Artículo 570- a tronaduras y vibraciones que afecten a edificios, estructuras, propiedades, construcciones o poblados cercanos, que establece:

“Toda vez que los efectos de una tronadura en términos de vibraciones, transmisión de ondas aéreas o ruidos de impacto medidos y fundados en parámetros técnicos, puedan eventualmente afectar a instalaciones, estructuras, construcciones o poblados cercanos; la Administración de la empresa deberá adoptar las medidas de control pertinentes a objeto de minimizar dichos efectos.

Cuando las tronaduras se realicen en lugares próximos a edificios, propiedades o instalaciones, éstos deberán utilizar implementos protectores que eviten que las proyecciones, producto de la tronadura, los afecten”.

En la cita anterior, es evidente la falta de especificidad de la normativa “...la Administración de la empresa deberá adoptar las medidas de control pertinentes a objeto de minimizar dichos efectos”. No se especifican medidas, controles, distancia mínima, efectos y una larga lista de etcéteras.

Es precisamente esta falta de especificidad la que denota la enorme complejidad de los fenómenos explosivos y sus efectos periféricos. Tanto que hace imposible una norma general, porque -en realidad- cada explosión es única. Los factores implicados están relacionados con el tipo de explosivos, la cantidad, la geometría de la carga, la secuencia de detonación de las cargas (rara vez es un una sola), la posición en la faena, la geometría al disponerlas, el tipo de roca a fracturar, y los efectos que anteriores tronaduras han tenido sobre el terreno.

Por otra parte, las vibraciones que se propagan al entorno se caracterizan por parámetros como velocidad, intensidad y alcance que –además de los factores antes enumerados- dependen de la geología del lugar de la faena y del terreno que media entre el sitio de la explosión y las estructuras cuya integridad se pretende conservar.

Si lo anterior no fuera suficiente, en términos de factores a considerar, es también necesario tener en cuenta las características constructivas y parámetros físicos característicos de las estructuras, en particular la (o las) frecuencia(s) de resonancia.

En años recientes, se han logrado algunos avances, tales como el “Plan de monitoreo de vibraciones por tronaduras”⁴ del Consejo Minero (CM)⁵ para la localidad de Tierra Amarilla. Según la información entregada en la página web del CM: “Mediante este trabajo, se miden y registran parámetros como la velocidad de las partículas y las frecuencias de vibración predominantes, lo que permite estimar el posible efecto en las infraestructuras y la percepción humana, de acuerdo a los niveles de vibración

³ Decreto 132. Aprueba Reglamento de Seguridad Minera. Disponible en: <http://bcn.cl/28huf>. (Diciembre 2019).

⁴ “Plan de monitoreo de vibraciones por tronaduras”. Disponible en: <http://bcn.cl/2ckc4> (Diciembre 2019).

⁵ “El Consejo Minero (es la asociación gremial que reúne a las empresas mineras de mayor tamaño que producen en Chile, teniendo como objetivo principal el impulso del desarrollo competitivo y sustentable del sector minero y su entorno”. Disponible en: <https://consejominero.cl/> (Diciembre 2019).

generados. Todo con el objetivo de calcular, controlar y generar tronaduras que no afecten a las comunidades vecinas, de manera a privilegiar y potenciar una producción segura.” Por otra parte, se han publicado algunos trabajos de investigación relacionados con vibraciones producto de la actividad minera, tales como “Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en minera Spence”⁶ y “Métodos de monitoreo para control de vibraciones en minería superficial”⁷

Por comparación, las metodologías de estos dos trabajos realizados son –evidentemente– más acuciosas que las realizadas en nuestro país. Por ejemplo en el estudio “Daño a las estructuras de superficie debido a las vibraciones asociadas a las explosiones (*Damage to surface structures due to blast vibration*)”⁸, se incluyeron los registros de los efectos que las tronaduras produjeron en viviendas para determinar los niveles seguros de vibración del suelo y otros edificios en áreas mineras. Se monitorearon los impactos producidos por 341 tronaduras en dos minas, sobre las estructuras de prueba y se determinaron los patrones característicos de vibración de 1.831 en o cerca de las estructuras.

En el trabajo recién citado, se registraron fracturas cosméticas (superficiales, no comprometen la integridad estructural) en una casa de barro-ladrillo-cemento, con velocidades máximas de partículas (PPV, *Peak Particle Velocity*)⁹ entre 51,6 y 56,3 mm/s (milímetros por segundo). Las estructuras de concreto reforzado y mortero de concreto (RCC) también experimentaron fracturas cosméticas a PPV entre 68,6 y 71,3 mm/s en el primer piso, y entre 71,2 y 72,2 mm/s en el segundo piso. Daños menores en la primera vivienda a niveles de PPV entre 81,0 y 89,7 mm/s. El primer y segundo pisos de la vivienda de RCC experimentaron daños menores a niveles de PPV entre 104 y 98,3-118 mm/s respectivamente. La vivienda de barro, ladrillo y cemento sufrió daños mayores a niveles de PPV entre 99,6 y 113,0 mm/s, mientras daños mayores ocurrieron en el primer piso de la estructura RCC a PPV de 122 mm/s y en el segundo piso ocurrieron a niveles entre 128,9 y 161 mm/s. Los niveles límite de vibraciones para los diferentes tipos de estructuras se basan en estas mediciones y observaciones.

Considérese además, que se usó un rango de potencia de tronaduras y un rango de viviendas para determinar los niveles de seguridad para cada locación específica y cada rango específico de tronaduras y que las vibraciones –determinantes de los daños en las viviendas– también dependen de sus materiales de construcción, la ubicación del sensor en la vivienda y las características del terreno donde se asientan. Es evidente que los modelos predictivos que se elaboren basados en estas mediciones tienen una validez estrictamente local y no pueden constituir una norma general para la industria. Por otra parte, las metodologías adoptadas debieran constituir una meta a alcanzar para los investigadores nacionales.

⁶ “Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en minera Spence” Disponible en: <http://bcn.cl/2ckcp-> (Diciembre 2019).

⁷ “Métodos de monitoreo para control de vibraciones en minería superficial”. Disponible en: <http://bcn.cl/2ckd4-> (Diciembre 2019).

⁸ “*Damage to surface structures due to blast vibration*”. Disponible en: <http://bcn.cl/2cj6u-> (Diciembre 2019).

⁹ Uno de los parámetros más importantes para determinar las características de las vibraciones de las estructuras.

Código de campo cambiado

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Arial, 10 pto, Inglés (Estados Unidos)

Con formato: Hipervínculo, Fuente: (Predeterminada) Arial, 10 pto, Español (España)

Con formato: fontstyle21, Español (España)

Un estudio de caso: “Seguridad de estructuras diseñadas a prueba de vibraciones originadas por tronaduras”¹⁰.

Se incluye este resumen (*abstract*) de un estudio de caso para ilustrar la dependencia absoluta de las condiciones locales para establecer las normas adecuadas para proteger estructuras y edificaciones, incluyendo las condiciones del terreno para asegurar la ejecución segura de la obra y estructuras aledañas. La publicación (*paper*) describe en detalle los estudios realizados para asegurar la integridad estructural de una represa de albañilería¹¹ de 85 años de existencia y estructuras de concreto verde¹² de varias edades, durante la excavación de cerca de 30.000 m³ de roca ígnea (granito) y roca metamórfica (como el mármol) en Maharashtra, India. Los estudios ayudaron a completar la excavación de la roca en los plazos previstos; y la integridad de la represa fue asegurada gracias al monitoreo *in situ* de las tronaduras durante las obras de excavación de la roca.

“Las tronaduras utilizadas para la excavación de roca se asocian con vibraciones del terreno con un potencial de daño a estructuras cercanas. La magnitud del daño producido a las estructuras depende, en gran medida, de las características del movimiento del suelo, de las características dinámicas de estructuras afectadas y del tipo de estratos geológicos que soportan sus fundaciones. La seguridad de las estructuras cercanas en relación a las vibraciones por tronaduras es siempre un motivo de preocupación; sin embargo, el uso de una metodología sistemática para abordar el trabajo de tronaduras ayuda a completar la excavación a tiempo sin comprometer la integridad de las estructuras cercanas. Comúnmente, se adopta una serie de pasos en los sitios de construcción para asegurar la integridad de las estructuras diseñadas a prueba de vibraciones ocasionadas por tronaduras, por ejemplo: definir un nivel de vibraciones aceptable; desarrollar una relación atenuación-sitio específico; estimación de cargas (explosivas) seguras para distintas distancias; diseño de un patrón de tronaduras y monitoreo de vibraciones durante las tronaduras”.

Consideraciones

1. De la información recabada, es evidente que debido a las peculiaridades locales –sean éstas asociadas a la geología de los suelos involucrados, a las estructuras, edificaciones o viviendas en las cercanías de la obra o a los materiales de construcción e ingeniería asociada a la excavación de la roca- no es posible establecer normas de aplicación general en el desarrollo de las obras.

¹⁰ “Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study”. Disponible en: <http://bcn.cl/2cj7b>. (Diciembre 2019).

¹¹ Albañilería (“*masonry*” en inglés) se refiere a la construcción de estructuras en base a unidades unidas entre sí por mortero (usualmente una mezcla de arena, cemento y agua). Disponible en <http://bcn.cl/2cj7b> (Diciembre 2019).

¹² Concreto verde (*green concrete*): es aquel que incluye material de desecho como -al menos- uno de sus componentes.

2. Lo que sí es factible, desde el punto de vista normativo, es exigir los estudios de suelos y respuestas mecánicas de éstos a los impactos mecánicos de las tronaduras, tanto en lo relativo al espectro de sus componentes vibratorias como a la intensidad de cada una de ellas.
3. Por otra parte, el tipo de tronadura, los explosivos utilizados, la geometría de las cargas, la secuencia de explosiones en cada tronadura, la distancia a las estructuras, edificios o viviendas afectos a las tronaduras y otros parámetros físicos pertinentes también deben ser considerados en las normativas aplicadas a los estudios exigidos.
4. También es importante considerar las características constructivas de las estructuras, edificios o viviendas afectas, así como su pre o post existencia en relación al inicio de las faenas mineras y en función de ello establecer responsabilidades en relación a la susceptibilidad al daño provocado por tronaduras.



Creative Commons Atribución 3.0
(CC BY 3.0 CL)