

C. NORMAS INTERNACIONALES

Este anexo tiene como objetivo brindar al lector la traducción de algunas de las normas tratadas en el capítulo 3 (página 19), o referencias a su aplicación de libros especializados, lo que en general se encuentran en idiomas diferentes al español. Adicionalmente se realizó la transcripción de norma española para complementar con una norma en nuestro idioma, las traducidas de otros.

C.1. Norma Suiza SN 640 312 a (1992) para efectos de sacudidas sobre edificaciones

C.1.1. Generalidades

C.1.1.1. Dominio de aplicación Esta norma es aplicable a sacudidas provocadas por

- voladuras,
- máquinas y equipo de construcción de todo tipo,
- tráfico en carretera y ferroviario,

y que pueden incidir sobre edificaciones.

No es aplicable a efectos de sacudidas sobre:

- seres humanos (molestia)
- maquinaria, equipos, instalaciones y sistemas o materiales especialmente delicados que se hallan dentro de las edificaciones
- los suelos (asentamientos, licuación, etc.)

Esta norma no es aplicable para sacudidas con frecuencias inferiores a 8 Hz, como ocurren por ejemplo durante terremotos. Sacudidas por debajo de 8 Hz tienen que ser objeto de análisis particulares.

C.1.1.2. Objeto Esta norma contiene:

- criterios para la evaluación del efecto de sacudidas sobre edificaciones.
- valores indicativos, mediante cuyo acatamiento por lo general se evitan daños en edificaciones.
- recomendaciones para la realización y la interpretación de mediciones de sacudidas.
- recomendaciones para el levantamiento y valoración de fisuramientos.

C.1.1.3. Propósito El acatamiento de los valores indicativos asegura que por lo general se eviten daños en edificaciones como efecto de sacudidas.

Daños en edificaciones también pueden ocurrir por causa de asentamientos y otras deformaciones del suelo de fundación. Estos no pueden ser evaluados mediante mediciones de sacudidas y por lo tanto no son objeto de esta norma.

C.1.1.4. Criterio de valoración La variable determinante para la valoración del potencial de daño de las sacudidas es el valor máximo del vector de velocidad VR (en mm/s), bajo consideración de la frecuencia de vibración (Hz) y la cantidad de las sacudidas.

C.1.1.5. Valoración subjetiva El ser humano puede sentir sacudidas como fuertes o molestas cuando aun son inofensivas para una edificación. Cuando la percepción de ruidos (explosión, golpe de martillo hincador, ruido de tráfico, etc.) es simultánea a la sacudida, la intensidad de la sacudida frecuentemente se sobreestima.

En consecuencia, la valoración subjetiva de los sacudimientos no es una medida confiable para la valoración del efecto de sacudidas sobre las edificaciones.

C.1.1.6. Efecto de sacudidas *Capacidad de vibración de las edificaciones:* Las sacudidas transmitidas a una edificación excitan elementos capaces de vibrar (columnas, pilares, vigas, techos, pisos, paredes, etc.) a vibraciones. Cuando las frecuencias propias (frecuencia fundamental y modos superiores) de elementos con bajo amortiguamiento caen dentro del rango frecuencial de las sacudidas, pueden ocurrir amplitudes de vibración grandes mediante efectos de resonancia. Las frecuencias propias de elementos constructivos están predominantemente entre 10 y 60 Hz. En consecuencia, las edificaciones están más en riesgo si las sacudidas tienen predominio de energías en frecuencias por debajo de 60 Hz, siendo particularmente problemáticas frecuencias por debajo de 30 Hz.

Frecuencia de ocurrencia: La probabilidad de danos aumenta con la cantidad de solicitudes.

Transmisión de vibraciones por el suelo: Generalmente el suelo actúa de manera amortiguante

en la transmisión de sacudidas a una edificación. Suelos blandos transmiten predominantemente vibraciones de frecuencias bajas; suelos duros también las de frecuencias altas.

La medición de las sacudidas en la edificación incluye el efecto del suelo de fundación sobre las sacudidas.

C.1.2. Valores indicativos

C.1.2.1. Gradación de valores indicativos Los valores indicativos están representados en la tabla C.3 en función de la susceptibilidad de la edificación a sacudidas, de la frecuencia de ocurrencia y la frecuencia determinante de las sacudidas.

Los valores indicativos para edificaciones de susceptibilidad a sacudidas normal (Clase 3) están fijados en la tabla C.3. Para las demás clases de susceptibilidad (1, 2, 4) se da un marco, dentro del cual los valores indicativos se deben fijar bajo consideración de la condición de la edificación.

C.1.2.2. Clases de susceptibilidad de las edificaciones Se distinguen cuatro clases de susceptibilidad:

1. muy poco susceptible,
2. poco susceptible,
3. susceptibilidad normal,
4. particularmente susceptible.

Lo decisivo es la susceptibilidad de los elementos constructivos. Esta es determinada por el tipo de construcción, los materiales utilizados y por las condiciones de la edificación.

Elementos constructivos con revello y revestimiento de yeso, así como elementos secundarios e instalaciones con amarres débiles son mucho más susceptibles a sacudidas que elementos de mampostería y concreto armado sin revestimiento.

Especialmente susceptibles son las zonas de contacto entre materiales de construcción diferentes.

C.1.2.3. Frecuencia de las solicitaciones Las sacudidas se distinguen en 3 clases de frecuencia según la frecuencia de ocurrencia de las solicitaciones por sacudida en una edificación en el período de evaluación:

- ocasionales: la cantidad de solicitaciones es muy inferior a 1000
- frecuentes
- permanentes: cantidad de solicitaciones muy superior a 100000

Como sollicitación se considera cada valor máximo del vector de velocidad que supera 0.7 veces el valor indicativo. Como período de evaluación se considera el tiempo durante el cual la edificación es sometida a la sacudida evaluada.

C.1.2.4. Rangos de frecuencia En esta norma se distinguen tres rangos de frecuencias:

- entre 8 y 30 Hz
- entre 30 y 60 Hz
- entre 60 y 150 Hz

La frecuencia determinante se debe medir para la componente de vibración más fuerte, con una precisión de $\pm 10\%$.

Tabla C.1: Clases de susceptibilidad

Clase de susceptibilidad	Construcción en altura	Construcción subterránea
1) muy poco susceptible		<ul style="list-style-type: none"> - puentes en concreto armado o acero - estructuras de contención en concreto armado o mampostería maciza - socavones, túneles, cavernas, pozos en roca dura o sedimentos bien consolidados - cimentaciones de grúas y maquinaria - tuberías sobre terreno

Continúa ...

Continuación Tabla C.1 Clases de susceptibilidad

Clase de susceptibilidad	Construcción en altura	Construcción subterránea
2) poco susceptible	<ul style="list-style-type: none"> - edificaciones industriales y de oficinas, en concreto armado o acero, generalmente sin resentimiento - silos, torres, chimeneas altas en construcción maciza y sin revestimiento o estructura de acero - mástiles de estructura metálica. - condición: las edificaciones han sido construidas bajo las reglas generales del ramo y adecuadamente mantenidas 	<ul style="list-style-type: none"> - cavernas, túneles, socavones y tuberías en roca blanda - parqueaderos subterráneos - conducciones industriales (gas, agua, canalización, cables) subterráneas - muros secos
3) susceptibilidad normal	<ul style="list-style-type: none"> - Viviendas con muros en concreto, concreto armado o ladrillos artificiales - edificios de oficinas, colegios, hospitales e iglesias con muros de mampostería o ladrillos artificiales y revestimiento en cemento - Condición: las edificaciones han sido construidas bajo las reglas generales del ramo y adecuadamente mantenidas 	<ul style="list-style-type: none"> - captaciones - reservorios - conducciones de hierro gris - cavernas, rasantes y subrasantes en túneles - cables susceptibles

Continúa ...

Continuación Tabla C.1 Clases de susceptibilidad

Clase de susceptibilidad	Construcción en altura	Construcción subterránea
4) particularmente susceptible	<ul style="list-style-type: none"> - casas con cielorasos de yeso o similares (“Hourdis”) - construcciones en cerrojo (“Colombage”) - edificaciones de la clase 3 nuevas o recientes renovadas - edificaciones históricas o bajo protección 	<ul style="list-style-type: none"> - cables de plomo viejos - tuberías de hierro gris viejas

C.1.2.5. Aplicación de los valores indicativos El valor del vector de velocidad se debe determinar mediante mediciones. Para valores inferiores a los valores indicativos daños pequeños son poco probables. Superación ocasional de los valores indicativos hasta aproximadamente 30% sólo aumentan la probabilidad de daños mínimamente. Para valores a partir del doble del valor indicativo los daños son probables. Fisuras continuas sólo son esperables para valores que superan varias veces los valores indicativos.

Para circunstancias especiales se debe consultar a un especialista. Este puede fijar valores indicativos mayores o menores en casos justificados.

C.1.3. Realización de las mediciones de sacudidas

C.1.3.1. Principios Debido a que las sacudidas pueden variar fuertemente en las diversas partes de una edificación, las primeras mediciones se deben realizar simultáneamente en varias partes. Un monitoreo permanente posterior se puede limitar a los sitios críticos. Para poder obtener el valor máximo determinante del vector de velocidad, se debe medir en cada sitio en tres componentes ortogonales (perpendiculares entre sí).

C.1.3.2. Sitio de medición y fijación de los sensores Una selección apropiada del sitio de medición, así como un acoplamiento correcto del sensor a la estructura portante de la edificación son condiciones decisivas para la utilidad de los resultados de medición.

Sitio:

Tabla C.2. Frecuencia de las solicitaciones y fuentes de sacudida

Clase de frecuencia de solicitaciones	Cantidad de solicitaciones	Fuentes de sacudidas típicas
Ocasionales	muy inferiores a 1000	<ul style="list-style-type: none"> - voladuras - compactadores y vibrohinchadores, cuando sólo generan vibraciones mayores durante arranque ya pagado
Frecuentes		<ul style="list-style-type: none"> - voladuras frecuentes - martillos y vibradores para hincado - compactadores - martillos para explotación, operación ocasional - plantas eléctricas de emergencia con operación frecuente
Permanentes	muy superiores a 100000	<ul style="list-style-type: none"> - tráfico - maquinaria de instalación fija - martillos para explotación

- Como sitios de medición se deberán escoger aquellos elementos rígidos y portantes de la edificación donde se esperan los efectos determinantes de las sacudidas.
- Sin embargo, en losas se deberá medir en zonas de borde.
- Para sacudidas con frecuencias determinantes superiores a 60 Hz los sitios de medición se deberán escoger principalmente en los muros de cimentación.

Fijación:

- Para aceleraciones superiores a 3 m/s^2 los sensores deben ser unidos fijamente a los elementos de la edificación. Para aceleraciones inferiores a 3 m/s^2 , es permisible emplazar los sensores sin fijación. Aceleraciones de 3 m/s^2 resultan para las siguientes velocidades y frecuencias (sinusoidales) de vibración:

Tabla C.3. Valores indicativos de vibraciones, para su uso ver Aplicación de los valores indicativos

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de solicitaciones	Frecuencia dominante		
		<30 Hz	30 - 60 Hz	>60 Hz
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	15	20	30
	Recurrente	6	8	12
	Permanente	3	4	6
4) particularmente susceptible	Ocasional Frecuente	Valores indicativos: entre los valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos		

- 25 mm/s a 20 Hz
- 13 mm/s a 40 Hz
- 08 mm/s a 60 Hz

- - Sitios de medición inapropiados son: coberturas laminadas o repellos de paredes, cornisas de ventana sueltas, pisos flotantes, tapetes, etc.

C.1.3.3. Requisitos para el equipo de medición El equipo de medición (sensores y amplificadores de medición) debe garantizar lo siguiente dentro del rango de 5 - 150 Hz:

- Almacenamiento o graficación de los valores del vector de velocidad de vibración y sus tres componentes en función del tiempo.
- Determinación de la frecuencia dominante.

El buen funcionamiento del equipo de medición debe ser verificado periódicamente. La calibración del equipo debe poder ser objeto de verificación posterior. En casos especiales se debe calibrar todo el sistema de medición en sitio antes y después de cada campaña de medición.

C.1.3.4. Interpretación Los valores indicativos en la tabla C.3 se refieren al monto del valor máximo del vector de velocidad. El valor justo es la combinación crítica del valor máximo del vector de velocidad VR y de la frecuencia en la componente dominante correspondiente al mismo valor.

[la norma incluye aquí un ejemplo de registros y cálculo]

C.1.3.5. Presentación de resultados (protocolos) El protocolo de medidas debe incluir toda la información técnica de las mediciones, en particular la fecha y hora de las mediciones, tipo y ubicación de la fuente de sacudidas, equipo de medición, localización de los puntos de medición, dirección de las componentes, y la descripción de la construcción.

C.1.4. Fisuras y protocolos de fisuras

C.1.4.1. Descripción de fisuras Exceptuando aquellas de materiales metálicos, las edificaciones prácticamente nunca están libres de fisuras. En lo siguiente sólo se consideran aquellas fisuras que desde una distancia de 1 m son visibles a ojo. Esto corresponde a un ancho mínimo de 0.05 mm.

En cuanto a la profundidad de las fisuras se distinguen:

Fisuras superficiales Sólo afectan una parte insignificante del corte del elemento constructivo y sólo disminuyen, si acaso, las calidades estéticas de la edificación, pero generalmente no su aptitud para el uso, durabilidad ni estabilidad.

Fisuras transversales Estas pueden afectar la aptitud de uso de la edificación.

Fisuras pueden ser descritas como sigue:

Fisuras finas 0.2 mm

Fisuras medianas 0.2 – 1 mm

Fisuras anchas 1 – 3 mm

Fisuras abiertas ≥ 3 mm

C.1.4.2. Desarrollo de fisuras *Durante la construcción:* Durante la construcción y durante el tiempo de endurecimiento de los materiales de construcción pueden formarse fisuras (encogimiento, recesión, dilataciones por cambios de temperatura o calor de hidratación, etc.)

Influencias de calor o frío externas (congelamiento) también conducen a que toda edificación durante algún tiempo después de su construcción o de reparaciones presenta fisuras. Su número aumenta con el tiempo.

Generalmente se consideran como admisibles los siguientes anchos de fisura, desde el punto de vista de la estética y la durabilidad:

Tabla C.4. Anchos de fisura admisibles dependiendo de la exposición (Norma Suiza)

Tipo exposición	Ancho [mm]
altos requerimientos estéticos	0.1 mm
sometidos a influencias ambientales	0.2 mm
no sometidos a influencias ambientales	0.3 mm
elementos constructivos interiores	0.4 mm

Envejecimiento: Con el tiempo, las siguientes causas pueden afectar la fisuración en una edificación:

- variaciones de temperatura
- recesos
- transformaciones químicas
- agresiones físicas y biológicas
- abrasión y desgaste
- deformaciones por cargas
- asentamientos del suelo
- modificaciones en la edificación
- etc.

La tasa anual de aumento de fisuras generalmente disminuye con la edad de la edificación, siempre y cuando no se debilita la capacidad de elementos portantes.

C.1.4.3. Aumento de fisuras por sacudidas Las sollicitaciones por esfuerzos debidos a sacudidas con valores de velocidad que no superan sensiblemente los valores indicativos apropiados para el objeto son pequeñas. Fisuras pueden formarse en donde ya hay tensiones (incl. tensiones de receso o sollicitación estática) tan grandes que la débil tensión dinámica es suficiente para iniciar o aumentar las fisuras. Fisuras que se formaron como consecuencia de sacudidas débiles muy probablemente hubieran aparecido de todas maneras tarde o temprano (después de meses o años). Por tanto, la formación de fisuras iniciadas por sacudidas puede ser considerada parcialmente como una anticipación de fisuramiento ulterior. Esto debe ser tenido en cuenta adecuadamente en la evaluación de daños. Las fisuras que se forman durante sacudidas sólo se distinguen en casos excepcionales de fisuras de tensión usuales; no existen patrones de fisuramiento típicos para sacudidas.

C.1.4.4. Protocolos de fisuras Cantidad, longitud y ancho de fisuras formadas durante un período determinado así como el aumento de fisuras preexistentes (superficiales y transversales) se pueden evaluar mediante un levantamiento cuidadoso antes y después de este período.

Es juicioso realizar los protocolos de fisuras de manera contradictoria. En zonas densamente urbanizadas puede ser razonable prescindir de levantamientos de fisuras si mediante suficientes mediciones las sacudidas son monitoreadas continuamente y los valores de sacudida admisibles se hallan sensiblemente por debajo de aquellos que esta norma asigna a las respectivas clases de edificaciones (tabla C.3).

C.2. Norma sueca SS 460 48 66 (1991), para vibraciones inducidas por voladuras en edificaciones

Esta norma sólo usa la velocidad vertical de vibración, pero prescribe para ciertas situaciones mediciones en las tres componentes. Las vibraciones deben ser medidas siempre, en lo posible, en una posición de la fundación del edificio en la cual las vibraciones son transmitidas a la edificación.

Niveles de guía: Los niveles de guía de esta norma deben ser usados para establecer niveles de vibración permitidos o valores de umbral. Estos valores se fundamentan en una amplia y muy bien documentada correlación entre la componente vertical de la velocidad pico de partícula y daños en edificaciones sobre diferentes tipos de terrenos geológicos. El nivel de guía está dado por:

$$v = v_o F_k F_d F_t \quad (C.1)$$

donde v_o es la velocidad vertical pico sin corrección, F_k un factor de calidad de construcción, F_d el factor de distancia que toma en cuenta la distancia entre la carga y el sitio de medición,

y F_t el factor que describe el tiempo del proyecto de las voladuras¹.

Para la velocidad vertical pico de partícula sin corrección v_o se deben usar los valores de la tabla C.5, Un valor más detallado de v_o se puede obtener si se mide la velocidad de propagación de la onda P en el terreno de la edificación en cuestión:

$$v_o = c_p/65 \quad (\text{C.2})$$

donde c_p es en m/s.

Tabla C.5. Valores vertical pico máximos de partícula sin corrección (Norma Sueca)

Tipo de terreno	v_o [mm/s]
Morrena suelta, arena, grava, arcilla	18
Morrena firme, arcillolita, limolita blanda	35
Granito, neis, caliza firme, cuarzita, arenisca, diabasa	70

El factor de calidad de construcción F_k es el producto del factor de construcción F_b y del factor de material F_m :

$$F_k = F_b F_m \quad (\text{C.3})$$

Estos dos factores se han fijado como muestran las tablas C.6 y C.7

Tabla C.6. Valor del factor F_b según el tipo de edificación (Norma Sueca)

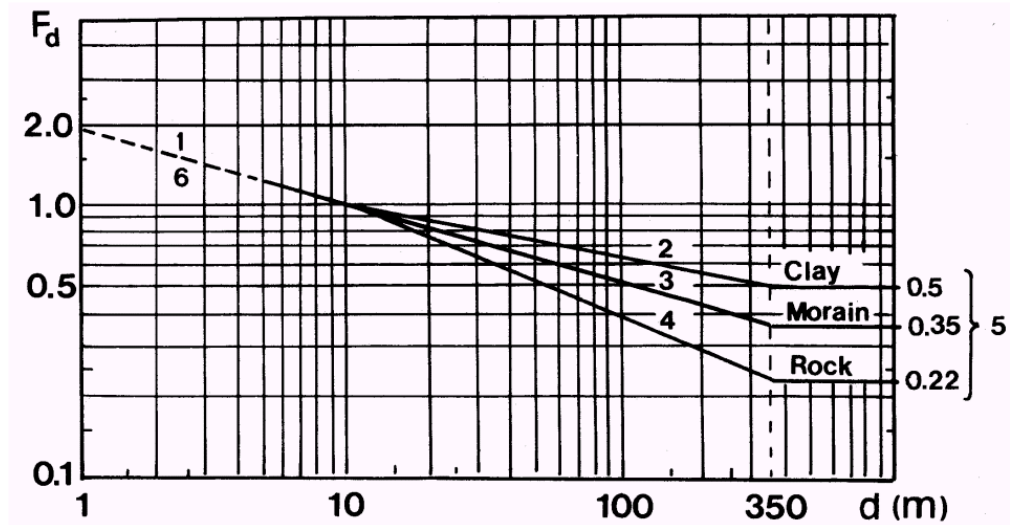
Clase	Tipo de edificación	F_b
1	Edificaciones pesadas (puentes, muelles, defensa civil)	1.70
2	Edificaciones industriales y de oficinas	1.20
3	Viviendas estándar	1.00
4	Edificaciones sensibles de diseño especial (con arcos altos, grandes luces, p. ej. iglesias y museos)	0.65
5	Edificaciones históricas en condición débil y ciertas ruinas	0.50

Tabla C.7. Valor del factor F_m según el tipo de material (Norma Sueca)

Clase	Tipo de material	F_m
1	Concreto reforzado, acero, madera	1.20
2	Concreto no reforzado, ladrillo, clincker	1.00
3	Concreto poroso de autoclave	0.75
4	Ladrillo artificial de caliza ("Mexi-brick")	0.65

El factor de distancia F_d está en función de la distancia más corta entre carga y edificación. Para su determinación, la norma toma en cuenta rangos de distancia (hasta 10 m, 10–350

Figura C.1. relación entre la distancia y el factor F_d



m, más de 350 m) y el tipo de terreno sobre el cual está fundada la edificación (en las tres categorías incluídas en la clasificación de la velocidad no corregida, figura C.1)

El factor de tiempo de proyecto F_t se debe usar en una escala móvil para tiempos de hasta 1 año, y 0.75 para tiempos superiores a 5 años:

Tabla C.8. Valor del factor F_t según el tipo de actividad (Norma Sueca)

Tipo de actividad de voladura	F_t
Obras de construcción (túneles, cavernas, cortes, etc.)	1.00
Trabajos estacionarios (minas, canteras)	0.75 – 1.00

C.3. Norma Escocesa PAN 50: Control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial. Anexo D: Control de voladuras en minería superficial

Las siguientes secciones son extractos referentes a vibraciones de la Norma PAN 50 en el Anexo D (Scottish Executive, 2000) y relevantes para este proyecto:

¹por ejemplo, actividades de minería de largo plazo o actividades de construcción de corto plazo)

C.3.1. Vibraciones

12. Cuando un explosivo es detonado en un barreno causa grietas y deformaciones permanentes de la roca a su alrededor. Por fuera del area cercana al sitio de voladura las deformaciones permanentes no se ocurren, en lugar de esto se presenta un rápido decaimiento de las ondas de tension desde la explosión, causando que el suelo muestre propiedades elásticas por medio de las cuales las partículas en la roca regresan a su posición original cuando las ondas pasan. Esto causa que las vibraciones sean radiadas desde el sitio de la voladura y el efecto se reduce al aumentar la distancia.

13. Es siempre el interés del operador el de reducir las vibraciones generadas por voladuras a un mínimo posible tanto en terreno como en el aire, porque esta reducción incrementa sustancialmente la eficiencia de las voladuras, y por lo tanto hay ahorro en las voladuras. A pesar de esto, hasta el mejor diseño y ejecución de una voladura puede generar una cierta cantidad de energía no deseada en forma de ondas transmitidas al suelo que radian desde el sitio de la voladura.

C.3.1.1. Mediciones 14. El BS 7385 parte 1 de 1990, discute el tema de mediciones de vibraciones en términos generales, recomendaciones específicas para investigación de daños se encuentra en la BS 7385 Parte 2 de 1993 y sobre la percepción humana en el BS 6472 de 1992.

15. Hay cuatro parámetros interrelacionados que pueden ser usados para de definir la magnitud de vibraciones en el suelo en cualquier lugar, estos son:

Desplazamiento de partícula – la distancia a la que se mueve la partícula antes de retornar a su posición original, medida en milímetros (mm).

Velocidad de partícula – la tasa a la cual cambia el desplazamiento de la partícula, medida en milímetros por segundo (mm/s)

Aceleración de la partícula – la tasa de cambio de la velocidad de partícula, medido en milímetros por segundo al cuadrado (mm/s^2) o en términos de la aceleración debida a la gravedad de la tierra (g).

Frecuencia – el número de oscilaciones por segundo al cual una partícula esta sometida, medido en Hertz (Hz).

16. En todas las normas el parámetro preferido de medición es la velocidad de partícula pico (VPP). La medición de los parámetros de partícula al paso de ondas normalmente se realiza en tres direcciones mutuamente perpendiculares, y las partículas oscilaran en estas tres dimensiones:

Longitudinal – También llamada radial, las partículas se mueven hacia adelante y atrás en la misma dirección que viaja la onda vibratoria.

Vertical – Movimiento hacia arriba y abajo perpendicular a la dirección en que la onda esta viajando.

Transversal Movimiento de la partícula a la derecha e izquierda y perpendicular a la dirección en que la onda esta viajando.

C.3.1.2. Niveles de amplificación 17. La mayoría de registros de vibraciones en trabajos de minería superficial son tomados por cualquiera de estos dos casos: para mostrar conformidad con las condiciones impuestas por los organismos de planeación o como respuesta a quejas y demandas. Cuando el registro de vibraciones obedece a quejas por posibilidad de daños en propiedades, una buena practica y aconsejado en el BS 7385 es tomar registros fuera de la propiedad sobre el suelo y muy cerca a la fachada mas cercana del sitio de voladura.

18. Las vibraciones son mas sentidas por las personas dentro de las edificaciones, por consiguiente con el fin de evaluar reclamos es necesario monitorear las vibraciones dentro de la edificación donde hallan sido sentidas, donde los afectados consideren que los efectos son mas apreciables. Adicionalmente, estas mediciones deben ser tomadas junto con otras fuera de la edificación, con el fin de cuantificar cualquier efecto de amplificación. Los niveles de amplificación entre 0.5 a 2.0 son los mas usuales en estructuras de tipo residencial no muy altas. La amplificación puede deberse a varios factores, pero es principalmente debida al que el contenido frecuencial en intervalos de tiempo de las vibraciones es similar a la frecuencia natural de la estructura (o partes de ella).

19. En términos de daños, Los efectos del potencial de amplificación son bien conocidos y aceptados en las normas. Los valores guía son normalmente asociados a registros tomados en la base de la edificación o sobre el suelo contiguo a esta. La BS 7385 comenta que vibraciones máximas pueden ser encontrados a media altura de paredes o pisos pero tales vibraciones usualmente no esta relacionada con la integridad estructural.

C.3.1.3. Efectos de la frecuencia 20. El contenido frecuencial de las vibraciones causadas por voladuras es un factor importante en la determinación de niveles de amplificación y respuesta a las vibraciones tanto en humanos como en estructuras. La frecuencia es en mayor parte determinada por las condiciones geológicas entre la fuente y el receptor, la distancia desde la fuente y en menor proporción por el diseño de la voladura y la geometría del barreno.

21. Entre menos firme o solido sea el medio de transmisión, las altas frecuencias de las vibraciones van a ser reducidas o filtradas sobre distancias cortas. De tal manera, las frecuencias del movimiento del suelo serán relativamente altas cuando se monitorea cerca a la voladura

y/o sea roca solida. Las frecuencias serán relativamente bajas cuando se monitorea a gran distancia de la fuente y/o cuando el medio de transmisión sea relativamente suave, como el caso de arcillas y suelos.

22. Los rangos típicos de frecuencias de vibraciones en el suelo producidos por trabajos en minería superficial es entre 5 y 40 Hz, con niveles predominantes entre 20 y 30 Hz en canteras de extracción de roca y de 5 a 15 Hz en el caso de minas a cielo abierto con menor capacidad de transmisión de ondas al medio. Por lo tanto, la amplificación de vibraciones en una estructura es posiblemente mas probable con voladuras en minería a cielo abierto.

C.3.1.4. Respuesta humana 23. La respuesta humana a vibraciones del suelo inducidas por voladuras son un fenómeno relativamente complejo que depende de una gama de factores de los cuales la amplitud de vibración es únicamente uno y no necesariamente el mas importante. Esta bien identificado que el cuerpo humano es muy sensible a cambios bruscos en el nivel de vibraciones, sin embargo tiene poca capacidad para distinguir magnitudes relativas. Aunque la sensibilidad a las vibraciones varia significativamente entre individuos, una persona generalmente puede ser consiente de vibraciones inducidas por voladuras con una velocidad pico de partícula de alrededor de 1.5 mm/s, y bajo algunas circunstancias a niveles menores a 0.5 mm/s.

24. Una vez las vibraciones sean mayores que el umbral de percepción es posible que se presente preocupación y las personas se queje de las voladuras. Tal preocupación normalmente se relaciona con el potencial de que las vibraciones causen daño a sus propiedades. Esta preocupación puede ser mostrada por daños ya existentes y debidos a recientes descubrimientos de rajaduras que pueden haber estado presentes allí desde hace algún tiempo y que pueden ser causados por procesos naturales. Amenudo, no obstante, la preocupación se basa en el sentimiento de que el daño va a ser causado en algún momento como resultado de repetidas vibraciones.

25. El grado de preocupación y de si se realizan las queja o no, es gobernado por muchos factores. Tal vez el mas obvio es la vibración por si misma en términos de su magnitud, duración y frecuencia. No obstante, la magnitud de vibración a la cual se originan reclamos varia enormemente de un sitio a otro, tal que no existe un umbral determinado en la cual se presentan quejas. Esto es considerado en parte como una reflexión en el hecho de que los individuos distinguen muy poco entre vibraciones de diferente magnitud.

26. La Susceptibilidad de los individuos a las vibraciones puede variar de persona a persona, dependiendo de factores tales como: la edad, salud y en gran medida la exposición previa. Generalmente se presenta el caso de que cuando los vecinos se acostumbran a los vibraciones producidas por las voladuras cesan los comentarios adversos. La explicación de la importancia y necesidad de las voladuras y de los niveles de vibraciones que se van a generar por las voladuras generan un actitud comprensiva hacia el operador.

C.3.1.5. Efectos sobre las estructuras 27. Cuando se esta definiendo daños en estructuras de tipo residencial la siguiente clasificación es usada:

Daño cosmético o umbral de daño – Con la formación de grietas finas o el crecimiento de grietas existentes en el estuco, superficie de paredes aligeradas y juntas en mortero.

Daño menor – Con la formación de grietas largas o perdida y caída de superficies tanto de estuco como de paredes aligeradas o grietas en bloques de concreto y ladrillo.

Daño mayor o daño estructural – Daño en elementos estructurales o en la edificación.

28. La BS 7385 de 1993 da una guía de valores respecto a la anterior clasificación de daño en estructuras residenciales en términos de la velocidad pico de partícula y frecuencia. Estos valores son basados en los niveles mas bajos encima de los cuales daño ha sido convincentemente demostrado.

29. Se puede presentar daño cosmético a una frecuencia de 4 Hz con valores de velocidad pico de partícula de 15 mm/s, incrementandose a una velocidad pico de 20 mm/s a los 15 Hz y de 50 mm/s hacia los 40 Hz y frecuencias superiores. Se presenta daño menor con magnitudes de vibración mayores a dos veces las dadas por las de daño cosmético y posiblemente daño mayor en la estructura a niveles mayores a cuatro veces los valores del daño cosmético. Estos valores aplican también cuando un estructura experimenta eventos repetidos de vibraciones.

30. Aunque el miedo al daño es la mayor preocupación de los de las personas que viven cerca a trabajos de minería superficial, la realidad es que los niveles de vibración en las viviendas cercanas, raramente se aproxima a los niveles necesarios para los cuales se producen grietas cosméticas en el estuco. Estructuras como aquellas de las industrias, edificios de comercio grandes o construcciones bajo tierra, son capaces de soportar niveles de vibraciones mayores a los aplicables en las residenciales, en virtud de que estas tienen diseños mas robustos.

31. La BS 7385 parte 1 de 1990 y parte 2 de 1993 discute sobre la resistencia de las estructuras a vibraciones inducidas por voladuras y especifica valores guía a los cuales no se produce daño en varios tipos de estructuras.

C.3.1.6. Predicción 32. La variación en en el peso de carga de explosivos detonada en un instante de tiempo esta relacionado estrechamente a la variación en la magnitud de vibración. Este parámetro junto con la distancia desde la voladuras forman la base para la predicción niveles de vibración.

33. El método aceptado de predicción es el de graficar el valor de velocidad pico de partícula contra la distancia escalada de las mediciones. La distancia escalada es el valor de la distancia

entre la voladura y el sensor dividido por la raíz cuadrada de la máxima carga instantánea de explosivos detonada para la cual se realizó la medición.

34. Cuando un buen número de valores de VPP y distancia escalada de un sitio son graficados en escala logarítmica se observa la existencia de una relación lineal. Tomando registros de vibraciones a separaciones mayores desde una voladura garantiza que los efectos geológicos sean cubiertos y si luego una cantidad de voladuras se monitorean en un solo sitio, la variación entre este y el lugar de las voladuras puede ser cuantificada.

35. La transmisión de vibraciones no puede nunca ser la misma en todas las direcciones desde el sitio de voladura, para cuantificar estas diferencias es necesario registros de vibraciones en diferentes direcciones.

C.3.1.7. Efectos de la geología 36. Una vez que las vibraciones son generadas en la fuente, es la geología la que determina en gran parte la manera en la cual se transmitirá las vibraciones, y por lo tanto las características predominantes de las vibraciones, incluyendo su magnitud a cualquier distancia dada. Un factor importante al respecto, es que la velocidad de propagación es una medida indirecta de las características geológicas, las que afectan la tasa de decaimiento de las vibraciones. Las variaciones en las velocidades de propagación en un tipo de roca, e inclusive entre tipos de roca, pueden ser significativos, por lo tanto es importante realizar mediciones de vibraciones específicas para cada sitio.

[Aquí la norma incluye una discusión sobre el ruido, polvo, eyecciones de rocas y presión acústica.]

C.3.2. Condiciones

C.3.2.1. Niveles de vibración permitidos 80. Los niveles de vibración permitidos deben ser especificados en términos de velocidad pico de partícula y deben ser medidos en milímetros sobre segundo. La instrumentación utilizada debe tener 3 sensores en direcciones mutuamente perpendiculares. Debe ser registrado con el fin de demostrar el cumplimiento con la BS 6472, que trata sobre la percepción humana de las voladuras, registros adicionales pueden ser necesarios dentro de la edificación en el lugar donde los ocupantes se sientan incómodos con las vibraciones. (ver paragrafo 97, en la pág 134)

81. En la determinación del nivel preciso de la velocidad pico de partícula se debe reconocer que la imperceptibilidad no es un criterio realista, el limite debería ser siempre escogido para minimizar las vibraciones admisibles por el terreno, esto acorde con la buena practica, seguridad y eficiencia en voladuras. como tal, circunstancias individuales para un sitio en particular deben ser consideradas. Los valores especificados deben ser compatibles con las guías actuales en esta materia dada en las publicaciones relevantes de la British Standards,

particularmente la BS 6472 de 1992 sobre la percepción y la BS 7385 parte 2 de 1993 respecto a la probabilidad de daño.

82. Para determinar el período de tiempo específico en que se realizan mediciones es necesario considerar con anticipación la frecuencia con que se realizaran las voladuras, esto con el fin de que un número representativo de voladuras pueda ser valorado. También es necesario considerar que el período de tiempo sea representativo de cualquier variación del sitio en la ubicación de las explosiones y/o el diseño que se utiliza.

83. Con el fin de ser capaz de evaluar el cumplimiento con el estándar de la probabilidad del 95 %, el número de voladuras consideradas debe idealmente ser 100 o más, sin embargo, en la práctica puede ser irracional extender el período de tiempo de observación a más de 12 meses antes de que la valoración pueda ser emprendida, aun si el número de eventos es realmente pequeño. *[aquí va una pequeña discusión sobre frentes en minas de carbón]*. Un período de tiempo mínimo de 3 meses puede ser considerado suficientemente representativo de las variaciones de las voladuras en voladuras de minas a cielo abierto y canteras.

84. Los valores escogidos deben identificar el hecho de que las voladuras en la práctica tienen que ser diseñadas de tal manera que el intervalo de confianza del 95 % raramente sea excedido o aproximado. Por consiguiente las voladuras deben ser diseñadas para que los valores medios o promedios de vibraciones estén alrededor de la mitad del 95 % del nivel de confianza. En la práctica, se desea que los valores generados sean más bajos que este valor promedio.

85. Una vez el umbral de percepción es excedido, la probabilidad de quejas es en mayor parte independiente de la magnitud de las vibraciones, pero es en gran medida influenciada por las relaciones entre el operador y la comunidad.

86. Generalmente, las voladuras individuales no debe exceder los 12 mm/s. El nivel promedio no debe exceder los 10 mm/s, y comúnmente no deben estar debajo de 6 mm/s en el 95 % de todas las voladuras registradas. Estos niveles están conforme con la BS 6472 de 1992 y la BS 7385 de 1993 parte 2.

87. Bajo circunstancias excepcionales puede ser apropiado que los niveles estén fuera del rango de 6 a 10 mm/s, tales circunstancias deben ser cuidadosamente examinadas por que niveles mayores a estos pueden incrementar la probabilidad de daño en propiedades; niveles menores al rango recomendado pueden en la práctica resultar en un mayor número de voladuras para producir el mismo cantidad de extracción, lo cual puede ser contraproducente ambientalmente.

88. Niveles menores deben ser considerados en aproximaciones a hospitales y laboratorios de precisión y donde se realicen trabajos delicados o se operen equipos muy sensibles y deban coincidir con las voladuras. En la determinación de los niveles de vibración permitidos se

deben considerar detalladamente cualquier potencial de restricción de las voladuras. Una justificación completamente racional debe ser dada a las autoridades de planeación cuando se inflijan los niveles de vibración recomendados.

89. *Historic Scotland* debe ser consultada cuando se consideren voladuras de minería superficial que puedan afectar a edificaciones listadas como "Categoría A", o este ubicada en un sitio que este programado o se encuentre en construcción un monumento. Es necesario que los niveles de vibración por voladuras en estructuras históricas estén por debajo de el rango recomendado. Esto puede incluir un meticuloso levantamiento de todos las edificaciones, recogiendo anchos largo y profundidad de todos los defectos antes del comienzo de las voladuras y un monitoreo continuo de estos defectos durante las operaciones de voladuras, hasta el momento en que el monitoreo indique que no ha ocurrido daño debido a las voladuras.

C.3.2.2. Limitación en el número de voladuras 91. Permisos ocasionales incluyen limitaciones en el número de voladuras permitidas en un día o semana, variando típicamente de una a dos voladuras por día a una o dos voladuras por semana. Con la adopción adecuada de criterios de vibración específicos para el sitio tales condiciones son innecesarias.

C.3.2.3. Edificaciones susceptibles a vibraciones 92. Las autoridades encargadas de planeación y los operadores de las minas deben considerar los efectos en las edificaciones susceptibles a vibraciones. Un edificación susceptible es cualquiera ocupada por una o varias personas regular o irregularmente como aposento, lugar de trabajo, sitio de reunion, etcetera (por ejemplo, propiedad residencial, colegios, oficinas, locales comerciales, iglesias, salones comunitarios). Tal ocupación no necesariamente ocurre al mismo tiempo que la voladura.

[Aquí la norma incluye un esquema de control de presión acústica]

C.3.2.4. Esquema de monitores de vibraciones 97. Los requerimientos precisos de cualquier esquema de monitoreo de vibraciones inducidas por voladuras debe ser materia de discusión entre la autoridad planificadora y el operador. Los requerimientos van a ser dependientes del sitio y pueden tomar en cuenta las condiciones locales. Cualquier esquema de medición debe considerar:

- *La localización y el numero de puntos de monitoreo*

Usualmente la edificación mas susceptible a vibraciones y mas cercana a las sitio de voladura debería ser la localización preferida para el monitoreo. Cuando las voladuras se realizan en mas de un área, entonces es necesario mas de un sitio de monitoreo. Puede ser también apropiado el monitoreo en otros lugares susceptibles a vibraciones aunque no sean los mas cercanos al sitio de voladura.

En algunas circunstancias el acceso a edificaciones sensibles a vibraciones pueden no ser ejecutado (viable), en este caso, se debe considerar seleccionar una localización alejada desde la edificación y en línea con el área de voladuras, en la cual se pueda regularmente monitorear, esta localización debe estar junto en los límites del sitio.

- *El tipo de equipos a usar y los parámetros a ser medidos*

Las mediciones deben ser realizadas usando monitores especialmente diseñados para el fin de monitoreo de vibraciones por voladuras, tales instrumentos, llamados sismógrafos, deben ser capaces de registrar tanto vibraciones del suelo como del aire; las vibraciones del suelo deben ser grabadas en términos de la velocidad de partícula pico con unidades de milímetros por segundo (mm/s) en 3 direcciones mutuamente perpendiculares; las vibraciones aéreas deben ser medidas en decibeles (dB) o en una escala lineal en con unidades de libras por pulgada al cuadrado (p.s.i.).

- *Que tan a menudo las mediciones deben ser tomadas*

En general todas las voladuras deberían ser monitoreadas para así tener la capacidad de demostrar la conformidad con los límites de vibraciones; en situaciones donde los niveles de vibración medidos sean relativamente bajos comparados con los límites del lugar, puede ser apropiado que únicamente un muestra representativa de voladuras sobre un determinado periodo de tiempo sean monitoreadas, en todos los casos el esquema debe ser precisamente definido lo que es requerido.

- *El método por cuál los datos se hacen disponibles a la autoridad de planeación*

Los resultados del monitoreo deben estar libremente disponibles para las autoridades de planeación; típicamente los resultados deben conservarse en el sitio y estar disponibles para inspección por las autoridades de planeación a todo momento, y se debe proporcionar copias las autoridades bajo su petición.

- *El método por el cual los datos son usados en orden de asegurar que los límites de vibración en el sitio no han sido excedidos y para mitigar cualquier efecto ambiental de la voladura*

Procedimientos pueden ser especificados si los valores registrados exceden el nivel acordado. Típicamente estos procedimientos deben involucrar notificación del evento a las autoridades con una valoración de sus implicaciones respecto a actividad futura de voladuras y los límites de vibración del sitio.

C.4. Norma Española UNE 22-381-93

C.4.1. Objeto

El objeto de esta norma es establecer un procedimiento de estudio y control de vibraciones producidas por voladuras con explosivos, y transmitidas por el terreno.

C.4.2. Campo de aplicación

El campo de aplicación se establece para aquellos casos de voladuras especiales en que se requiera la realización de un estudio de vibraciones.

Según el tipo de actividad, la presente norma es de aplicación a los trabajos con explosivos que se puedan clasificar en:

- Trabajos de explotación en minas y canteras, tanto en labores de extracción de materiales como en labores complementarias
- Trabajos de construcción en obras públicas
- Trabajos de demolición y especiales, en los que generalmente se emplean pequeñas cargas (demoliciones en general, taqueos, regeneración de pozos, etc.)

En relación a la posibilidad de realizar ensayos previos mediante explosivos con vistas a la obtención de datos para un estudio de vibraciones, hay que tener en cuenta que, en algunos trabajos, se puede alterar significativamente el elemento a volar con las pruebas. Este punto se tendrá en cuenta a la hora de definir el tipo de estudio requerido. Estas circunstancias se presentan sobre todo en los trabajos de demolición y especiales.

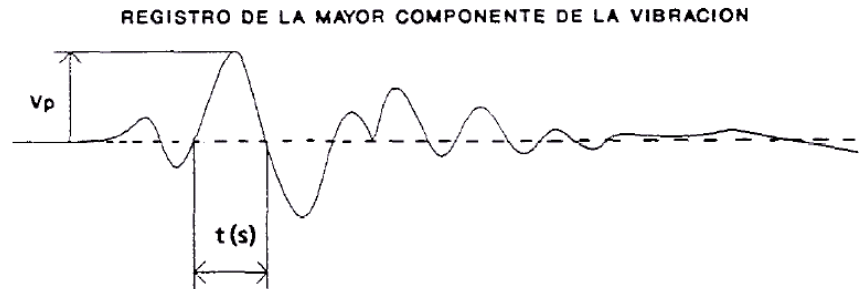
C.4.3. Clasificación de estructuras a efectos de la aplicación del criterio de prevención de daños

Se entiende por estructura colindante toda obra de origen antrópico con una finalidad útil y que sea susceptible de experimentar vibraciones.

Los tipos de estructuras objeto de la presente norma son exclusivamente las clasificables en los siguientes grupos:

Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.

Figura C.2. Determinación de los parámetros característicos de la vibración. V_p es velocidad de vibración pico, la frecuencia principal es $1/2t$



Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.

Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

NOTA - Para el resto de estructuras el estudio de vibraciones se ajustará a los criterios de la Administración encargada de velar por la seguridad de las personas y las instalaciones, en función del objetivo del proyecto y del tipo de estructuras que previsiblemente puedan estar afectadas.

C.4.4. Determinación de los parámetros característicos de la vibración

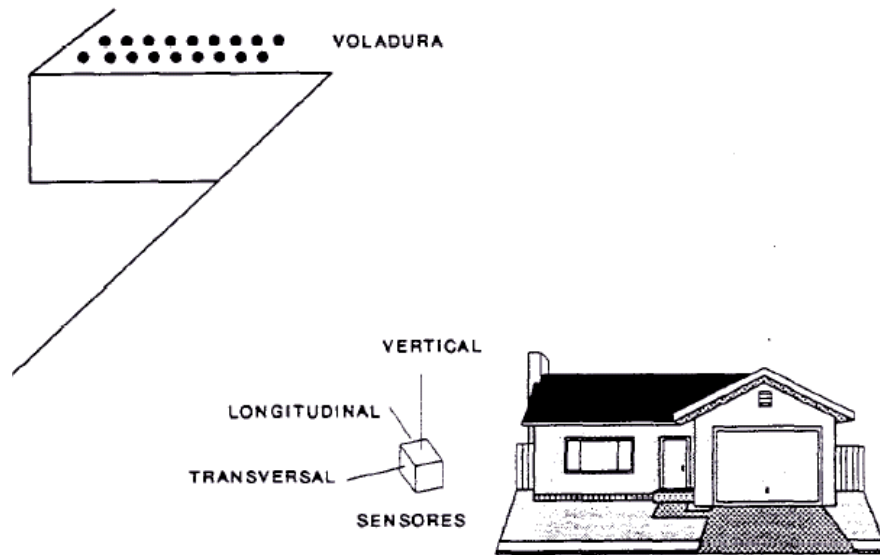
Las vibraciones derivadas de voladuras son oscilaciones transitorias y no periódicas que se propagan por el terreno a una velocidad característica del mismo o velocidad de propagación.

Se define como parámetros característicos de la vibración en esta norma los siguientes:

- Valor pico de la velocidad de vibración en su mayor componente.
- Frecuencia principal de la vibración.

El valor pico de la velocidad de vibración corresponde a la máxima desviación del registro tanto positiva como negativamente sobre el origen (véase figura C.2). si el registro de la vibración fuera en aceleración o desplazamiento tendría que ser integrado o derivado para obtener el registro de velocidad.

Figura C.3. Orientación de los sensores



Dado que la vibración es un movimiento espacial, es necesario realizar, al menos, una medición de las tres componentes en tres direcciones perpendiculares entre sí, que normalmente suelen ser (véase figura C.3):

- Dirección vertical.
- Dirección longitudinal o componente horizontal en dirección a la voladura.
- Dirección transversal o componente horizontal perpendicular a la longitudinal.

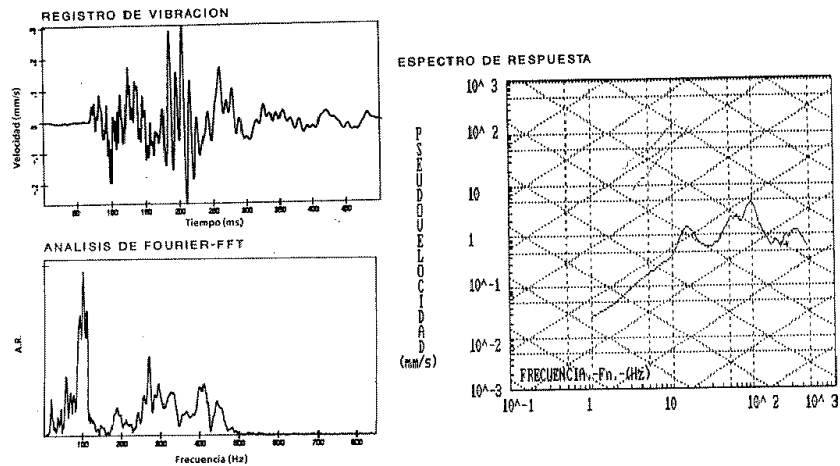
Analizando los tres registros se seleccionará aquella componente que presente un mayor valor pico.

Al ser este tipo de vibraciones no periódicas, participan en ellas diferentes frecuencias, entre las cuales hay que seleccionar una frecuencia principal característica, que varía con el tipo de terreno y con la distancia, siendo tanto más baja cuanto más blando sea el terreno (velocidad sísmica baja) y cuanto más distante esté el punto de registro.

Esta frecuencia principal se puede determinar por diferentes métodos, entre los que se mencionan los siguientes: (véase figura C.4)

- Análisis de Fourier de la señal, cuyo algoritmo aplicado al cálculo por ordenador se conoce como FFT
- Espectro de respuesta de la señal o pseudoespectro de velocidad

Figura C.4. Cálculo de la frecuencia principal



- El método del semiperíodo, que consiste en determinar el tiempo entre el cruce por el origen anterior y posterior al valor pico de la señal. Asignando ese valor al semiperíodo de la frecuencia principal, se puede calcular ésta según las fórmulas siguientes:

$$t(s) = T/2; \quad f(Hz) = 1/T = 1/2t$$

Estos parámetros característicos de la vibración servirán para su comparación con el criterio de prevención de daños.

Puede darse la circunstancia de que un registro presente varios picos de velocidad de vibración del mismo orden y con diferentes frecuencia. En este caso, habría que considerar la menor de las frecuencias. Esta circunstancia queda cubierta si se realiza un análisis de Fourier o de respuesta.

C.4.5. Criterio de prevención de daños

En la figura C.5 y la tabla C.9 se indican los niveles seguros para el valor pico de la mayor componente de la velocidad de vibración medido en el terreno.

El nivel está dado en función del grupo donde quede clasificada la estructura considerad, según la clasificación en la sección C.4.3, y de la frecuencia principal.

Figura C.5. Criterio de prevención de daños

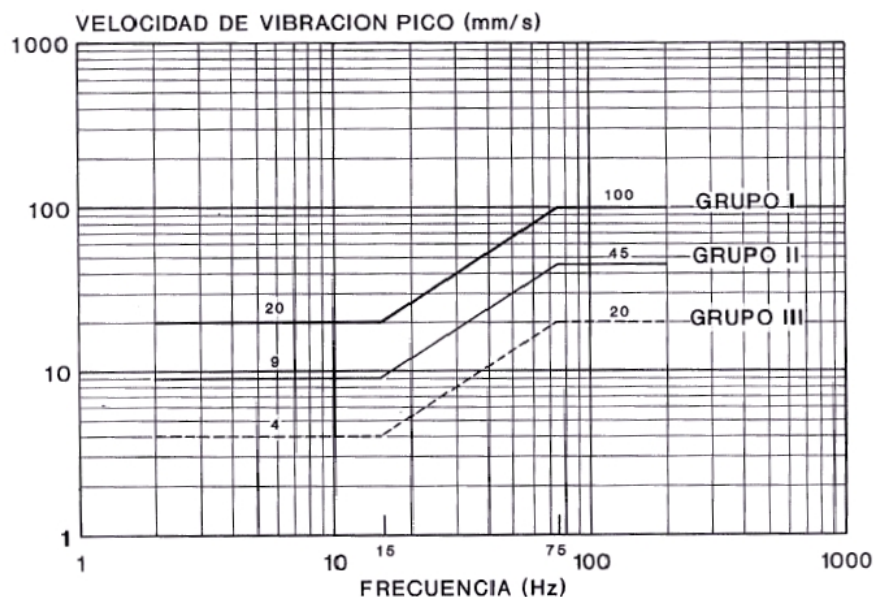


Tabla C.9. Criterios de prevención de daños

		Frecuencia Principal (Hz)		
		2 – 15	15 – 75 ^a	> 75
		Velocidad mm/s	Desplazamiento mm	Velocidad mm/s
Tipo de estructura	I	20	0.212	100
	II	9	0.095	45
	III	4	0.042	20

^a En los tramos de frecuencias comprendidas entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular al velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación:

$$V = 2\pi f d$$

donde:

V es la velocidad de vibración equivalente en mm/s

$\pi = 3.1416$

f es la frecuencia principal en Hz

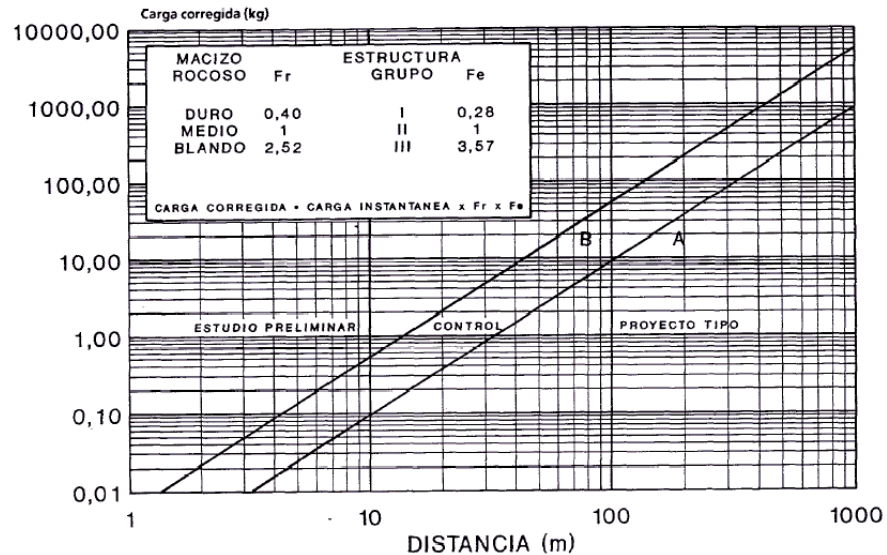
d es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla

Excepcionalmente, se podría aprobar niveles superiores a los indicados en casos concretos mediante la presentación de un informe detallado y técnicamente justificado (v.g. análisis de la respuesta en estructuras especialmente diseñadas, acuerdos entre la propiedad de la estructura y la empresa operadora, etc.).

C.4.6. Tipo de estudios de vibraciones requerido

El estudio requerido será función del tipo de trabajo a desarrollar mediante explosivos, de la estructura a preservar, del tipo de terreno, de la distancia existente entre la voladura y

Figura C.6. Tabla carga/distancia general. Selección del tipo de estudio



la estructura y de la carga máxima de explosivo a detonar instantáneamente o carga por secuencia.

En función del tipo de terreno y de la estructura a considerar, queda delimitado el tipo de estudio para unas condiciones de carga por secuencia y distancia determinadas.

Utilizando la figura C.6 se puede conocer el tipo de estudio que podría ser requerido siguiendo el proceso siguiente:

- a) Se determinará el tipo de macizo rocoso sobre el que está cimentada la estructura de acuerdo con la siguiente clasificación, que tiene en cuenta la velocidad sísmica estimada; es decir, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el macizo rocoso considerado:

Formación rocosa dura: Aquella cuya velocidad sísmica es superior a 4.000 m/s.

Formación rocosa media: Aquella cuya velocidad sísmica está comprendida entre 2.000 y 4.000 m/s.

Formación rocosa blanda Aquella cuya velocidad sísmica es inferior a 2.000 m/s.

- b) Se determinará el grupo de estructura en función de la clasificación, ya dada en el apartado C.4.3.
- c) Se determinará la distancia entre la voladura y la estructura en metros.
- d) Se determinará la carga máxima instantánea de proyecto en kg que se prevé detonar. Esta carga, también llamada carga por secuencia, es la suma de todas las cargas de

explosivos detonadas con el mismo número de detonador, y para secuencias ente números superiores a 8 ms. Si existen varias secuencias, se considerará la que tenga mayor carga.

En función del grupo de la estructura y del tipo de macizo rocoso se corregirá la carga instantánea multiplicándola por un factor F_e , que considera la estructura a preservar, y un factor F_r , que considera la frecuencia dominante que viene condicionada al tipo de macizo rocoso.

$$Q_c = F_r F_e Q$$

Los valores que toma F_e y F_r se pueden ver en las tablas siguientes:

Tabla C.10. Valores de F_e

Estructura grupo	F_e
I	0.28
II	1
III	3.57

Tabla C.11. Valores de F_r

Estructura grupo	F_r
Duro	0.40
Medio	1
Blando	2.52

Con el valor de Q_c , o carga corregida, y la distancia considerada, se entrará en la figura C.6 definiendo el punto P del caso que se estudia.

Si el punto P está por encima de la recta B, podría ser exigible un estudio preliminar de vibraciones, tal y como se describe en el apartado C.4.7.3.

Si el punto P está entre la curva A y B, se podría requerir una medición de control de la voladura proyectada, tal y como se describe en el apartado C.4.7.2.

Si, por último, el punto está por debajo de la recta A, sólo será necesaria la inclusión en el proyecto de esta justificación con la figura C.6, tal y como se describe en el apartado C.4.7.1.

Para aquellos trabajos en los que la realización de ensayos previos suponga una alteración importante del elemento a volar, el tipo de estudio requerido podrá ser únicamente uno de los siguientes:

- Medición de control.
- Proyecto tipo de vibraciones.

A continuación se dan las expresiones analíticas de las rectas A y B en función del tipo de estructuras y de macizo rocoso para su utilización en lugar de la figura C.6.

$$Q = 924,79 \cdot 10^{-6} \frac{1}{F_e} \frac{1}{F_r} F_a D^2$$

donde

Q es la carga máxima instantánea en kilogramos;

D es la distancia en metros.

F_e es el factor de estructura igual a:

0.28	.....	Grupo I
1	.....	Grupo II
3.57	.....	Grupo III

F_r es el factor del macizo rocoso igual a:

2.52	.....	Macizo rocoso blando
1	.....	Macizo rocoso medio
0.40	.....	Macizo rocoso duro

F_a es el factor de la recta

1	.....	recta A
5.77	.....	recta B

C.4.7. Definición de los diferentes tipos de estudio de vibraciones

C.4.7.1. Proyecto tipo de vibraciones Este caso se produce cuando la posición del punto P en la figura C.6 queda por debajo de la recta A, es decir, la carga instantánea de explosivo del proyecto es tan baja para esa distancia que es descartable cualquier incidencia de las vibraciones.

En este caso bastará con adjuntar al proyecto de voladura una hoja con la figura C.6 en la que figure el citado punto, así como una memoria explicativa.

C.4.7.2. Medición de control de vibraciones Este tipo de estudio puede ser requerido cuando el punto P esté situado entre las rectas A y B.

El control de vibraciones implica la medición del nivel de vibración de una voladura de producción en el punto definido.

Los datos que debe aportar un control de vibraciones son: carga máxima instantánea, carga por cada secuencia y secuencias empleadas, distancia y velocidad de vibración pico para cada componente junto a las frecuencias dominantes, así como la ubicación de los puntos de disparo y registro. También incluirá una breve descripción del terreno.

Si el nivel de vibración resultante del control fuera menor que el nivel fijado por el criterio de prevención de daños, podrá incrementarse progresivamente la carga en controles posteriores, manteniendo igual el resto de los parámetros, hasta que los niveles resultantes sean iguales o inferiores al valor de vibración admisible, calculado según las tablas dadas en la sección C.4.5

Si el nivel de vibración resultante del control superase el nivel fijado por el criterio de prevención de daños, sería necesario un estudio preliminar de vibraciones para voladuras posteriores.

C.4.7.3. Estudio preliminar de vibraciones Este tipo de estudio podría ser requerido cuando el punto P esté situado por encima de la recta B.

Este tipo de estudio es necesario en circunstancias de trabajo tales que se desee conocer el comportamiento sísmico del terreno, es decir, la relación existente entre la carga detonada, la vibración generada y la distancia. Para ello, será necesaria la realización de ensayos previos.

Las pruebas pasarán por las siguientes fases:

- Determinación de la componente principal con un registro de las tres componentes.
- Medición de la componente principal en posiciones distantes entre sí de manera que cubran el área de interés.
- Medición con diferentes cargas instantáneas en orden creciente hasta llegar, si es posible, a cargas del mismo orden de las que se prevén utilizar controlando los niveles obtenidos in situ.
- Ajuste de los datos de una ley de amortiguación.
- Determinación de la frecuencia dominante en el rango de distancias estudiado.
- Determinación del nivel máximo de vibración obtenido del criterio de prevención de daños en función del tipo de estructura y de la frecuencia dominante.

- Cálculo de las tablas carga instantánea/distancia.

El ajuste de los puntos de ensayo se realizará a las leyes tipo:

- La ley general: $V = KQ^\alpha D^\beta$
- La ley cuadrática: $V = K(D/\sqrt{Q})^\beta$

Las pruebas se han de plantear en base a la detonación de voladuras con diferentes cargas instantáneas, o bien, en base a la ejecución de barrenos individuales confinados con diferentes cargas.

Los ensayos confinados suelen generar niveles de vibración más altos que las voladuras de producción; por tanto, en caso de haber realizado el estudio con cargas confinadas, se podría revisar el estudio con datos posteriores en voladuras de producción.

La realización de controles sucesivos, tal y como se indica en el apartado C.4.7.2, puede aportar datos suficientes para la realización de un estudio preliminar de vibraciones y, por tanto, se convierte en una vía alternativa para la realización de un estudio preliminar. Una vez obtenida la ley que relacione la velocidad de vibración máxima pico con la carga por secuencia detonada y la distancia, se podrá calcular la tabla carga por secuencia/distancia en base al límite de vibración fijado por el criterio de prevención de daños.

C.4.8. Instrumentación a emplear

C.4.8.1. Requerimientos de los equipos Los requerimientos mínimos del sismógrafo adecuado para realizar tanto un control como un estudio preliminar son:

- Capacidad de registrar las tres componentes de la vibración. Si hubiera constatación anterior de la componente principal, se podría utilizar sismógrafos de un solo canal registrando la componente principal.
- Respuesta lineal del equipo en el rango de frecuencias 2 Hz a 200 Hz. Asimismo, si hubiera constatación anterior del rango de frecuencias de la vibración, se podría emplear equipos con un comportamiento línea en este rango.
- Capacidad de detección de niveles pico de vibración desde, al menos, 1 mm/s hasta 100 mm/s.

Los datos técnicos del sismógrafo o sismógrafos empleados en el estudio o control, se incluirán en el informe correspondiente al mismo.

C.4.8.2. Fijación de los sensores al terreno Los sensores utilizados han de ser colocados en el terreno sobre el que está cimentada la estructura, al objeto de determinar la vibración que recibe dicha estructura. Habrá de evitarse la medición en la propia estructura, ya que en ese caso se registraría la respuesta de la misma.

Siempre que se prevea la medición de aceleraciones menores a 0.2 g, se podrá apoyar el sensor, unido a un cubo con una masa suficiente par evitar deslizamientos y con tres patas de apoyo puntuales. Sin embargo, siempre que se prevean aceleraciones mayores a 0.2 g, los sensores se deberán fijar firmemente al terreno con pernos, pegamento u otro sistema.

En terrenos sueltos se podrá clavar el sensor mediante un perno o bien habrá de ser enterrado.

En la figura C.7 se muestran esquemáticamente los sistemas descritos de fijación.

