

## 3. REGLAMENTACIÓN EN MANEJO DE VIBRACIONES

### 3.1. Introducción

Durante la última década se ha incrementado el número de estructuras sometidas a sollicitaciones por vibraciones, esto influenciado por migraciones de poblaciones a sitios con fuentes generadoras de vibraciones. Pero también ha aumentado la cantidad y magnitud de las vibraciones, principalmente debido factores sociales y económicos que han impulsado el desarrollo, entendido como producción a gran escala de las obras civiles y minería (fuentes generadoras de vibraciones). Con el aumento en los niveles de vibraciones, la cantidad de edificaciones y de fuentes generadoras de vibración, es necesario entonces poner cotas máximas a los niveles de vibraciones con el fin de evitar daños en las edificaciones.

En el ámbito internacional, las vibraciones producidas por voladuras con posibilidad de daños en edificaciones, se han realizado en acuerdo con ciertos niveles de vibraciones máximos. Los valores máximos, encontrados por medio de mediciones y reconocimiento de daños en edificaciones, incluyen cierto margen de seguridad, y son en muchos casos parte de una legislación o normatividad técnica.

El fin de esta sección es revisar y aplicar la normatividad internacional en un contexto local. Aquí se muestran algunos de los conceptos básicos en los que se basa la normatividad internacional (sección 3.2), se revisan algunas de las normas internacionales (sección 3.3) y se implementan los valores representativos para el caso particular de mina La Calera (sección 3.4)

### 3.2. Aspectos básicos

Las vibraciones causadas por el ser humano pueden causar daños desde estructurales a cosméticos en las edificaciones; en la mayoría de los casos tales vibraciones son generadas por voladuras, maquinaria de construcción y tráfico vehicular o férreo.

Estas vibraciones inducen esfuerzos dinámicos en edificaciones, generando deformaciones temporales en todos los elementos constitutivos de la edificación. Sumados a los esfuerzos estáticos preexistentes, estas deformaciones dinámicas pueden causar daños en la edificación.

La relación entre velocidad de vibración –velocidad de partícula o resultante– y esfuerzos, en el caso idealizado de una onda plana en un medio elástico infinito, está dada por

$$\sigma = \varepsilon E, \varepsilon = \dot{u}/c, \sigma = \dot{u}E/c,$$

siendo  $\sigma$  el esfuerzo,  $\varepsilon$  la deformación,  $E$  el módulo de elasticidad,  $\dot{u}$  la velocidad de partícula y  $c$  la velocidad de propagación de la onda sísmica (Persson et al., 1994). En consecuencia, para un substrato geológico y un tipo de edificación determinado (i.e, velocidad de propagación y módulo de elasticidad constante), la velocidad de vibración de partícula es la variable decisiva, es decir es la que determina los esfuerzos, los que pueden ser los causantes de daños. Por esta razón, todas las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños por estremecimientos generados por vibraciones de causa humana utilizan la velocidad de vibración como variable básica.

Por otro lado, la magnitud de las deformaciones que un nivel de vibración dado genera en una estructura también depende del comportamiento dinámico de ésta, y en particular de sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en conjunto y las de los elementos individuales). Por ésto, la frecuencia (el inverso del período) de la vibración incidente es la segunda variable básica en la evaluación del potencial de daños.

Sin embargo, la probabilidad de daños por vibraciones depende de muchos otros factores, tales como:

- la duración de las vibraciones,
- la cantidad de solicitaciones a las que es sometida la estructura,
- la resistencia de los materiales que constituyen la estructura,
- la calidad de la construcción - los esfuerzos estáticos preexistentes (incrementados por ejemplo por asentamientos del suelo)
- el nivel de mantenimiento y conservación de la estructura.

Una evaluación rigurosa del potencial de daños por vibración en una serie de estructuras no es económicamente justificable en la mayoría de los casos. Por esto se ha recurrido generalmente a normas y recomendaciones que relacionan características de la estructura y del suelo de cimentación con el tipo de vibración, o con los niveles de vibración (velocidad de partícula, frecuencia dominante, cantidad de solicitaciones), o sólo con características de la voladura misma (cantidad de carga, distancias, etc.) Estas normas generalmente se fundamentan en la experiencia de varias décadas, involucrando miles de mediciones y observaciones de daños. Sin embargo, su aplicación en ambientes diferentes a los de su origen requiere una cuidadosa evaluación y asimilación, debiéndose considerar aspectos tales como las tipologías de las estructuras, materiales de construcción y prácticas constructivas. Con este requisito, las normas también pueden ser utilizadas como guías en países que no poseen norma propia, como ocurre en Colombia.

Salvo las normas específicas para voladuras con explosivos, las reglamentaciones para el control de efectos de vibraciones antropogénicas no distinguen el tipo de fuente. En esos

casos la diferenciación de la fuente se hace a partir de los parámetros de movimiento, estableciendo diferencias según la cantidad de sollicitaciones –duración de los máximos– presentes en la señal.

Hoy en día el control de los efectos adversos de vibraciones causadas en la Ingeniería Civil y Minería, se logra mediante el acatamiento de los niveles sugeridos en las normas específicas, así como mediante el diseño y manejo apropiado de los respectivos equipos y procesos causantes de las vibraciones. Por ejemplo los niveles de vibración causados por voladuras se pueden reducir mediante la limitación de las cargas o secuenciando las voladuras de tal forma que la energía transmitida al suelo sea distribuida en el tiempo, lo cual disminuye las velocidades máximas de vibración. Hoy en día hay técnicas aún más sofisticadas, que mediante una secuenciación muy controlada (y previamente diseñada) logran fenómenos de interferencia destructiva y directividad en el campo de ondas generado por la voladura.

Los valores máximos de velocidades de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra. Quizás el valor indicativo que más se ha implantado es el de 2 pulg/s (50.8 mm/s), que se fundamenta en voluminosas observaciones de Langefors y Kihlström (Bollinger, 1980; Persson et al., 1994), quienes en 1963 establecieron, para diversos tipos de suelos, valores de la velocidad de partícula pico y sus efectos asociados.

Por otro lado, es importante evaluar las vibraciones en 3 direcciones ortogonales (como algunas normas lo exigen), con el fin de observar asimetría de radiación en las voladuras, propiedades de los diferentes tipos de onda generadas, así como observar particularidades de la transmisión de ondas elásticas en el suelo.

### **3.3. Reglamentación Internacional**

Como parte de este proyecto se plantea la utilización de normas internacionales sobre el control de vibraciones, la Tabla 3.1 muestra aquellas que son relevantes a criterio del autor.

*Tabla 3.1. Normatividad internacional en el manejo de voladuras*

| Pais de procedencia   | Nombre de reglamentación | Fecha de expedición |
|-----------------------|--------------------------|---------------------|
| Alemania <sup>a</sup> | DIN 4150                 | 1975                |
| Brasil                | CETESB D7.013            | 1998                |
| Escocia               | PAN50                    | 2000                |
| EEUU - Federal        | USBM RI8507              | 1980                |
| EEUU - Federal        | OSM 817.67               | 1983                |
| España                | UNE 22-381-93            | 1993                |
| Francia               | Recomendaciones GFEE     | 2001                |
| Internacional         | ISO 4866                 | 1990                |
| Italia                | UNI 9916                 | 1991                |
| Nueva Zelanda         | NZS 4403                 | 1976                |
| Portugal              | NP2074                   | 1983                |
| Reino Unido           | BSI 6472                 | 1992                |
| Reino Unido           | BSI 7385                 | 1993                |
| Sueca                 | SS 460 48 46             | 1991                |
| Suiza                 | SN 640 312a              | 1992                |

<sup>a</sup> La norma alemana tiene además tres actualizaciones en los años 1999 y 2001.

Sin embargo, las normas que se utilizaran en este trabajo son: -1- DIN 4150 (Alemania) de 1975 y actualizaciones, -2- PAN50 (Escocia), -3- USBM RI8507 (EEUU), -4- OSM 817.67 (EEUU), -5- UNE 22-381-93 (España), -6- ISO 4866 (Internacional), -7- SS 460 48 46 (Suecia) y -8- SN 640 312a (Suiza). Se escogieron estas ocho normas, por disponibilidad (1 –actualizaciones–, 2, 4, 5, 6, 8) o por que se encontraron referencias indirectas a los valores representativos de ellas (1 –1975–, 3, 7).

Con el fin de tener una visión panorámica de las normas y sintetizar los diferentes aspectos de ellas en lo que respecta a: variables, valores indicativos, sensores, tipos constructivos, etc. se elaboró la Tabla A.4 (pág. 89).

De las normas disponibles, se tradujeron la PAN50 (Escocia) y la SN 640 312a (Suiza), en inglés y alemán respectivamente, las que se incluyen en el anexo C, adicionalmente se incluyó la UNE 22-381-93 (España).

### **3.3.1. Alemania - DIN 4150**

El Instituto de Normalización Alemana o DIN (Deutsches Institut für Normung) ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibración, el primero en 1975, el cual fue desglosado (3 partes) y actualizado en 1999 y 2001.

Los criterios de la DIN 4150 de 1975 a partir de información en Persson et al. (1994) se

resumen en la tabla 3.2.

*Tabla 3.2. Resumen de los valores indicativos de la norma DIN 4150*

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . .   | Vibraciones producidas por cualquier fuente.                                      |
| <b>Variables medidas</b> . . . . .   | Velocidad vertical pico [mm/s] y velocidad de partícula pico o resultante [mm/s]. |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | Ver tablas A.2.   |

Los valores indicativos recomendados por la DIN 4150:1975 dependen del tipo de edificación, como se muestran en la tabla A.2 (página 87). Una de las características importantes en esta norma es la inclusión de valores máximos (de partícula y pico vertical) para edificaciones históricas, lo cual es importante para este proyecto debido a que en el área de estudio existe una de estas: la capilla de la hacienda Mulaló.

Las actualizaciones de la norma DIN mencionadas son: 1) Predicción de los parámetros de medición (DIN, 2001b), 2) Efectos en las personas dentro de edificaciones (DIN, 2001c) y 3) Efectos en estructuras (DIN, 2001a). De estas tres, la última es la más atractiva para este proyecto.

### **3.3.2. Escocia - PAN50**

Esta norma, desarrollada en Escocia y publicada en febrero de 2000, se basa en los estándares: BSI (British Standard Institute) BS-6472 de 1992 y BS-7385 partes 1 (sobre la medición) y 2 (sobre los efectos) de 1993, las guías de planeación nacional NPPG (National Planning Policy Guidelines) 4, 14 y 16, y las PAN (Planning Advice Notes) 56 y 58.

El Anexo D de la PAN 50 (*Control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial*), provee sugerencias para las autoridades encargadas de planificación así como a la industria minera de los efectos de las voladuras y de los límites aceptables en este tipo de trabajos. Las áreas en que actúa esta norma, las cuales implican impacto sobre el medio ambiente, construcciones y personas son: 1) Vibraciones del suelo, 2) Presión acústica (sobre-presión del aire), 3) Ruido, 4) Polvo, 5) Eyección de rocas.

Los puntos principales tratados en esta norma en cuanto se refiere a vibraciones producidas por voladuras son: 1) lugar donde se debe realizar las mediciones, donde aconsejan seguir las normas del BS-7385 parte 1 (ver resumen en tabla 3.3.2 – sitios de medición); 2) los niveles de amplificación en estructuras, se definen en un rango de frecuencias entre 5 y 40 Hz donde las estructuras pueden amplificar los movimientos del suelo y es probable que se presente daño cosmético; 3) los umbrales y tipos de daños en las viviendas producidos por vibraciones (véase resumen en Tabla 3.4); y 4) los efectos de la geología en las vibraciones inducidas por voladuras.

Tabla 3.3. Resumen de los valores indicativos de la PAN50

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . . . | Vibraciones en el suelo producidas por voladuras, pero también presión acústica, ruido, polvo y eyección de rocas.  |
| <b>VARIABLES MEDIDAS</b> . . . . .   | Velocidad pico en cada componente [mm/s] y velocidad de partícula –resultante– pico [mm/s].   |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | de 6 a 10 mm/s en el 95 % de las voladuras en un periodo de 6 meses, para voladuras individuales no debe ser superior a 12 mm/s. Adicionalmente valores en los que se pueden producir daños (Tabla 3.4) |
| <b>Sensores utilizados</b> . . . . . | Sensores de tres componentes que registren velocidad.   |
| <b>Sitio de medición</b> . . . . .   | Sobre el suelo, cerca de la fachada más cercana al sitio de voladura, cuando hay quejas también se realizan mediciones dentro de la estructura.   |
| <b>Particularidad</b> . . . . .      | Define velocidades mínimas.   |

Tabla 3.4. Valores de velocidad de partícula pico asociados con diferentes tipos de daños en la norma PAN50 Anexo D - Escocia

| Tipo de daño | Características   | Valores Indicativos (mm/s) |           |         |
|--------------|---|----------------------------|-----------|---------|
|              |   | < 4 Hz                     | 4 – 15 Hz | > 15 Hz |
| Cosmético    | Formación de grietas finas, crecimiento de grietas existentes en estuco, paredes delgadas o mortero.              | 15                         | 20        | 50      |
| Menor        | Formación de grietas largas, pérdida o caída de superficies de estuco, grietas en bloques de concreto y ladrillo. | 30                         | 40        | 100     |
| Estructural  | Daño en elementos estructurales.  | 60                         | 80        | 200     |

Tomado de Scottish Executive (2000).

El rango de valores máximos de 6 a 10 mm/s para conjuntos de voladuras o 12 mm/s para voladuras aisladas son concertados entre las empresas que realizan las voladuras y los organismos de planeación local, es decir se llega a un arreglo en cuanto a los valores máximos que la empresa generara, los cuales no deben ser mayores a los que causan daño cosmético en la proximidad de la vivienda más cercana a la zona de explotación minera (véase Tabla 3.4).

Una de las recomendaciones interesantes de esta norma consiste en limitar el nivel de vibraciones mínimas a 6 mm/s, optimizando así el número de voladuras. Esto es, si los niveles de vibraciones son pequeños, es porque probablemente la empresa minera esta realizando voladuras pequeñas, las cuales son a la larga antieconómicas.

### 3.3.3. EEUU - OSM 817.67

La norma federal de los EEUU pertinente es administrada por el OSMRE (*Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement*). La sección 817.67 (*"Use of explosives: Control of adverse effects"*), originalmente desarrollada para su uso en minería de carbón, prevé varios procedimientos para determinar los límites de velocidades de vibración de partícula, dependiendo del nivel de monitoreo disponible. Las características fundamentales de esta norma se presentan en la tabla 3.3.3.

*Tabla 3.5. Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67*

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . . . | Vibraciones en el suelo producidas por voladuras en minas de carbón.   |
| <b>Variables medidas</b> . . . . .   | Velocidad de partícula pico [mm/s] en cada componente o velocidad resultante pico [mm/s] del arreglo tridimensional de sensores. |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | 25.4 mm/s a distancias entre 100 y 1500 m y 19.0 mm/s para distancias superiores   |
| <b>Sensores utilizados</b> . . . . . | Sensores de tres componentes que registren velocidad.  |
| <b>Debilidades</b> . . . . .         | No es autosuficiente, necesita de la USBM RI8507 cuando se necesite utilizar la frecuencia en el análisis.                       |

Esta norma considera solamente la velocidad con valores máximos aceptables para distancias entre 100 y 1500 m de 25.4 mm/s y para distancias mayores de 19.0 mm/s. Los máximos admisibles son aplicables en la mayor velocidad encontrada en los tres sensores ortogonales. Los valores y procedimientos de la OSM 817.67 son además la base para otras normas estatales de los EEUU.

Esta norma refiere a los valores indicativos de la USBM RI8507 cuando se puede calcular la frecuencia dominante de las vibraciones. La ventaja radica en que los valores máximos de la USBM RI8507 son mayores a los del OSM 817.67 para frecuencias altas.

### 3.3.4. EEUU - USBM RI8507

La USBM RI8507 no es realmente una norma, es un reporte de investigación del departamento de minas de EEUU (USBM – *U.S. Bureau of Mines*) de los efectos de las vibraciones producidas por la mina de carbón Ayrshire en Evansville –Indiana– sobre viviendas cercanas (Siskind et al., 1993).

Aunque la RI8507 no es una norma, sus valores han sido aceptados en todo el mundo como umbrales para daño cosmético en viviendas debido a vibraciones causadas por voladuras. Las características fundamentales de la BI8507 se encuentran en la tabla 3.6

Tabla 3.6. Resumen de la USBM RI8507

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . . . | vibraciones producidas por voladuras  |
| <b>Variables medidas</b> . . . . .   | Velocidad de partícula pico [mm/s], frecuencia asociada a la máxima velocidad pico [Hz]   |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | ver línea puntea en figura 3.1  |
| <b>Sensores utilizados</b> . . . . . | Sensores de tres componentes que registren velocidad.   |
| <b>Debilidades</b> . . . . .         | Valores debajo de los 4 Hz no fueron comprobados. Las mediciones se realizaron con una distancia escalada <sup>†</sup> aparentemente constante. Son únicamente aplicables a viviendas |

<sup>†</sup>Relaciona la carga y la distancia de la voladura con la velocidad de partícula, es de la forma  $v = K/(R/\sqrt{W})^\alpha$ , donde  $R$  es la distancia entre la voladura y el sitio de medición,  $W$  es el peso de la carga por micro-retardo,  $v$  es la velocidad de partícula  $K$  y  $\alpha$  son constantes que dependen del sitio.

El RI8507 considera voladuras clasificadas como pequeñas en minería de carbón (menores a 2000 kg de explosivos por retardo), y que serían consideradas grandes en otros trabajos de minería y canteras. Las distancias usadas en este informe fueron de unos cuantos kilómetros de distancia –distancias moderadas–, con registro de daños en viviendas de uno y dos pisos. Uno de los alcances del RI8507 fue demostrar la incidencia de la frecuencia de las vibraciones en el daño de las estructuras.

La principal dificultad en USBM RI8507 radica en la poca información por debajo de los 4 Hz (véase figura 3.1). Al no tener suficiente información experimental en el rango 0 a 4 Hz trazaron una línea con pendiente 0.03 pulgadas ente 0 y 4 Hz (antiguo criterio de daño por sismos).

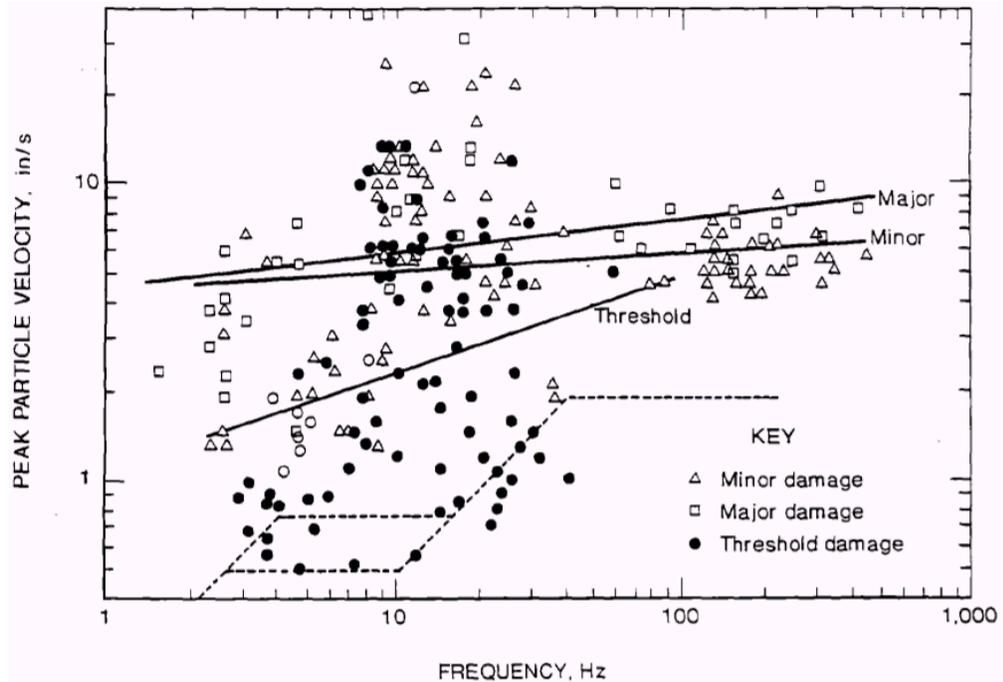
Los valores máximos admisibles de velocidades de partícula en los Estados Unidos están resumidos en la Figura 3.1; estos valores son aplicables únicamente para viviendas, y diferenciándolas según el tipo de mampostería (yeso y paredes aligeradas)

### 3.3.5. España - UNE 22-381-93

La norma española “Control de vibraciones producidas por voladuras” (AENOR, 1993), elaborada por la *Asociación Española de Normalización y Certificación* (AENOR) tiene como objetivo principal establecer un procedimiento de estudio y control de las vibraciones producidas por voladuras en trabajos de explotación de minas, canteras, obras civiles, demoliciones y otras técnicas que requieran el uso de explosivos (por ejemplo compactación de suelos). Los puntos relevantes de esta norma se presentan en la tabla 3.7.

Según esta norma el valor pico de la velocidad de vibración corresponde a la máxima desviación del registro positivo o negativo medido respecto al nivel cero u origen de la señal. Ya que la norma reglamenta velocidades máximas, cualquier registro que no sea de

Figura 3.1. Compendio de daños por vibraciones del USBM RI8507, la línea punteada corresponde a los límites hasta donde no se produce daños, tomado de Siskind et al. (1993)



velocidad debe ser llevado a estas unidades por medio de derivación (cuando se tienen desplazamientos) o integración (si se tienen aceleraciones), sin embargo hay que tener en cuenta los problemas que estas operaciones puedan tener y que por lo tanto es preferible medir las velocidades directamente (ver sección 2.2.2, pág. 7).

Como ya se mencionó, la velocidad máxima se selecciona de uno de los tres sensores ortogonales, específicamente del que tenga el máximo. En el arreglo de sensores, dos deben estar ubicados en una plano horizontal y uno perpendicular a éste (vertical); de los sensores en el plano horizontal uno debe estar orientado en dirección a la fuente – Longitudinal – y otro perpendicular a la longitudinal –Transversal–.

Tabla 3.7. Resumen de la norma UNE 22-381-93 (España)

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . .   | Vibraciones producidas por voladuras.   |
| <b>Variables medidas</b> . . . . .   | máxima velocidad pico en las componentes ortogonales en [mm/s] y frecuencia en Hz.  |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | véase Tabla 3.8.  |
| <b>Sensores utilizados</b> . . . . . | Sensores de tres componentes que registre velocidad (preferiblemente), desplazamiento o aceleración; respuesta lineal del equipo en el rango 2 a 200 Hz, capacidad de detección de niveles pico de al menos 1 a 100 mm/s. |
| <b>Ubicación sensores</b> . . . . .  | Sobre el suelo cercano a la(s) estructuras que van a estar sometidas a las vibraciones.   |
| <b>Fuerte</b> . . . . .              | — Cubre gran cantidad de tipos estructurales;<br>— por medio de un procedimiento sencillo se puede determinar el tipo de estudio de vibraciones requerido por el proyecto.  |

Tabla 3.8. Valores de velocidad máximos en mm/s y frecuencias para la prevención de daños según la norma española UNE 22-381-93

| Tipo de estructura  | Frecuencia principal (Hz) |                      |      |
|---|---------------------------|----------------------|------|
|   | 2 – 15                    | 15 – 75 <sup>a</sup> | > 75 |
|   | Vel. <sup>b</sup>         | Desp. <sup>c</sup>   | Vel. |
| I Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.  | 20                        | 0.212                | 100  |
| II Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones | 9                         | 0.095                | 45   |
| 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  | 4                         | 0.042                | 20   |

Con base en AENOR (1993).

<sup>a</sup> En el tramo de frecuencias comprendido entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular la 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,  $f$  es la frecuencia principal en Hz y  $d$  es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla.

<sup>b</sup> Velocidad máxima en mm/s.

<sup>c</sup> Desplazamiento máximo en mm (ver comentario a.)

Si el tipo de estructura no se encuentra en una de las tres descritas (Tabla 3.8) entonces la entidad de planeación municipal es la encargada de ajustar los criterios con el fin de velar por la seguridad de personas e instalaciones, dependiendo del tipo de proyecto y de estructura.

En esta norma la frecuencia dominante o principal (Hz) puede ser determinada por tres métodos: 1) Por medio de Análisis de Fourier, 2) con el espectro de respuesta de la señal o el pseudo-espectro de velocidad o 3) por medio de análisis de vibraciones armónicas (en la norma: análisis de semiperiodo) en el tramo de máxima velocidad de la señal.

Si se presentan varios máximos en la señal, la norma establece: *“Puede darse la circunstancia de que un registro presente varios picos de velocidad de vibración del mismo orden y con diferentes frecuencias. 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”* (en AENOR, 1993, página 4), pero antes de obrar hay que pensar, de lo cual surgen las siguientes inquietudes:

- No hay una relación directa entre el máximo en el dominio del tiempo y máximos en el dominio de la frecuencia en oscilaciones transitorias.
- La duración de la oscilación es tan importante como el valor máximo y la frecuencia; cuando se realiza análisis de Fourier o de respuesta lo que prima es la duración de la oscilación (energía de la oscilación en la señal).
- Es cierto que las frecuencias bajas, tienen más influencia en la respuesta de edificaciones, pero en el caso de elementos no estructurales (en los cuales se presenta daño cosmético) influyen mas las frecuencias altas.

### **3.3.6. Internacional ISO 4866**

La ISO, Organización Internacional para Estandarización, por medio del comité técnico de vibraciones mecánicas y choque ISO/TC 108 crearon el estándar ISO 4866: *“Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement an evaluation of their effects on buildings”* en 1990 (ver ref. ISO, 1990), teniendo dos correcciones posteriores en los años 1994 (ref. ISO, 1994) y 1996 (ref. ISO, 1996).

En si la ISO 4866 no presenta valores indicativos de vibraciones, ya que este estándar esta creado para establecer principios básicos de medición y procesamiento de señales, con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras. Este estándar es considerado como una guía técnica para la elaboración de normas regionales e investigaciones.

La medición de niveles de vibración según este estándar tiene como propósitos: 1) *reconocimiento de problemas* donde se reporte vibraciones en edificaciones, que causen consternación en los ocupantes y sea necesario evaluar niveles que garanticen la integridad estructural, 2) *monitoreo de control* donde niveles de vibración máximos permitidos han sido establecidos por alguna agencia y requieran se reportados, 3) *Documentación* de cargas dinámicas que hayan sido consideradas en el diseño estructural, donde se realizan mediciones

para verificar la predicción y reajustar parámetros en nuevos diseños (por ejemplo la Norma Sismo-resistente Colombiana — NSR-98), y 4) *diagnóstico* cuando los niveles establecidos de vibraciones requieran más investigación.

*Tabla 3.9. Aspectos importantes en la reglamentación ISO 4855 de 1990.*

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Campo de aplicación</b> ....  | Vibraciones en general (voladuras, tráfico, hincado, maquinaria, etc.) excluyendo vibraciones acústicas.   |
| <b>Variables medidas</b> .....   | Depende del campo de aplicación, pero en general aceleración o velocidad (tabla A.3), frecuencia y duración de la oscilación.  |
| <b>Valores indicativos</b> ..... | No aplica.   |
| <b>Sensores utilizados</b> ..... | Recomienda acelerómetros o sensores que midan velocidad (geofonos), dependiendo del tipo de aplicación (tabla A.3).  |
| <b>Ubicación sensores</b> .....  | En el suelo cerca a estructuras sometidas a vibraciones y dado el caso sobre la estructura.  |
| <b>Fortalezas</b> .....          | Son lineamientos muy generales basados en principios básicos, que sirven de guía en el momento de elaborar una norma o al realizar un trabajo en el área de vibraciones. |
| <b>Debilidades</b> .....         | No provee valores indicativos.   |

Uno de los puntos importantes en este estándar es que la duración de las vibraciones se considera relevante en el problema de vibraciones, lo cual no se ha puesto en práctica en las normas, con excepción de la norma Suiza. La ISO tiene en cuenta la duración ya que es aplicable en cualquier investigación o normas de vibraciones con cualquier tipo de fuente.

La forma en la cual este estándar tiene en cuenta la duración de la señal es clasificando la vibración en continua o transitoria. Con este fin se define una constante de tiempo para la cual se presenta resonancia, dada por  $\tau_r = 1/(2\pi\xi_r f_r)$ ; donde  $\tau_r$  es la constante de tiempo,  $\xi_r$  representa la influencia del amortiguamiento y depende del tipo de excitación y  $f_r$  es la frecuencia de resonancia. Cuando la vibración es mayor de  $5\tau_r$  entonces se considera que la vibración es continua y cuando es menor se considera es transitoria. En el caso de las voladuras ISO considera que se puede considerar como transitoria.

Como se muestra en la tabla 3.9, los sensores preferidos son aquellos que miden cantidades cinemáticas como la aceleración (acelerómetros) y velocidad (geofonos). Dependiendo de la variable que se necesite (Tabla A.3) y del tipo de sensor utilizado, se pueden encontrar valores de la variable considerada a partir de los valores obtenidos en la medición por medio de integración o diferenciación. La ISO recomienda tener cuidado al momento de integrar valores con frecuencias bajas.

En el análisis de señales, la ISO plantea dos casos: 1) si hay suficiente información de las

estructuras a analizar, entonces recomienda realizar el espectro de respuesta y 2) si no hay información de las estructuras entonces recomienda utilizar métodos en el dominio de la frecuencia o del tiempo.

Cuando se realiza análisis de señales en el dominio de las frecuencias, esta norma recomienda utilizar la densidad espectral de potencia o *PSD* (por *Power Spectral Density*, concepto y método que proviene de la ingeniería eléctrica y electrónica) o similares. Para el análisis de las señales en el dominio del tiempo plantea que se pueden utilizar conteo de picos o cruces por cero (que puede ser implementado por el método de la bisección).

### 3.3.7. Norma Suiza SN 640 315a de 1992

La norma de Suiza fue elaborada para ser aplicada a las vibraciones causadas por: voladuras, maquinaria y tráfico y que pueden causar daño cosmético en la edificación. Al igual la mayoría de las normas de control de vibraciones, no tiene en cuenta: la percepción humana, los daños en equipos delicados, y los efectos en suelos blandos de las vibraciones causadas por las fuentes antes mencionadas.

Esta norma contempla frecuencias desde los 8 hasta los 150 Hz, y establece que por fuera de este rango deben ser estudiadas con base en otras normas y consideraciones. La inclusión del número de sollicitaciones –cantidad de vibraciones en la señal– y su correspondiente diferencia en los valores indicativos máximos de velocidad, es la responsable de que esta norma sea realmente aplicable a una amplia gama de vibraciones, y que por lo tanto sea versátil.

*Tabla 3.10. Aspectos importantes en la reglamentación Suiza SN 640 315a (1992)*

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . . . | Vibraciones por voladuras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carreteras y ferroviario.   |
| <b>Variables medidas</b> . . . . .   | Velocidad resultante –de partícula– pico [mm/s], frecuencia de la vibración [Hz] relacionada con la componente de máxima velocidad, adicionalmente la cantidad de sacudidas |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | ver tabla C.3 (página 122)  |
| <b>Sensores utilizados</b> . . . . . | Tres componentes ortogonales de sensores que registren velocidad en mm/s con un rango lineal entre 5 y 150 Hz   |
| <b>Ubicación sensores</b> . . . . .  | Sobre la estructura   |
| <b>Fortalezas</b> . . . . .          | Brinda criterios para definir daño no estructural –fisuras en mampostería –. Define una frecuencia de las sollicitaciones   |

Los valores máximos establecidos en la norma dependen de varios parámetros como la cantidad de sollicitaciones y de la susceptibilidad de la edificación, obteniéndose así un rango

amplio de valores indicativos. Esta norma también contempla la posibilidad de cambiar estos valores previa consulta a un experto en el tema.

Según la norma, las mediciones deben realizarse con geofonos, es decir sensores cinemáticos que midan velocidad y que deben tener una respuesta lineal entre 5 y 150 Hz. Prácticamente todos los sismómetros de ingeniería (sensores activos) cumplen con este objetivo. Adicionalmente la norma espera que los sensores sean rutinariamente calibrados con el fin de obtener valores de vibraciones correctos.

El sitio definido por esta norma para instalar los sensores es dentro de la estructura estudiada en los pisos superiores, ya que se espera que bajo esa condición la velocidad de partícula sea superior a la que se registra en la base de la estructura. Sin embargo, en este proyecto no se requiere evaluar los efectos en una estructura en particular, por lo cual las vibraciones fueron registradas en una pequeña zapata ubicada dentro de una caseta.

Para mayor información de la norma se puede consultarse en el Anexo C, sección C.1, página 115.

### **3.3.8. Norma Sueca SS 460 48 66 1991**

La norma sueca tampoco considera las molestias causadas a humanos, ni el riesgo de equipos sensibles a vibración, pues solo contempla el efecto de las vibraciones producidas por voladuras sobre las edificaciones.

Esta norma esta sustentada en cientos o miles de observaciones en el lecho rocoso escandinavo, donde se han podido estimar con buena certeza niveles de daño en las estructuras. Esto ha hecho que la norma tenga en cuenta varios tipos de estructuras geológicas, que otras normas no han tenido en cuenta; sin embargo, el no incluir información de frecuencias y de otras componentes diferentes a la vertical hace que sea desactualizada respecto a los estándares actuales.

Para mayor información sobre esta norma se puede consultar el Anexo C, sección C.2, página 125.

## **3.4. Implementación de valores representativos**

Para la interpretación de los valores obtenidos en términos de su potencial de daños se han calculado niveles indicativos bajo las prescripciones de las diversas normas consideradas en este trabajo. Para aquellas descripciones geológicas y de tipologías constructivas que no coinciden ajustadamente con las condiciones locales, se escogieron las más comparables y, en todo caso, se aplicaron las categorías más “desfavorables” en cuanto al nivel de vibración

Tabla 3.11. Aspectos importantes de la SS 640 315a (Suecia)

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Campo de aplicación</b> . . . .   | Vibraciones por voladuras.  |
| <b>Variables medidas</b> . . . . .   | Velocidad pico vertical [mm/s] y dado el caso la Velocidad de partícula pico [mm/s].                      |
| <b>Valores indicativos</b> . . . . . | Proporciona una multitud de valores indicativos, los cuales se calculan a partir de una ecuación sencilla |
| <b>Sensores utilizados</b> . . . . . | Sensor vertical que registre velocidad  |
| <b>Ubicación sensores</b> . . . . .  | Sobre el suelo junto a la estructura de interés.  |
| <b>Fortalezas</b> . . . . .          | La inclusión de la geología y la gran cantidad de valores indicativos que se pueden obtener               |
| <b>Debilidades</b> . . . . .         | Esta sustentado únicamente en mediciones verticales, no tiene en cuenta la frecuencia.                    |

admisible, pero a la vez las más favorables para el sitio expuesto.

Todas las normas fundamentan sus valores indicativos en resultados empíricos, o sea numerosas observaciones de voladuras y daños. Algunas normas son evidentemente - por simple comparación - muy conservativas. Las apreciables diferencias entre los valores indicativos - niveles de velocidad de partícula admisibles, principalmente - se deben seguramente a los diferentes niveles de "riesgo aceptable" en los diferentes países, más que a diferencias en la resistencia de las edificaciones.

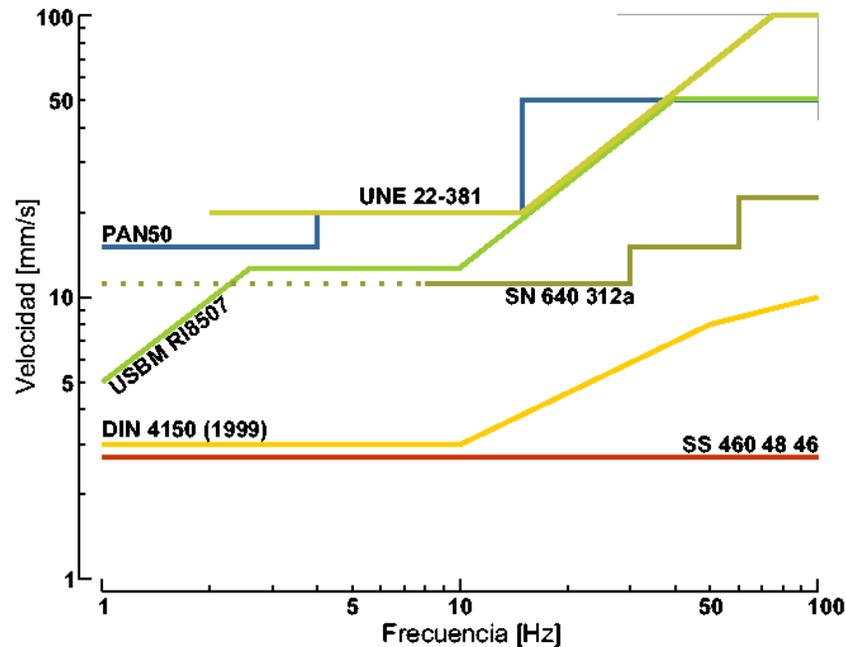
De los dos sitios evaluados: San Marcos y Mulaló, la edificación mas vulnerable se encuentra en esta ultima población y corresponde a una capilla colonial –edificación histórica. Esta edificación esta cimentada sobre depósitos de vertiente relativamente consolidados, adicionalmente ésta iglesia está construida en ladrillo sin ningún sistema estructural –propio de su periodo. Mulaló es también la localidad mas cercana a las voladuras, debido a la mejor calidad de la caliza hacia esta población. Los valores indicativos de las diferentes normas –detallados en las siguientes secciones– aplicadas en este proyecto están resumidas en la figura 3.2.

### 3.4.1. Valores representativos DIN 4150 de 1999

La primera de las normas DIN 4150 (1975) prescribe valores mas bajos de velocidad – resultante y vertical– que su actualización, adicionalmente incluye en su catalogación límites para "monumentos históricos" (tabla A.2, página 87).

Los valores prescritos por la DIN 4150 de 1975 para este tipo de edificaciones –monumentos históricos– es de 4 mm/s para velocidad resultante máxima y una velocidad vertical máxima entre 2.4 y 4 mm/s. Sin embargo, debido a que esta versión de norma no incluye valores de frecuencias, se utilizó la actualización de 1999.

Figura 3.2. Resumen de velocidades máximas indicativas de las diferentes normas aplicados al caso del mina La Calera



La norma alemana DIN 4150 de 1999 no contempla valores representativos para edificaciones históricas como se explicó anteriormente. Sin embargo, los valores máximos correspondientes al tipo de construcción 3, “edificaciones susceptibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases” (tabla A.1, página 87), pueden ser aplicados en este proyecto.

Las velocidades resultantes o de partícula de la norma DIN 4150 de 1999 y los rangos de frecuencias correspondientes utilizados son:

- 1 – 10 Hz** → 3 mm/s.
- 10 – 50 Hz** → 3 – 8 mm/s.
- 50 – 100 Hz** → 8 – 10 mm/s.

Esta norma también incluye un valor máximo de componente vertical de 8 mm/s en cualquier frecuencia.

### 3.4.2. Valores representativos PAN50

La norma escocesa solo tiene en cuenta estructuras de tipo residencial. Los valores representativos se basan en criterios de daño: cosmético, menor o estructural, en este tipo de edificaciones (ver resumen de norma en tabla 3.4 página 24 o la traducción de la norma en la página 127).

El objetivo del proyecto es poder evaluar el cumplimiento con normas internacionales utilizando la situación mas desfavorable, por lo tanto se ha escogido la iglesia de Mulaló por su tipología y cercanía a las voladuras. Ya que la norma no contempla este tipo de estructuras, se ha escogido la situación más desfavorable que corresponde a la velocidad de partícula más pequeña que produce daño cosmético, con valores representativos de:

< 4 Hz → 15 mm/s.

4 – 15 Hz → 20 mm/s.

> 15 Hz → 50 mm/s.

### 3.4.3. Valores representativos del OSM 817.16

Los valores admisibles para velocidades de vibración por voladuras en la minería son especificados a nivel federal en EEUU por el OSMRE (*Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement*), sin embargo, cuando se dispone de monitoreo tanto de la velocidad de vibración (en 3 componentes) como de la frecuencia dominante, como es el caso, los valores límite son los recomendados por la USBM RI8507.

### 3.4.4. Valores representativos del USBM RI8507

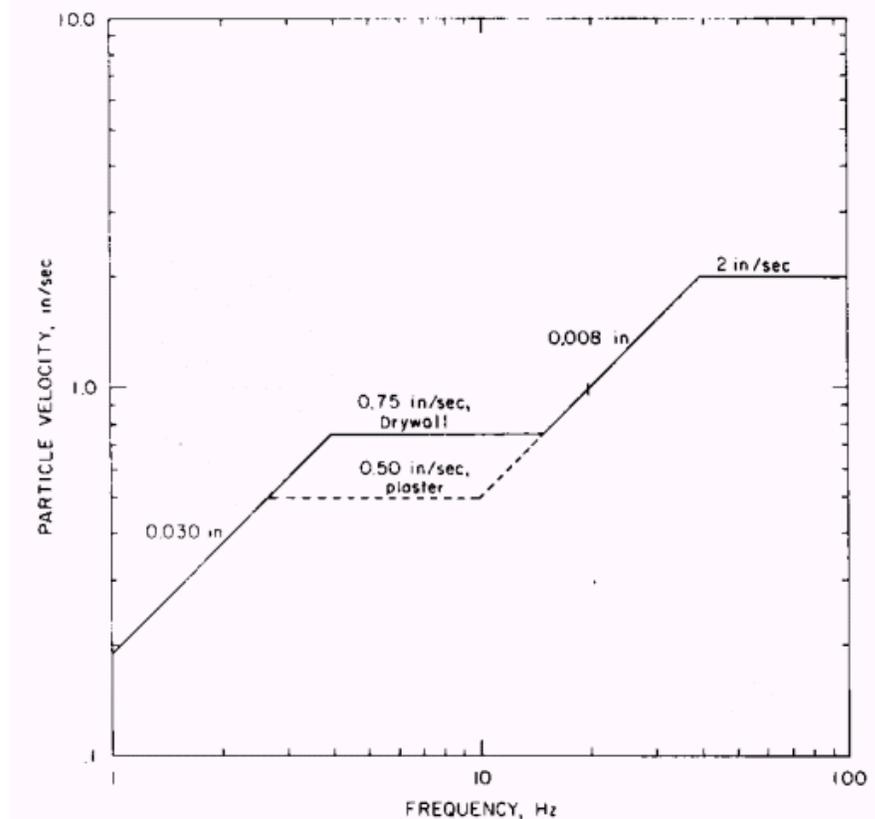
Los límites de velocidad resultante de la USBM RI8507 son exclusivos para edificaciones residenciales, diferenciando valores para viviendas con paredes con yeso y paredes aligeradas, a estas ultimas se les permite mayores velocidades resultantes en el rango de frecuencias aproximadamente entre 4 y 11 Hz (ver figura 3.3).

La catalogación de esta norma que se aproxima al tipo de material de la iglesia Mulaló es la de paredes con yeso, para el cual los valores representativos son:

1 – 2.6 Hz → 5 – 12.7 mm/s.

2.6 – 10 Hz → 12.7 mm/s.

Figura 3.3. Velocidades de vibración permisibles por la USBM RI8507



10 – 40 Hz → 12.7 – 50.8 mm/s.

40 – 100 Hz → 50.8 mm/s.

### 3.4.5. Valores representativos del UNE 22-381-93

La norma UNE de España tiene en cuenta nuestra situación de sitios históricos. El grupo III en la clasificación de estructuras (vea página 136), con el valor pico de velocidad más bajo<sup>1</sup>, es el que se utilizara en aquí; sus valores representativos son:

2 – 15 Hz → 20 mm/s.

15 – 75 Hz → 20 – 100 mm/s.

> 75 Hz → 100 mm/s.

<sup>1</sup>evaluado en la componente con valor mas alto de velocidad

### 3.4.6. Valores representativos ISO 4866

La ISO presenta métodos para la estandarización de normas, es muy general y no presenta valores representativos que puedan ser utilizados.

### 3.4.7. Valores representativos de SS 460 48 46

La norma sueca (ver Anexo C.2, página 125) utiliza categorías que no son iguales a aquellas encontradas en el entorno de la cantera de Mulaló, especialmente en lo relacionado con la geología de terrenos (por ejemplo depósitos glaciales) y las características de las edificaciones. Se hace entonces la asociación mas aproximada a las condiciones locales, las que se muestran a continuación.

**Velocidad vertical pico no corregida** La población Mulaló está localizada sobre depósitos de vertiente relativamente consolidados, que pueden ser considerados como un sustrato intermedio entre las clases "Morrena suelta" (depósitos glaciales sueltos) y "Morrena firme" (tabla C.5, página 126), o sea:

$$v_o = \frac{18 + 35}{2} = 26,5 \text{ mm/s}$$

**Factor de tipo de construcción** La edificación con tipología constructiva mas desfavorable, como ya se mencionó, es la iglesia de Mulaló, la que es asociable a la categoría 5 ("Edificaciones históricas en condición débil") y por lo tanto

$$F_b = 0,5$$

**Factor de material de construcción** La iglesia de Mulaló es una edificación de mampostería de ladrillo común, sin confinamiento. La clase de material más asociable es la que corresponde a "ladrillo artificial de caliza", que es:

$$F_m = 0,65$$

**Factor de distancia** En todo caso, la distancia entre una voladura en La Calera y cualquier vivienda en Mulaló o San Marcos será superior a los 350 m. Por esto, la norma prevee para edificaciones situadas sobre morrena firme 0.35 y sobre morrena suelta 0.5. Por interpolación se obtiene:

$$F_d = 0,42$$

**Factor de tiempo de proyecto** Para proyectos con duraciones superiores a los 5 años, el valor designado por la norma es:

$$F_t = 0,75$$

El nivel de guía para la velocidad vertical máxima es entonces

$$\begin{aligned}v &= 26,5 \times 0,5 \times 0,65 \times 0,42 \times 0,75 \\ &= 2,71 \text{ mm/s},\end{aligned}$$

ya que esta norma no tiene en cuenta la frecuencia, entonces se asumirá que el valor de 2.71 mm/s es constante para todas las frecuencias.

### **3.4.8. Valores representativos de SN 640 312a**

En la tabla C.3 de la norma suiza (sección C.1 en la pág. 115) se dan los valores indicativos para diversos tipos de edificaciones (según su susceptibilidad), cantidad de solicitaciones y rangos de frecuencias dominantes.

Tomando –como en el cálculo anterior– la iglesia de Mulaló como objeto más susceptible, la tabla C.1 (pág. 118) de la norma ubica el caso en la clase 4 (“particularmente susceptible; edificaciones históricas o bajo protección”). La clase de frecuencia de solicitaciones (tabla C.2, pág. 121) asociable es la de “ocasionales”, porque la norma califica como solicitación (ver pág. 117 – Frecuencia de solicitaciones) aquella que excede el valor indicativo en 0.7 veces, lo que es muy poco probable que ocurra en este tipo de vibraciones de duración finita y corta.

Con lo anterior, los valores escogidos están “entre los valores indicativos de la clase 3 y la mitad de estos”, que los valores indicativos son:

$$< 30 \text{ Hz} \rightarrow (15 + 7\frac{1}{2})/2 \rightarrow 11.2 \text{ mm/s.}$$

$$30 - 60 \text{ Hz} \rightarrow (20 + 10)/2 \rightarrow 15 \text{ mm/s.}$$

$$> 60 \text{ Hz} \rightarrow (30 + 15)/2 \rightarrow 22.5 \text{ mm/s.}$$

## **3.5. Reglamentación Nacionales**

Como parte de la investigación, se realizó una búsqueda bibliográfica y de normatividad nacional en el manejo de vibraciones por fuentes antrópicas en: ICONTEC, Ministerio de Minas y Energía, IDEAM, Ingeominas y Minercol. En ninguna de estas instituciones ha desarrollado normatividad respecto a este campo.

Sin embargo se han realizado investigaciones aisladas por parte de varios grupos en este tema, en algunas de las cuales se han aplicado los criterios del USBM RI8507 en ausencia de uno nacional. Ingeominas (1996) desarrolló un estudio en la mina Guativas en Une,

Cundinamarca; Universidad de los Andes (Cementos del Valle, 1988, 1992) y el Observatorio Sismológico del SurOccidente (Cementos del Valle, 1999, 2000, 2001, 2002) en la mina la Calera en Yumbo, Valle del Cauca.

Es practica común en algunas instituciones que trabajan en este tema utilizar la NSR-98 (Norma Sismo-resistente Colombiana) para la evaluación de efectos de las voladuras sobre las construcciones, ya que esa norma tiene peso legal. Sin embargo, esta norma no es adecuada para este tipo de trabajos, ya que:

- En la parte relacionada con este tema, la NSR-98 es una norma de diseño de estructuras.
- El periodo de retorno del sismo tipo es de 475 años, el daño *estructural* se presenta por un evento extremo, la estructura se supone esta en buen estado.
- Las voladuras tienen periodos de retorno pequeños (1/2, 1, 2 días, ocasionalmente una semanal o mensual), por lo cual el daño mas bien puede ser por fatiga sobre elementos no estructurales.
- Lo que prevén las normas especificas es que no presente daño *cosmético* debido a las vibraciones, la NSR-98 no proporciona esto.