

# Una revisión de los factores que afectan a la generación de vibraciones y modelos predictivos empíricos

M. Cánovas, J. Arzúa, M. Maleki, O. Palacios,

*Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas. Universidad Católica del Norte, Chile.*

E. Trigueros

*Departamento de Ingeniería Minera y Civil. Universidad Politécnica de Cartagena, España.*

**ABSTRACT:** Only a small proportion of the energy released by the explosive is used to fragment the rock. The remaining energy is dissipated in undesirable effects such as air blasts, fly rocks and vibrations, which can damage structures of nearby buildings, landslides, etc. The magnitude of vibrations depends on a number of controllable and uncontrollable factors. Controllable factors are related to geometric, blasting and explosive parameters. Uncontrollable factors refer to natural parameters that cannot be modified, such as geological and mechanical properties of the rock mass. To reliably predict vibrations, there are predictive models considering the most influential factors. These empirical models have been developed through numerous field tests. A deep bibliographic review has been conducted to study the influence of factors affecting the generation of vibrations and the main empirical prediction models.

**RESUMEN:** Solo una parte de la energía del explosivo es aprovechada para fragmentar la roca. La energía restante se disipa en efectos no deseados como onda aérea, proyecciones y vibraciones, que pueden causar daños a estructuras cercanas, desprendimientos, etc. La intensidad de las vibraciones depende de una serie de factores controlables y no controlables. Los primeros están relacionados con parámetros geométricos, de la tronadura y del explosivo. Los factores no controlables se refieren a los parámetros naturales sobre los que no se puede actuar, como propiedades geológicas y mecánicas de la roca. Con el objetivo de predecir de manera fiable los niveles de vibración, existen modelos predictivos que consideran los factores más influyentes. Estos modelos convencionales tienen carácter empírico y han sido desarrollados por medio de numerosas pruebas de campo. Se ha realizado una profunda revisión bibliográfica para estudiar la influencia de todos los factores que pueden afectar a la generación de vibraciones y los principales modelos de predicción.

**Keywords:** tronadura, vibraciones, factores controlables y no controlables, modelos de predicción

## 1 INTRODUCCIÓN

La tronadura es una operación necesaria para minería y obras civiles. El empleo de explosivos es imprescindible cuando equipos mecánicos como *bulldozers* o excavadoras hidráulicas no pueden romper la roca. A pesar de que la tronadura se considera el camino más rápido y económico para fragmentar rocas, solo una pequeña parte de la energía liberada por los explosivos, aproximadamente entre un 15% y un 30%, se emplea realmente para fragmentar la roca (Hagan, 1977). La energía restante se disipa y es responsable de efectos no deseados como vibraciones, proyecciones, onda aérea y daños al macizo (López-Jimeno *et al.* 1995).

Entre los efectos no deseados, las vibraciones son las más peligrosas, ya que pueden dañar estructuras cercanas. Si la frecuencia de la

vibración se acopla al rango de la frecuencia natural de la estructura, se puede dar el fenómeno de resonancia y generar daños en la estructura (Dowding, 1985; Singh, 1997).

Las vibraciones son movimientos ondulatorios propagados desde el punto de la detonación (Dauetas *et al.* 1993). Su predicción es muy importante para reducir lo más posible el daño generado por la tronadura. Generalmente, se emplea la velocidad máxima de partícula (PPV, *peak particle velocity*) para describir las vibraciones. El esfuerzo inducido por las vibraciones es directamente proporcional a la velocidad máxima de partícula (Dauetas *et al.* 1993; Athanasopoulous y Pelekis, 2000; Monjezi *et al.* 2016). Debido a la anisotropía de los parámetros de la roca, la complejidad de la geología local y la variabilidad de los parámetros

de tronadura, predecir la velocidad máxima de partícula es una difícil tarea. Sin embargo, en las últimas décadas muchos investigadores han propuesto diferentes modelos para predecir con fiabilidad los niveles de vibraciones.

La mayoría de los modelos empíricos se basan en dos parámetros: (i) carga máxima de explosivo por retardo, también conocida como carga operante, y (ii) distancia de la tronadura con el punto de monitoreo (Langefors y Kihlstrom, 1963; Ambraseys, 1968). Otros predictores empíricos han sido desarrollados con respecto a los datos obtenidos en explotaciones específicas, proporcionando diferentes ecuaciones de atenuación (Kuzu, 2008; Cardu *et al.* 2015; Trigueros *et al.* 2017). En los últimos años numerosos trabajos se han enfocado en aplicar técnicas de inteligencia artificial como redes neuronales, obteniendo modelos muy precisos (Khandelwal y Singh, 2006; Amnie *et al.* 2014).

Además de los modelos predictivos, algunos países han desarrollado especificaciones que limitan las vibraciones de acuerdo para diferentes tipos de estructura. En la mayoría de normativas, debido a la importancia de la frecuencia, este factor se utiliza en combinación con la velocidad máxima de partícula, como por ejemplo en los estándares desarrollados por las instituciones USBM (United States Bureau of Mines), DIN (Deutsches Institut Für Normung), UNE (Una Norma Española) e INN (Instituto Nacional de Normalización de Chile). El objetivo de estos estándares es garantizar la estabilidad de las estructuras adyacentes.

El objetivo de este trabajo es realizar una exhaustiva revisión bibliográfica de los factores que afectan a la generación de vibraciones y los diferentes modelos predictivos que se han ido desarrollando a lo largo de los años.

## 2 VIBRACIONES

La detonación de una carga explosiva en el interior de un barreno genera instantáneamente un volumen de gases a un elevado gradiente de presión y temperatura, hasta 50 GPa y 5.000 K (McKenzie, 1990). El frente de detonación generado viaja a través de la columna de explosivo a una velocidad entre 1.500 y 9.000 m/s (Aimone, 1992). La presión que ejercen los gases sobre las paredes del barreno origina una onda de presión o de choque que se transmite a través del macizo rocoso, y también de la atmósfera. En ambos casos se generan perturbaciones de carácter ondulatorio y

transitorio que se extinguen en un breve periodo de tiempo (Langefors y Kihlström, 1963).

La propagación de estas ondas por el interior del macizo rocoso genera movimiento de las partículas, que en realidad son oscilaciones alrededor de su punto de equilibrio. Generalmente, no se llegan a producir desplazamientos permanentes, ya que las partículas retornan de nuevo a su posición inicial (Zhang, 2016). Sin embargo, si la intensidad de las vibraciones es muy fuerte, se pueden inducir esfuerzos que rompen la roca si se sobrepasa su límite elástico (Konya y Walter, 1990).

Los efectos perjudiciales de las vibraciones ocurren en las zonas más cercanas a la detonación, ya que las tensiones se van reduciendo con el inverso de la distancia al punto de detonación (1/D). De manera simplificada, se pueden considerar dos factores principales que producen atenuación de la energía contenida en el frente de ondas: (i) absorción de energía por parte del macizo rocoso en el que se propaga la onda y (ii) amortiguación geométrica por el aumento continuo del volumen afectado (Trigueros y Martínez, 2009).

Debido a los mecanismos de superposición de diferentes tipos de ondas, dispersión o variaciones de longitud de onda, los modelos clásicos de ondas elásticas no constituyen un fiel reflejo de la generación y propagación de las vibraciones. Sin embargo, son una buena aproximación, ya que la propagación de la vibración alrededor del barreno se realiza mediante ondas elásticas de baja energía (Bernaola *et al.* 2013).

A pesar de que las vibraciones son diferentes a las de un evento sísmico en términos de fuente de energía, cantidad de energía y distancia recorrida (Oriard, 1989), se puede afirmar que las vibraciones se transmiten por el macizo rocoso en forma de ondas sísmicas (López-Jimeno *et al.* 2017). Las ondas sísmicas se clasifican en dos tipos: ondas internas y ondas superficiales. Las ondas internas se propagan por el interior del macizo rocoso. Hay dos tipos de ondas internas en función de los esfuerzos que generan: ondas P (primarias, longitudes o de compresión) y ondas S (secundarias, transversales o de cizallamiento). Cuando las ondas internas llegan a la superficie, se generan ondas superficiales. Las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love (Q) son los principales tipos de ondas superficiales (Ainalis *et al.* 2018). La Figura 1 muestra el arribo de las ondas P y S a un geófono triaxial.

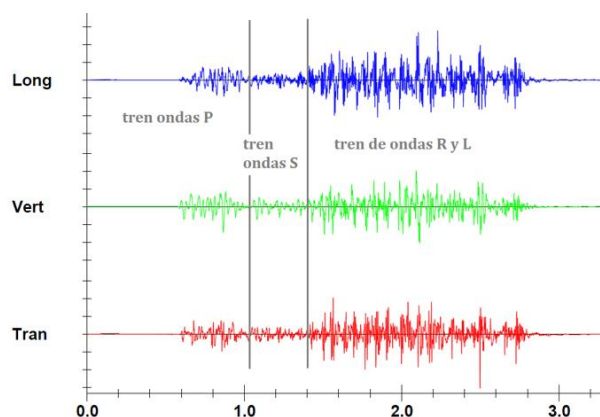


Figura 1. Arribo de ondas P y S (Cospedal, 2019).

Las ondas P se propagan por el interior del macizo produciendo compresión y tracción de forma alternativa en la misma dirección en la que se propaga la onda. Las ondas P producen cambios de volumen, pero no de forma. Las ondas S provocan el movimiento de las partículas en dirección transversal a la dirección de propagación de la onda (Trigueros y Martínez, 2009). Las ondas internas se pueden diferenciar porque la velocidad de propagación es diferente para cada una. Las ondas P tienen mayores velocidades de propagación y, por tanto, son las primeras en llegar al punto de medición (Zhang, 2016).

Sin embargo, a pesar de lo expuesto anteriormente, en los estudios de monitoreo de vibraciones no es tan sencillo llegar a distinguir los diferentes tipos de ondas que llegan a los geófonos. La profundidad de los barrenos de producción es pequeña, no suele superar los 20 m, lo que implica frentes de ondas internas de baja energía. Además, las ondas llegan de forma casi simultánea a los geófonos, ya que la diferencia de velocidad entre los dos tipos de ondas es pequeña frente a las pequeñas distancias que recorren hasta los geófonos (López-Jimeno et al. 2017).

### 2.1 Propiedades de las vibraciones

La transmisión de la onda sísmica generada por la detonación a través del macizo rocoso produce un movimiento de las partículas en cada punto, que es lo que se conoce por vibración. Dada la complejidad de este fenómeno, y con objeto de simplificar el estudio, las vibraciones se consideran como ondas de tipo sinusoidal. Los principales componentes de las vibraciones son (Bernaola et al. 2013; Zhang, 2016):

(i) Desplazamiento (S): es el máximo desplazamiento de la partícula excitada desde la posición de equilibrio.

(ii) Velocidad (v): es la velocidad de las partículas del macizo rocoso como respuesta al paso de las ondas sísmicas.

(iii) Frecuencia (f): es el número completo de oscilaciones por segundo. Es el inverso del periodo (T).

El desplazamiento, e, en cualquier momento se define por la Ecuación (1).

$$e = S \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

Siendo  $\omega$  la frecuencia angular de la vibración definida por la Ecuación (2).

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (2)$$

Resulta inmediato deducir los valores de velocidad y aceleración en función del desplazamiento mediante las Ecuaciones (3) y (4).

$$v = \frac{de}{dt} = S \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -S \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

La velocidad máxima se obtiene cuando  $\cos(\omega \cdot t)$  es la unidad (Ecuación 5).

$$v_{max} = S \cdot \omega = S \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5)$$

Finalmente, despejando el desplazamiento máximo se puede demostrar que las vibraciones de baja frecuencia generan un mayor daño al ser mayor el desplazamiento (Ecuación 6).

$$S_{max} = \frac{v_{max}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (6)$$

### 2.2 Factores que influyen en las vibraciones

Al igual que los resultados de una tronadura, la intensidad de las vibraciones depende de una serie de factores que se pueden dividir en dos grupos: (i) controlables e (ii) incontrolables. Los factores controlables están relacionados con las características de los explosivos e iniciadores utilizados y el diseño de la tronadura. Por otro lado, los parámetros que no se pueden controlar están relacionados con las características geológicas y estructurales del macizo rocoso (Singh y Singh, 2005). Algunos trabajos dividen los factores controlables en dos grupos: (i) geométricos y (ii) del explosivo y la tronadura (Siskind, 1980). Esta última clasificación se empleará en este trabajo para describir las variables que afectan en la generación de vibraciones. La Tabla 1 muestra los principales factores en función de la clasificación utilizada. Hay que destacar que algunos factores controlables dependen de factores como la maquinaria existente (diámetro de perforación) o los diseños impuestos para asegurar la

estabilidad de la mina (altura de banco), por lo que no se puede considerar que sean controlables en sentido estricto. Por otro lado, según la bibliografía consultada, algunos autores indican que la longitud de carga explosiva no tiene una influencia real en la generación de vibraciones, sin embargo, otros autores afirman lo contrario.

Tabla 1. Factores que afectan a la generación de vibraciones.

Factores controlables geométricos	Factores controlables del explosivo	Factores no controlables
Diámetro barreno	Carga operante	Características geológicas y mecánicas de la roca
Longitud carga explosiva	Tipo de explosivo	Características estructurales
Altura de banco	Acoplamiento carga explosiva	Presencia de agua
Burden	Secuencia de retardos	
Espaciamiento	Tipo de detonador	
Pasadura	Distancia al punto monitoreo	
Taco	Dirección de propagación	
Inclinación		
Presencia de caras libres		

### 2.2.1. Factores controlables geométricos

La Figura 2 muestra los principales factores geométricos de una tronadura.

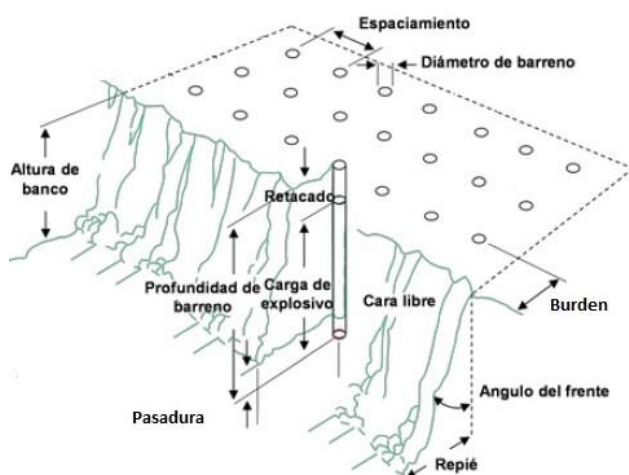


Figura 2. Principales factores geométricos de una tronadura (modificado de Bernaola et al. 2013).

### Diámetro del barreno

La influencia del diámetro de perforación es bien conocida. Siskind y Fumanti (1974) demostraron que es posible fracturar la roca hasta una distancia entre 3 y 55 veces el radio del barreno en función del tipo de explosivo y las características geológicas. Un aumento del diámetro del barreno implica un aumento de la intensidad de las vibraciones, ya que la cantidad de explosivo por barreno es proporcional al cuadrado del diámetro (López-Jimeno et al. 2017).

Sin embargo, este no es un factor que se tenga en cuenta para controlar vibraciones. Una explotación minera no suele emplear más de dos o tres diámetros de perforación, y estos solos responden a criterios de producción. Los diámetros de perforación varían aproximadamente entre 1<sup>1/2</sup>” para perforaciones manuales en pequeña minería hasta aproximadamente 13” para gran minería a cielo abierto (Blair, 2010; Cospedal, 2019).

### Longitud de la carga explosiva

Es importante distinguir entre la longitud de la carga explosiva y la longitud de barreno, ya que esta última considera también la longitud del taco. La longitud de la carga explosiva es un parámetro que suele ser constante en todos los barrenos de producción de una tronadura y que, generalmente, oscila entre los 5 y 20 m en minería a rajo abierto (Blair, 2010; Cospedal, 2019). Blair (2014) desarrolló un modelo para estudiar la influencia de la longitud de la carga explosiva en los niveles máximos de vibraciones. A partir de un barreno ciego en un medio elástico uniforme, obtuvo que los niveles máximos de vibraciones son independientes de la longitud de carga para valores mayores a 0,01 m. Además, demostró que aumentar la longitud de carga incrementa la longitud del frente de detonación de las ondas P y S, pero no su amplitud.

### Altura de banco

Si la altura de banco es muy grande, se pueden presentar problemas de desviación de los barrenos, que además de afectar a la fragmentación, generarán vibraciones debido a que la malla de perforación no se mantendrá constante en toda la altura del barreno (López-Jimeno et al. 2017). Worsey (1986) afirmó que cuanto mayor sea la altura de banco, y por tanto la longitud del barreno, mayor será el nivel de vibraciones.

La rigidez del paralelepípedo de roca situado delante de los barrenos es la relación entre la altura de banco  $H$  y el *burden*  $B$ . Este parámetro tiene una gran influencia sobre los resultados de fragmentación y la generación de efectos no deseados. Cuando la relación  $H/B$  es grande (el valor óptimo es  $H/B \geq 3$ ), el desplazamiento y deformación de la roca es fácil (Ash, 1968). Por tanto, debe mantenerse una relación cercana al valor óptimo establecido empíricamente por Ash para reducir las vibraciones al estar las cargas menos confinadas. La Tabla 2 muestra los efectos resultantes de la relación de rigidez.

Tabla 2. Efectos resultantes de la relación de rigidez (Ash, 198).

Efectos	Relación de rigidez (H/B)			
	1	2	3	4
Fragmentación	Mala	Regular	Buena	Excelente
Onda aérea	Severa	Regular	Buena	Excelente
Proyecciones	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibraciones	Severa	Regular	Buena	Excelente

### Burden

El *burden* es el parámetro geométrico más importante de la tronadura. El resto de parámetros se calculan a partir de él. Se asume que el nivel de vibraciones aumenta al incrementar el *burden*, ya que los gases permanecen confinados en el fondo del barreno más tiempo del apropiado. En este caso, la energía del explosivo no se emplea en fragmentar la roca y aumenta el nivel de vibraciones (Singh y Singh, 2005). El aumento del nivel de vibraciones al aumentar el *burden* también se puede explicar por la mayor distancia y el mayor tiempo que tarda la onda de choque en llegar hasta la cara libre.

Blair y Birney (1994) y Brent *et al.* (2002) realizaron mediciones usando un solo barreno para dos valores de *burden* sin encontrar una relación concreta. Liu y Ludwig (1996) no hallaron una relación válida, pero concluyeron que sí debe haber una relación entre el *burden* y el nivel de vibraciones. Los experimentos de Blair y Armstrong (2001) tampoco encontraron una correlación estadística y sugirieron que cualquier correlación puede deberse a variaciones en las propiedades del macizo rocoso. Yuill (2003) realizó mediciones en seis disparos únicos y halló evidencias de una relación significativa entre el *burden* y el nivel de vibraciones. Uysal *et al.* (2007) emplearon valores de *burden* entre 3 y 14 m en dos explotaciones diferentes y encontraron una débil relación con el nivel de vibraciones, sin embargo,

la alta dispersión impidió establecer una relación directa. A pesar de que la idea sobre la relación entre *burden* y nivel de vibraciones está muy extendida, aún no se han presentado evidencias que muestren de manera clara esta relación (Ainalis *et al.* 2017).

### Espaciamiento

El espaciamiento es la distancia entre barrenos de una misma fila que se disparan simultáneamente o con retardo. La influencia del espaciamiento es similar a la del *burden*, además, este se calcula en función del valor del *burden* (López-Jimeno *et al.* 2017). Singh y Singh (2005) afirmaron que emplear una relación entre espaciamiento y *burden* mayor que uno, aumenta la fragmentación, de manera que toda esa energía que se emplea en fragmentar la roca no generará vibraciones.

### Pasadura

La pasadura es la longitud del barreno bajo el nivel de piso del banco, necesaria para fragmentar la roca a la altura del banco y lograr la cota de excavación propuesta. Si se emplea una longitud de pasadura mayor a la necesaria, la energía resultante de la detonación se empleará en menor proporción para romper el volumen de roca por cizallamiento en la base y mover la pila de material. Así, un porcentaje cada vez mayor de la energía del explosivo se convierte en vibraciones (López-Jimeno *et al.* 2017).

### Taco

El taco es la longitud de la parte superior del barreno que se rellena con material inerte. Su función es confinar los gases del explosivo el tiempo suficiente para que trabajen en la fragmentación de la roca (Singh y Singh, 2005). Parece lógico pensar que usar taco implica reducir los niveles de vibraciones debido a que se reduce la cantidad de explosivo en el barreno. Sin embargo, un taco mayor a una longitud crítica puede incrementar el nivel de vibraciones debido al elevado confinamiento y la alta presión de los gases generados con la detonación (Hagan y Kennedy, 1977).

Los tacos intermedios se emplean para separar cargas explosivas dentro de un barreno usando un material inerte. En ocasiones, se usan tacos de aire debido a que consiguen mejores resultados de fragmentación (Ainalis *et al.* 2017). Park y Jeon (2010) propusieron el uso de tacos de aire en el fondo de barrenos para reducir el nivel de vibraciones en tronaduras subterráneas.

## Inclinación de los barrenos

La disposición de la carga de fondo, el explosivo más potente, en un barreno inclinado favorece un mejor aprovechamiento de la energía del explosivo a nivel de piso. Esto se debe a que se reduce la cantidad de energía que se pierde en vibraciones por debajo de la cota inferior del banco sin encontrar una superficie libre de reflexión (Bernaola *et al.* 2013; López-Jimeno *et al.* 2017).

## Presencia de caras libres

En una tronadura de producción con una superficie libre, las ondas generadas por la detonación viajan hacia la cara libre que cumple la función de plano de reflexión (Zhang, 2016). El fenómeno de reflexión es bien conocido y fue descrito mediante las ecuaciones de Zoeppritz (Aki y Richards, 2002), aunque según Blair (2015), las ondas no pueden considerarse como planas y es muy complicado modelizar el fenómeno de reflexión de las ondas. Además, el ángulo de la cara libre tiene una influencia considerable, ya que la amplitud del frente de las ondas internas (P y S) puede reducirse o aumentarse en función de este ángulo cuando las ondas alcanzan la cara libre (Blair, 2015).

### 2.2.2. Factores controlables del explosivo

#### Carga operante

La carga operante, o carga máxima de explosivo por retardo, se considera el factor más importante, junto con la distancia, que influye en la generación de vibraciones.

Es muy importante diferenciar entre la carga operante y la carga total de la tronadura, puesto que debido a la secuencia no todos los barrenos detonan a la vez (Nichols *et al.* 1971). El intervalo de retardo debe ser lo suficientemente grande para que no existan interferencias constructivas o con efectos sumatorios entre las ondas generadas por los distintos barrenos (López-Jimeno *et al.* 2017). Dick *et al.* (1982) establecieron que el nivel de vibraciones generado por dos cargas con un retardo de 8 o 9 milisegundos entre sí no genera un mayor nivel de vibraciones, ya que las ondas no tienen efecto sumatorio y se pueden considerar disparos independientes. Una definición más precisa de carga operante se refiere a la suma de todas las cargas que detonan en un intervalo inferior a 8 milisegundos, siendo el efecto equivalente a la vibración generada por la suma de dichas cargas (Bernaola *et al.* 2013). Según los resultados de

investigaciones publicadas por el USBM, existe una relación exponencial entre el nivel máximo de vibraciones y la carga operante,  $v \propto Q^\alpha$ , estando el valor de  $\alpha$  en torno a 0,8 (López-Jimeno *et al.* 2017).

Algunos autores consideran intervalos diferentes. Langefors y Kihlström (1963) indicaron que, con intervalos superiores a tres veces el periodo de vibración, se puede considerar que no hay efecto de cooperación entre barrenos adyacentes. Linehan y Wiss (1982) consideraron un intervalo de 17 milisegundos entre retardos sucesivos para eliminar la superposición de las vibraciones. Sin embargo, a pesar de lo intuitivo que parece afirmar que existe una relación directa entre la carga de explosivo y el nivel de vibraciones, Mandal (2012) y Blair (2014) ponen en duda esta relación y afirman que no tiene sentido considerando los modelos axisimétricos de radiación desde un barreno dentro de un medio infinito.

#### Tipo de explosivo

Los explosivos que generan una elevada presión de explosión (generación de gases) como el ANFO, suelen generar un menor nivel de vibraciones. Según López-Jimeno *et al.* (2017), al comparar la misma cantidad de ANFO con un hidrogel común y con adición de aluminio, la intensidad de las vibraciones generadas por el ANFO es 2 y 2,4 veces menor, respectivamente. Por otro lado, y como se mencionó anteriormente, hay una relación entre la velocidad de vibración de partícula y los esfuerzos inducidos en la roca, por tanto, explosivos con mayor presión de detonación (mayor densidad y mayor velocidad de detonación) como dinamitas y emulsiones generarán mayores niveles de vibraciones.

En los estudios de monitoreo y control de vibraciones se deberían normalizar las cargas a un explosivo de potencia conocida, como el ANFO, a partir de los valores de potencia relativa en peso y potencia relativa en volumen.

#### Acoplamiento de la carga explosiva

Una carga explosiva completamente acoplada ocupa todo el diámetro del barreno. Por el contrario, una carga desacoplada tiene un diámetro inferior al diámetro del barreno. Se ha demostrado que hay una relación entre el acoplamiento de la carga y el nivel de vibraciones. Taqieddin (1986) encontró que se producen mayores niveles de vibraciones con cargas acopladas que con cargas desacopladas

debido a que los gases generados encuentran mayor dificultad para fragmentar y desplazar la roca, por lo que la energía generada se transforma en energía sísmica. Como afirmó Melnikov (1962), empleando cargas desacopladas entre el 65 y el 75% se mejora la fragmentación, el desplazamiento y se reduce el nivel de vibraciones, ya que la energía generada en la detonación se transforma con más facilidad en energía para fragmentar y desplazar la roca.

### Secuencia de retardos

A pesar de la importancia de la secuencia de salida de la tronadura sobre la fragmentación y movimiento de la pila de material, no se puede considerar que tenga una gran influencia sobre el nivel de vibraciones (Blair, 2009). Blair y Armstrong (1999) demostraron que, si el macizo rocoso tiene un comportamiento homogéneo, la frecuencia de las vibraciones se puede controlar con la secuencia de retardos. En el caso contrario, en un macizo con características muy variables, las vibraciones son impredecibles y no se pueden controlar. Shi y Chen (2011) estudiaron la influencia de varios tiempos de retardos (15, 25, 30, 35 y 40 milisegundos) en una misma mina a cielo abierto, sin encontrar evidencias estadísticas. Algunos tiempos de retardo disminuían los niveles de vibraciones mientras que otros aumentaban la intensidad de las vibraciones.

### Tipo de detonador

Los detonadores se emplean como iniciadores y para controlar la secuencia de detonación de las cargas explosivas. Actualmente se usan tres tipos de detonadores: eléctricos y no eléctricos en pequeña y mediana minería, y electrónicos en gran minería. Una de las innovaciones más recientes es el uso de detonadores electrónicos inalámbricos que transmiten la señal mediante inducción electromagnética (Lownds y Piel, 2019). La aparición de los detonadores electrónicos ha traído mejoras significativas en el uso, la seguridad y la precisión de los tiempos de detonación (Bowen, 2015). Además, la dispersión en los retardos de los tiempos de detonación se ha reducido a menos de un milisegundo (Anderson y Brinckerhoff, 2008). Aunque autores como Birch *et al.* (2010) sugieren que el uso de detonadores electrónicos mejora la fragmentación y reducen el nivel de vibraciones, esta afirmación ha sido discutida en algunos trabajos que establecen que no hay una relación demostrable (Blair, 2010).

### Distancia al punto de monitoreo y dirección de propagación

Junto con la carga operante, la distancia entre la tronadura y el punto de monitoreo es uno de los factores más importantes en la generación de vibraciones. Es inmediato pensar que la intensidad de las vibraciones se va reduciendo conforme aumenta la distancia. Por tanto, es un factor importante cuando hay edificaciones o estructuras sensibles cerca de una tronadura. Según el USBM, el nivel de vibraciones disminuye en función de la distancia de acuerdo a la relación  $v \propto 1/D^b$ , estando el valor de  $b$  en torno a 1,6 (López-Jimeno *et al.* 2017).

Otro factor que se debe considerar es la dirección de propagación de las vibraciones. Debido a las variaciones de las características de la roca, geométricas, fracturación y presencia de agua, entre otros factores, las vibraciones pueden propagarse en direcciones diferentes (Ainalis *et al.* 2017).

#### 2.2.3. Factores no controlables

Los factores no controlables son parámetros naturales relacionados con el macizo rocoso sobre los que no se puede actuar, como propiedades geológicas y mecánicas de la roca y características estructurales. Tienen una gran influencia a medida que aumenta la distancia de la tronadura, ya que, para distancias pequeñas, los factores geométricos y del explosivo tienen una mayor influencia sobre las vibraciones.

El macizo rocoso se puede definir como la forma en que se presenta la roca de forma natural. El macizo rocoso está formado por la roca y su estructura, que a su vez contiene planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otras estructuras. Todas estas características hacen del macizo rocoso un conjunto discontinuo y que puede presentar propiedades heterogéneas y/o anisótropas (Ramírez-Oyanguren y Alejano-Monge, 2004).

Las ondas generadas en la detonación del explosivo pueden transmitirse en direcciones diferentes y están sujetas a fenómenos de atenuación, dispersión, reflexión y refracción en función de las propiedades del macizo rocoso. Las características de la transmisión de las ondas a través del macizo son importantes para entender y caracterizar las vibraciones (Aldas, 2010). En macizos homogéneos es más fácil predecir y controlar los niveles de vibraciones ya que se propagan en todas las direcciones, sin embargo, en macizos con propiedades muy

variables y estructuras complejas, la propagación de las ondas varía con la dirección y es más difícil predecir y controlar las vibraciones (Blair y Armstrong, 1999).

### Características geológicas y mecánicas de la roca

Para conocer la capacidad de transmisión de las vibraciones, se puede obtener la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el macizo rocoso. Este parámetro se obtiene mediante la técnica geofísica de sísmica de refracción (Bernaola *et al.* 2013). Las propiedades de la roca tienen una gran influencia en la generación de vibraciones cada roca las transmite de forma diferente en función de sus propiedades.

Singh *et al.* (2008) hallaron que cuanto mayor son el módulo de Young y la velocidad de la onda P, mayor es el nivel de vibraciones. Khandelwal y Singh (2006, 2009) estudiaron la influencia de los módulos de Young y de Poisson y la velocidad de la onda P mediante redes neuronales artificiales. Chakraborty *et al.* (1998) investigaron la influencia de la resistencia a tracción en el nivel de vibraciones. Ozer (2008) y Mesec *et al.* (2010) escalan las propiedades de la roca intacta usando el índice de calidad del macizo rocoso GSI para estudiar el nivel de vibraciones. Kumar *et al.* (2016) trataron de considerar más propiedades del macizo rocoso y consideraron el peso específico, la resistencia a compresión simple de la roca y los índices RQD y GSI.

### Características estructurales

La influencia de las características estructurales del macizo rocoso ha sido investigada por muchos autores a lo largo de los años. Keith y Crampin (1977) y Aki y Richards (2002) estudiaron la influencia de medios anisótropos en la transmisión de ondas sísmicas. Los efectos de fracturación como estratificación, fallas, juntas, diaclasas y cavidades han sido estudiados por muchos autores (Pyrak-Nolte *et al.* 1990a, b; Cook, 1992; Gu *et al.* 1996; Wu *et al.* 1998; Hao *et al.* 2001; Ak y Konuk, 2008; Kuzu, 2008; Takahashi *et al.* 2018). Charlie *et al.* (1996) y Müller *et al.* (2010) caracterizaron el flujo generado por las ondas sísmicas en medios rocosos porosos. La influencia de formaciones con múltiples capas y fracturación sobre la dirección de propagación fue investigada por Shao *et al.* (2015), quienes hallaron que la orientación de las fracturas determina la velocidad de la onda P en formaciones fracturadas anisótropas. Natheghi (2011) estudió

los efectos de diferentes formaciones de roca en la intensidad y dirección de los niveles de vibraciones. Su estudio aportó nuevas relaciones empíricas entre distancia y velocidad de partícula en excavaciones a cielo abierto y subterráneas para diferentes formaciones.

### Presencia de agua

El efecto de la presencia de agua en el macizo rocoso ha sido estudiado por varios autores (Hopler, 1998; Lee, 2011). Según Singh y Narendrula (2007), el agua puede facilitar el acoplamiento entre el explosivo y la roca para cargas desacopladas, permitiendo la transmisión de mayores cantidades de energía al ser mayor la impedancia entre explosivo-agua-roca que entre explosivo-aire-roca.

## 3 MODELOS DE VIBRACIONES

### 3.1 Modelos de predicción empíricos

Una forma general de expresar la ley de transmisividad de vibraciones o ley de amortiguación viene dada por la Ecuación (7), que expresa la relación matemática entre la velocidad máxima de vibración PPV (mm/s), la carga operante Q (kg) y la distancia entre la tronadura y el punto de monitoreo D (m).

$$PPV = \frac{K}{D^b} Q^\alpha \quad (7)$$

Los parámetros K,  $\alpha$  y b son constantes empíricas que tienen en cuenta las características geológicas del macizo rocoso, las características geométricas y la topografía del área de la tronadura y la transmisión de la detonación por el macizo rocoso. El valor de las constantes se puede determinar mediante análisis de regresión múltiple a partir de los valores conocidos Q y D y de los registros de PPV (Bernaola *et al.* 2013).

Este modelo general, basado en el de Holmberg y Persson (1978), no considera simetría de la carga. Otros autores han desarrollado modelos asumiendo cargas simétricas. Dentro de estos modelos, algunos consideran cargas esféricas (Ambraseys y Hendron, 1968; Gosh y Daemon, 1983; Roy, 1991). En estos modelos la distancia reducida tiene unidades de  $m/kg^{0.33}$  (Ecuación 8).

$$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-b} \quad (8)$$

Otros autores como Duvall y Petkof (1959) asumen el empleo de cargas simétricas cilíndricas. Para este caso se ha demostrado, mediante análisis dimensional, que la distancia



reducida debe corregirse por la raíz cuadrada de la carga operante, teniendo unidades m/kg<sup>0,5</sup>. La Ecuación (9) muestra el modelo de estos autores. Este modelo es el que aparece en la normativa del United States Bureau of Mines y es uno de los más extendidos.

$$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-b} \tag{9}$$

Durante las últimas décadas, modelos empíricos similares han sido desarrollados por investigadores. En la Tabla 3 se muestran algunos de los más empleados.

Tabla 3. Modelos de predicción empíricos de vibraciones.

Autores	Modelo
Langefors y Kihlström (1963)	$PPV = K \left( \frac{Q}{D^{2/3}} \right)^{\frac{b}{2}}$
Davies et al. (1964)	$PPV = K \cdot D^b \cdot Q^a$
Indian Standard (1973)	$PPV = K \left( \frac{D^{2/3}}{Q} \right)^{-b}$
Ghosh y Daemen (1983)	$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-b} e^{-\alpha D}$
Gupta et al. (1987)	$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-b} e^{-\alpha \left( \frac{D}{Q} \right)}$
Ghosh y Daemen (1983)	$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-b} e^{-\alpha D}$
Roy (1991)	$PPV = n + K \left( \frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-1} \tag{1}$
Bilgin et al. (1998)	$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-b} B^{\gamma} \tag{2}$
Rai and Singh (2004)	$PPV = K \cdot D^{-b} \cdot Q^a \cdot e^{-\alpha D}$
Ak y Kounuk (2008)	$PPV = K \left( \frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-b} \lambda^{\alpha} \tag{3}$
Giraudi et al. (2009)	$PPV = K \left( \frac{D^2}{(Q \cdot t_{det})^{1/2}} \right)^{-b} \tag{4}$
Simangunsong y Wahyudi (2015)	$PPV = K \left[ (1 + \cos \theta_i + N_c) \frac{D}{Q^{1/2}} \right]^{-b} \tag{5}$
Kumar et al. (2016)	$PPV = \frac{f_c^{0,642} \cdot D^{-1,463}}{\gamma} \tag{6}$

Murmu et al. (2018)  $PPV = K \left( \frac{D}{Q^{2/5}} \right)^{-b}$

- (1) n: constante empírica que considera las propiedades del macizo rocoso y la transmisión de la detonación.
- (2) B: *burden*,  $\gamma$ : peso específico de la roca (kN/m<sup>3</sup>).
- (3)  $\lambda$ : frecuencia de discontinuidades.
- (4)  $t_{det}$ : tiempo de detonación (s).
- (5)  $N_c$ : denota las capas de mineral entre el área de tronadura y el punto de monitoreo;  $\Theta_i$ : ángulo de incidencia.
- (6)  $f_c$ : factor que relaciona PPV con RQD.

### 3.2 Modelos de predicción específicos

Otros autores han desarrollado modelos empíricos específicos del lugar de estudio que no pueden aplicarse a otros lugares. Estos modelos tienen la forma general que muestra la Ecuación (10).

$$PPV = K \cdot DR^{\alpha} \tag{10}$$

La Tabla 4 muestra una compilación de algunos de ellos. En todos ellos los autores trabajaron con cargas simétricas cilíndricas ( $DR = D/Q^{1/2}$ ).

Tabla 4. Modelos empíricos específicos de predicción de vibraciones

Autores	Modelo
Nicholls et al. (1971)	$PPV = 362 \cdot DR^{-1,63}$
Siskind et al. (1980)	$PPV = 828 \cdot DR^{-1,32}$
Kahrman (2002)	$PPV = 191 \cdot DR^{-1,13}$
Kahrman (2004)	$PPV = 340 \cdot DR^{-1,79}$
Kahrman et al. (2006)	$PPV = 561 \cdot DR^{-1,432}$
Kuzu (2008)	$PPV = 428,45 \cdot DR^{-1,7842}$
	$PPV = 257 \cdot DR^{-1,03}$ (areniscas)
Ozer (2008)	$PPV = 6309 \cdot DR^{-1,9}$ (esquistos)
	$PPV = 3019 \cdot DR^{-1,69}$ (calizas)
Ak et al. (2009)	$PPV = 1367 \cdot DR^{-1,59}$
Mesec et al. (2010)	$PPV = 508 \cdot DR^{-1,37}$

Hudaverdi (2012)	$PPV = 792,75 \cdot DR^{-1,719}$
Cardu et al. (2015)	$PPV = 70,482 \cdot DR^{-0,882}$
Ongen et al. (2018)	$PPV = 152,75 \cdot DR^{-1,16}$
Takahashi et al. (2018)	$PPV = 0,6481 \cdot DR^{-2,119}$

#### 4 CONCLUSIONES

Al igual que para evaluar los resultados de una tronadura, la intensidad de las vibraciones depende de factores controlables y no controlables, pudiendo dividir los factores controlables en referentes al diseño de la tronadura y a las propiedades del explosivo. Los factores no controlables son los relacionados con las propiedades del macizo rocoso, coincidiendo muchos autores en que la fracturación es un aspecto muy importante y que merece ser estudiado con más detalle. Cabe destacar que los autores consultados en la numerosa bibliografía estudiada concuerdan en que los factores controlables más relevantes que afectan a las vibraciones son la carga operante, la distancia del punto de monitoreo y dirección de propagación y el diámetro del barreno.

A través del tiempo se han desarrollado numerosos modelos predictivos que permiten estimar las vibraciones producidas en tronadura. Además, el avance del conocimiento del campo de la tronadura ha permitido clasificar los factores que más inciden en la generación y el nivel de vibraciones.

#### REFERENCES

- Aimone, C. (1992). Rock breakage: Explosives, blast design. SME Mining Engineering Handbook, 3rd edn. Society of Mining Engineers, Littleton, 722-746.
- Ainalis, D., Ducarne, L., Kaufmann, O., Tshibangu, J. P., Verlinden, O., Kouroussis, G. (2018). Improved analysis of ground vibrations produced by man-made sources. Science of The Total Environment, 616, 517-530.
- Ainalis, D., Kaufmann, O., Tshibangu, J. P., Verlinden, O., Kouroussis, G. (2017). Modelling the source of blasting for the numerical simulation of blast-induced ground vibrations: a review. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(1), 171-193.
- Ak, H., Iphar, M., Yavuz, M., Konuk, A. (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(4), 669-676.
- Ak, H., Konuk, A. (2008). The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: a case study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(9), 686-694.
- Aki, K., Richards, P. G. (2002). Quantitative seismology. University Science Books, San Francisco.
- Aldas, G. G. U. (2010). Investigation of blast design parameters from the point of seismic signals. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24(1), 80-90.
- Ambraseys, N. N., Hendron, A. J. (1968). Dynamic behaviour of rock masses. J. Wiley & Sons.
- Amnieh, H. B., Siamaki, A., Soltani, S. (2012). Design of blasting pattern in proportion to the peak particle velocity (PPV): Artificial neural networks approach. Safety Science, 50(9), 1913-1916.
- Anderson, D., Brinckerhoff, P. (2008). Signature hole blast vibration control—twenty years hence and beyond. Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Vol. 34, No. 2, p. 27.
- Ash, R. L. (1968). The design of blasting rounds. Surface mining, 387.
- Athanasopoulos GA, Pelekis PC. Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. Soil
- Bernaola, J., Castilla, J., Herrera, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Universidad Politécnica de Madrid.
- Bilgin, A., Esen, S., Kilic, M. (1998). TKI the investigation to eliminate the environmental problems caused by blasts in Can open-pit lignite mine facility. Final report. Ankara: TKI general directory.
- Birch, W., White, T., Hosein, S. (2010). Electronic detonators: a step forward in blast vibration control. Proceedings of the 15th Extractive Industry Geology Conference, Cardiff.
- Blair, D. P. (2009). Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation. Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 171.
- Blair, D. P. (2010). Seismic radiation from an explosive column. Geophysics, 75(1), E55-E65.
- Blair, D. P. (2014). Blast vibration dependence on charge length, velocity of detonation and layered media. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 65, 29-39.
- Blair, D. P. (2015). The free surface influence on blast vibration. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 77, 182-191.
- Blair, D. P., Armstrong, L. W. (1999). The spectral control of ground vibration using electronic delay detonators. Fragblast, 3(4), 303-334.
- Blair, D. P., Armstrong, L. W. (2001). The influence of burden on blast vibration. Fragblast, 5(1-2), 108-129.
- Blair, D. P., Birney, B. (1994). Vibration signatures due to single blastholes fired in the Charlotte Deeps. ICI Confidential Report.
- Bowen, N. (2015) Next generation blasting—how will wireless change mining. Proceedings of the 2nd Annual International Mining and Resources Conference, Melbourne, Australia.
- Brent, G. F., Smith, G. E., Lye, G. N. (2002). Studies on the effect of burden on blast damage and the implementation of new blasting practices to improve

- productivity at KCGMs Fimiston Mine. *Fragblast*, 6(2), 189-206.
- Cardu, M., Mucci, A., Uyar, G. G. (2015). Investigating the effects of bench geometry and delay times on the blast induced vibrations in an open-pit quarry. *GEAM-GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA-GEAM-GEOENGINEERING ENVIRONMENT AND MINING*, (144), 45-56.
- Chakraborty, A. K., Roy, P. P., Jethwa, J. L., Gupta, R. N. (1998). Blast performance in small tunnels-a critical evaluation in underground metal mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(3), 331-339.
- Charlie, W. A., Veyera, G. E., Durnford, D. S., Doehring, D. O. (1996). Porewater pressure increases in soil and rock from underground chemical and nuclear explosions. *Engineering Geology*, 43(4), 225-236.
- Cook, N. G. (1992). Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 29, No. 3, pp. 198-223.
- Cospedal, J. (2019). Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- Dauetas AA, Denisyuk II, Kuzmenko AA, Vorobev VD. *Seismic Effects of Blasting in Rock*. 1993., CRC Press; 1993.
- Davies, B., Farmer, I. W., Attewell, P. B. (1964). Ground vibration from shallow sub-surface blasts. *Engineer*, 217(5644)
- Dick, R. A., Fletcher, L. R., D'Andrea, D. V. (1982). *Explosives and blasting procedures manual*. Washington, DC: US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Dowding, C.H. (1985). *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Duvall, W. I., Petkof, B. (1959). Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock (No. BM-RI-5483). United States Bureau of Mines.
- Ghosh, A., Daemen, J. J. (1983). A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws). *Proceedings of the 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Giraudi, A., Cardu, M., Kecojevic, V. (2009). An assessment of blasting vibrations: a case study on quarry operation. *American Journal of Environmental Sciences*, 5(4), 468-474.
- Gu, B., Suárez-Rivera, R., Nihei, K. T., Myer, L. R. (1996). Incidence of plane waves upon a fracture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B11), 25337-25346.
- Gupta, R. N., Pal Roy, P., Bagchi, A., Singh, B. (1987). Dynamic effects in various rock mass and their prediction. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 35(11), 455-462.
- Hagan, T. N., Kennedy, B. J. (1978). Practical approach to the reduction of blasting nuisances from surface operations: aust min, V69, N11, Nov 1977, P36-46. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 15, No. 3, p. 65.
- Hao, H., Wu, Y., Ma, G., Zhou, Y. (2001). Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock mass. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(2), 85-98.
- Holmberg, R., Persson, P. A. (1978). The Swedish approach to contour blasting. *SveDeFo*.
- Hopler, R. B. (Ed.). (1998). *Blasters' handbook*. International Society of Explosives Engineers.
- Hudaverdi, T. (2012). Application of multivariate analysis for prediction of blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 300-308.
- Indian Standard (1973). *Criteria for Safety and Design of Structures Subjected to Underground Blast*. Bulletin No: IS-6922, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- Kahrman, A. (2002). Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at can open-pit lignite mine in Turkey. *Environmental Geology*, 41(6), 653-661.
- Kahrman, A. (2004). Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 887-892.
- Kahrman, A., Ozer, U., Aksoy, M., Karadogan, A., Tuncer, G. (2006). Environmental impacts of bench blasting at Hisarcik Boron open pit mine in Turkey. *Environmental Geology*, 50(7), 1015-1023.
- Keith, C. M., Crampin, S. (1977). Seismic body waves in anisotropic media: reflection and refraction at a plane interface. *Geophysical Journal International*, 49(1), 181-208.
- Khandelwal, M., Singh, T. N. (2006). Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach. *Journal of Sound and Vibration*, 289(4-5), 711-725.
- Konya, C. J., Walter, E. J. (1990). *Surface blast design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Kumar, R., Choudhury, D., Bhargava, K. (2016). Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 341-349.
- Kuzu, C. (2008). The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(5), 405-414.
- Langefors, U., Kihlström, B. (1963). *The modern technique of rock blasting*. New York: Wiley.
- Lee, N. (2011). The effects of various wet-hole loading methods on powder factor. *Proceedings of the 37th Conference on Explosives and Blasting Technique*, San Diego, California.
- Linehan, P., Wiss, J. F. (1982). Vibration and air blast noise from surface coal mine blasing. *Mining Engineering*, 34(4).
- Lopez Jimeno, C., López Jimeno, E., Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. AA Balkema.
- López-Jimeno, C., López-Jimeno, E., Bermúdez, P. G. (2017). *Manual de perforación, explosivos y voladuras: minería y obras públicas*. Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Proyectos de Ingeniería.
- Lownds, C. M., & Piel, W. H. (2019). Wireless detonators with state sensing, and their use. U.S. Patent No. 10,267,611. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Lui, Q., Ludwig, G. (1996). A blast damage study in blasthole open stope mining. *Proceedings of the 5th international symposium on rock fragmentation by blasting*, Vienna, 451-459.

- Mandal, S. K. (2012). Mathematical model to locate interference of blast waves from multi-hole blasting rounds. *Engineering*, 4(03), 146.
- McKenzie, C. (1990). Quarry blast monitoring: technical and environmental perspectives. *Quarry Management*, 17, 23-4.
- Melnikov, N. V. (1962). Influence of explosive charge design on results of blasting. *Mining Research*, 147-155.
- Mesec, J., Kovač, I., Soldo, B. (2010). Estimation of particle velocity based on blast event measurements at different rock units. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 1004-1009.
- Mohamadnejad, M., Gholami, R., Ataei, M. (2012). Comparison of intelligence science techniques and empirical methods for prediction of blasting vibrations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 238-244.
- Mohamed, M. T. (2011). Performance of fuzzy logic and artificial neural network in prediction of ground and air vibrations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), 845.
- Monjezi, M., Baghestani, M., Faradonbeh, R. S., Saghand, M. P., Armaghani, D. J. (2016). Modification and prediction of blast-induced ground vibrations based on both empirical and computational techniques. *Engineering with Computers*, 32(4), 717-728.
- Müller, T. M., Gurevich, B., Lebedev, M. (2010). Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks—A review. *Geophysics*, 75(5), 75A147-75A164.
- Murmu, S., Maheshwari, P., Verma, H. K. (2018). Empirical and probabilistic analysis of blast-induced ground vibrations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103, 267-274.
- Nateghi, R. (2011). Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(6), 899-908.
- Nicholls, H. R., Johnson, C. F., Duvall, W. I. (1971). *Blasting vibrations and their effects on structures*. US Government Printers.
- Ongen, T., Karakus, D., Konak, G., Onur, A. H. (2018). Assessment of blast-induced vibration using various estimation models. *Journal of African Earth Sciences*, 145, 267-273.
- Oriard, L. L. (1989). The scale of effects in evaluating vibration damage potential. *Proceedings of the 15th Annual Conference on Explosives and Blasting Research*, International Society of Explosives Engineers, 161-176.
- Ozer, U. (2008). Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy–Kartal metro tunnel. *Engineering Geology*, 100(1-2), 82-90.
- Park, D., Jeon, S. (2010). Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a blasthole. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(5), 752-761.
- Pyrak-Nolte, L. J., Myer, L. R., Cook, N. G. (1990). Transmission of seismic waves across single natural fractures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B6), 8617-8638.
- Pyrak-Nolte, L. J., Myer, L. R., Cook, N. G. (1990). Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B7), 11345-11358.
- Rai, R., Singh, T. N. (2004). A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors. *Indian Journal of Engineering and Material Sciences*, 11:178e84.
- Ramírez-Oyanguren, P., Alejano-Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes* (No. 727). Red DESIR.
- Roy, P. P. (1991). Prediction and control of ground vibration due to blasting. *Colliery Guardian*, 239(7), 215-219.
- Shao, S., Petrovitch, C. L., Pyrak-Nolte, L. J. (2015). Wave guiding in fractured layered media. *Geological Society, London, Special Publications*, 406(1), 375-400.
- Shi, X. Z., Chen, S. R. (2011). Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(8), 1154-1158.
- Simangunsong, G. M., Wahyudi, S. (2015). Effect of bedding plane on prediction blast-induced ground vibration in open pit coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 1-8.
- Singh PK, Vogt W, Singh RB, Singh MM, Singh DP. Response of surface structures to rock blasting. *Miner Res Eng*. 1997;6(04):185–194.
- Singh, T. N., Dontha, L. K., Bhardwaj, V. (2008). Study into blast vibration and frequency using ANFIS and MVRA. *Mining Technology*, 117(3), 116-121.
- Singh, P., Narendrula, R. (2007). The influence of rock mass quality in controlled blasting. *Proceedings of the 26th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown*, 314-319.
- Singh, T. N., Singh, V. (2005). An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines. *Geotechnical & Geological Engineering*, 23(3), 249-262.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., Dowding, C. H. (1980) *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*. United States Department of the Interior, United States Bureau of Mines.
- Siskind, D. E., Fumanti, R. R. (1974). Blast-produced fractures in Lithonia granite: 23F. US. BUR. MINES, RI 7901, 1974, 38P. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 11, No. 11, p. A219.
- Takahashi, Y., Sasaoka, T., Sugeng, W., Hamanaka, A., Shimada, H., Saburi, T., Kubota, S. (2018). Study on Prediction of Ground Vibration in Consideration of Damping Effect by Fragment in the Rock Mass. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6(06), 1-11.
- Taqieddin, S. A. (1986). Ground vibration levels: prediction and parameters. *Mining Science and Technology*, 3(2), 111-115.
- Trigueros, E., Martínez, J. M. (2009). Limitación de carga operante para voladuras en canteras de roca ornamental: Aplicación a una cantera de Piedra Bateig. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (182), 16-21.
- Trigueros, E., Cánovas, M., Muñoz, J. M., Cospedal, J. (2017). A methodology based on geomechanical and geophysical techniques to avoid ornamental stone damage caused by blast-induced ground

- vibrations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100(93), 196-200.
- Uysal, Ö., Arpaz, E., Berber, M. (2007). Studies on the effect of burden width on blast-induced vibration in open-pit mines. *Environmental Geology*, 53(3), 643-650.
- Worsey, P. N. (1986). Understanding Vibrations from Multihole Blasts Using Short Delay Periods. *Journal of Explosives Engineering*, International Society of Explosives Engineers (ISEE).
- Wu, Y. K., Hao, H., Zhou, Y. X., Chong, K. (1998). Propagation characteristics of blast-induced shock waves in a jointed rock mass. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(6), 407-412.
- Yuill, G. J. (2003). Simulation of the generation and propagation of blast induced shock waves. Doctoral dissertation, University of Leeds.
- Zhang, Z. X. (2016). *Rock fracture and blasting: theory and applications*. Elsevier Science, Oxford.