

Tecnología de los Explosivos

Tema 4.2. Vibraciones y onda aérea



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

VIBRACIONES

La **vibración es el fenómeno de transmisión de energía** por la propagación de un movimiento ondulatorio en un medio, pudiendo recurrir grandes distancias. Está caracterizado por un emisor (generador de vibraciones), y medio de transmisión, y un receptor. En el caso de las voladuras a cielo abierto, la transmisión de dichas vibraciones podrá producirse tanto por el terreno, como por la atmósfera.

Puede distinguirse entre ondas internas y superficiales. Las internas, a su vez, en ondas p (compresivas, ocasionan movimiento en la dirección de propagación, con cambios de volumen, no de forma), s (transversales, originan movimientos de partícula perpendicular al de la onda, con cambios de forma, no de volumen, y velocidad intermedia entre las p y las superficiales. Las ondas superficiales, Rayleigh (R) y Love (Q), son complejas y no resultan relevantes en el nivel de vibración.

Para definir bien las **vibraciones**, deben distinguirse dos aspectos fundamentales: la propagación o transmisividad en el medio, el movimiento de las partículas del medio debidas a dicha vibración, lo que conlleva la consideración de dos tipos fundamentales de velocidades:

- **De la onda** (o de propagación por el medio).
- **De la partícula** (relativa a las oscilaciones de la partícula excitada a consecuencia de la onda).

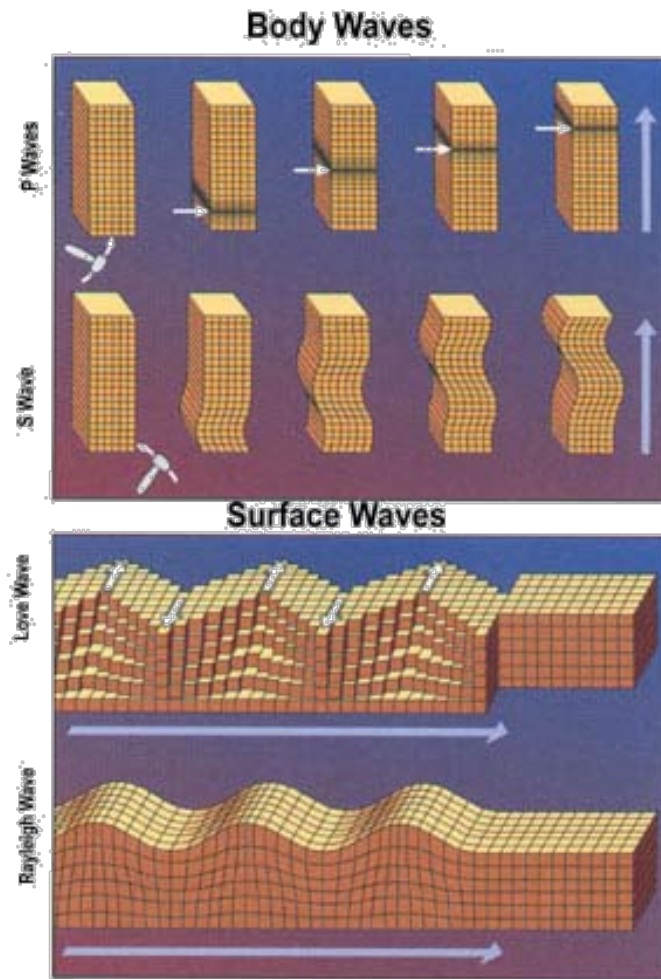


Figura: <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=P%20wave>.
Dominio Público.

VIBRACIONES

Las partículas, por tanto, al vibrar oscilan respecto a su posición de equilibrio, conllevando un desplazamiento (amplitud), con velocidad (parámetro más habitual para medir la vibración) y aceleración. Conociendo dichos parámetros, puede evaluarse el nivel de vibración.

La transmisión de la vibración generada por barrenos con espaciados con distancias pequeñas se considerará desarrollada en base a ondas elásticas. En voladuras normales, puede considerarse que un 40% de la energía total se transforma en energía vibratoria.

La amortiguación al aumento de superficie del tren de ondas, asociado a la geometría cilíndrica o esférica. La energía caracterizada por una alta frecuencia se absorbe con mayor celeridad que la de baja frecuencia, por lo que serán estas últimas las determinantes a distancias mayores con respecto al foco de emisión.

Para medir las vibraciones debe determinarse la expresión que liga la velocidad con los parámetros influyentes. La velocidad de vibración en mm/s a la que un punto estará expuesto puede expresarse como una función de la carga Q de explosivo (Kg) y la distancia ($D(m)$) entre los puntos de disparo y medida (la relación será inversamente proporcional a la distancia).

VIBRACIONES

$$V = K \cdot Q^{\alpha} \cdot D^{\beta}$$

K, α y β representan aspectos relativos a la geología del terreno, geometría de capas, diferencias de cota entre puntos de disparo y medición, propagación, energía empleada para la generación de vibraciones, etc. Dada la irregularidad de los terrenos y la variabilidad de la energía, la obtención de dichas expresiones se debe realizar en base a la realización de estudios de vibraciones. Estos ensayos se destinan a hallar sus valores por un ajuste mínimo-cuadrático en base a los valores de V, Q y D. El coeficiente de correlación (r) indica si los puntos (V,Q,D) presentan un adecuado ajuste a una determinada ley o no, variando entre 1 si el ajuste es perfecto, y 0 cuando no existe ajuste alguno.

Suele recurrirse a la representación de la gráfica velocidad de vibración frente a distancia reducida, respondiendo esta última a una expresión del tipo: $D_r = D/Q^{\alpha/\beta}$. Al tomar logaritmos:

$$\log V = \log K - \beta \log (D/Q^{\alpha/\beta})$$

VIBRACIONES

El registro de vibraciones se desarrolla con geófonos, aparatos que transforman las vibraciones del terreno en impulsos eléctricos, e irán conectados al sismógrafo. De las variantes electrodinámica y piezoeléctrica, la segunda es la más interesante para captar las ondas de baja frecuencia, que conllevan las peores consecuencias, y se atenúan más lentamente, por lo que su alcance es mayor. Se requiere que sea robusto y de elevada autonomía, con registro continuo y frecuencia elevada de muestreo (mínimo 1 KHz), con objeto de analizar los valores pico de las ondas y las frecuencias dominantes.

SISMÓGRAFO



GEÓFONO

VIBRACIONES

FACTORES INFLUYENTES EN LAS VIBRACIONES	
TIPO DE EXPLOSIVO	Los explosivos de alta energía de tensión (E.T., elevado poder rompedor), generan más vibraciones.
RETARDO	La dispersión de los retardos respecto al tiempo nominal (5 al 15%) puede ocasionar acoplamientos de cargas subsecuentes.
DIÁMETRO DE PERFORACIÓN	La carga es función del cuadrado del diámetro, por lo que su aumento es desfavorable para las vibraciones. El barreno podría fraccionarse y secuenciarse en caso de ser necesario.
RELACIÓN ALTURA BANCO	Un valor próximo a 2 produce buen arranque con confinamiento razonable.
EXCESO DE CONFINAMIENTO	Aumenta el nivel de vibraciones.
DESACOPLAMIENTO	En general reduce las vibraciones.
TAMAÑO DE LA VOLADURA	Si las secuencias son excesivamente reducidas por el tamaño de la voladura, puede aumentar el nivel de vibración.
CONSUMO ESPECÍFICO	El aumento del consumo específico puede aumentar las vibraciones y dar proyecciones, pero una reducción excesiva implica reducir las proyecciones a costa de aumentar las vibraciones (reducción del consumo en un 20% puede triplicar el nivel de vibraciones).
GEOLOGÍA	Las discontinuidades entre la voladura y las estructuras puede reducir las vibraciones. Si ambas se ubican en un mismo estrato, es posible que por el contrario la vibración se intensifique. Es necesario tener un buen conocimiento de la geología local.
DIRECCIONAMIENTO DE LA VOLADURA	Orientar el avance de la voladura en sentido contrario a la ubicación de la estructura puede reducir las vibraciones que ésta experimente.
PRECORTES	Las voladuras de precorte pueden contribuir a la reducción de las vibraciones a las estructuras, al implicar la generación de un plano de discontinuidad previo a la(s) voladura(s) principal(es) que reducirán las vibraciones transmitidas más allá de dicha superficie).

Fuentes: López Jimeno et al. (2003): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas».

Fernández Miguel, I.: «Vibraciones y Onda Aérea». «Diseño, Ejecución y Control del Voladuras». 18-22 de julio de 2011. Cursos de Verano de la Universidad de Cantabria.

Las estructuras deberán protegerse garantizando las siguientes velocidades (o desplazamientos, en el caso de frecuencias intermedias) máximas, conforme a la naturaleza de dichas estructuras:

- **Estructura Grupo I:** Estructuras industriales/ligeras/metálicas.
- **Estructura Grupo II:** Viviendas.
- **Estructura Grupo III:** Monumentos y estructuras a proteger.

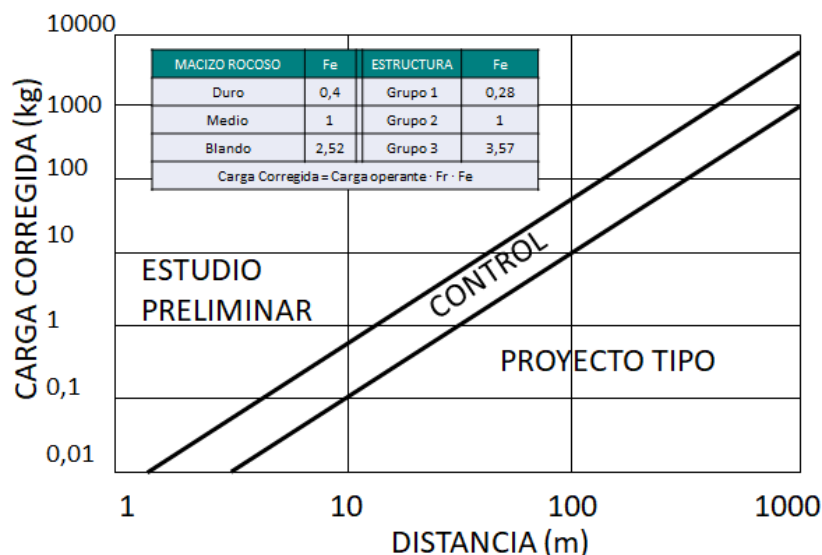
FRECUENCIAS EN Hz			
	2 - 15	15 - 75	> 75 Hz
	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)	Velocidad (mm/s)
GRUPO I	20	0,212	100
GRUPO II	9	0,095	45
GRUPO III	4	0,042	20

$$V(\text{mm/s}) = 2\pi f(\text{Hz})D(\text{mm})$$

VIBRACIONES

CRITERIO DE DAÑOS

UNE 22.381.93



Nota: Versión simplificada del ábaco. Para una determinación precisa, debe acudir a la Norma UNE 22.381.93.

La norma distingue tres tipos de rocas, en función de la velocidad de transmisión de las ondas p, considerando por tanto comportamientos distintos en cuanto a amplitud y frecuencia en función del tipo de roca. (Blanda, $V_p < 2000$ m/s; media, $2000 < V_p < 4000$ m/s; dura, $V_p > 4000$ m/s).

Proyecto tipo: nivel menor de exigencia justificación teórica, obtenida por aplicación directa de la norma, de que los niveles de vibración no van a alcanzar en ningún caso los límites establecidos.

Control de vibraciones: de grado intermedio de exigencia, medición real en las voladuras iniciales del proyecto, para determinar las vibraciones generadas.

Estudio Preliminar: medida más exigente, para aquellos casos en que se predicen niveles superiores a los definidos por la norma. Consiste en obtener la ley de transmisibilidad del terreno en que se va a ejecutar el proyecto mediante ensayos reales (disparo de cargas y medida de vibraciones).

VIBRACIONES

EJEMPLO DE DETERMINACIÓN DE TABLA CARGA-DISTANCIA

En una zona se desean dar voladuras, pero produciendo niveles de voladuras que no pongan en peligro la integridad de estructuras existentes en las inmediaciones. A partir de un estudio inicial de vibraciones, se determina que la frecuencia dominante en la zona es de 10 Hz, las estructuras existentes pertenecen a los Grupos I y II (UNE 22-381-93). Para la expresión general $V = K \cdot (Q)^\alpha \cdot D^\beta$ las constantes definidas a partir del ensayo será de 85,89, $\alpha = 0,69$ y $\beta = -1,17^*$. Determine la tabla carga distancia para la situación de partida descrita.

UNE 22.381.93

$$9 = 85,89 \cdot (Q)^{0,69} \cdot D^{-1,17}$$

Sustituyendo con diversos valores de la distancia, se obtiene para cada una de ellos la carga operante admisible.

FRECUENCIAS EN Hz			
	2 - 15	15 - 75	> 75 Hz
	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)	Velocidad (mm/s)
GRUPO I	20	0,212	100
GRUPO II	9	0,095	45
GRUPO III	4	0,042	20

La estructura más restrictiva de las existentes será del Grupo II, por lo que se emplea su desplazamiento máximo admisible para determinar la velocidad máxima:

$$V = K \cdot (Q)^\alpha \cdot D^\beta ; V = 85,89 \cdot (Q)^{0,69} \cdot D^{-1,17}$$

Distancia (m)	Carga (kg)
100	93,69
200	303,31
300	603,22
400	982,502
500	1434,36
...	
1000	4646,23

*Fuente de los parámetros: Pérez Cáliz, J.: «Explotación de una cantera de áridos en el T.M. de Priego de Córdoba».

VIBRACIONES

EJEMPLO DE DETERMINACIÓN DE TABLA CARGA-DISTANCIA

UNE 22.381.93

En una zona se desean dar voladuras, pero produciendo niveles de voladuras que no pongan en peligro la integridad de estructuras existentes en las inmediaciones. A partir de un estudio inicial de vibraciones, se determina que la frecuencia dominante en la zona es de 10 Hz, las estructuras existentes pertenecen a los Grupos I y II (UNE 22-381-93). Para la expresión general $V = K \cdot (Q)^\alpha \cdot D^\beta$ las constantes definidas a partir del ensayo será de 85,89, $\alpha = 0,69$ y $\beta = -1,17^*$. Determine la tabla carga distancia para la situación de partida descrita.

En el caso estudiado, la frecuencia de 10 Hz queda comprendida entre 2 y 15 Hz. Para la estructura más limitante de las anteriormente descritas, Grupo II, el máximo desplazamiento admisible será de 9 mm/s. **En caso de haber caído en la zona intermedia, por ejemplo, con frecuencia dominante de 40 Hz, debería obtenerse la velocidad a partir de la expresión que la relaciona entre con el desplazamiento (en ese caso sería 0,095 mm/s para estructuras del Grupo II, por lo que se obtendría, se tiene que $V = 2 \pi f d$, por lo que $V = 2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 0.095 = 23,87$ mm/s.**

ONDA AÉREA

La onda de choque generada en una detonación produce una onda de presión en el aire, fluctuante con una determinada frecuencia, generando ruido. En consecuencia, éste podrá determinarse si se calcula la sobrepresión que lo genera. Los principales parámetros a considerar son la amplitud (incremento o disminución de la presión del aire, pudiendo expresarse en unidades de presión, siendo común recurrir a los dB lineales), frecuencia (Hz, número de vibraciones por segundo, y duración (s), influyendo en la energía total absorbida por la estructura.

CAUSAS

- La vibración, fragmentación y desplazamiento de la roca en la cara libre (predominante si la voladura está diseñada de forma adecuada).
- La vibración del piso.
- El escape de gases por las fisuras de las rocas.
- Escape a través del taco.
- Posible detonación del explosivo al aire.



Causas de la onda aérea.

Fuentes: López Jimeno et al. (2003): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas».
Adaptado de: Fernández Miguel, I.: «Vibraciones y Onda Aérea». «Diseño, Ejecución y Control del Voladuras». 18-22 de julio de 2011. Cursos de Verano de la Universidad de Cantabria.

ONDA AÉREA

FACTORES INFLUYENTES

- Tipo y cantidad de explosivo.
- Método de iniciación.
- Geología y topografía.
- Distancia y condiciones de la estructura.
- Condiciones atmosféricas.

EFFECTOS

Los efectos de la onda aérea son mayores cuando coinciden las frecuencias de la estructura y la onda de presión, por lo que lo que las voladuras que generen ondas de baja frecuencia (como por ejemplo los taqueos), suelen ocasionar quejas. Los efectos de la onda aérea pueden ser aparatosos en cristales, enlucidos, fachadas... Si bien la respuesta humana suele ser más restrictiva que las consecuencias que puedan ocasionar sobre las estructuras.

ALTA FRECUENCIA

$$P(Pa) = 179191 \cdot \left(\frac{D(m)}{Q_m(kg)^{1/3}} \right)^{-2.2}$$

- Referida a la carga por microrretardo (Q_m).

BAJA FRECUENCIA

$$P(Pa) = 1778,5 \cdot \left(\frac{D(m)}{Q_t(kg)^{1/3}} \right)^{-1.27}$$

- Referida a la carga total (Q_t).

ONDA AÉREA

EFFECTOS

AFECCIÓN A LAS PERSONAS (US Bureau of Mines)

MEDIDA	AMPLITUD LINEAL PICO
Umbral permisible	136 dB
Nivel de precaución	136-128 dB
Nivel seguro	128 dB

AFECCIÓN A ESTRUCTURAS (CRISTALES)

$$dB = l^{-0,035} e^{0,1} \cdot 175 \cdot R^{-0,07}$$

- **dB**: amplitud para la rotura en dB pico.
- **l**: dimensión mayor del cristal (cm).
- **e**: espesor del cristal (mm).
- **R**: parámetro definido en base a la ocurrencia de la rotura (1 para un 50% de riesgo de rotura, 3,5 para un 1% de riesgo de rotura, 7,3 para un 0,1% de riesgo de rotura).

- **144 dB ocasionarían una ocurrencia de un 0,1% de rotura.**

ONDA AÉREA

MEDIDAS PARA REDUCIR LA ONDA AÉREA

- Reducir el diámetro de perforación.
- Acortar la longitud del barreno si es posible.
- Secuenciar la carga dentro de cada barreno.
- Utilizar el mayor número de tiempos posibles.
- Secuenciar con los primeros tiempos los barrenos más próximos a las estructuras, e irse alejando de ellas con los tiempos más altos.
- Adecuar el consumo específico.
- Emplear relaciones $H/B > 2$.
- Hacer una perforación de calidad.
- Dimensionar adecuadamente la sobreperforación.
- Disponer frentes con la mayor superficie libre posible.
- Cuando sea posible, disponer pantallas entre las voladuras y las estructuras a proteger.
- Revisar la carga de barrenos, máxime en el caso de cuevas o coqueras que puedan ocasionar concentraciones peligrosas de carga.
- Secuenciar de tal manera que se evite el refuerzo o la superposición de ondas.
- Minimizar el empleo de cordón detonante, o cubrirlos si fuese necesario.