



CONTROL DE VIBRACIONES *

Luis Enrique Sánchez

*Departamento de Engenharia de Minas
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo*

1. DETONACION Y PROPAGACION DE ONDAS SISMICAS EN UN MACIZO ROCOSO

Cuando es detonada una carga explosiva en el interior de un macizo rocoso, su energía potencial es liberada en un intervalo de tiempo muy corto. El mecanismo de detonación es tal que se crea una elevada presión en la zona de reacción química. Esta presión instantánea puede alcanzar hasta 30.000 bars. Los explosivos comunes en explotación minera producen presio-

nes del orden de 2000 a 6000 bars, o sea, de 2 a $6 \cdot 10^8$ Pa. Para tener una idea de la importancia de esos valores basta compararlos con la presión sonora. El límite superior de audibilidad es de 20 Pa, o sea diez millones de veces menor que la presión resultante de la detonación de un explosivo.

De la misma forma, la potencia de una detonación de explosivo es altísima. Los valores típicos son del orden de 16 Gigawatts, o sea, del mismo orden que la potencia de la usina hidroeléctrica de Itaipú.

Esta presión provoca una onda de choque que se utiliza en el trabajo de fragmentación de la roca y de formación, sobre el frente de explo-

* Trabajo publicado en "Aspectos Geológicos de Protección Ambiental", Volumen I, UNESCO, 1995.

sión, en una pila de fragmentos de forma adecuada a su carga. Otra parte de esa energía es liberada en el ambiente, propagándose a través del macizo rocoso, de la napa freática y del aire.

La onda de choque es una onda sísmica que puede ser de tipos diferentes. Las más comunes son:

- las ondas longitudinales (u ondas de compresión, o primarias o P),
- las ondas transversales (o de cizallamiento, o secundarias o S),
- las ondas de Raleigh (u ondas R),
- las ondas de Love (u ondas Q).

Los frentes de onda tienen formas diferentes. Las ondas P se propagan por tracciones y compresiones sucesivas del medio y, al alcanzar una superficie libre o cambiar de medio de propagación (por ejemplo, al pasar de un estrato geológico a otro) a un ángulo diferente de 90°, están sujetas a fenómenos de reflexión y refracción que dan origen a las ondas S, donde la vibración es perpendicular a la dirección de propagación. Las ondas P y S se propagan en todas direcciones y son llamadas ondas de volumen.

Es común describir el movimiento del terreno provocado por el pasaje de una onda sísmica como la trayectoria de una partícula imaginaria solidaria con el medio atravesado. De este modo, en las ondas longitudinales la partícula se mueve en torno de un punto de reposo hacia adelante y hacia atrás en la dirección de propagación de la onda, o sea, longitudinalmente. Ya, en las ondas transversales el movimiento de la partícula se da en un plano perpendicular a la dirección de propagación o frente de onda. Si las partículas se movieren en una dirección preferencial en ese plano se dice que son polarizadas.

En las interfaces aire/superficie del terreno las ondas de volumen dan lugar a las ondas llamadas de superficie, que se propagan en ese límite. Las ondas de superficie se caracterizan por frecuencias más bajas que las de volumen. Las ondas R son las ondas de superficie más comúnmente encontradas y transportan la mayor parte de la energía propagada en superficie (Tritsch, 1983) y por ende presentan mayor potencial de riesgo a las estructuras.

En las ondas R las partículas desarrollan un movimiento elíptico retrógrado principalmente en las direcciones vertical y longitudinal, mientras que en las ondas Q las partículas se mueven predominantemente en la horizontal en una dirección transversal a aquella de propagación del frente de onda.

Cada tipo de onda se propaga con una velocidad que es característica del medio atravesado. La onda más rápida es siempre la P, seguida por la onda S y por las ondas de superficie. La velocidad de propagación depende apenas de las características del medio. La de las ondas longitudinales es dada por:

$$\text{donde: } v_L = \frac{E}{\rho} \left[\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]$$

v_L - velocidad de propagación de las ondas longitudinales

E - módulo de Young

ν - coeficiente de Poisson

ρ - densidad del medio

Las rocas cristalinas permiten la mayor velocidad de propagación, que es del orden de 5000 a 6000 m/s para las ondas longitudinales cuando la roca es sana. También la frecuencia de vibración depende de la naturaleza del terreno, las rocas cristalinas admiten las frecuencias más elevadas.

La onda de choque es amortiguada a medida que su frente se aleja del origen. Además del fenómeno puramente geométrico de dispersión de energía en un espacio tridimensional, el carácter no completamente elástico de las rocas y la presencia de agua llenando vacíos son también factores de amortiguamiento del temblor. La amplitud, la velocidad y la aceleración del movimiento oscilatorio disminuyen con la distancia, sucediendo lo mismo con la frecuencia de oscilación. Los terremotos, captados a centenas o millares de kilómetros de su epicentro, presentan frecuencias mucho más bajas (del orden de 2 Hz).

Se asume, en general, que las vibraciones tienen una forma sinusoidal, lo que facilita su representación matemática y no introduce errores demasiado importantes (Chapot, 1981; Dowding, 1985; Langefors y Kihlström, 1978).

En esta hipótesis simplificadora, relaciones matemáticas elementales describen el movimiento de las partículas de la siguiente manera:

$$\text{traslación } d(t) = d_0 \cdot \text{sen } \omega \cdot t$$

$$\text{velocidad } v(t) = \omega \cdot d_0 \cdot \text{cos. } \omega \cdot t$$

$$\text{aceleración } a(t) = \omega^2 \cdot d_0 \cdot \text{sen } \omega \cdot t$$

donde: ω = frecuencia angular = $2 \pi f$

f = frecuencia (ciclos/segundo)

Los registros de vibraciones debidos al desmonte de rocas con explosivos no tienen una frecuencia nítidamente definida, pero muestran un espectro de variación, como se ejemplifica en la figura 1.

En el registro de un fuego no interesa los diferentes tipos de ondas generados, sino el efecto total del temblor. Sin embargo, diferentes tipos de ondas transmitirán diferentes cantidades de energía, según los tipos de terrenos atravesados. Propagándose con velocidades diferentes, los diversos tipos de ondas necesitarán tiempos distintos para alcanzar puntos a la misma distancia; el movimiento de las partículas afectadas será controlado por la energía que llega a cada instante y, en rigor, contenida en cada tipo de onda.

2. DAÑOS CAUSADOS POR LAS VIBRACIONES Y LIMITES ADMISIBLES

Al elaborarse un proyecto de ingeniería de minas es necesario tener una evaluación previa de las consecuencias de las vibraciones sobre las construcciones y la molestia de los habitantes de la vecindad. Para ello es preciso prever los niveles de vibración a diferentes distancias del lugar de detonación. Eso es hoy posible gracias a las investigaciones que están siendo hechas desde los años 30. Desde esa época se trabaja en la búsqueda:

- (a) de una relación empírica entre alguna medida de la energía de la vibración y la probabilidad de daños a residencias y otras estructuras de las cercanías;
- (b) de una relación empírica entre la carga detonada y esta energía de la vibración, en función de la distancia;

- (c) de aparatos capaces de captar las vibraciones de manera precisa, fiable y reproducible;
- (d) de los límites máximos admisibles de vibración; y
- (e) de las medidas económicamente viables a ser tomadas para evitar que las vibraciones sobrepasen esos límites máximos.

Si la propagación de las ondas de choque por el macizo rocoso pudo desde luego ser comprendida satisfactoriamente, el comportamiento de estructuras sometidas a vibraciones transitorias demoró más a ser modelado. En efecto, se midió y se previó los niveles de vibraciones transmitidas por el macizo rocoso y por la capa de suelo a la altura de las fundaciones de esas estructuras, pero su comportamiento dinámico y la forma como transmiten y amortiguan las vibraciones que les llegan a partir de las fundaciones fueron incorporaciones más recientes a la investigación.

2.1. Primeras investigaciones

Una de las primeras investigaciones a respecto de las vibraciones producidas por el desmonte de rocas con explosivos y sus efectos sobre estructuras se deben a U.S. Bureau of Mines (USBM), que inició un programa de investigaciones en 1930 (Lee et al, 1936). El primer trabajo de este equipo fue el desarrollo de un tipo de sismógrafo adaptado a la tarea de captar vibraciones engendradas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de un estudio sobre los aparatos utilizados en la captación de vibraciones debidas a los terremotos, los investigadores concluyeron que sería necesario proyectar y construir un sismógrafo que midiera directamente la amplitud del movimiento vibratorio. Además, sería también necesario proyectar y construir mesas vibratorias que, oscilando con frecuencias y amplitudes conocidas y regulables, sirvieran para calibrar los sismógrafos (Irland, 1934). Fueron los precursores de los modernos sismógrafos de ingeniería, como son llamados esos aparatos para diferenciarlos de los sismógrafos empleados en sismología.

Luego de construidos, ajustados y calibrados los equipos, dio inicio una campaña de trabajos de campo, cuando fueron medidas vibraciones en diversas canteras y en una mina experimental del mismo USBM. Ya en aquella época la motivación del estudio eran casos de litigio entre mineros y la población, que los acusaban

de provocar daños a sus casas. La primera publicación, sin presentar todavía muchos resultados derivados de experimentos, data de noviembre de 1936 (Lee et al, 1936).

El año siguiente continuaron las pruebas, que se efectuaron hasta que se produjeron daños en una de las casas en cuestión. En los siguientes dos años fueron efectuadas nuevas pruebas, con el empleo de explosivos y un vibrador mecánico. El programa de investigaciones fue clausurado en 1940, con el análisis retrospectivo de los datos y la tentativa de modelización matemática de los resultados y conclusiones.

Las síntesis y conclusiones de esa década de investigaciones fueron publicadas por Thoenen y Windes (1942), no obstante publicaciones anteriores mostrasen resultados parciales. Admitiendo el carácter preliminar de su trabajo, y la necesidad de estudios más profundos y de dilucidación de una serie de preguntas pendientes, son presentadas varias conclusiones. Se destacan:

- (a) la presencia de capa no consolidada causa mayor amplitud de movimiento en bajas frecuencias que en roca sana, en iguales condiciones de distancia y de carga explosiva;
- (b) la escala de Mercalli, normalmente usada para evaluar el efecto de terremotos, es inadecuada para vibraciones producidas por explosivos; para aceleraciones consideradas como provocadoras de daños serios o totales en aquel caso, no se observó ningún daño durante los ensayos;
- (c) se dedujo una fórmula matemática empírica para cálculo de traslación en función de la distancia y de la carga explosiva.

Finalmente, se propuso un criterio de daño, el de la aceleración del movimiento oscilatorio (deducida a partir de la medida de amplitud y frecuencia). Durante las pruebas fueron constatados solamente daños cuando la aceleración era aproximadamente igual o mayor que la aceleración de la gravedad (g). Para evitarlos, fue recomendado que la aceleración no sobrepasara 0,1 g.

En 1949, Crandell publicó un artículo proponiendo otra manera de estimar el potencial de daño: un coeficiente llamado «coeficiente de energía», cociente entre el cuadrado de la aceleración

máxima y el cuadrado de la frecuencia del movimiento.

La primera publicación que propone el empleo de la velocidad de vibración (velocidad de partícula) se debe a Langefors y colaboradores (1958). En esa época, diferentes estados norteamericanos adoptaban ya criterios diferentes en su reglamentación sobre el tema (Duvall y Fogelson, 1962).

Los ensayos de Langefors y colaboradores fueron realizados en rocas duras y sanas, la variable medida era la traslación y el equipo de investigación hizo también construir su propio «vibrógrafo». El riesgo de daño para «casos normales» construidas directamente sobre roca, según las conclusiones de estos autores, se correlaciona con la velocidad de partícula de la siguiente manera:

- (a) a 70 mm/s, ninguna fisura observable;
- (b) a 110 mm/s, pequeñas fisuras y caída de revoque;
- (c) a 160 mm/s, fisuras;
- (d) a 230 mm/s, fisuras importantes

El criterio de daño, sin embargo, se expresa en función del cociente entre la velocidad de partícula (v) y la velocidad de propagación de la onda de choque a través del macizo rocoso (c). Los criterios anteriores son, de esta forma, válidos para $c = 3000$ mm/s. No obstante, se debe notar que las frecuencias registradas durante las pruebas son bastante altas - entre 50 y 500 Hz - lo que se debe a la naturaleza de la roca.

En la edición de 1978 de su famoso libro sobre desmonte de rocas, Langefors y Kihlström mantienen básicamente la misma argumentación de veinte años atrás. Los límites propuestos por esos autores para un desmonte seguro serían de 70 mm/s en rocas duras ($c = 4500$ a 6000 m/s), 35 mm/s en rocas de densidad media ($c = 2000$ a 3000 m/s) y de 18 mm/s en material no consolidado ($c = 1000$ a 1500 m/s).

En Canadá, Edwards y Northwood (1960) condujeron otra serie de ensayos realizados en rocas blandas y suelo no consolidado, trayendo nuevos elementos. Estos experimentos, suplementados por otros ejecutados más tarde con igual metodología, hicieron evidente la importancia de la frecuencia, sugiriendo una considerable variación en el límite de daño en función

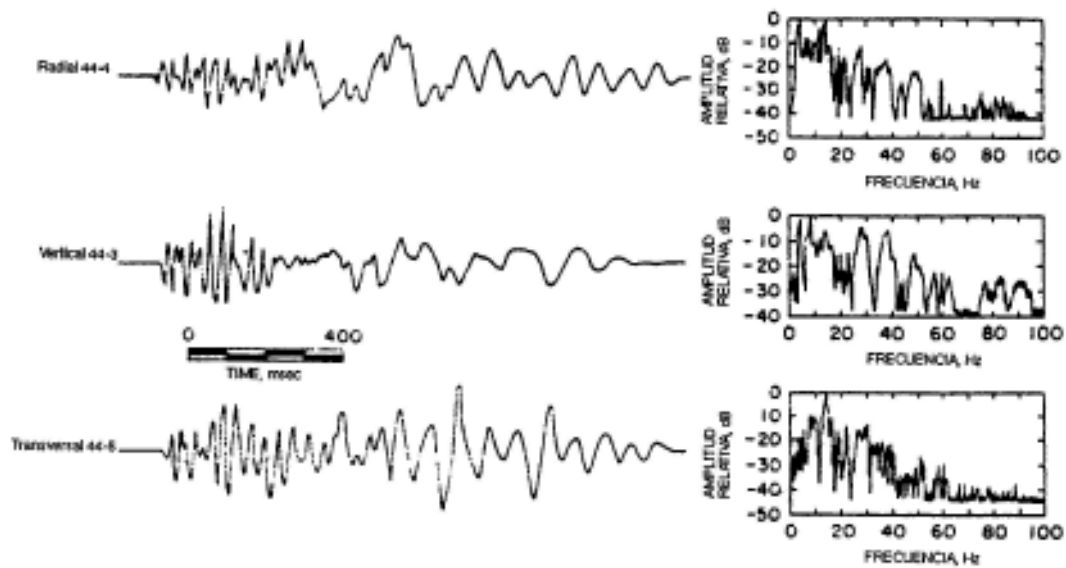


Figura 1 - Típico registro de vibraciones engendradas por el desmorte en una mina de carbón, medido a 2287 pies (Siskind et al., 1980)

de ésta. Otro aspecto igualmente importante de estas investigaciones es que por primera vez la velocidad de partícula fue medida directamente y no deducida a partir de medidas de traslación o aceleración. Los autores midieron comparativamente traslaciones, velocidad y aceleración, así como la deformación de las estructuras en cuestión, concluyendo que la mejor correlación con el daño se encuentra cuando se emplea la velocidad de partícula, para todo tipo de terreno. Sería probable la producción de daños cuando la velocidad sobrepasara 100 mm/s, y los autores recomiendan un límite de seguridad de 50 mm/s para el componente longitudinal de la velocidad de partícula medido junto a la fundación de la casa.

En la misma época, en Checoslovaquia, Dvorak realizaba experimentos semejantes, concluyendo también que la velocidad de partícula es un buen criterio para evaluar el potencial de daño. Este autor propuso los siguientes límites:

- (a) de 10 a 30 mm/s: límite de aparición de daños;
- (b) de 30 a 60 mm/s: daños leves;
- (c) por encima de 60 mm/s: daños importantes (Chapot, 1981).

En 1962, una nueva publicación del U.S. Bureau

of Mines pasó revista a alrededor de 40 artículos sobre el tema, encontrando apenas tres que presentaban datos sobre vibración conjugados con observaciones sobre el nivel de daño a estructuras residenciales, o sea, los trabajos de Edwards y Northwood (1960), Lee et al. (1936) y Thoenen y Windes (1942). Estos datos fueron trabajados estadísticamente tratando de determinar cual parámetro -traslación, velocidad o aceleración- presentaba una mejor correlación con el grado de daño observado. El estudio indicó la velocidad de partícula como el parámetro más adecuado, manteniendo el valor de 50 mm/s como garantía de probabilidad muy baja de ocurrencia de daño, para una gran variedad de condiciones de suelo y roca.

2.2. Trabajos recientes y propuestas de normas técnicas

Una nueva síntesis del U.S. Bureau of Mines fue hecha por Fogelson (1971), conteniendo el análisis de nuevos datos. El mismo valor de 50 mm/s se mantiene como límite por debajo del cual la probabilidad de daños es muy pequeña. Sólo en 1980 el U.S. Bureau of Mines revé este valor (Siskind et al., 1980), considerado excesivamente alto en otras partes del mundo y en muchos estados norteamericanos. Introduciendo la frecuencia como parámetro tan importante como la velocidad de partícula, un avance

substantial fue conseguido, resultante de un análisis del comportamiento dinámico de las estructuras en función del espectro de frecuencias del movimiento vibratorio. Los valores propuestos son mostrados en el cuadro 1. Sin embargo, estos autores, proponen alternativa-mente otro criterio aplicable en el caso de un análisis más preciso (figura 2): para frecuencias por debajo de 4 Hz, la traslación máxima sería el criterio de daño (0,76 mm), así como entre 12 y 40 Hz (0,20 mm), mientras que de 4 a 12 Hz y por encima de 40 Hz continuaría teniendo valor el criterio de velocidad máxima de partícula.

Trabajos ejecutados en diversos países de Europa, en Canadá y en Australia propusieron diferentes valores de velocidad máxima de partícula tratando de evitar daños a construcciones. Sin embargo, los valores propuestos se sitúan usualmente entre 10 y 20 mm/s. En Gran Bretaña, el National Coal Board trabaja con un límite de 12 mm/s (Walker et al., 1982). En Ontario, Canadá, se encuentran valores entre 10 y 12 mm/s (Whitby-Cotescu et al., 1971). En Francia se propusieron criterios variando de 10 a 30 mm/s en función de la naturaleza del terreno y de la calidad de la construcción (Bejui, 1982). Chapot (1981), que realizó un profundo estudio retrospectivo y ejecutó centenas de mediciones, sugiere una gama de 10 a 30 mm/s, sin hacer mención a la frecuencia. No obstante, este autor considera que límites inferiores a 10 mm/s deben ser considerados en el problema de canteras (o de explotaciones de minas en áreas urbanas) «donde la influencia de las detonaciones puede durar varios años y donde parece legítimo ahorrar a la vecindad cualquier molestia, inclusive la mínima».

En Brasil, la norma técnica NBR 9653 de 1986 establece el valor máximo de 15 mm/s, independiente del tipo y construcción y de la frecuencia. Se especifica, sin embargo, que el aparato de medición debe tener respuesta de frecuencia por lo menos en la faja de 5 a 150 Hz.

2.3. La importancia de la frecuencia

Las recientes investigaciones tienden a indicar el espectro de frecuencias del movimiento vibratorio como tan o más importante que la velocidad de vibración en la evaluación del potencial de daño. Incorporando resultados de trabajos desarrollados en el campo de la sismología, en el estudio de explosiones atómicas y de estructuras capaces de resistir a estos fenó-

menos, las «investigaciones en dinámica estructural han mostrado que las estructuras responden en modo diferente cuando excitadas por vibraciones idénticas en todos los aspectos, pero diferentes en la frecuencia principal. Una estructura residencial responderá menos a un movimiento de terreno de 12 mm/s a una frecuencia principal de 80 Hz que a una frecuencia principal de 10 Hz. Entonces, el movimiento a 80 Hz tiene menos probabilidad de fisurar la estructura que el movimiento a 10 Hz» (Dowding, 1985).

El problema con las bajas frecuencias es que la frecuencia principal del movimiento vibratorio puede ser de igual orden que la frecuencia natural (de resonancia) de la estructura, caso en el que el movimiento se amplificará y las deformaciones serán más importantes.

Estudios detallados han mostrado que las frecuencias naturales de estructuras residenciales están comprendidas entre 5 y 10 Hz, mientras que las paredes de estas residencias presentan frecuencias del orden de 12 a 20 Hz (Dowding, 1985). Obviamente tales valores dependen del tipo de construcción y de los materiales empleados.

En un análisis de 23 estructuras residenciales de uno y dos pisos, Dowding et al. (1981) encontraron una media de 7 Hz como frecuencia natural (variando de 3 a 11 Hz), siendo que las casas de una sola planta presentaron un resultado de 8 Hz, mientras en las casas de dos plantas, de 5,8 Hz como media. La frecuencia natural media de deformación de las paredes fue medida en 15,2 Hz (variando de 12 a 20 Hz).

Se dice que la vibración de una estructura residencial presenta respuesta libre. Esto significa que la estructura continúa vibrando luego del pasaje del tren de ondas que causa la vibración del terreno. Las deformaciones en el caso de respuesta libre están asociadas al movimiento relativo entre la estructura y el terreno y, dependiendo de la relación de fase entre estos dos movimientos, el movimiento relativo puede ser mayor o menor que el movimiento del terreno (Dowding y Corser, 1981). Como las deformaciones son, en un último análisis, el factor responsable por la aparición de fracturas, la frecuencia -tanto del movimiento del terreno como del movimiento de la estructura- surge como parámetro esencial.

El comportamiento de una estructura residencial fue modelado con base en este tipo de con-

Cuadro 1 - Valor máximo de velocidad de partícula según propuesta del U. S. Bureau of Mines en 1980

Tipo de estructura	Baja Frecuencia	Alta Frecuencia
Casas modernas con paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc.)	19 mm/s	50 mm/s
Casas antiguas, con paredes revocadas	12,5 mm/s	50 mm/s

Baja frecuencia: < 40 Hz, todo pico espectral que se produzca por debajo de 40 Hz y dentro de una faja de 6 dB (o sea, 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.

Alta frecuencia: > 40 Hz

Fuente: Siskind et al. (1980)

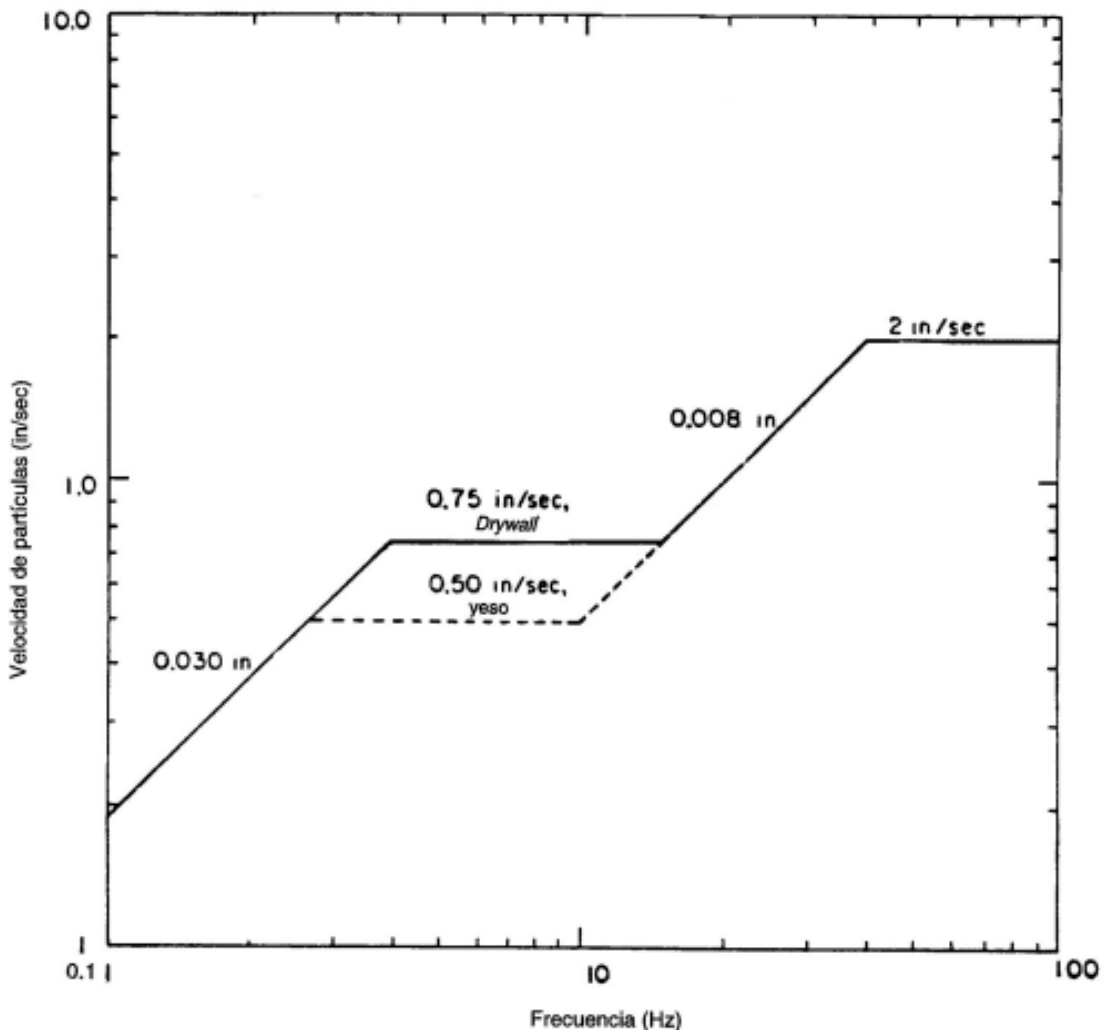


Figura 2 - Niveles de seguridad para vibraciones de estructuras residenciales según el U. S. Bureau of Mines, 1980 (Siskind et al., 1980)

sideraciones (Dowding y Corser, 1981; Dowding et al., 1981; Siskind et al., 1980; Dowding, 1985), lo que resultó en la propuesta del U.S. Bureau of Mines de rebajar sus límites de velocidad de partícula (Siskind et al., 1980), luego de permanecer por muchos años en la marca de 50 mm/s mientras que innumerables investigadores proponían límites más bajos.

2.4. La naturaleza de los daños

Muchas de las primeras investigaciones sobre límites de seguridad para vibraciones pecaban por la mala definición de la palabra daño, o quizás por la falta completa de definición. Notable excepción son los primeros trabajos canadienses (Edwards y Northwood, 1960 y Northwood et al., 1963), que definen con precisión:

- límite de daño: «apertura de viejas fisuras y formación de nuevas fisuras en el revoque, desplazamiento de objetos sueltos»;
- daño menor: «superficial, no afectando la resistencia de la estructura (por ejemplo quebradura de ventanas, caída de revoque, formación de fisuras en la mampostería)»;
- daño mayor: «sería debilitación de la estructura (por ejemplo grandes fisuras, movimientos de cimientos o muros conductores, recalques en distorsión o debilitamiento de la superestructura, paredes fuera de plomo) (Edwards y Northwood, 1960).

Modernamente se ha definido límite de daño como la ocurrencia de fisuras de dimensión capilar en el revestimiento de las paredes, del tipo de las que aparecen con frecuencia en muchas estructuras, independientemente de estar o no sometidas a vibraciones. Este tipo de ocurrencia se llamó «cosmético» por algunos autores, pues no compromete ni la resistencia ni la estabilidad de la estructura.

Stagg y colaboradores (1984) estudiaron el origen y el proceso de fisuración en residencias. Según ellos, «la actividad humana y las variaciones de temperatura y humedad provocan deformaciones en paredes equivalentes a movimientos de terreno de hasta 30 mm/s. El golpe de una puerta, por ejemplo, puede causar deformaciones de hasta 140 micro-pulgadas/pulgada, equivalente a la deformación causada por una vibración de 12,5 mm/s.

Estos mismos investigadores simularon las condiciones de fatiga de una estructura sometida a vibraciones con el auxilio de un vibrador mecánico que producía deformaciones equivalentes a las de una velocidad de partícula de 12,5 mm/s. La primera fractura apareció luego de 56.000 ciclos, que equivaldrían a 28 años de actividad de explotación minera.

3. MODELACION DE LA PROPAGACION

Los límites admisibles de vibraciones equivalen a patrones ambientales que deben ser respetados por todo operador minero, y en eso son semejantes a patrones de calidad del aire y del agua. Ellos equivalen al concepto de capacidad de asimilación del medio. De la misma forma que patrones de calidad de las aguas se establecen con objetivos de preservación de hábitats de fauna y flora, de uso recreativo o para abastecimiento público, los patrones ambientales para vibraciones son establecidos para que sean evitados daños a las construcciones y para que no provoquen efectos dañinos a la salud humana.

Para que el patrón sea atendido, la empresa debe tener un programa de control de vibraciones que normalmente incluye dos partes: (i) tecnología de desmonte apropiada; (ii) seguimiento de vibraciones.

Por otro lado, el proyectista de una mina, así como el agente gubernamental encargado de la aprobación oficial del proyecto, tiene diferentes necesidades de información: Ellos necesitan conocer con antelación los futuros niveles de vibración resultantes de una mina que todavía no existe. Para ello, con miras a una situación futura, se sirven de modelos que representen las condiciones de propagación de ondas sísmicas en un macizo rocoso.

¿Cuáles son los parámetros que deben ser tomados en cuenta y correlacionados con la velocidad de partícula (o sea, el indicador de calidad ambiental)? Ciertamente la carga de explosivo y la distancia, pero también el tipo de roca, las estructuras geológicas, el tipo de explosivo y de iniciador. Entre estos parámetros, la carga de explosivo y la distancia son fácilmente medibles; el tipo de explosivo y de roca son ya más difíciles de representar. Normalmente, en los modelos de propagación se busca correlacionar la carga y la distancia con la velocidad de partícula.

La distancia interfiere inicialmente por un efecto de atenuación geométrica: la explosión de una carga da origen a un frente de onda cuya propagación es amortiguada por el efecto geométrico y también por un efecto de atenuación física debido al hecho que el macizo rocoso no presenta un comportamiento perfectamente elástico. Es posible hacer un análisis teórico de este fenómeno, lo que llevaría a resultados muy complejos. Empíricamente, el efecto de la distancia puede ser analizado detonándose la misma carga explosiva a distancias variables. En este caso, se constata que la velocidad de partícula se correlaciona a distancia en la forma de una recta en un gráfico logarítmico, de acuerdo con la expresión:

$$V = K.D^{-b}$$

donde V es la velocidad de partícula y D la distancia, K una constante representativa de las características geológicas del lugar y b es la inclinación de la recta, variando normalmente entre 1,5 y 2. Otra expresión obtenida de resultados empíricos es:

$$V = K \frac{1}{D} . e^{-aD}$$

Con relación a la carga de explosivos, resultados empíricos sugieren una ecuación del tipo:

$$V = K.Q^a$$

lo que se representa por una recta de inclinación ascendente a en un gráfico logarítmico. Empíricamente Chapot (1981) obtuvo valores de a entre 0,43 y 0,84.

De este modo, las ecuaciones de propagación tendrían la siguiente forma:

$$V = K.Q^a . D^{-b}$$

Resultados reportados en la literatura indican, para un exponente a entre -1/3 y -1/2, o sea, las ecuaciones asumen la forma:

$$V = K \cdot \left[\frac{D}{Q^a} \right]^{-b}$$

Ejemplos de ecuaciones de propagación obtenidas a partir de mediciones ejecutadas en diversos sitios son:

$$V = 250 \left[\frac{D}{\sqrt{Q}} \right]^{-1,8} \quad (\text{Chapot, 1981}),$$

para canteras y

$$V = 1274 \cdot \left[\frac{D}{\sqrt{Q}} \right]^{-1,76} \quad (\text{Tritsch, 1983}) \text{ y}$$

$$V = 51,48 \cdot \left[\frac{D}{Q^{1/2}} \right]^{-1,298} \quad (\text{Midéia et al., 1978}),$$

para macizos basálticos.

Sin embargo, solamente el estudio de cada sitio en particular podrá proporcionar una ecuación confiable. Ello sólo es posible cuando la mina ya esté en operación. Las opciones para delinear el problema son (i) la utilización de una ecuación publicada en la literatura técnica, como las anteriores, siempre que se admita un gran margen de error, o sea, apenas el orden de grandezade la vibración; (ii) utilizar ecuaciones obtenidas para tipos similares de roca, preferentemente en la misma región, lo que es muy raro de encontrarse; (iii) ejecutar mediciones en una mina que presente condiciones geológicas semejantes y extrapolar los datos, opción que puede ser mucho más factible, una vez que es frecuente que proyectos nuevos sean ejecutados en regiones donde hay ya otras minas en funcionamiento.

Una observación importante es que cualquier ecuación de propagación no debe ser encarada como determinista, pero si probabilista. De este modo, al levantarse una ecuación representativa de un determinado sitio se debe disponer de un número suficiente de muestras y calcular coeficientes de correlación para diferentes intervalos de confianza.

4. MINIMIZACION DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES

Para reducir los efectos nocivos de las vibraciones el técnico debe actuar sobre los principales parámetros que representan el fenómeno, o sea, la carga y la distancia. Evidentemente no se puede alterar los parámetros representativos de las condiciones del sitio. La distancia

puede ser una variable en nuevos proyectos; de esa manera, se debe evitar la construcción de estructuras en áreas que están sujetas a riesgos. Como muchas veces la empresa de minería no tiene control sobre las normas que rigen el uso del suelo en el entorno de la propiedad y las empresas de explotación de minas actúan como inductores de la ocupación regional, es usual la recomendación que la empresa trate de adquirir los terrenos situados en el entorno de la futura mina, de manera de formar un cerco de seguridad alrededor de la cava a ser abierta.

Claro que esta solución no se aplica para casos en que la mina ya está instalada y existen construcciones demasiado próximas de frente a la explotación. En este caso se debe actuar sobre los demás parámetros, comenzando por la carga de explosivo. Las investigaciones sobre la propagación de vibraciones mostraron que al detonarse cargas explosivas no simultáneas, los efectos no se suman si el tren de ondas llega en impulsos individualizados. Es suficiente un intervalo de algunos milésimos de segundo para evitar el efecto de superposición de frentes de ondas. De esta manera, la solución más usual consiste en detonar las cargas explosivas de cada fuego en diferentes momentos, pudiéndose agrupar agujeros del mismo fuego o inclusive detonarse agujero por agujero.

Esto se hace simplemente con la instalación de micro-retardadores entre las cargas explosivas que se desea espaciar temporalmente. Son dispositivos simples y baratos ampliamente disponibles en el mercado hoy en día.

Otra alternativa para reducir la carga es disminuir la altura del frente de exposición (de modo que la columna de explosivo sea menor) y, en algunos casos utilizar micro-retardador dentro del agujero, lo que es más difícil operativamente, o emplear espaciadores entre la carga de fondo y la carga de columna.

Otra solución puede ser reorientar el frente de la mina, de modo que la dirección preferencial de propagación de las ondas de choque no coincida con la dirección de las construcciones más próximas. Esto no es muy difícil de obtener en la mayoría de las minas y es también perfectamente posible pensar en planes de fuego diferenciados de acuerdo al sector de la mina que se esté explotando: los más próximos a las construcciones tendrían planes de fuego más cuidadosos.

Finalmente, otra manera de reducir las vibraciones es utilizar explosivos con menor velocidad

de detonación, como el ANFO en lugar de dinamita (DMGA/IPT, 1985).

5. SEGUIMIENTO

El seguimiento de vibraciones se hace con la utilización de sismógrafos de ingeniería, especialmente contruidos para tal fin. Sus partes esenciales son un geófono, un amplificador y un registrador. El geófono es el aparato que capta las vibraciones mecánicas y las transforma en corriente eléctrica, transmitida por cable al amplificador que a su vez las registra en un rollo de papel. Hoy en día los sismógrafos son acoplados a microprocesadores que pueden registrar los datos en la memoria y transmitirlos a un microcomputador. Los resultados son ya suministrados en términos de velocidad resultante y de frecuencia.

La velocidad de partícula es representada por un vector de tres componentes: la dirección vertical, la dirección longitudinal (o sea, la de una línea imaginaria uniendo el centro de masa de la detonación al punto de seguimiento) y la dirección transversal (o sea, formando 90° con la longitudinal en el mismo plano horizontal).

Sismogramas obtenidos aisladamente para cada una de las componentes muestran que la velocidad de pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones. De este modo, la componente longitudinal puede presentar su pico algunas milésimas de segundo luego del pico de velocidad vertical. Sucede que lo que debe ser medido, de acuerdo con las normas técnicas, es la velocidad resultante, que apenas para efecto de análisis se divide en tres componentes. Se debe por ende calcular la velocidad resultante a cada intervalo de tiempo de modo de obtener la velocidad máxima.

Los sismógrafos de la década del 80 suministraban registros gráficos para cada componente y el cálculo de la resultante debería ser hecho manualmente después. Como ese procedimiento era muy arduo y lento, las normas técnicas permitían que fuera identificado el máximo de cada componente y que se hiciera la suma vectorial de cada máximo, aunque se produjeran en tiempos diferentes. La resultante podía ser calculada a través de la expresión:

$$V_g = (|V_{long}|_{max}^2 + |V_{trans}|_{max}^2 + |V_{ver}|_{max}^2)^{0.5}$$

Chapot (1981) mostró que este método siempre trabaja a favor de la seguridad, pues en la

peor de las hipótesis, la velocidad resultante estimada será igual a la velocidad resultante real; en un análisis estadístico de más de 400 medidas, en donde fueron calculadas tanto la velocidad estimada por este método como la real, este autor encontró que en media la estimación excedió la velocidad real en 24%. Hoy los sismógrafos ya incorporaron programas de integración que permiten el cálculo automático de la velocidad resultante. Estos aparatos también se hicieron bastante fáciles de operar, lo que permite el entrenamiento de un técnico a un costo relativamente bajo.

El geófono debe ser instalado junto al fundamento de la construcción que se pretende investigar, pues lo que se intenta medir es la vibración del suelo o roca y no la respuesta de la estructura. La característica más importante del geófono es su respuesta de frecuencia, o sea, la curva de tensión eléctrica en función de la frecuencia de la vibración. Todo geófono tiene una frecuencia propia (de resonancia) para la cual su respuesta es anormal. A partir de un determinado valor por encima de esta frecuencia él dará una señal eléctrica proporcional a la velocidad de vibración. Es la llamada respuesta plana, que puede ser extendida por debajo de la frecuencia natural a través de un circuito de compensación (Stagg y Engler, 1980). Los fabricantes suministran la curva de respuesta del aparato, que puede ser verificada en el laboratorio. Sin perder de vista el espectro de frecuencias normalmente observado en detonaciones, se recomienda, la mayor parte de las veces, que el aparato de medida pueda captar con precisión movimientos a partir de 3 Hz o inclusive «entre 2 Hz y 150 Hz para canteras y minas de carbón y de 5 Hz a 200 Hz para obras de construcción civil» (Stagg y Engler, 1980). La norma

brasileña (NBR 9653) requiere respuesta plana por lo menos entre 5 y 150Hz.

Como el precio de los instrumentos de medida es proporcional a su sensibilidad, es posible utilizar un aparato menos sensible cuando se trata de hacer un seguimiento de vibraciones, en que un estudio preliminar demostró que el límite inferior del espectro de frecuencia no es tan bajo. En un primer estudio, no obstante, es importante emplear instrumentos sensibles, pues una parte no menospreciada de la energía del movimiento vibratorio puede estar contenida en la faja de bajas frecuencias.

Así como en cualquier seguimiento ambiental, en el caso de vibraciones también se debe mantener un registro de todas las medidas hechas informándose como mínimo, lo mostrado en el cuadro 2. Cuando se busca conocer la ley de propagación de vibraciones en un macizo, se debe obtener un gran número de medidas, hechas en puntos situados a diferentes distancias y en diferentes direcciones del lugar de detonación. Esto puede exigir un tiempo bastante grande en una mina que tenga, por ejemplo, dos detonaciones por semana. Hoy existen ya sismógrafos multicanales que permiten la captación de la misma detonación en decenas de puntos diferentes, suministrando resultados más confiables que los que pueden ser obtenidos al medir diferentes detonaciones, puesto que cada operación es fuente de diferencias no controlables en las variables intervinientes (marcación de los agujeros, perforación, carga, conexión del explosivo al agujero, lotes diferentes de un mismo explosivo, etc.).

Cuadro 2 - Informaciones que deben constar en un registro de detonación

<p>Croquis del frente de exposición y localización de la mina Cantidad de explosivo y secuencia de detonación Tipo de explosivo, de iniciador y demás accesorios utilizados Hora de la detonación y condiciones atmosféricas Lugar de captación y distancia Tipo de sismógrafo empleado Resultados obtenidos ⁽¹⁾ Operador del sismógrafo y técnico responsable por la detonación</p>
--

⁽¹⁾ Usualmente los sismógrafos tienen un canal para medición de sobrepresión atmosférica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BEJUI, H. 1982. Les appareils de mesures des vibrations. Tendances et évolution. Tunnels et Ouvrages Souterrains, novembre (n. spécial).
- CHAPOT, P. 1981. Étude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche 105: 1-56.
- CRANDELL, F. J. 1949. Ground vibrations due to blasting and its effect upon structures. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, April, 222-245.
- DMGA/IPT. 1985. Recomendações técnicas para desmonte de rochas em pedreiras. Brasil Mineral 16:27-31
- DOWDING, C. H. 1985. Blast vibration monitoring and control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 297 p.
- DOWDING, C. H.; CORSER, P. G. 1981. Cracking and construction blasting. Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 107 (CO1): 89-106.
- DOWDING, C. H.; MURRAY, P. D.; AMATZIDIS, D. K. 1981. Dynamic properties of structures subjected to blasting vibrations. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 107 (ST7): 1233-1249.
- DUVALL, W. I. Y FOGELSON, D. E. 1962. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 5968, Washington, 19 p.
- EDWARDS, A. T.; NORTHWOOD, T. D. 1960. Experimental studies of the effects of blasting on structures. The Engineer 210: 538-546.
- FOGELSON, D. E. 1971. U. S. Bureau of Mines research on vibration from blasting. Revue de l'Industrie Minière, n.spécial, p. 158-165.
- IRLAND, G. A. 1934. A study of some seismometers. U. S. Bureau of Mines Technical Paper , 556, Washington, 48 p.
- LANGFORS, U.; WESTERBERG, H.; KIHLLSTROM, B. 1958 Ground Vibrations in Blasting. Water Power 10: 335-338; 390-395; 421-424.
- LANGFORS, U.; KIHLLSTROM, B. 1978. The modern technique of rock blasting. Almqvist & Wiksell, Estocolmo, 3a. ed., 438 p.
- LEE, F. W.; THOENEN, J. R.; WINDES, S. L. 1936. Earth vibrations caused by quarry blasting. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 3319, Washington, 19p.
- MIDÉIA, N. F.; PAULA, L. C.; DOCC, L. C. 1978. Desmonte de rochas com explosivos: critérios práticos para a determinação de cargas por espera e distância seguras em basaltos. Construção Pesada, setembro, 141-144.
- NORTHWOOD, T. D.; CRAWFORD, R.; EDWARDS, A. T. 1963. Blasting vibrations and building damage. The Engineer 215: 973-978.
- SISKIND, D. E. et al. 1980. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. U. S. Bureau of Mines Report of Investigation 8507, Washington, 74p.
- STAGG, M. S.; ENGLER, A. J. 1980. Measurement of blast-induced ground vibrations and sismograph calibration. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 8506, Washington, 62 p.
- STAGG, M. S. et al. 1984. Effects of repeated blasting on a wood-frame house. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 8896, Washington, 82 p.
- THOENEN, J. R.; WINDES, S. L. 1942. Seismic effects of quarry blasting. U.S. Bureau of Mines Bulletin 442, Washington, 83 p.
- TRITSCH, J. 1983. Les vibrations engendrées par les tirs de mines en carrières et grands travaux. CERCHAR, Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France, Verneil-en-Halatte, 29 p.
- WALKER, S.; YOUNG, P. A.; DAVEY, P. M. 1982. Development of response spectra techniques for prediction of structural damage from open-pit blasting vibrations. Mining Industry 91(4): A55-A62.
- WHITBY-COTESCU, L.; SHILLABER, J.; COATES, D. F. 1971. Pit slope manual, chap. 10: Environmental planning. CANMET rep. 77-1, Ottawa, 93p.

