

Tema 10. Vibraciones y Onda Aérea causadas por la voladura

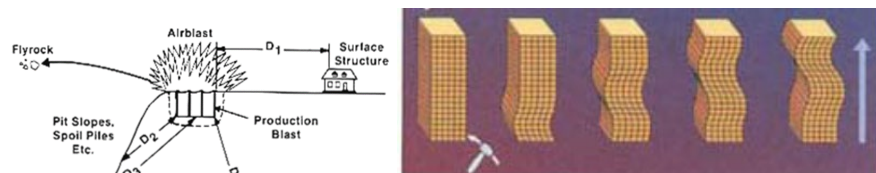
Índice del Tema:

1. INTRODUCCIÓN
2. ONDAS MECÁNICAS
3. DAÑOS POR VIBRACIONES
4. NORMATIVA ESPAÑOLA SOBRE VIBRACIONES PROVOCADAS POR VOLADURA
5. ONDA AÉREA

1.Introducción

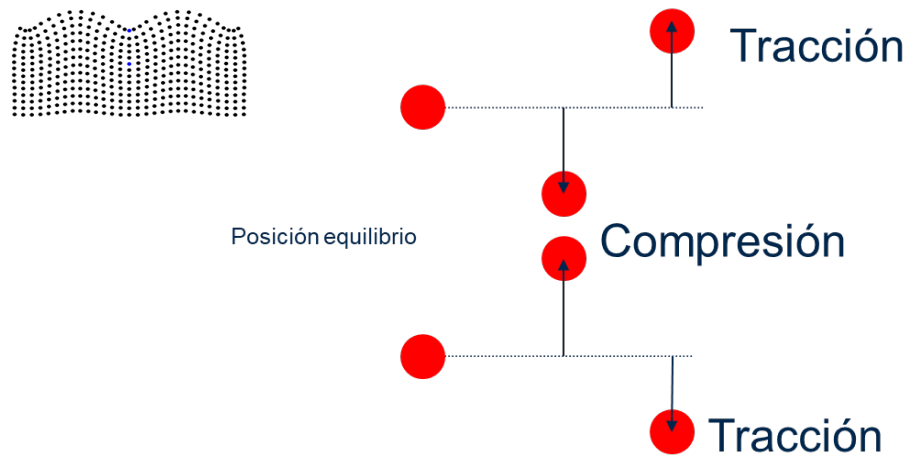
Cuando detona el explosivo en el interior del barreno se produce una perturbación en el medio que lo rodea que se propaga en forma de ondas vibratorias por el macizo (onda sísmica) y por el aire (onda aérea). La energía transportada por dichas ondas será la liberada por el explosivo menos la consumida en fracturar, calentar y desplazar el material de la voladura. Berta estima que en torno al 80% de la energía del explosivo se trasmite en forma de dichas ondas repartiéndose aproximadamente por igual entre ellas (40% terreno-40% aire).

Las ondas conforme se alejan del barreno se amortiguan, al principio fuertemente debido al gran consumo de energía en la fracturación de la roca y, posteriormente, más lentamente debido al aumento de superficie sobre las que actúan (divergencia geométrica). Estas ondas pueden ocasionar daños y molestias a las personas y estructuras, por lo que hay que prever sus magnitudes.



Gran parte de la energía del explosivo se transmite como ondas que se propagan en el entorno

Por vibración de una partícula se entiende como el movimiento oscilatorio de la misma, alrededor de una posición de equilibrio, caracterizado por su amplitud, frecuencia, velocidad y aceleración de vibración. Cuando el término hace referencia a un sistema, entonces el fenómeno comprende a las vibraciones de las partículas que lo componen. Dichas vibraciones provocan **deformaciones** en el sistema y dichas deformaciones producen esfuerzos/tensiones en el sistema de diversa índole.



Esfuerzos de tracción y compresión ocasionados por la vibración de un sistema de dos partículas

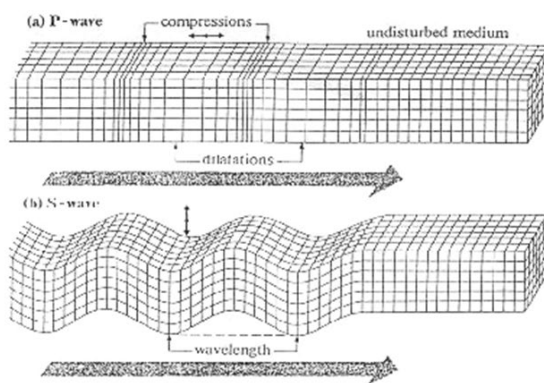
Las deformaciones se propagan y transmiten por el terreno, las estructuras y el aire como ondas mecánicas. Dichas ondas se caracterizan además por su velocidad de propagación y por su longitud de onda.

2.Ondas mecánicas

Son varios los tipos de onda por lo que se transmite la energía de las ondas. De interés en el campo de voladuras son:

Las ondas internas o volumétricas (se propagan por el interior del medio):

- P o longitudinales: producen esfuerzos de compresión tracción en la dirección de propagación de la onda
- S o transversales: producen esfuerzos cortantes en la dirección perpendicular a la de propagación de la onda



$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

$$\left(\frac{C_p}{C_s}\right) = \left(\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}\right)^{0.5}$$

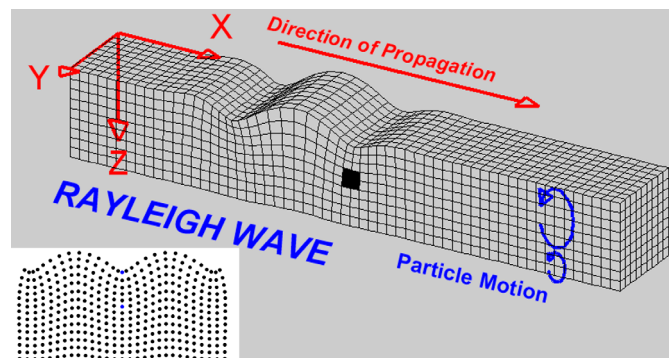
$$\text{si } \nu = 0.25 \text{ se obtiene } \left(\frac{C_p}{C_s}\right) = 1.73$$

Propagación de las ondas internas: C_p (C_s) es la velocidad de propagación de la onda P (S), E es el módulo de Young y ν es el coeficiente de Poisson

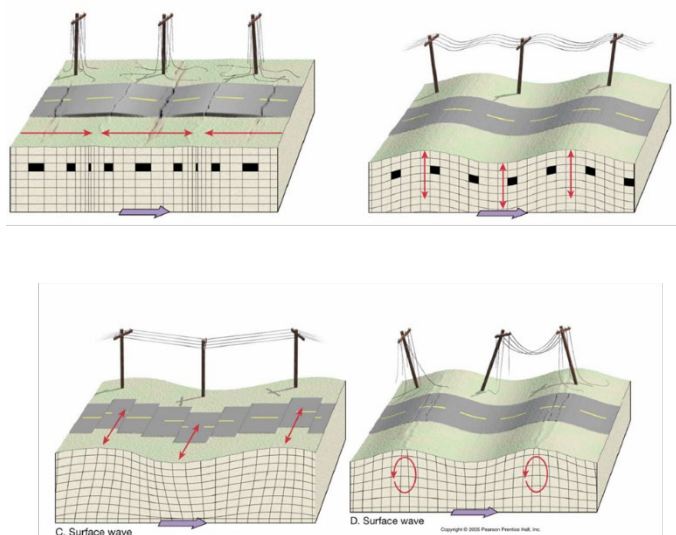
Cuando las ondas internas alcanzan interfaces de diferentes características elásticas se producen las ondas superficiales, de las que destacan las:

- Ondas Rayleigh: ocasionan un movimiento elíptico retrógrado en un plano vertical (similares a las que se propagan en el mar). Se propagan a menor velocidad que las anteriores (en torno al 92% de la velocidad de las ondas S), variando su amplitud exponencialmente con la profundidad. Son, potencialmente, las principales responsables de los daños debido a que transportan gran parte de la energía -su divergencia geométrica es menor-, y a que provocan mayores deformaciones.

- Ondas Love: se forman cuando la impedancia acústica aumenta con la profundidad. Parecidas a las anteriores, pero el movimiento es en un plano horizontal.

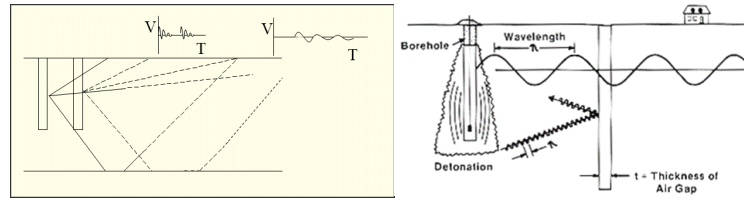


Propagación y deformaciones producidas por las Ondas Rayleigh



Movimiento producido por las diferentes ondas

Tras la voladura, a cada punto del macizo le llega un tren de ondas complejo (ondas directas, reflejadas y refractadas) con la particularidad de que conforme se aleja de la fuente emisora su frecuencia va disminuyendo. Esto es debido a la presencia de microfisuras y microporos en el macizo rocoso que hacen que éste actúe como un filtro pasabaja (se filtran las componentes de alta frecuencia dejando pasar únicamente las de baja frecuencia).



Según el tren de ondas se aleja de la voladura disminuye su frecuencia (el macizo rocoso actúa como filtro pasabaja)

Además de la distancia, el rango de frecuencias que llega a cada punto depende de la fuente (longitud de los barrenos y retardo en la salida) y del propio terreno por el que se propagan.

Si bien el tren de ondas no es armónico, para analizarlo se aproxima, localmente, a una onda sinusoidal tal como se muestra en la figura siguiente.

$$y = A \sin \left[2\pi \left(x / \lambda + t / T \right) \right] \quad \begin{aligned} T &= 1/f \\ cT &= \lambda \end{aligned}$$

y es la parcial de y con respecto a t ; ϵ es la parcial con respecto a x

$$\begin{aligned} |v_{\max}| &= 2\pi f A & |\epsilon_{\max}| &= 2\pi A / \lambda = 2\pi f A / c \\ |\dot{v}_{\max}| &= (2\pi f)^2 A & |\epsilon_{\max}| &\sim v / c \end{aligned}$$

Aproximación sinusoidal de las vibraciones: y es la amplitud, v es la velocidad de vibración, T es el periodo, λ la longitud de onda, c es la velocidad de propagación de la onda y ϵ es la deformación

El rango de valores de los parámetros que definen la onda es muy variable dado que dependen de la fuente, del medio por el que se propaga y de la distancia de medida a la fuente.

En la tabla de la derecha se dan algunos rangos de valores.

Parámetro	Rango típico en voladuras
A	$10^{-4} \text{ --- } 10 \text{ mm}$
v	$10^{-4} \text{ --- } 10^3 \text{ mm/s}$
a	$10 \text{ --- } 10^5 \text{ mm/s/s}$
T	$0.5 \text{ --- } 2 \text{ s}$
λ	$30 \text{ --- } 1500 \text{ m}$
f	$0.5 \text{ --- } 200 \text{ Hz}$

Por otra parte, en la figura anterior se observa que la *deformación máxima es proporcional a la velocidad de vibración e inversamente proporcional a la velocidad de propagación de la onda*. Esta relación es importante ya que, como se verá a continuación, la velocidad máxima de vibración es uno de los parámetros implicados en la estimación del potencial de daños que pueden causar las ondas en las estructuras.

3.Daños por vibraciones

3.1 Umbral de daños

Los daños surgen como consecuencia de las deformaciones inducidas en las estructuras, cuando se supera un determinado umbral de vibración, siendo complicados de predecir e incluso de definir ya que depende de numerosos factores:

- La fuente de la perturbación que origina el tren de ondas
- El medio por el que se propaga y que lo altera
- El estado, la naturaleza y situación de la estructura a proteger
- La interacción entre la onda y la estructura con diferentes mecanismos productores de daño
- La propia concepción del término daño

Todo ello hace que las normativas de los diferentes países al respecto sean conservadoras. En ellas se suele hacer referencia al término **umbral de daños**, considerando que *superado dicho umbral existe cierta probabilidad de ocurrencia de alguna fisura de tipo «cosmético», esto es, del grosor de un pelo (0.1 mm).*

En un estudio de Holmberg et al. (1981) sobre un periodo de 15 años se obtuvo que de media surgen unas 15 fisuras al año en una casa por causas ambientales. Así pues, si bien la utilización explícita del término daño para definir dicho umbral puede ser conveniente para dar relevancia al asunto en cuestión, puede, a su vez, dar lugar a malinterpretaciones en cuanto a las implicaciones de dicho término, dado que suele interpretarse con connotaciones más severas.

3.2 Parámetros representativos para establecer el criterio de daños en estructuras

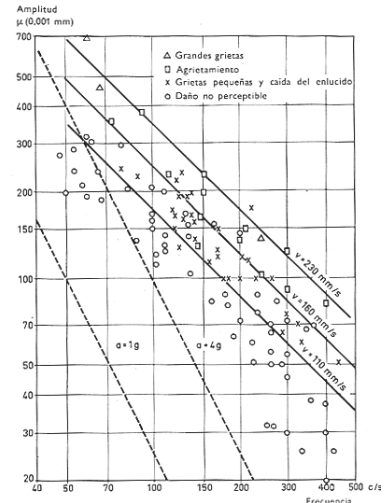
Langefors realizó un análisis de las vibraciones provocadas por voladuras y sus efectos en casas edificadas en roca dura ($c = 5000$ m/s). Del estudio de los datos recopilados (gráfica de la derecha), se infiere que el criterio de daños sería de la forma:

$$\log A < -\log f + kte$$

$$\log A + \log f < kte$$

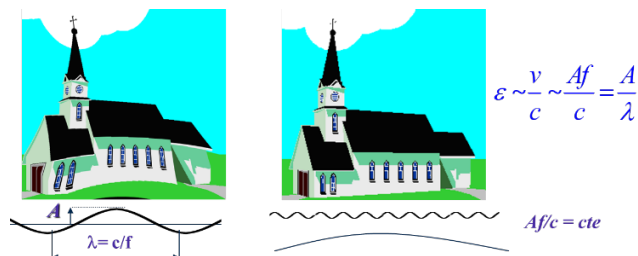
$$\log(Af) < kte$$

$$Af < kte' \rightarrow v < \text{valor}$$



Para roca dura Langefors estableció, de forma conservadora, el umbral de daños en 70 mm/s. Para terrenos con velocidades de propagación de las ondas menores estableció el umbral inversamente proporcional a dicha velocidad – recuerden que *deformación máxima es proporcional a la velocidad de vibración e inversamente proporcional a la velocidad de propagación de la onda*.

Pero la cuestión es algo más compleja ya que el riesgo de que una onda, con una v/c dada, ocasione daños a una estructura será mayor cuando la longitud de onda sea del orden de la dimensión de la estructura: se producen mayores asientos diferenciales en la cimentación, y cuando su frecuencia se acerque a la de resonancia de la estructura. Además, dependerá también de la sensibilidad de la estructura a las vibraciones.



En el riesgo de daño hay que considerar la frecuencia y la naturaleza de la estructura

Las frecuencias naturales en edificaciones suelen estar entre: 5-20 (30) Hz, correspondiendo a la superestructura entre 5-15 Hz y a los suelos y muros: 12-20 Hz.

Por otra parte, en los años 80 la USBM (United States Bureau of Mines) realizó un estudio de las frecuencias predominantes producidas por voladuras. En dicho estudio se puso de manifiesto que en la mayoría de las ocasiones las frecuencias predominantes están dentro del rango de las frecuencias naturales de las edificaciones. Así pues, está claro que la frecuencia es otro parámetro que hay que incluir para establecer un criterio de daños.

Además de los trabajos de Langefors y de la USBM, desde mediados del siglo pasado varios investigadores y organizaciones han realizado estudios experimentales tratando de relacionar

los daños ocasionados en varios tipos de edificaciones con las vibraciones que le llegaban del terreno provocadas en voladuras. De forma sintética las principales conclusiones de los mismos son:

- La velocidad máxima (pico) de vibración es el mejor y más práctico descriptor para regular el potencial de daño de una onda vibratoria
- También hay que tener en cuenta la frecuencia de la vibración dado que el potencial de daño para bajas frecuencias (<40Hz) es mayor que para altas frecuencias (>40Hz) – esto es debido a que la frecuencia natural de las edificaciones está precisamente por debajo de los 40Hz (generalmente por debajo de los 20Hz) pudiendo entonces entrar la estructura en resonancia con amplificación de las vibraciones

Frecuencias naturales en edificaciones

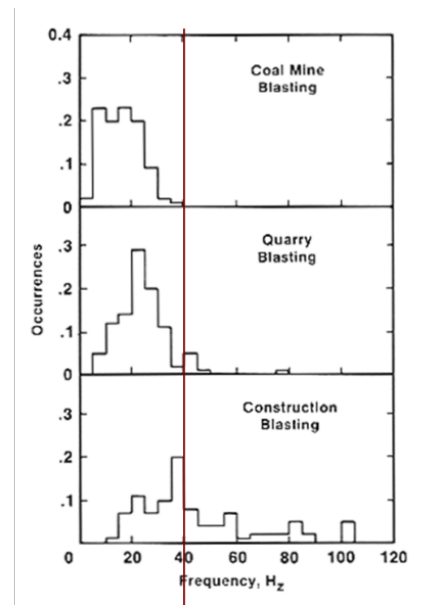
$$F(Hz) = (0,1 \times n)^{-1}$$

$$F(Hz) = 11,1 \times (L_p/H)$$

n = n° de plantas

L_p = dimensión en planta

H = altura



>Riesgo de daños

3.3 Criterios de Daños

Las conclusiones de diversos estudios realizados sobre la cuestión se sintetizan a continuación:

- En general en los trabajos realizados (Langefors, Kihlstrom and Westerberg (1957), Edward and Northwood (1959), USBM (1971), Canmet, Bauer and Calder (1977)) se establece que por debajo del umbral de 2 in/s (50 mm/s) no hay daños perceptibles
- A partir de 4 in/s (100 mm/s) pueden aparecer pequeñas grietas; y daños importantes a partir de 6-9 in/s (150 mm/s- 225 mm/s)
- De los estudios de Siskind et al. (1980) se puede inferir que por debajo de 0.5 in/s (12.5 mm/s) hay ausencia total de daño (incluye medidas de muy baja frecuencia <4Hz)

Resulta interesante comparar los valores anteriores con las vibraciones/deformaciones que originan los fenómenos habituales/naturales ocurridos en una casa (Stagg et al. (1984), Dowding (1996)).

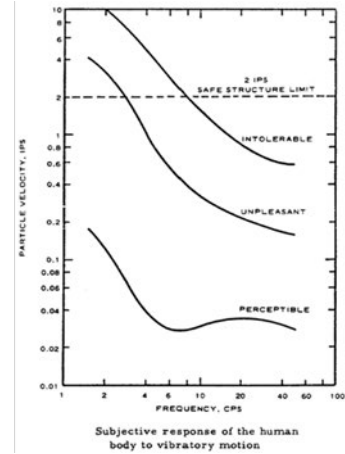
Strain Levels Induced by Household Activities
Environmental Changes and Blasting

Loading Phenomena	Site ^a	Microstrain Induced by Phenomena ($\mu\text{in./in.}$)	Corresponding Blast Vibration Level ^b (mm/s)
Daily environmental changes	K ₁	149	30.0
	K ₂	385	76.0
Household Activities			
1. Walking	S ₂	9.1	0.8
2. Heel drops	S ₂	16.0	0.8
3. Jumping	S ₂	37.3	7.1
4. Door slams	S ₁	48.8	12.7
5. Pounding nails	S ₁₂	88.7	22.4

Velocidades de vibración (equivalentes) en edificaciones, debidas a variaciones en las condiciones ambientales (lluvia, viento, humedad, temperatura) y a otros factores

Por otra parte, hay que considerar que las personas somos muy sensibles a las vibraciones, tanto más si van acompañadas de una fuerte onda aérea, lo que nos a magnificar sus posibles efectos.

vibration effects on people	frequencies 1 ÷ 10 Hz a_{\max} [mm/s ²]	frequencies 10 ÷ 100 Hz v_{\max} [mm/s]
imperceptible	10	0.16
just perceptible	40	0.64
clearly perceptible	125	2.0
annoying	400	6.4
unpleasant, painful if lasting	1000	16.0
harmful	> 1000	> 16.0



Efectos de las vibraciones sobre las personas

4. Normativa española sobre vibraciones provocadas por voladura

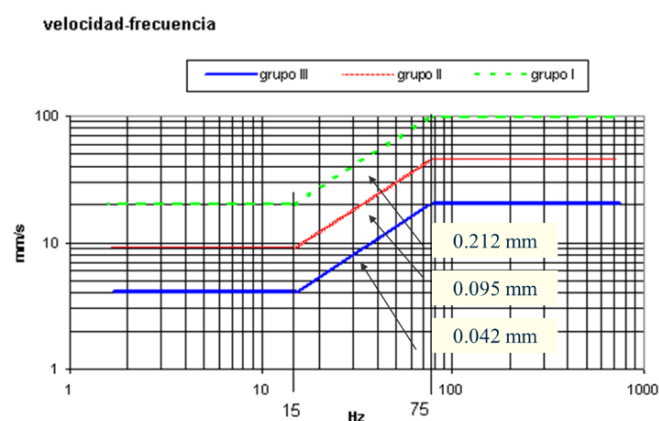
El Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (ITC 10.3.01) dicta que:

“En caso de proximidad a construcciones o instalaciones que pudieran ser afectadas por las vibraciones producidas por la voladura, la autoridad minera competente puede exigir la aplicación del contenido de la Norma UNE 22.381 «Control de vibraciones producidas por voladuras»”

Dicha norma distingue tres tipos de estructuras:

- Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado y metálicas
- Grupo II: Viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, estructuras de valor arqueológico... que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad
- Grupo III: Estructuras de valor arqueológico... que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones (ellas o los elementos contenidos)

La norma establece unos umbrales de perturbación, en función de la frecuencia principal del terreno, para cada grupo de estructura.



Umbrales de perturbación permitidos en función de la frecuencia predominante y del grupo de estructura a proteger

Así, por ejemplo, para una edificación del grupo II cimentada sobre un terreno cuya frecuencia predominante de vibración sea inferior a 15Hz la velocidad máxima (o de pico) de vibración (V_{pico}) permitida será de 9 mm/s. Note que entre los 15hz y los 75Hz se limita la amplitud máxima (su valor está indicado en la figura) lo que se traduce en un umbral de velocidad de vibración variable entre dichas frecuencias.

Para tener alguna base de comparación con la normativa de otros países se incluyen algunas tablas ilustrativas.

Norma Suiza SN 640312a (1992)

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de sollicitaciones	Valores máx. del vector de velocidad resultante (mm/s)		
1) muy poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el triple de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
2) poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el doble de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
3) susceptibilidad normal	Ocasional Recurrente Permanente	Frecuencia dominante		
		<30 Hz	30 - 60 Hz	>60 Hz
		15	20	30
		6	8	12
		3	4	6
4) particularmente susceptible	Ocasional Frecuente	Valores indicativos: entre los valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos		

DIN4150 (1999)

Tabla A.1. Valores guía máximos para velocidad de partícula DIN4150:1999

Clase de construcción	Frecuencia fundamental			NS ^a
	1 a 10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	TF ^b
1 Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos	20 ^c	20 – 40	40 – 50	40
2 Edificaciones residenciales y construcciones similares	5	5 – 15	15 – 20	15
3 Otras edificaciones sensibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases	3	3 – 8	8 – 10	8

Adaptado de DIN (2001a).

^a Nivel Superior componente horizontal.

^b Todas las frecuencias.

^c Velocidades de partícula en mm/s.

Valores umbrales de la velocidad de vibración (normas suiza y alemana)

Konon (1985) de la revisión de la diversa normativa concerniente a edificaciones de interés histórico ofrece la siguiente tabla.

Frequency Range (Hz)	Transient Vibration PPV (in/sec)	Steady-State Vibration PPV (in/sec)
1–10	0.25	0.12
10–40	0.25–0.5	0.12–0.25
40–100	0.5	0.25

Niveles máximos de vibración permitidos en edificaciones de interés histórico (Konon, 1985)

La normativa UNE no exige, lógicamente, que haya siempre que medir la velocidad de vibración. En un proyecto de voladuras, la necesidad de tomar o no medidas frente a las vibraciones depende de los siguientes factores:

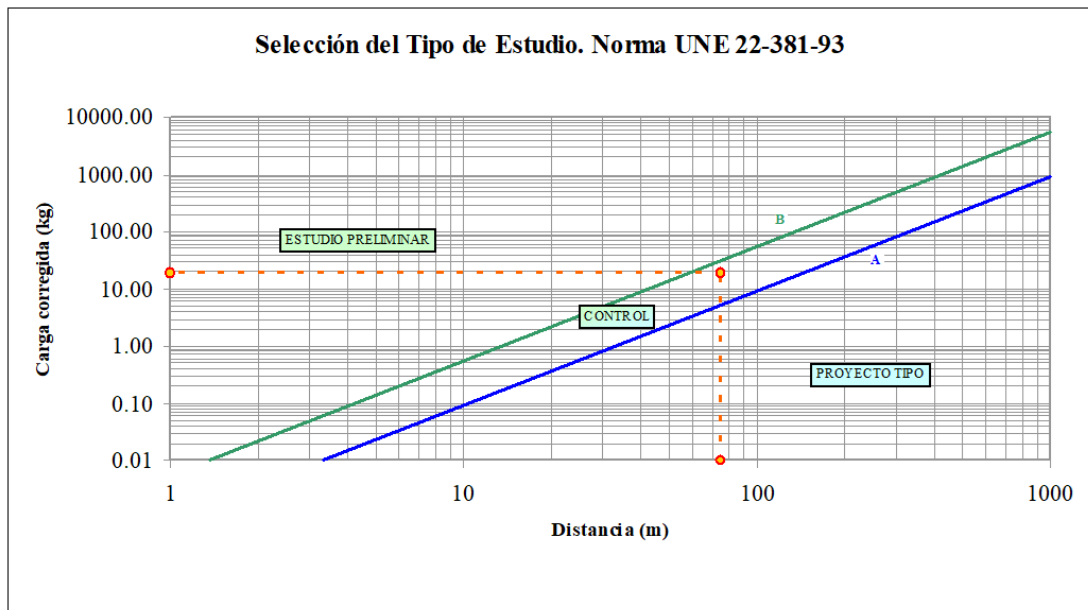
- Carga máxima instantánea o carga máxima operante o carga máxima cooperante (W): es la máxima cantidad de explosivo (kg), definida en el proyecto, que saldrá con un retardo entre barrenos inferior o igual a 8 ms
- Carga corregida (Wc): es la carga anterior multiplicada por dos factores ($W \times Fr \times Fe$), que tienen en cuenta el tipo de estructura y la velocidad de propagación de las ondas P del terreno

Tipo de estructura		Tipo macizo rocoso (Cp m/s)	
Factor Fe (estructura)		Factor Fr (roca)	
Grupo I	0.28	<2000	2.52
Grupo II	1	2000–4000	1
Grupo III	3.57	>4000	0.4

Factores para determinar la carga corregida

Con Wc y la distancia de la voladura a la estructura a proteger se entra en el siguiente gráfico que delimita tres zonas:

- Proyecto Tipo
- Medición de Control
- Estudio Preliminar



Carga corregida frente a distancia: zonas que delimitan el tipo de estudio a realizar

Si el punto introducido pertenece a la zona correspondiente al **Proyecto Tipo** se debe indicar en el proyecto que se está por debajo de la zona de riesgo (la carga en relación a la distancia a la voladura no es susceptible de causar daños). Si cae en la zona de **Control** hay que medir las vibraciones y comprobar que se está por debajo del umbral, pudiéndose incrementar la carga si las medidas dieron por debajo del umbral y comprobando que con la nueva carga siguen sin superarlo. Si se entra en la zona de **Estudio Preliminar** hay que realizar un estudio vibrográfico para obtener la ley de propagación de vibraciones del terreno.

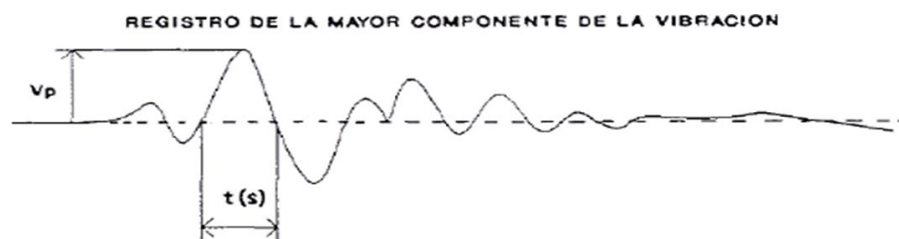
Una idea que cabe plantearse es realizar el diseño de las voladuras obteniendo la carga corregida máxima permitida del gráfico de la norma, según sea la distancia considerada, de forma que las coordenadas del punto (W_c , D) lo sitúen dentro de la zona de proyecto tipo, en el límite con la zona de control. Con la carga corregida así obtenida puede calcularse la carga máxima cooperante, dividiendo aquella entre los factores correspondientes al grupo de estructura y tipo de macizo (F_e y F_r). Con dicha carga cooperante se puede diseñar la voladura ajustando de forma pertinente el diámetro de perforación y la altura del banco.

La cuestión que hay que considerar es que en muchas ocasiones dicha carga operante será pequeña, en relación a la óptima, limitando bastante el tamaño de los barrenos (diámetro y altura) por lo que supondrá un sobre coste que puede ser mayor que el de realizar el estudio vibrográfico correspondiente.

4.1 Estudio preliminar

Consiste en realizar una serie de voladuras midiendo y registrando, con un sismógrafo, la siguiente información en diferentes puntos del terreno:

- Carga instantánea (W): definida anteriormente
- Máxima velocidad de vibración (v): se registran las tres componentes (X, Y, Z) de la velocidad de vibración medida en el punto, sus valores pico, así como sus respectivas frecuencias principales
- Distancia (D): distancia de la voladura al punto de medida



Cálculo de la frecuencia principal con el método del semiperiodo

La norma UNE permite calcular la frecuencia predominante utilizando diferentes técnicas. Usualmente se obtiene mediante la transformada de Fourier de la señal. La norma también permite utilizar la técnica del semiperiodo. Esta técnica consiste en medir el semiperiodo del valor pico como el intervalo de tiempo que transcurre entre los dos puntos de corte de la señal, adyacentes al pico, con el valor cero. El periodo sería, lógicamente, el doble del semiperiodo, y la frecuencia, su valor inverso.

A continuación, se calcula la denominada distancia reducida o distancia escalada: $D/W^{0.5}$ y se asume que la velocidad de vibración se amortigua según el modelo:

$$v = K(D/\sqrt{W})^{-\alpha} \text{ Ley de escala cuadrática [1]}$$

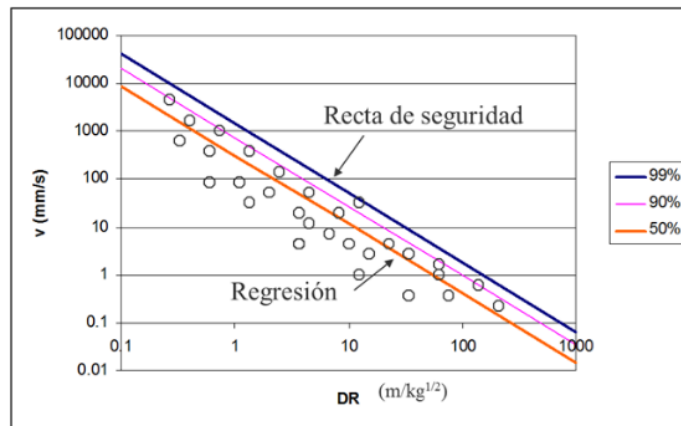
Para cada componente de la velocidad de vibración, los coeficientes K y α (de valor positivo) se determinan mediante regresión, habitualmente, asumiendo un modelo log-normal cuya dispersión (en $\log v$) sigue una normal $\varepsilon(0, \sigma)$:

$$\log v = \log K - \alpha \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) + \varepsilon(0, \sigma) + [\text{ec. lineal: } y = \log K - \alpha x \text{ con } x = \log(D/\sqrt{W})]$$

El error típico de la regresión (s) representa la estimación de la desviación estándar del modelo σ , y viene dado por la expresión:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \left[\sum (y - \bar{y})^2 - \frac{[\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})]^2}{\sum (x - \bar{x})^2} \right]}$$

Siendo n el número de datos empleados.



Determinación de la ley de propagación de vibraciones

Las voladuras realizadas para registrar los datos y obtener la ley de propagación de vibraciones del terreno deben diseñarse cuidadosamente. Interesa que se den las condiciones más semejantes posibles (cargas, distancias, caras libres e incluso retardos) a las que se pretenden realizar y que dan origen a la necesidad del estudio preliminar, aunque muchas veces esto dicta bastante de ser factible. Las medidas deben abarcar un rango de

distancias reducidas que cubra ampliamente la problemática particular que se pretende abordar (se trata de interpolar no de extrapolar). Hay que procurar que el logaritmo de la distancia escalada de interés –puede realizarse una estimación preliminar de ella- esté en la zona central del rango de las voladuras de ensayo que se vayan a diseñar. Si son varias las estructuras sensibles potencialmente afectadas por las vibraciones habrá que analizar cuál será el caso más limitante en cuanto a las cargas máximas operantes.

El paso siguiente será calcular la recta de seguridad o intervalo de predicción -en realidad es una curva- con una determinada fiabilidad (nivel de confianza, *NC*) de no superar la velocidad umbral definida por la norma.

Un objetivo más ambicioso y riguroso, pero también más restrictivo en cuanto a la carga máxima operante, sería determinar la curva que abarque, al menos, una determinada cobertura (*C*) de la población con un *NC* deseado o, lo que es lo mismo, calcular el intervalo de tolerancia con la cobertura y el nivel de confianza establecidos. Procuraremos aclarar a continuación estos conceptos.

Suponga el caso hipotético de que la población – y, por tanto, sus estadísticos: media y desviación estándar- estuviese correctamente determinada con la muestra (imagine un tamaño de la muestra inmenso). Entonces, el nivel de confianza puede interpretarse como una cobertura de la población. Así, la curva calculada con un *NC* dado corresponde a aquella en la que la probabilidad de que no se supere la velocidad de vibración predicha por el modelo en cada distancia escalada es igual a *NC*.

Por ejemplo, un intervalo de predicción con un *NC* del 95% implicaría que en un 5% de las voladuras futuras (en una de cada 20) se superará la velocidad de vibración calculada pues el nivel de confianza abarcaría el 95% de la población (cobertura del 95% de la población).

La curva resultante, en este caso ideal, es una recta paralela a la obtenida en la regresión (esto es, a la recta que corresponde al *NC* del 50%), por lo que únicamente variará el valor del parámetro *K*.

Por ejemplo, tras la regresión log-normal de las medida se obtiene la siguiente ley de propagación: $v = 323 x (D/\sqrt{W})^{-1.45}$ o, en su versión lineal, tomando logaritmos: $\log(v) = \log(323) - 1.45 x (D/\sqrt{W})$, en donde v representa el valor esperado de la velocidad pico. La desviación estándar de la regresión, en escala logarítmica, ha resultado ser igual a: $s = 0.292$.

Suponga que dicha ley y su desviación estándar son iguales a la media y desviación estándar de la población. Se desea determinar la recta con un NC del 95%. En una distribución normal, dicho valor corresponde a 1.64 desviaciones típicas del valor esperado (inversa de la distribución normal estándar acumulada). El nuevo valor de K será:

$$K_{95} = 323 * 10^{1.64 \times 0.292} = 973 \text{ y la recta de seguridad será: } v_{95} = 973 (D/\sqrt{W})^{-1.45}$$

Bajo el supuesto dado, dicha ecuación abarcaría el 95% de la población. O sea, el 95% de las medidas futuras estaría por debajo del valor de v_{95} .

En la práctica el número de datos puede ser bastante limitado y la interpretación expuesta en el párrafo anterior no es válida dado que hay incertidumbre tanto en el valor esperado de v como en la desviación estándar de la población.

Habitualmente para solventar, *en cierto modo*, esta circunstancia se calcula el intervalo de predicción con el NC deseado, teniendo en cuenta que la desviación estándar de la predicción viene dada por la siguiente expresión:

$$se_{for-i} = s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{x_i - \bar{x}}{\sum(x_i - \bar{x})}}$$

Vean que la desviación estándar en cada punto varía con el número de registros (n) de la muestra, así como con la distancia escalada (x_i) del punto.

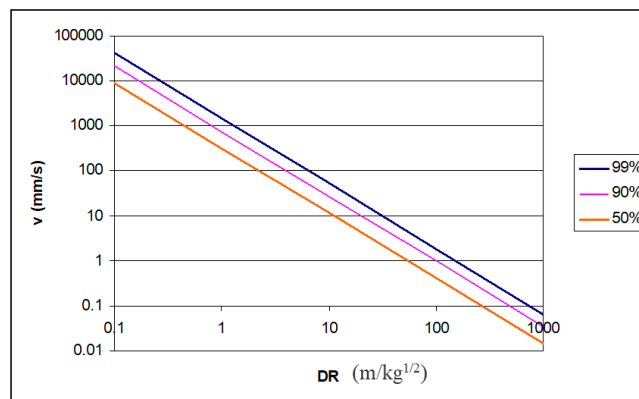
Esta vez, para obtener el intervalo de predicción con un determinado NC se debe calcular el número de desviaciones típicas con respecto al valor esperado utilizando *la distribución*

t de Student con n-2 grados de libertad -en vez de la distribución normal utilizada previamente-

Si se pretende un *NC* del 95%, con *n* igual a, por ejemplo, 20 registros, y a una distancia escalada igual a la distancia escalada media, le corresponderían, aplicando la *t* de Student: 1.7 desviaciones típicas del valor esperado (frente a las 1.64 que se obtuvieron aplicando la distribución normal) y, además, el error estándar de la predicción sería algo mayor (≈ 0.30). Por tanto, el valor de *K* será algo mayor:

$$K_{95_for} = 323 * 10^{1.7 \times 0.30} = 1042, \text{ y la recta de seguridad será: } v_{95_for} = 1042 (D/\sqrt{W})^{-1.45}$$

$$v(\text{mm/s}) = K \left(D(m) / \sqrt{W(\text{kg})} \right)^{-1.45}$$



<i>NC</i> (%)	<i>K</i>
50	323
90	760
99	1473
99.9	2350

Valor de *K* en función del nivel de confianza (*NC*) adoptado (USBM -1363 datos)

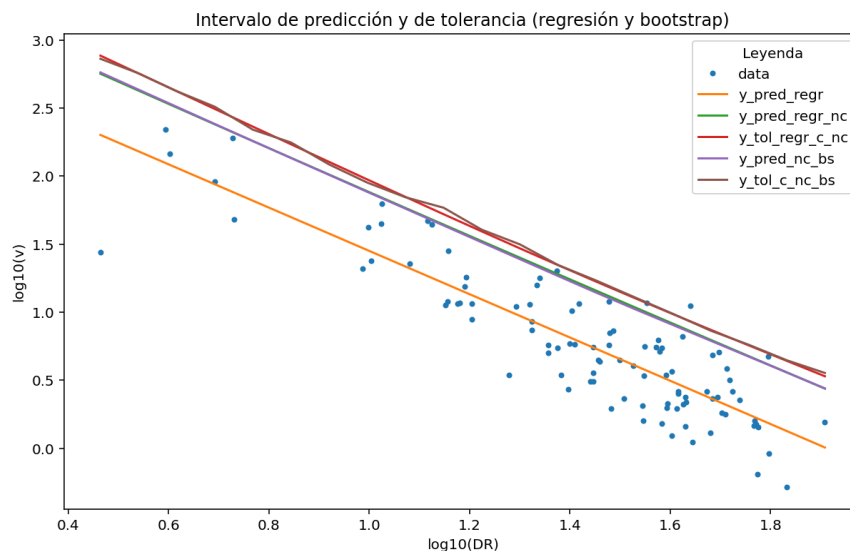
Por otra parte, el *NC* representa la probabilidad de que, supuesto que se repitiera muchas veces el procedimiento de la toma de la muestra de 20 registros y se calculase para cada toma el intervalo de predicción (note que éste es una variable aleatoria), dicho intervalo contuviese el percentil de los datos definido por el *NC* (95% en el ejemplo).

Dicha variable aleatoria contendrá en promedio el *NC* de los datos de la población, pero algunos intervalos de predicción contendrán una cobertura muy por debajo de *NC* mientras que otros intervalos contendrán una cobertura superior a *NC*. Lamentablemente, no se puede asegurar a que caso en particular corresponde la única muestra que en la realidad se dispone.

En el ejemplo expuesto ($NC = 95\%$) la cobertura media de los infinitos posibles intervalos de predicción, contruidos con las infinitas combinaciones de muestras de 20 registros, sería del 95% pero en sólo el 80% de las muestras, tras la determinación de la recta de seguridad, se obtendría una cobertura real por encima del 95% (este valor se ha calculado mediante técnicas de simulación).

No cabe entonces la interpretación del nivel de confianza como una cobertura, esto es, para un nivel de confianza del 95% no se puede asegurar que la velocidad pico medida en un futuro esté por debajo del umbral de velocidad calculado en el 95% de los casos posibles (de la población) –aunque, efectivamente, dicho umbral sí que contenga al 95% de los datos de la muestra utilizada para realizar la regresión si dicha muestra sigue el modelo log-normal.

En aquellas situaciones sensibles es conveniente calcular el intervalo de tolerancia en vez del intervalo de predicción. Dicho intervalo de tolerancia “*garantiza*” una cobertura mínima deseada con un determinado NC , mas los resultados serán, en general, conservadores.

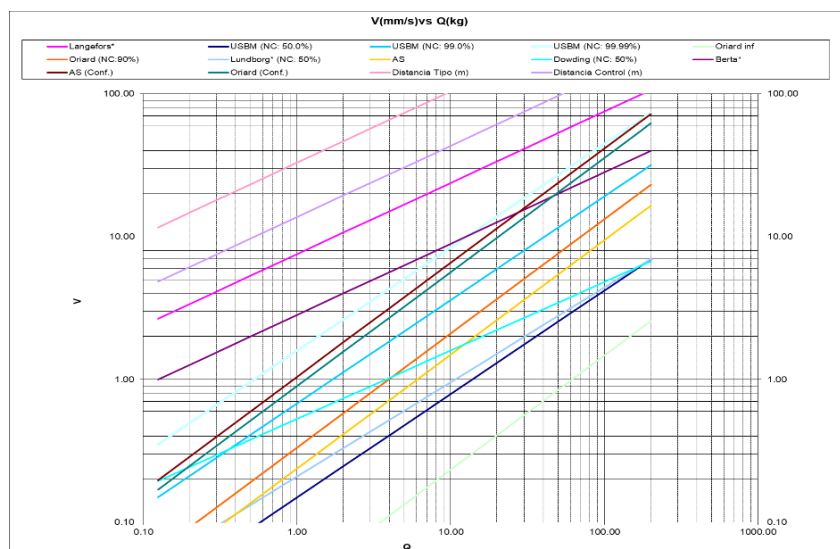


Resultados para una cobertura y nivel de confianza del 95%. Note la diferencia entre los intervalos a pesar del número elevado de datos (100). Cálculos realizados suponiendo modelo log-normal (regr), así como utilizando la técnica de bootstrap (bs).

Una vez escogido el método más adecuado y realizado los cálculos y análisis de los resultados, el paso siguiente será determinar la carga máxima operante siguiendo los pasos siguientes: con la máxima velocidad de vibración permitida, de acuerdo con la frecuencia principal medida y el tipo de estructura a proteger (ver gráfico de umbrales permitidos), se despeja, en la recta de seguridad, la distancia reducida. Con ésta y, conocida la distancia de la voladura a la estructura a proteger, la determinación de la carga máxima operante permitida es inmediata.

Aunque la ley de propagación de vibraciones es específica de cada lugar (y de la configuración geométrica de la voladura, de la secuencia y sistema de iniciación, etc.) se puede tener una idea del orden de magnitud esperado de las vibraciones, analizando leyes obtenidas por diversos autores en condiciones similares (confinamiento de la voladura y tipo de roca). Una regla grosera es que cada vez que se dobla la distancia la velocidad de pico se reduce a un tercio del valor en la distancia original.

En la figura siguiente se representa la relación entre la velocidad pico de vibración (v) en función de la carga cooperante (Q), obtenida por diferentes autores, para una distancia de 200 m. Note que en voladuras confinadas (*conf*) –sin cara libre vertical- las velocidades obtenidas son varias veces mayores que en las voladuras habituales.



Relación entre la carga instantánea y la velocidad de vibración obtenida por diferentes autores a una distancia de 200 m

Finalmente señalar que la norma UNE también permite emplear un modelo que incorpora un parámetro adicional: $v = K(D/W^\beta)^{-\alpha}$. El valor de β queda como parámetro a determinar en la regresión.

Para cargas alargadas un valor de β igual a $\frac{1}{2}$ (la ley de escala cuadrática vista hasta el momento) parece razonable, mientras que para cargas concentradas un valor del coeficiente β igual a $\frac{1}{3}$ (ley de escala cúbica) puede ser más apropiado. Cuando el número de registros es reducido puede ser más prudente adoptar uno de esos dos valores.

Sea cual fuere el modelo adoptado siempre es conveniente cotejar los resultados con los disponibles en la bibliografía o de experiencias previas.

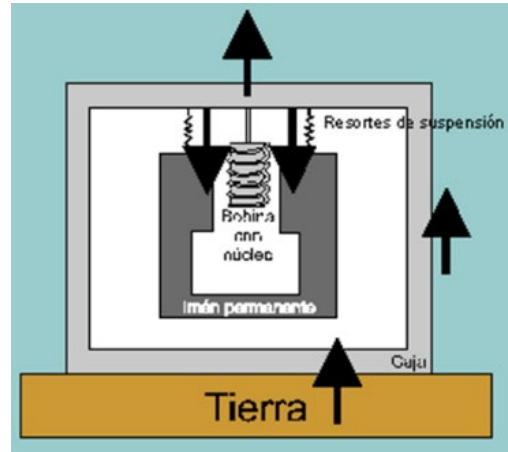
4.2 Sismógrafo

El sismógrafo es el quipo empleado para captar y registrar la señal. Consta de uno o más elementos captadores y del registrador -encargado de amplificar, registrar, grabar e incluso, a veces, de visualizar los datos medidos. Hay diferentes tipos de captadores: amplímetro, geófono, acelerómetro y sonómetro.



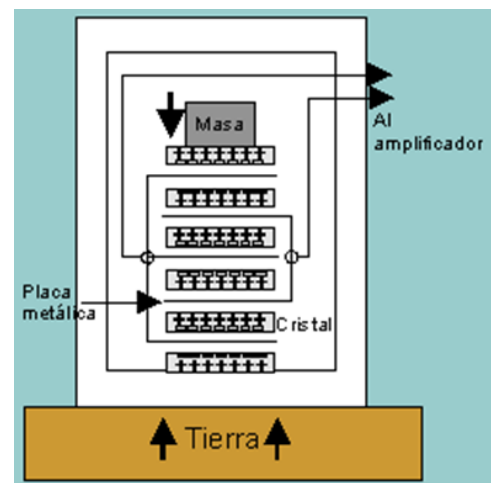
En el caso de las vibraciones ocasionadas por voladuras se utiliza, habitualmente, el geófono (mide velocidad de vibración: un canal por cada componente de la velocidad) y el sonómetro (mide la sobrepresión ocasionada por la onda área: un único canal).

El geófono consta de tres bobinas perpendiculares entre sí para medir cada una de las tres componentes de la velocidad de vibración (el captador se alinea con la voladura que será la dirección longitudinal). El movimiento relativo entre la bobina y el imán produce una fuerza electromotriz entre los terminales de la bobina cuyo voltaje es proporcional a la velocidad del movimiento, dentro del rango de validez de



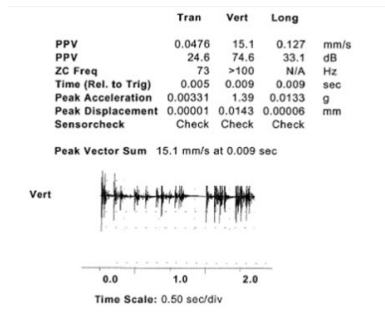
medida del aparato (en frecuencias y velocidades de vibración). Las amplitudes y aceleraciones se obtienen integrando y derivando, respectivamente, la señal. El equipo es digital, con una frecuencia de muestreo que habitualmente está entre 1024 y 2048 puntos por segundo. El captador se fija en el terreno y, prefijada un umbral de velocidad para puesta en modo grabación (trigger), comienza a grabar los datos a partir de que se registre dicho umbral – también graba en torno a un centenar de puntos de medida previos al trigger-.

El acelerómetro es interesante cuando se esperan registros de alta frecuencia (en las cercanías del barreno, por ejemplo) pues tiene mayor rango de medida en frecuencias que el geófono. Una masa descansa sobre una batería de placas hechas de material piezoeléctrico- sensible a la presión como el cuarzo o turmalina-. La aceleración del suelo hacia arriba aumentará el peso aparente de la masa



produciendo una variación de la presión que a su vez induce una variación del voltaje entre las placas proporcional a la aceleración –de nuevo, dentro del rango de validez de medidas del aparato-.

Junto con el equipo, los fabricantes incluyen el software necesario para la adquisición y tratamiento de los datos.



Sismógrafo: registrador, geófono y sonómetro (dcha.) y algunos de los datos que registra (izda.)

El captador debe fijarse solidariamente en el terreno donde se van a medir las vibraciones. Los métodos de enterrado o fijación recomendados por la ISEE (*International Society of Explosives Engineers*) son:

- El método de enterrado preferible es excavar un hoyo no menor de tres veces la altura del captador; clavar el sensor en el fondo y compactar firmemente el suelo alrededor y sobre el mismo
- La fijación del captador sobre superficie rocosa se realiza por medio de pernos

4.3 Medidas para reducir las vibraciones sísmicas

Cuando sea necesario el control de vibraciones las primeras actuaciones deben enfocarse en comprobar que el diseño de la voladura, la secuencia de iniciación y su ejecución sean correctos. Tras dicha comprobación el nivel de vibraciones puede disminuirse con diferentes actuaciones.

- Disminuir la carga cooperante
- Aumentar el número de retardos (no repetir números - intervalo mayor de 8 ms)
- Seccionar la carga dentro de los barrenos
- En el caso de trabajar con exceso de carga en columna ajustarla
- Controlar la perforación y ajustar la J

- Variar el diámetro de perforación/altura del banco
 - Variar la altura del banco ($K > 2V$) para disminuir su rigidez
- Diseñar secuencias en V1 o V2 para que cada barreno tenga buena salida
- Disminuir el número de filas a disparar en cada pega y controlar los tiempos de retardo
- Utilizar detonadores electrónicos (menor dispersión en la salida por lo que menor riesgo de superposición de ondas)
- Producir un corte artificial en el terreno entre la voladura y la estructura: a veces se ha planteado realizar un precorte en las inmediaciones de la estructura a proteger – en la dirección perpendicular a la voladura- para amortiguar las ondas. El corte debería lo suficientemente profundo, por debajo de la cota de las cimentaciones. La cuestión es que, si se utiliza la técnica del precorte, aunque la carga de los barrenos sea pequeña, estos, idealmente, deben salir a la vez y, además, están fuertemente confinados. Luego existe la posibilidad de provocar fuertes vibraciones en la ejecución del corte
- Secuenciar de manera que la voladura progrese en el sentido contrario al de la estructura a proteger para evitar la superposición de ondas
- Cuando la distancia entre la voladura y la estructura es grande –que es lo habitual-, la frecuencia en el terreno es baja y se superponen las diferentes ondas, por lo que es importante considerar el retardo entre barrenos. De acuerdo con Langefors, si T es el periodo correspondiente a la frecuencia principal y t es el retardo entre barrenos:
 - Para $t > 3T$ no hay colaboración entre barrenos: la onda se ha amortiguado en gran proporción cuando llegue el siguiente tren de ondas al punto en cuestión

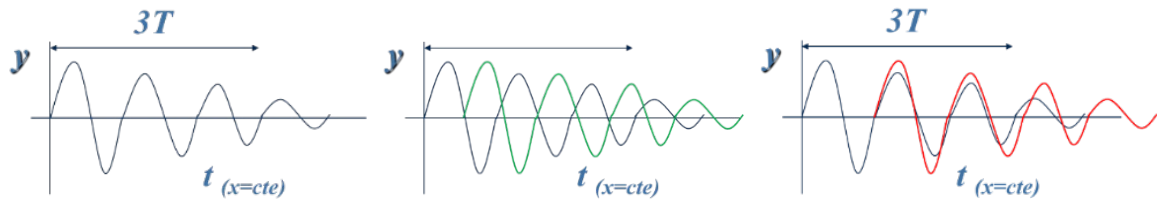
- En caso contrario, si $t = n \times T/2$

Con $n = \text{par}$, hay refuerzo

Con $n = \text{impar}$, hay interferencia

- Langefors da la siguiente condición de no refuerzo: $nr \times t = k \times T$

siendo nr el nº de retardos, con k entero y k/nr no entero



Condición de refuerzo y de interferencia entre dos ondas

5.Onda aérea

La onda aérea se produce por la expulsión al aire de los gases a través de las grietas, fracturas y del retacado y, en menor magnitud, por la energía de la onda de choque transmitida al aire cuando dicha onda alcanza las caras libres. El efecto de la onda aérea sobre las personas –dentro de ciertos márgenes- es bastante subjetivo; depende de la sensibilidad de la persona, del interés de la obra para los vecinos y de las relaciones públicas que se hayan o no establecido, precisamente, para evitar las quejas: se ha de informar siempre al vecindario y disparar a horas prefijadas.

La onda aérea comprende el rango de frecuencias audible entre 20 Hz y 20 KHz. Como escala de medidas acústicas se utiliza el decibelio (dB):

$$db = 20 \log \frac{P}{P_o}$$

$$P_o = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

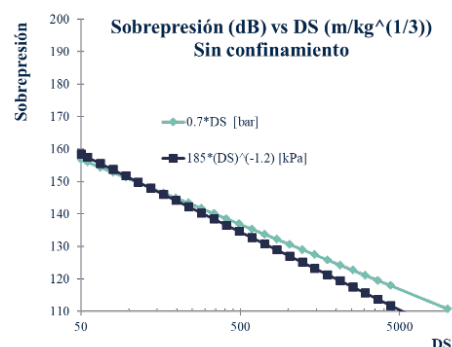
1 Pa =	1 N/m ²
1 bar =	100 kPa
1 atm =	101325 Pa
1 psi =	6.9 kPa

En donde P es la sobrepresión en Pascales, y P_o es la mínima sobrepresión audible. Adviertan que la escala no es lineal.

La sobrepresión en un punto va a depender de factores ambientales tales como: temperatura, humedad, altura, así como de la orografía en la zona de estudio. Aun así, existen algunas expresiones que permiten hacer una estimación preliminar. Por ejemplo, para bajas sobrepresiones:

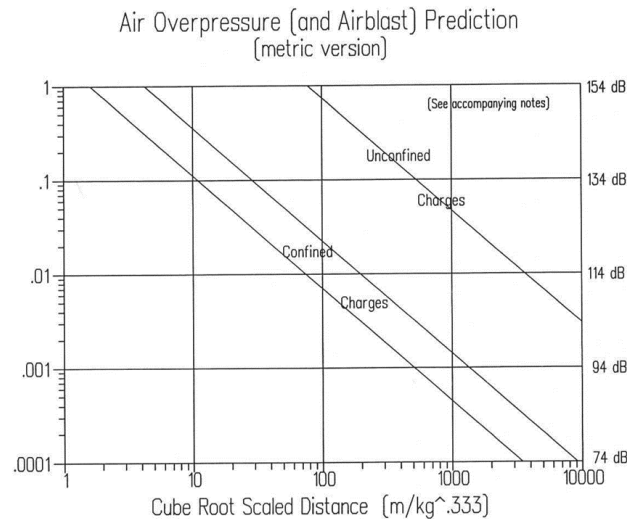
$$P(\text{kPa}) = K \left(\frac{D(\text{m})}{W^{1/3}(\text{kg})} \right)^{-1.2}$$

K es 185 si no hay confinamiento
K es 3.3 si hay confinamiento



Para predecir la variación de la sobrepresión con la distancia pueden realizar el mismo tipo de estudio que el realizado para las velocidades de vibración. En este caso se ajusta el modelo: $P = K (D/W^{1/3})^\alpha$ a las medidas realizadas con el sonómetro.

Observen en la siguiente gráfica la fuerte influencia del confinamiento en la magnitud de las sobrepresiones.



Estimación preliminar de sobrepresiones (eje de abscisas izdo. En kPa)

De la gráfica se puede inferir que típicamente la sobrepresión disminuye entre [6 -7] dB cuando se dobla la distancia, y que una carga confinada origina una sobrepresión de unos [30-40] dB menor que la producida por una que detona al aire.

Otra expresión que da una idea del orden de magnitud de la sobrepresión en función de la velocidad pico de vibración, para voladuras confinadas, es la siguiente: $P(\text{Pa}) = 0.38 v$ (mm/s). Por ejemplo, para el máximo umbral permitido en España (100 mm/s) la sobrepresión sería del orden de 38 Pa, unos 126 dB (supuesto que la voladura está bien diseñada y ejecutada).

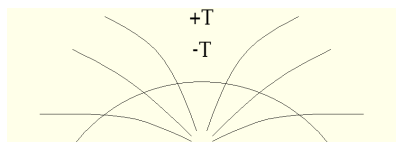
En la tabla siguiente se muestran los posibles efectos de la onda aérea en estructuras y en las personas.

Airblast Intensity		Probable Result	Average Human Response
dB	psi		
180	2.900	Structural damage	Ear drum rupture possible
175	1.631		
170	0.917	Many windows break	Intolerable
165	0.516		
160	0.290		
155	0.163	(equal to a 96 mph wind gust)	
150	0.092	Poorly mounted windows can break	
145	0.052		
140	0.029	(equal to a 40 mph wind gust)	Distinctly unpleasant
134	0.0145	OSMRE and USBM limit	
130	0.0092	(equal to a 23 mph wind gust)	
125	0.0052		
120	0.0029		Mildly unpleasant
115	0.0016		
110	0.00092	(equal to a 7.2 mph wind gust)	
105	0.00052		
100	0.00029		
95	0.00016		
90	0.000092		Strongly perceptible
85	0.000052		
80	0.000029		
75	0.000016		
70	0.0000092		Distinctly perceptible
65	0.0000052		
60	0.0000029		Perceptible

Efectos de la sobrepresión en estructuras y personas

Como pueden observar, entre los niveles de 125 dB -130 dB no se espera ningún daño a estructuras, aunque si puede ocasionar molestias a las personas. De lo expuesto puede concluirse que, si se respeta la normativa al respecto a los umbrales máximos de velocidad de vibración permitidos, no es esperable ocasionar daños por la onda aérea producida. Esto no es óbice para disminuir las posibles molestias tomando una serie de medidas preventivas iniciales: longitud de retacado igual a la piedra máxima, control de la perforación y reconocimiento del frente.

En general, las recomendaciones para disminuir la onda aérea son las mismas que aquellas para evitar las proyecciones: inicio en fondo, $T = (35 - 45) d$, evitar retardos largos que pudieran ocasionar descabezamientos...También es aconsejable evitar utilizar cordón detonante en superficie – y también en la zona de retacado-, evitar la superposición de ondas (utilizar tiempos de retardo mayores de $E/340 \approx 3 \text{ ms/mE}$), crear pantallas artificiales de tierra entre la zona de voladura y las zonas sensibles, evitar disparar cuando la dirección del viento es desfavorable, y a primera hora de la mañana y tras la puesta del sol, horas en las que se produce el fenómeno de inversión térmica: la temperatura de la atmósfera aumenta con la altitud haciendo que las ondas se curven volviendo hacia la tierra.



Fenómeno de inversión térmica: la onda aérea se curva regresando hacia la superficie de la tierra debido al incremento de la temperatura de la atmósfera con la altitud

CONTENIDO

Tema 10. Vibraciones y Onda Aérea causadas por la voladura	1
1. Introducción	1
2. Ondas mecánicas.....	3
3. Daños por vibraciones.....	6
3.1 Umbral de daños.....	6
3.2 Parámetros representativos para establecer el criterio de daños en estructuras.	7
3.3 Criterios de Daños.....	9
4. Normativa española sobre vibraciones provocadas por voladura	11
4.1 Estudio preliminar.....	15
4.2 Sismógrafo	22
4.3 Medidas para reducir las vibraciones sísmicas.....	24
5. Onda aérea	27