

EFECTO DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR VOLADURAS EN MINAS SOBRE EDIFICACIONES RESIDENCIALES DE MAMPOSTERÍA SIMPLE EN COLOMBIA¹

Daniel Ruiz Valencia.², Camilo Otálora Sánchez.³, Jorge A. Rodríguez Ordóñez.⁴

Resumen: Los explosivos usados en la minería generan ondas que se transmiten en todas las direcciones desde la fuente. Estas vibraciones superficiales causadas por el paso de las ondas de Rayleigh (principalmente) pueden ser registradas en dos componentes horizontales y una vertical en forma de registros contra el tiempo de aceleración, velocidad o desplazamiento. Estas vibraciones pueden afectar las edificaciones cercanas a la zona de operación de la mina. Por esta razón, en el presente artículo se presentan registros de vibraciones asociadas a voladuras medidos en campo por el grupo ESTRUCTURAS de la Pontificia Universidad Javeriana. Asimismo, se presenta una revisión de los límites de vibración aceptados internacionalmente para evitar daños en edificaciones. Por último, se desarrolla un modelo por elementos finitos (análisis modal espectral) de una edificación existente de mampostería simple (sin refuerzo) colombiana sometida a movimientos correspondientes a tres valores de $R/W^{1/2}$ (siendo R la distancia entre el lugar de medición y el sitio de la voladura y W el máximo peso de explosivo por unidad de retardo). De acuerdo con las mediciones y con los límites internacionales, las vibraciones podrían causar daño leve en edificaciones frágiles. Se considera necesario establecer límites de vibración ajustados a las condiciones de las edificaciones colombianas.

Palabras clave: cargas por voladuras, edificios residenciales, estimación de daño, vibraciones del terreno, voladuras en minas.

EFFECT OF VIBRATIONS INDUCED BY MINE BLASTING ON RESIDENTIAL STRUCTURES OF UNREINFORCED MASONRY IN COLOMBIA

Abstract: Explosives used in mining generate waves transmitted in all directions from the blast source. These surface vibrations caused mainly by the passage of Rayleigh waves can be recorded in the two horizontal directions and in the vertical direction in the form of acceleration, velocity or displacement time history traces. These vibrations could affect those buildings close to the zone of operation of the mine. In this paper the vibrations caused by blasts and registered by the group ESTRUCTURAS from the Pontificia Universidad Javeriana are presented. Also, vibration limits internationally accepted to prevent damages in buildings are reviewed. Finally, a finite element model is developed (spectral modal analysis) of an existing unreinforced masonry Colombian building. The structure is subjected to the movements corresponding to three values of $R/W^{1/2}$ (where R is the distance between the blast and the site of measurement and W the maximum weight of explosive by delay). According to the measurements and the international limits, the vibrations could cause light damage in fragile buildings. From these results, it is proposed to establish vibration limits adjusted to the conditions of the Colombian buildings.

Keywords: blast loads, damage assessment, ground vibrations, mine blasting, residential buildings.

¹ Artículo recibido el 1 de junio de 2007 y aceptado para publicación el 9 de noviembre de 2007.

² Ingeniero Civil, M.Sc., Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, Profesor Asistente e Investigador del grupo ESTRUCTURAS, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Calle 40 No. 5-50, Bogotá, Colombia. E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co.

³ Ingeniero Electrónico, Profesor Asistente e Investigador del grupo SIRP del Departamento de Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7ª No. 40-62, Bogotá, Colombia. E-mail: camilo.otalora@javeriana.edu.co.

⁴ Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D. Profesor Asociado, Investigador de los grupos ESTRUCTURAS y CECATA y Director del Departamento de Ingeniería Civil, Carrera 7ª No. 40-62, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. E-mail: rodriguezja@javeriana.edu.co.

INTRODUCCIÓN

La liberación de energía en las voladuras en sitios de explotación de minerales genera una serie de ondas de esfuerzo que se desplazan por la corteza terrestre y una onda de choque generada en el aire. Las ondas internas que viajan por el suelo van acompañadas de ondas superficiales que parten del mismo punto de la perturbación y que se van diferenciando en la medida que los frentes de onda se van alejando de la fuente, debido principalmente a las diferentes velocidades de propagación y los diferentes periodos de vibración.

Durante su viaje las ondas mueven las partículas del medio que recorren produciendo sobre éstas velocidades, desplazamientos y aceleraciones que se pueden registrar en los aparatos destinados para este fin. Los registros de desplazamiento, velocidad y aceleración de partículas generados por las voladuras tienen tres características primordiales: la amplitud, el contenido frecuencial y la duración. La amplitud depende de la cantidad de material detonado y de la distancia al punto de registro, el contenido frecuencial depende de la fuente de perturbación y del camino recorrido y por último, la duración depende de la cantidad de material detonado y de la distancia entre la detonación y el punto de registro (Sarria, 2004).

Diversos investigadores han establecido una serie de variables independientes y otras dependientes dentro del proceso asociado con una voladura. Según Dowding (1985), citado por Sarria (1996), dentro de las variables independientes se encuentran la energía liberada (W), la distancia a la explosión (R), la velocidad de onda en la roca (C), la densidad de la roca (ρ) y el tiempo (t). Por su parte, las variables dependientes se resumen en el desplazamiento máximo del medio (u), la velocidad máxima del medio (v), la aceleración máxima del medio (a) y la frecuencia del movimiento (ω). Con base en lo anterior, para realizar un estudio del efecto de las vibraciones sobre las construcciones se deben tener en cuenta las siguientes actividades:

- a. Definición de límites para evitar daño en sistemas estructurales de acuerdo con los referentes internacionales.
- b. Medición de los movimientos del terreno producidos por las voladuras en las proximidades de las estructuras.
- c. Modelación dinámica de los sistemas estructurales que permitan establecer la respuesta estructural dinámica ante los desplazamientos del terreno. Esta modelación es posible realizarla mediante modelos simplificados de un grado de libertad o mediante análisis dinámicos más complejos (análisis modal espectral, análisis dinámicos lineales y no lineales, etc.) mediante técnicas numéricas como los elementos finitos.

Durante los últimos años el grupo de investigación ESTRUCTURAS de la Pontificia Universidad Javeriana ha realizado diversas mediciones y estudios relacionados con el efecto que las vibraciones originadas en voladuras (por actividades de minería) tienen sobre edificaciones de vivienda. En el presente documento se resumen los principales aspectos de dichas mediciones incluyendo el análisis respectivo.

MARCO TEÓRICO

Propagación ondulatoria

Al producirse una voladura en el terreno, se generan ondas de diferentes características que se propagan en todas direcciones. Esta generación o liberación de esfuerzos en los medios elásticos induce propagación de ondas de esfuerzo de diferentes tipos. Se propagan ondas internas y ondas de superficie. De acuerdo con Sarria (2004), las ondas internas se propagan por el interior de los cuerpos y las de superficie lo hacen preferencialmente en los contornos de los cuerpos aunque también se pueden propagar por las interfases o discontinuidades. Las ondas internas se dividen en compresionales llamadas ondas P y de cortante llamadas ondas S. Las ondas P se desplazan con mayor velocidad que las ondas S y tienen periodos más cortos; en cambio las ondas S suelen ser portadoras de mayor energía. Las ondas superficiales son de dos clases: ondas de Rayleigh, llamadas ondas R, y ondas de Love, llamadas ondas L. Estas ondas superficiales tienen velocidades similares a las de las ondas S. En la Figura 1 se pueden observar las características del movimiento ondulatorio de las ondas S, P y R.

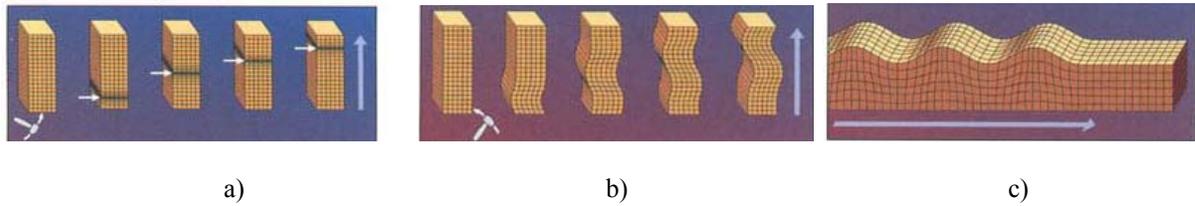


Figura 1: Variación del movimiento de partícula con el tipo de onda. a) Onda de compresión P, b) Onda de corte S, c) Ondas de Rayleigh R. Tomado de USGS (2007).

Las ondas R reciben la mayor parte de la energía y son las causantes del daño a las estructuras toda vez que viajan por la superficie de la corteza con movimientos de las partículas en un patrón elíptico. Para distancias pequeñas, los tres tipos de onda llegan casi simultáneamente y esto hace que las señales sean muy complicadas de interpretar. En el presente caso hay que considerar además los retardos en milisegundos utilizados en las voladuras los cuales complican las señales de llegada.

Cada una de las ondas está caracterizada en cada medio de transmisión por una velocidad y se denota por la letra C con el subíndice correspondiente a cada tipo de onda (C_p , C_s , C_R y C_L). La velocidad ondulatoria es una propiedad del material, al menos dentro del comportamiento elástico. A manera ilustrativa se presenta en la Tabla 1, tomada de Sarria (2004), las velocidades típicas de propagación de ondas compresionales P para varios tipos de roca y materiales.

Tabla 1: Velocidades de propagación C_p para algunos materiales, tomado de Sarria (2004).

MATERIAL	C_p (m/s)
Depósitos superficiales no consolidados y blandos	200-400
Arcillas y limos no consolidados; gravas y arenas no saturadas	400-1500
Arenas, gravas saturadas, arcillas, limos compactos, rocas meteorizadas	1500-2000
Sedimentos semiconsolidados saturados, rocas ígneas y metamórficas alteradas	2000-2500
Pizarras alteradas, rocas metamórficas cizalladas, ígneas y calizas	2500-3700
Aire	340
Agua	1470
Concreto	3500
Hielo	3200

Estimación de la velocidad máxima de partículas para voladuras

Como en muchos fenómenos ondulatorios, la velocidad de las partículas es la variable que mejor correlación ha mostrado con los fenómenos de daño que se presentan en las obras civiles. Las vibraciones debidas a voladuras no son la excepción y por ello es el parámetro más importante a relacionar con las características de las voladuras mismas; véanse por ejemplo las normas DIN 4150 (1999), AS 2187 (1993) y BS 7385-2 (1993).

A su vez, las siguientes son las principales variables que permiten estimar las velocidades máximas de partícula: la distancia desde la explosión hasta el punto de medición (R), la máxima carga de explosivo detonado por tiempo de retardo (W), la velocidad de propagación de ondas del medio transmisor (C_p , C_s , C_R y C_L), la densidad del medio transmisor (ρ) y el tiempo.

En Dowding (1985), Hendron y Oriard (1972), Siskind et al. (1980) y Ahsby (1981) se reporta que la velocidad máxima de partícula puede correlacionarse con los siguientes dos cocientes: $R/W^{1/2}$ o $R/W^{1/3}$, siendo el primero de estos dos el más comúnmente utilizado. En la Figura 2 se presentan los resultados de Dowding et al. (2003) en donde se hacen regresiones con datos registrados en explosiones en minas a cielo abierto en diferentes lugares de los Estados Unidos de América. En esta referencia se usa como parámetro la distancia escalada por la raíz cuadrada de la máxima carga por tiempo de retardo $R/W^{1/2}$.

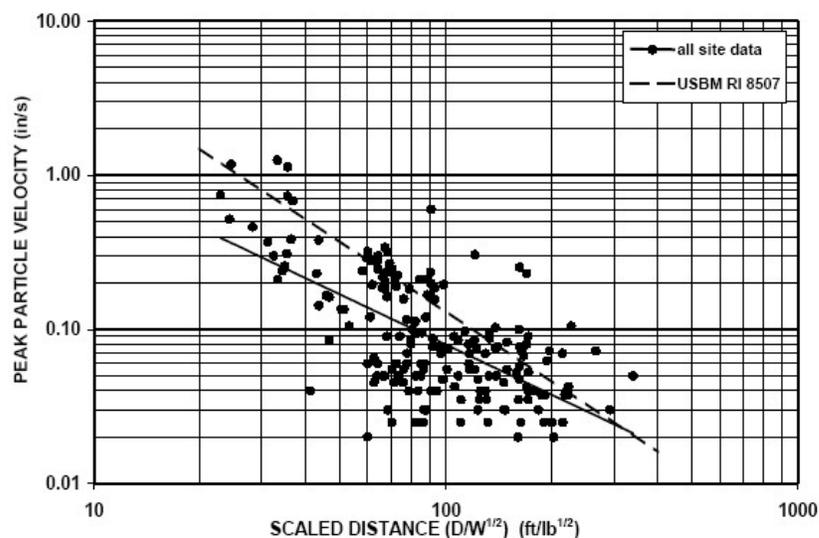


Figura 2: Variación de la máxima velocidad de máxima de partículas versus la distancia escalada con la raíz cuadrada de la carga máxima por unidad de retardo (Dowding et al., 2003).

Al construir funciones que relacionan el parámetro $R/W^{1/2}$ con la velocidad de partículas, es posible controlar el tamaño de las voladuras para evitar daños en las edificaciones cercanas. Para ello debe tenerse en cuenta simultáneamente la distancia desde el lugar de ocurrencia de la voladura hasta las edificaciones (R), la velocidad de partículas que genera daños en las edificaciones (v) y de esta manera establecer la cantidad de explosivo a detonar por tiempo de retardo (W).

Definición de límites para evitar daños

En las normas y literatura disponible se ha trabajado tradicionalmente con los criterios de aceleración y velocidad de partículas en la definición de los valores límites para evitar daños en sistemas estructurales. Para ello deben consultarse las normas DIN 4150 (1999), AS 2187 (1993), BS 7385-2 (1993), entre otras. No obstante, existen límites asociados con las deformaciones máximas (derivadas) impuestas a los sistemas estructurales.

El concepto de daño es relativo dado que puede involucrar desde la generación de micro fisuras hasta la aparición de grietas que puedan inducir algún tipo de colapso. Adicionalmente, la aparición o no de daños, grietas y fisuras está íntimamente relacionada con la calidad de los materiales y de las técnicas constructivas. Aunque en Colombia existe un código de construcciones puede ser difícil estandarizar las características de los materiales y de los procesos constructivos, sobre todo cuando se habla de viviendas de tipo informal. Por esta razón un estudio específico de daños en una edificación particular requerirá de evaluaciones detalladas que van desde la caracterización del suelo y los materiales usados en la construcción hasta la evaluación de las cargas actuantes (vibraciones debidas a voladuras, cargas muertas, vivas, viento, etc.).

No obstante todas las variables que participan en la aparición de fisuras, las normas internacionales han establecido unos valores de velocidad límite de las partículas del suelo (asociadas con vibraciones) por encima de los cuales es probable que se generen daños visibles en los elementos de una edificación. Sin embargo, hay que recordar que estos valores son indicativos.

Teniendo en cuenta lo anterior, la norma DIN 4150 (1999) establece los valores máximos de velocidad de vibración (en mm/s) en función de la frecuencia, para que no se observen daños en diferentes tipos de edificaciones (comercial, viviendas, edificios, industrias). Estos valores se presentan en la Tabla 2. Lo propio se presenta en López-Jimeno et al. (2003) cuyos valores límites se resumen en la Tabla 3.

Por su parte, los estándares australianos de explosivos (AS 2187, 1993) establecen como límite para edificaciones residenciales una velocidad máxima de 10 mm/s. En el mismo estándar se establece para edificios comerciales e industriales de concreto reforzado o de acero un límite máximo de 25 mm/s y para hospitales, presas y edificios históricos se establece un límite de 5 mm/s.

Tabla 2: Valores máximos de velocidad de partícula (mm/s) para evitar daños (Norma DIN 4150, “Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures”).

Tipo de Edificación	Frecuencia		
	< 10 Hz	10-50Hz	50-100 Hz
Estructuras delicadas, muy sensibles a la vibración	3	3-8	8-10
Viviendas y Edificios	5	5-15	15-20
Comercial e Industrial	20	20-40	40-50

Tabla 3: Valores máximos de velocidad de partícula establecidos en López-Jimeno et al. (2003).

Tipo de Edificación	Velocidad máxima de partícula
Para edificaciones en muy mal estado de construcción o edificios en madera o mampostería.	12 mm/s
Edificios muy sensibles a las vibraciones	0 a 10 Hz → 3 mm/s 10 a 50 Hz → 3 a 8 mm/s 50 a 100 Hz → 8 a 10 mm/s

De la misma manera, en los estándares ingleses (BS 7385-2, 1993) se establece una velocidad máxima de 50 mm/s para estructuras aporricadas de industrias y edificios comerciales con frecuencia de vibración superior a 4 Hz. En la misma norma se sugiere un límite entre 15 y 20 mm/s para edificaciones sin refuerzo, residenciales y con frecuencias entre 4 Hz y 15 Hz.

La U.S. Bureau of Mines (Negociado de Minas de los EE. UU.) establece una limitación de 0.79 pulg/s (20 mm/s) para la aparición de grietas visibles, aunque también establece límites dependientes de la frecuencia de movimiento como en el reporte USBM RI 8507 (Siskind et al., 1980). En dicho documento se plantea una curva límite que depende de la frecuencia de movimiento, la cual se presenta en la Figura 3a. Asimismo en la Figura 3b se muestra una comparación de datos registrados en Dowding et al. (2003) con los límites de la Figura 3a.

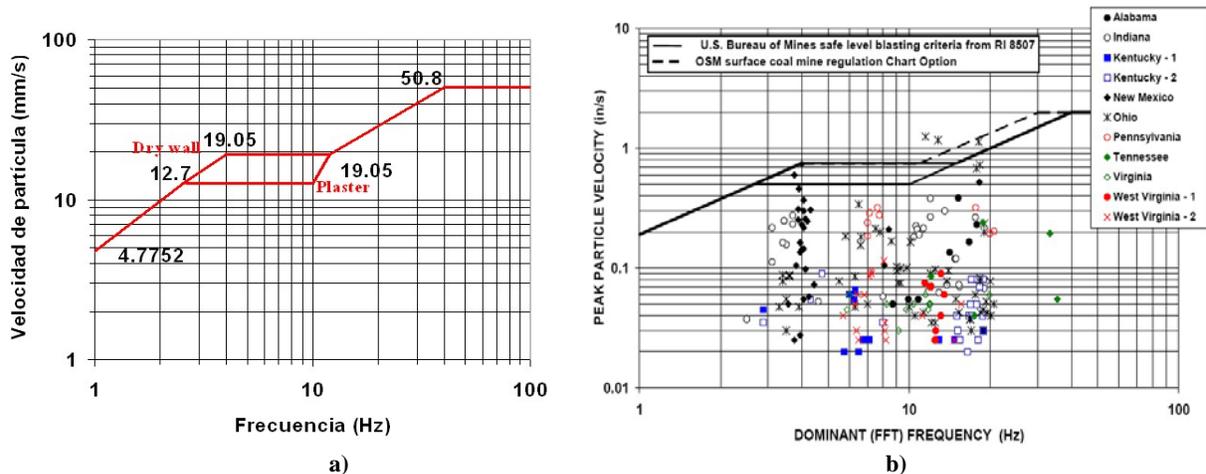


Figura 3: a) Valores límite de velocidad para diferentes frecuencias para evitar daño en estructuras de acuerdo con U.S. Bureau of Mines, en USBM RI 8507 (Siskind et al. 1980); b) Comparación con de mediciones reportadas en Dowding et al. (2003).

Es importante anotar que las condiciones socioeconómicas y las normativas de cada país están directamente asociadas con los límites establecidos anteriormente, ya que una edificación de vivienda tipo residencial construida en Australia, Estados Unidos o en Europa tendrá, en general, un comportamiento mecánico superior a una construida en un país en vía de desarrollo. Lo anterior se valida si se tiene en cuenta que en los estratos bajos de los países del tercer

mundo es muy común que se edifiquen las viviendas mediante la modalidad de autoconstrucción o una construcción desarrollada sin asesoría técnica de un ingeniero y en el mejor de los casos elaborada por un maestro de obra.

Asimismo, de acuerdo con Dowding y McKenna (2005) y Gad et al. (2005) es importante diferenciar los daños inducidos por las vibraciones de las voladuras de aquellos inducidos por otros fenómenos como los cambios de temperatura o de humedad, gradientes de temperatura entre la noche y el día, asentamientos diferenciales, sobrecargas estructurales, cambios químicos en los materiales, durabilidad de los materiales, entre otros aspectos. Esto es particularmente importante si se tiene en cuenta que en Dowding y McKenna (2005) se menciona que movimientos del terreno con velocidades pico de 1.5 mm/s originados en voladuras generan un movimiento de grietas 10 veces menor que el asociado con fenómenos atmosféricos. El primer autor (Ruiz Valencia) coordinó un estudio en el que aparecieron fisuras y grietas en edificaciones de un piso que la comunidad asociaba con las voladuras en una mina cercana. Después de una exhaustiva investigación se logró demostrar que estos daños en realidad se debían a fenómenos expansivos del suelo de cimentación de las viviendas, los cuales generaban una serie de esfuerzos en los muros superaban ampliamente la resistencia a tensión de la mampostería. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario instrumentar en el tiempo las grietas como se presenta en la Figura 4 ya que con la medición continua es posible tener luces sobre el real aporte de los diferentes fenómenos naturales (por ejemplo el clima) y los antrópicos en la evolución de procesos de fisuración.

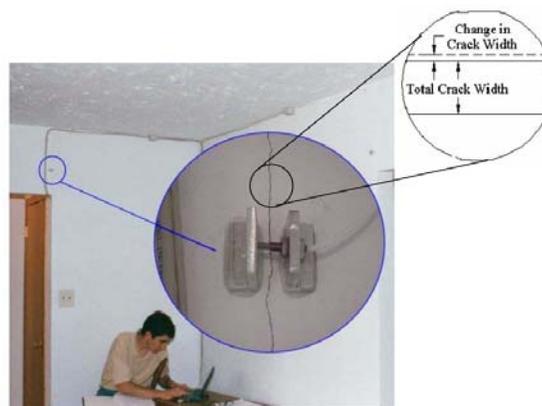


Figura 4: Instrumentación de grietas asociadas con vibraciones. Tomado de Dowding et al. (2003).

MEDICIONES EFECTUADAS

Durante los últimos años el grupo ESTRUCTURAS de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, Colombia, ha tomado registros de velocidad y aceleración en función del tiempo de las vibraciones debidas a voladuras en minería. Estas mediciones se han llevado a cabo a diferentes horas del día y a distancias desde el punto de la voladura hasta el punto de medición variable entre 400 metros y 8000 metros. Todas las mediciones se han realizado para valores de $R/W^{1/2}$ en el rango de $70 \text{ ft/lb}^{1/2}$ hasta $1300 \text{ ft/lb}^{1/2}$. En cada punto de medición se registró la velocidad o la aceleración en tres direcciones mutuamente perpendiculares (Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical).

Por otro lado, la estructura geológica de la zona de medición está conformada por sucesiones de sinclinales y anticlinales con rumbo Suroeste - Noreste separados por fallas paralelas. Las rocas más antiguas que afloran en el área corresponden a rocas sedimentarias del Cretáceo superior y Terciario inferior. La unidad portadora de los mantos de carbón está en el miembro medio del Terciario Paleoceno. La columna estratigráfica del área comprende una secuencia de rocas sedimentarias de edad Cretáceo superior hasta reciente. En la Figura 5 se presenta la columna estratigráfica generalizada.

Para llevar a cabo las mediciones, el segundo autor del presente trabajo diseñó e implementó un completo sistema electrónico de alta sensibilidad conformado por los siguientes elementos, y que pueden observarse en la Figura 6:

- a) Sensores de alta resolución, los cuales incluyen sismómetros sísmicos y acelerómetros sísmicos uniaxiales. Los acelerómetros tiene la capacidad de medir aceleraciones en un rango desde 0.00001 hasta 0.5g. La respuesta de estos sensores se mantiene lineal para un rango de frecuencias entre 0.05 y 200 Hz. Los sensores de velocidad tienen dos rangos de medición, uno para registros muy lejanos y otro para registros de gran amplitud y

cercanos. La sensibilidad de los sismómetros es de 5×10^{-6} mm/s y la respuesta se mantiene lineal entre 0.001 y 200 Hz.

- b) Amplificadores y filtros para los acelerómetros que permite establecer ampliificaciones de 10, 100 o 1000 mV/g y filtros de 450 Hz y de los 100 Hz.
- c) Sistemas de adquisición de datos para varios canales (marca "National Instruments") que permite tomar datos a una velocidad de 2000 datos por segundo (2 kHz).
- d) Computador portátil para control y toma de datos.

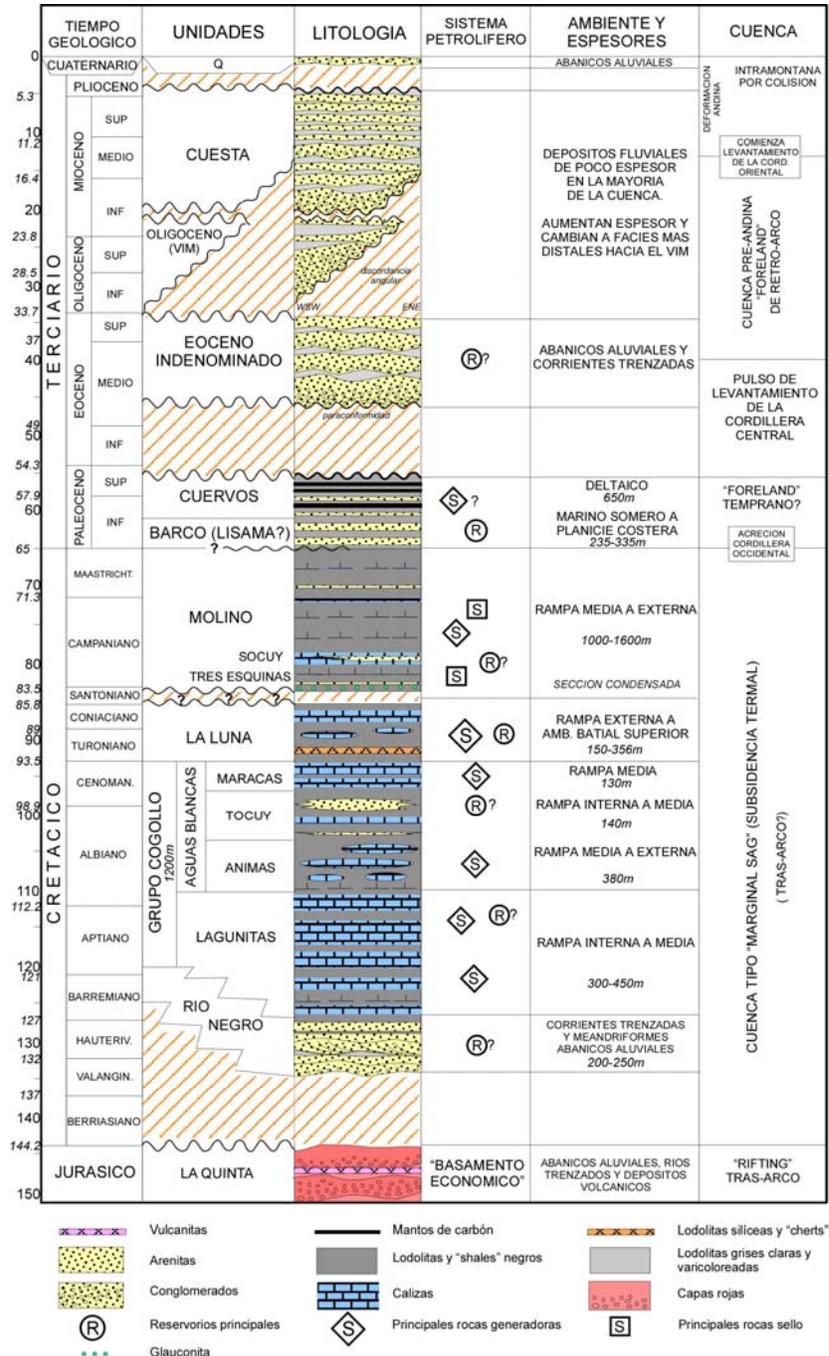


Figura 5: Columna estratigráfica generalizada de la zona bajo estudio.

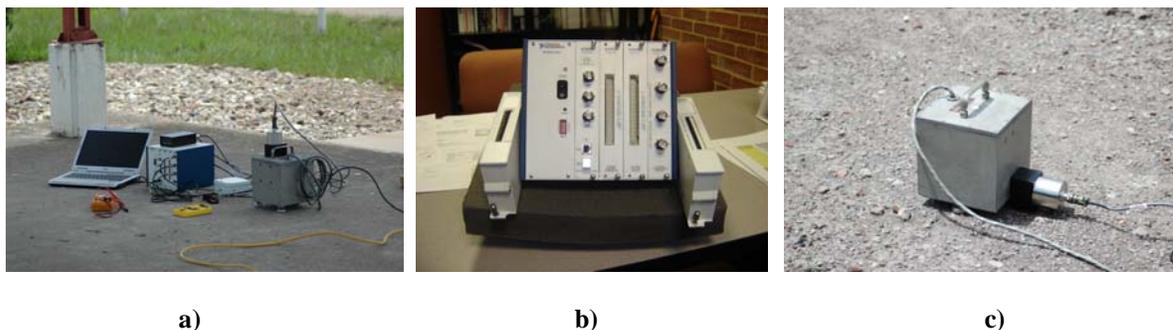


Figura 6: Equipos utilizados durante las mediciones: a) Computador, tarjeta de adquisición de datos, acelerómetro y sismómetro; b) Tarjeta de adquisición de datos; c) Dos sismómetros (ubicados dentro del cubo) y un acelerómetro.

A manera ilustrativa, en la Tabla 4 se muestran los registros procesados de aceleración en función del tiempo (aceleración Este-Oeste, Norte-Sur y Vertical) para tres parámetros $R/W^{1/2}$ ($71 \text{ ft/lb}^{1/2}$, $255 \text{ ft/lb}^{1/2}$ y $462 \text{ ft/lb}^{1/2}$). En la Figura 7 se muestra el resumen de todas las mediciones realizadas por el grupo de investigación y se observa que, tal como se reporta en la literatura técnica internacional, a mayor $R/W^{1/2}$ disminuye tanto la aceleración como la velocidad de las partículas. Para efectos comparativos con los reportes de la literatura técnica, las gráficas de la Figura 7a están en el mismo formato de la Figura 2.

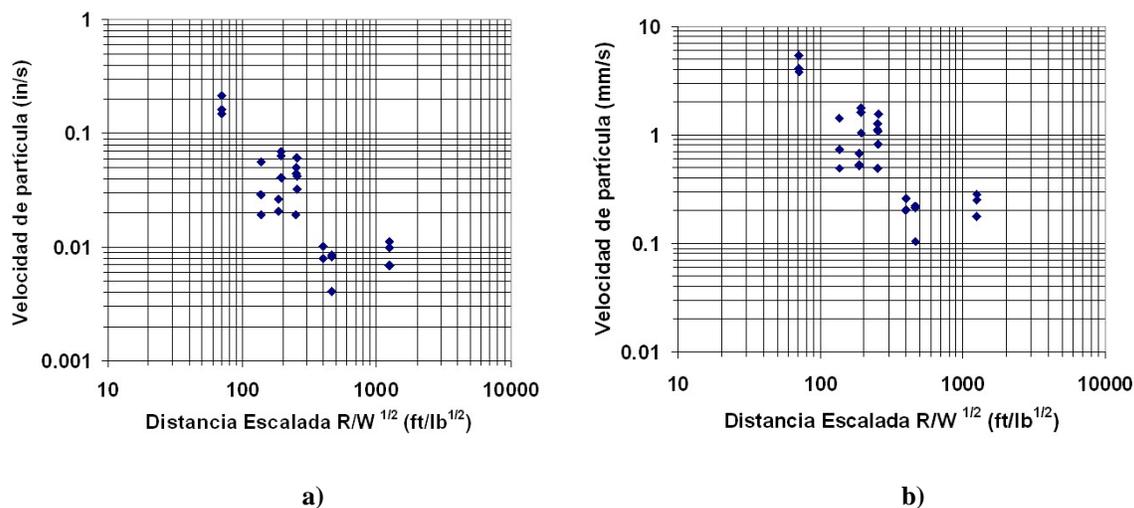


Figura 7: Resumen de las mediciones efectuadas en función de la velocidad de partículas y la distancia escalada por la raíz cuadrada de la máxima carga por unidad de retardo $R/W^{1/2}$ en unidades de $\text{ft/lb}^{1/2}$: a) Velocidad de partícula en in/s ; b) Velocidad de partícula en mm/s .

Obsérvese que la velocidad de partícula de la Figura 7a está en el sistema inglés (in/s) mientras que la de la gráfica de la Figura 7b está en el Sistema Internacional (mm/s). Los valores de velocidad máxima registrados por el grupo ESTRUCTURAS varían entre 0.1 mm/s y 6 mm/s . Asimismo, al analizar los datos se observa que si se mantiene el parámetro $R/W^{1/2}$ por encima de 100, las velocidades pico de partícula se mantienen inferiores a los límites establecidos internacionalmente para evitar daños a edificaciones frágiles. Por otro lado, al comparar los valores de velocidad de la Figura 2 con los de la Figura 7 para el mismo parámetro de $R/W^{1/2}$ se observa que las velocidades de la Figura 2 son superiores a aquellas medidas por el grupo ESTRUCTURAS. Estas velocidades registradas son inferiores a aquellas reportadas por Gad et al. (2005) las cuales varían entre 1.5 mm/s y 222 mm/s (en donde se tienen distancias desde el punto de medición hasta el lugar de la voladura entre 50 m y 1000 m). Estas variaciones son de esperarse ya que el fenómeno ondulatorio tiene muchas variables que condicionan la respuesta, como se mencionó anteriormente. Aunque

es claro que la tendencia en todos los casos se mantiene (a menor $R/W^{1/2}$, mayor velocidad), para adecuar las observaciones reportadas internacionalmente al medio colombiano es necesario realizar mediciones a nivel local como lo ha hecho el grupo ESTRUCTURAS.

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE UNA VIVIENDA EN MAMPOSTERÍA SIMPLE

Con el fin de analizar la respuesta de una edificación frágil ante las vibraciones generadas por voladuras, se modeló a través del método de los elementos finitos una edificación existente de 30 m² elaborada en mampostería simple (sin refuerzo en acero) y construida en bloques No. 5 con mortero de pega de baja calidad similar a aquellas edificaciones usadas por pobladores cercanos a la zona de explotación. Este tipo de edificación de autoconstrucción es común en el medio colombiano a pesar de su prohibición por parte de AIS (1998) en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. El levantamiento estructural de la edificación bajo estudio, así como la caracterización mecánica de sus materiales, fue realizado dentro del marco de proyectos de investigación del grupo ESTRUCTURAS de la Universidad Javeriana; véanse las referencias: Ruiz et al. (2005) y Arias, Velásquez y Ruiz (2005). Dentro de esta línea de investigación se han llevado a cabo ensayos de tracción diagonal (más de 70 muretes de 1.2 m x 1.2 m) y ensayos de compresión simple (piezas individuales, mortero de pega y pilas de mampostería). Todas las probetas objeto de ensayo fueron construidas mediante bloques No. 4 y bloques No. 5 siguiendo los procedimientos y usando los materiales con los que típicamente se elaboran las viviendas de autoconstrucción.

En la Tabla 4 se muestran resultados típicos de ensayos de resistencia a la compresión de mampostería con bloques No. 5. En la Figura 8 se muestran fotografías del montaje y la falla de las pilas de bloque sometidas a compresión. Se reporta el promedio de la resistencia a la compresión de la mampostería (f'_m) ya que a través de este valor se estimó el módulo elástico siguiendo las recomendaciones de AIS (1998): $E_m = 750 f'_m = 750 \times 4.99 = 3750 \text{ MPa} = 37500 \text{ kg/cm}^2$, Apartado D.5.2 de la NSR-98 (AIS, 1998).

Tabla 4: Resistencia a la compresión de la mampostería establecida en Ruiz et al. (2005)

Espécimen	Resistencia a la compresión (MPa)
5A	5.02
5B	4.75
5C	4.92
5D	4.87
5E	5.37
PROMEDIO	4.99



a)



b)

Figura 8: a) Montaje; b) Falla de las pilas sometidas a compresión para caracterización de los materiales.

En la Figura 9a se muestra una imagen de la edificación bajo estudio y en la Figura 9b se muestra su respectivo modelo numérico en elementos finitos elaborado en el programa SAP 2000.

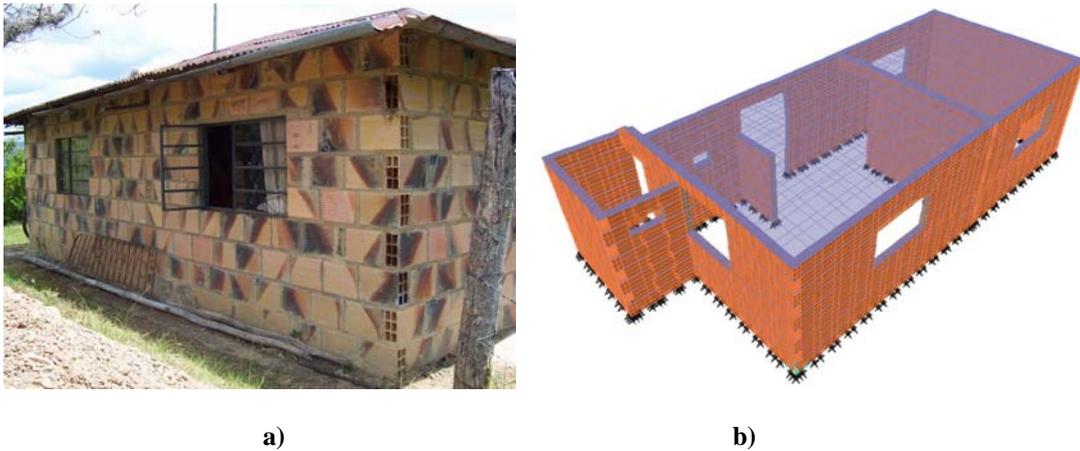


Figura 9: a) Edificación bajo estudio; b) Modelación por elementos finitos de la edificación.

En el modelo numérico por elementos finitos se simularon tanto los bloques de arcilla a través de elementos tipo “shell” (cáscara) como el mortero de pega (a través de elementos sólidos). La placa (o “plancha” como se conoce en autoconstrucción) de cubierta se simuló mediante elementos tipo “shell” de 10 cm de espesor lo cual coincide con lo encontrado en las mediciones de campo de la edificación bajo estudio. En total se usaron 31342 elementos tipo “shell” y 3040 elementos sólidos. Para el peso de los materiales se asumió un valor de 18.5 kN/m^3 para los bloques, 24 kN/m^3 para el concreto y de 21 kN/m^3 para el mortero. Asimismo, se realizaron las modificaciones del caso para que el módulo elástico de la mampostería considerado por el modelo fuese de 3750 MPa , tal como se estableció en párrafos anteriores.

El modelo numérico fue cargado simultáneamente con el peso propio y con las fuerzas asociadas con los espectros de respuesta de aceleración de las señales de la Tabla 5. Dichos espectros de respuesta se muestran en la Figura 10.

Es importante anotar que los registros de vibración de la Tabla 4 muestran la aceleración en función del tiempo en tres direcciones mutuamente perpendiculares. Por esta razón en el modelo numérico se realizaron análisis modales espectrales en los cuales se aplicaron simultáneamente los espectros en dirección X, Y y Z.

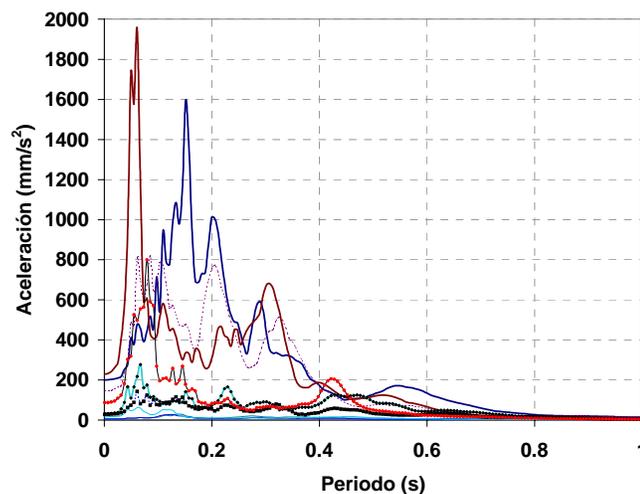
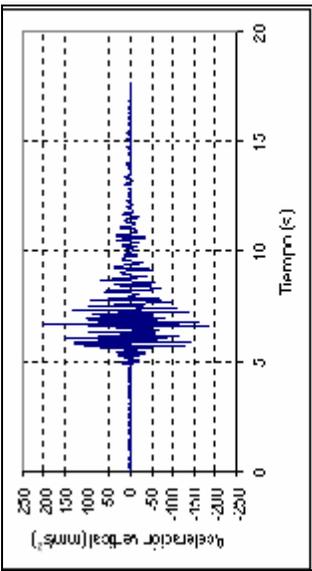
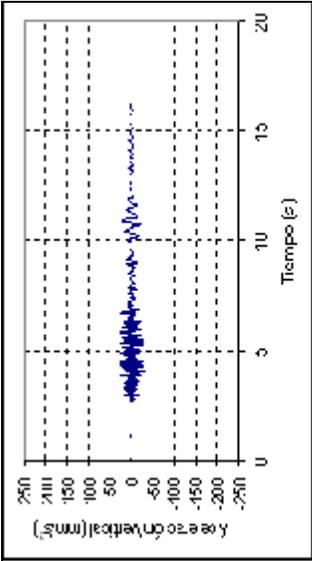
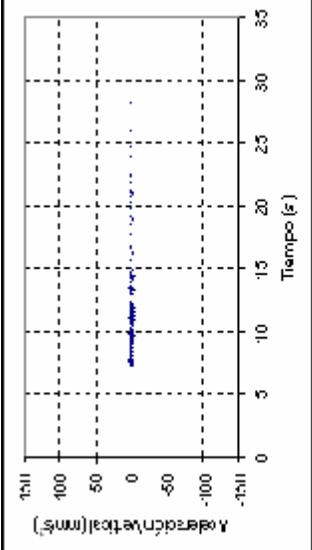
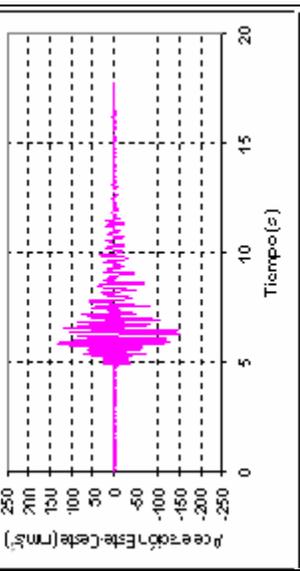
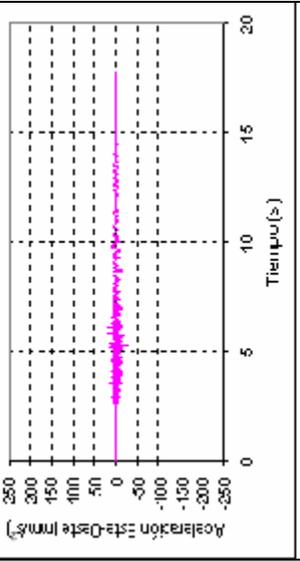
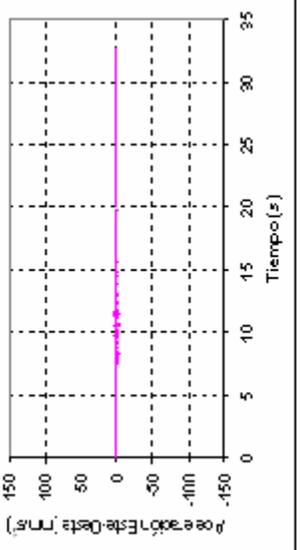
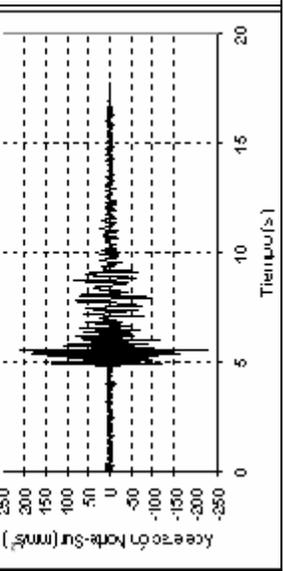
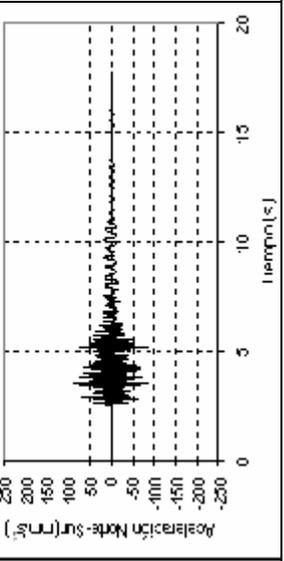
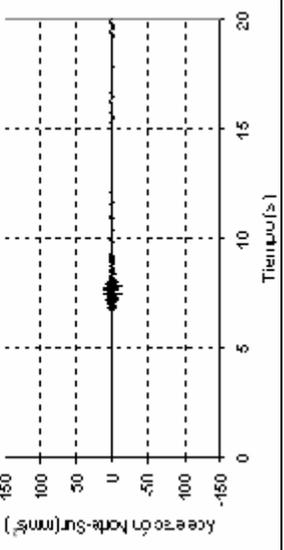


Figura 10: Espectros de respuesta de las señales de análisis.

Tabla 5: Registros de aceleración en funcion del tiempo en direccion este -oeste, norte-sur y vertical para tres valores de $R/W^{1/2}$.

$R/W^{1/2}=71 \text{ ft/lb}^{1/2}$	$R/W^{1/2}=225 \text{ ft/lb}^{1/2}$	$R/W^{1/2}=462 \text{ ft/lb}^{1/2}$
		
		
		
<p>Vmax vertical =5.41 mm/s</p> <p>Vmax Este-Oeste=3.8 mm/s</p> <p>Vmax Norte-Sur=4.12 mm/s</p>	<p>Vmax vertical =0.82 mm/s</p> <p>Vmax Este-Oeste=1.07 mm/s</p> <p>Vmax Norte-Sur=1.55 mm/s</p>	<p>Vmax vertical =0.22 mm/s</p> <p>Vmax Este-Oeste=0.1 mm/s</p> <p>Vmax Norte-Sur=0.20 mm/s</p>

Con base en lo anterior, se muestra en la Figura 11 las formas modales y los periodos de vibración en las dos direcciones principales de la edificación. No obstante, es importante mencionar que para garantizar una participación de masa superior al 95% se consideraron 20 modos de vibración.

De acuerdo con AIS (1998), la resistencia a la tensión de la mampostería está en el orden de los 0.2 MPa (200 kPa). Por encima de este esfuerzo empezarán a aparecer grietas. En la Figura 12 se muestra la distribución de esfuerzos en uno de los muros críticos de la vivienda bajo estudio para los tres análisis espectrales efectuados de acuerdo con las señales de la Tabla 5. Cabe recordar que en la medida que el parámetro $R/W^{1/2}$ se incrementa, disminuye tanto la aceleración del registro como su velocidad y por ende la sollicitación sobre el sistema estructural. De acuerdo con lo anterior solamente se podrían generar fisuras concentradas en las inmediaciones de las esquinas de puertas y ventanas para el caso en el que la edificación se viese sometida a la señal correspondiente a $R/W^{1/2} = 71 \text{ ft/lb}^{1/2}$. Los otros dos registros no podrían generar fisuras ya que los esfuerzos de tensión son inferiores a 0.2 MPa. Lo anterior se valida si se comparan las velocidades de partícula de los registros de velocidad críticos (VMAX VERTICAL = 5.41 mm/s, VMAX ESTE-OESTE = 3.8 mm/s, VMAX NORTE-SUR = 4.12 mm/s) con los límites establecidos internacionalmente para no daño a estructuras de vivienda, los cuales están entre 3 mm/s y 20 mm/s. Teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas y que las estructuras de mampostería (simple) sin refuerzo son por definición frágiles (no tienen capacidad de disipación de energía en el rango inelástico), éstas podrían ser catalogadas como estructuras delicadas muy sensibles a la vibración, en cuyo caso el límite estaría entre 3 mm/s y 8 mm/s. De acuerdo con los análisis efectuados, los registros de vibración críticos tienen una velocidad de partículas en el orden de los 4.4 mm/s. Esto traería como consecuencia la generación de daños menores tal como se corrobora con los modelos numéricos por elementos finitos.

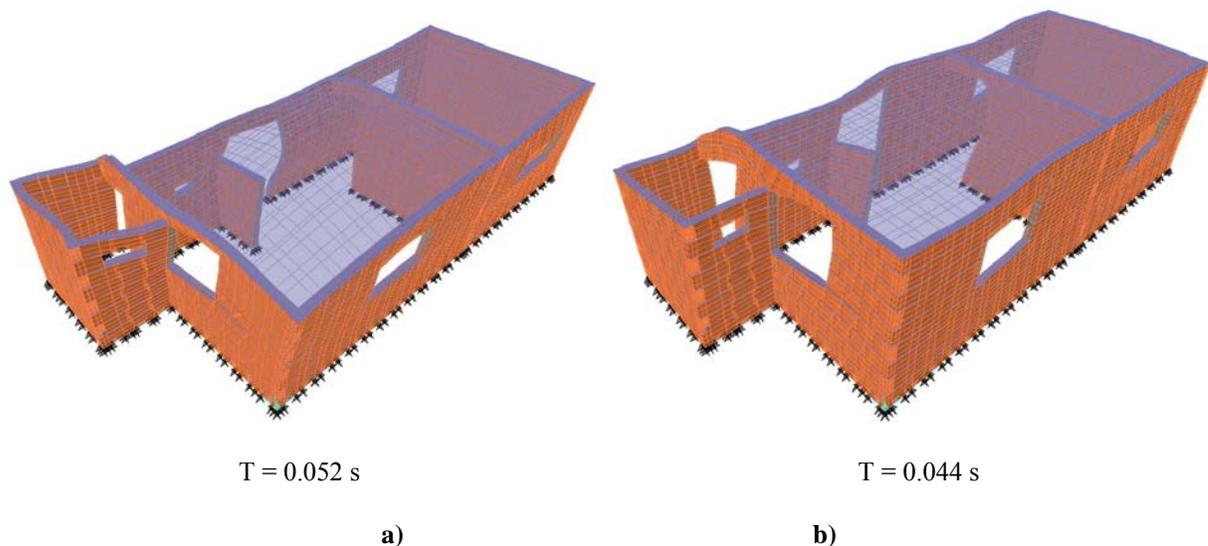


Figura 11: Periodos fundamentales de vibración.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las velocidades de partícula debidas a voladuras en minería que fueron registradas por el grupo ESTRUCTURAS estuvieron entre 0.1 mm/s y 6 mm/s. Dichas mediciones corresponden a un rango de $R/W^{1/2}$ (distancia escalada por la raíz de la máxima carga por unidad de retardo) entre 70 y 1300 $\text{ft/lb}^{1/2}$.

De acuerdo con las mediciones de vibraciones efectuadas, si se diseñan las voladuras con el parámetro de distancia escalada con la raíz cuadrada de la máxima carga por unidad de retardo superior a 100 $\text{ft/lb}^{1/2}$ se mantendrán las velocidades pico de partículas en niveles que minimizarían los daños en edificaciones de viviendas.

Teniendo en cuenta los resultados presentados anteriormente se deberían desarrollar, para las condiciones propias de Colombia, límites de vibración (no solo debidos a voladuras sino a otros fenómenos como el tráfico vehicular pesado – por ejemplo paso de Tractocamiones o buses articulados de sistemas de transporte masivo, operación de equipos de construcción, etcétera) ajustados a las condiciones locales y de construcción de edificaciones. Para ello es necesario

desarrollar una mayor cantidad de proyectos de investigación que involucren el registro de las vibraciones debidas a fenómenos naturales y antrópicos en conjunto con mediciones de las fisuras en edificaciones de vivienda cercanas.

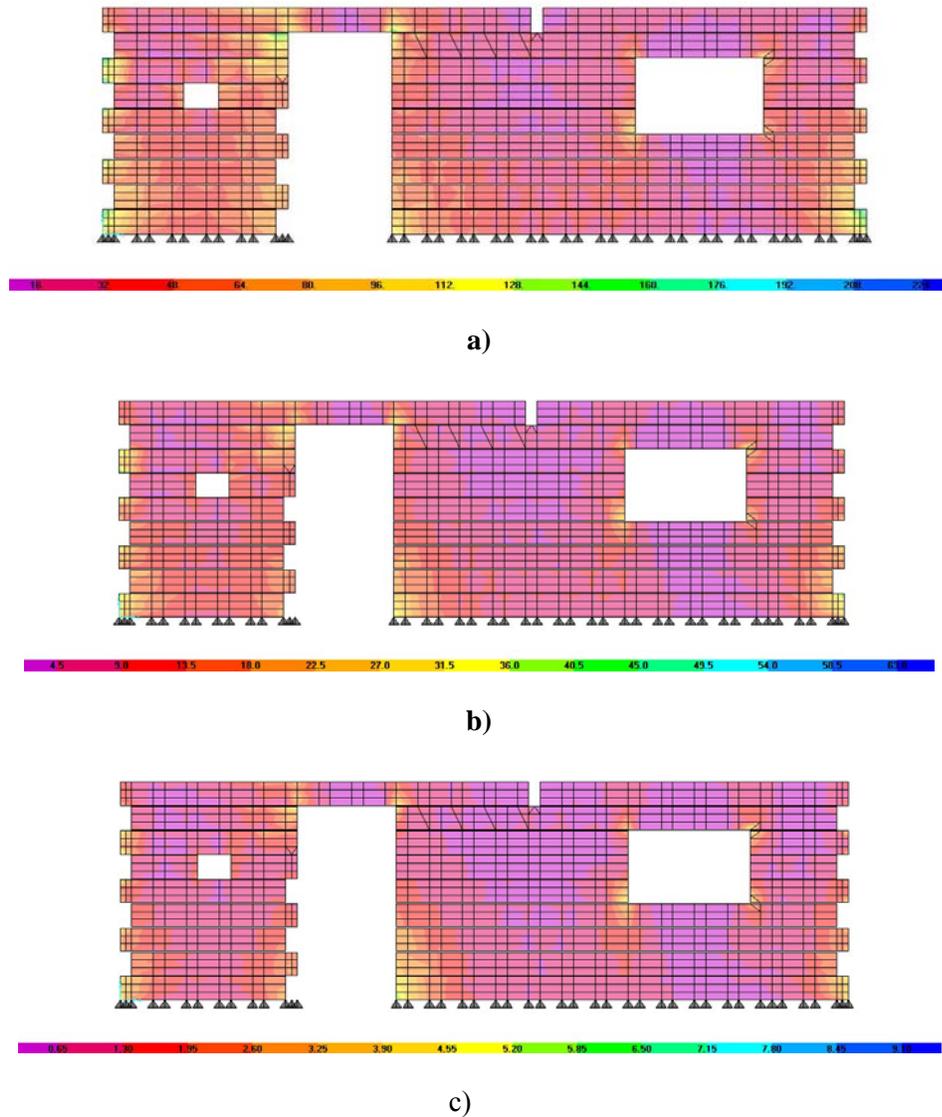


Figura 12: Distribución de esfuerzos (kPa) para los análisis espectrales efectuados: a) Esfuerzos para la voladura con $R/W^{1/2} = 71 \text{ ft/lb}^{1/2}$ ($V_{MAX} = 5.41 \text{ mm/s}$ y esfuerzo máximo de 224 kPa); b) Esfuerzos para la voladura con $R/W^{1/2} = 255 \text{ ft/lb}^{1/2}$ ($V_{MAX} = 1.55 \text{ mm/s}$ y esfuerzo máximo de 63 kPa); c) Esfuerzos para la voladura con $R/W^{1/2} = 462 \text{ ft/lb}^{1/2}$ ($V_{MAX} = 0.22 \text{ mm/s}$ y esfuerzo máximo de 9.1 kPa).

REFERENCIAS

- Arias, N., Velásquez F. y Ruiz D. (2005). *Reforzamiento sísmico exterior de mampostería no estructural mediante tensores de acero*, Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- AS 2187 (1993). *Explosives - Storage, Transport and Use*, Australian Standard.
- AIS (1998). *Normas Colombianas para el Diseño y la Construcción de Edificaciones Sismorresistentes (NSR-98)*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Colombia.

- BS 7385-2 (1993). *Part 2: Evaluation and Measurement for Vibration in Buildings. Guide to Damage Levels From Ground Borne Vibration*, British Standard.
- DIN 4150 (1999). *Part 3: Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures*, German Standard, Deutsches Institut Fur Normung E.V.
- Dowding, C.H. (1985). *Blast Vibration Monitoring and Control*, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Dowding, C. y McKenna, L. (2005). "Crack response to long term environmental and blast vibration effects", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp 1151-1161.
- Dowding, C., Siskind, D., McKenna, L., Martell, M. y Aimone-Martin, C. (2003). *Comparative Study of Structure Response to Mine Blasting*, Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, Appalachian Regional Coordinating Center Pittsburgh, Pennsylvania.
- Ahsby, J. P. (1981). "Production blasting and the development of pit slopes", *Proceedings of the 3rd. International Conference on Stability in Open Pit Mining*, Vancouver, B.C., Canada.
- Gad, E., Wilson, A., Moore, A. Y Richards, A. (2005). "Effects of mine blasting on residential structures", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 19, No. 3, pp. 222-228.
- Hendron, A.S. y Oriard, C. (1972). "Specifications for controlled blasting in civil engineering projects", *Proceedings of the First American Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Society of Mines Engineers, AIME, Littleton, Colorado, pp. 1585-1560.
- López-Jimeno, C., López-Jimeno, E., García-Bermúdez, P., (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*, E.T.S.I. de Minas, Madrid, España.
- Ruiz D., Molano, M., Forero, M., Serrano, A. y Varón, A. (2005). "Refuerzo sísmico para mampostería no estructural con maderas confinantes y con malla electrosoldada", *Memorias del Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Concepción, Chile.
- Sarria, A. (1996). *Métodos Geofísicos con Aplicaciones a la Ingeniería Civil*, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia.
- Sarria, A. (2004). *Investigación No Destructiva y Cargas Extremas en Estructuras*, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia.
- Siskind, D., Stagg, M., Kopp, J. y Dowding, C. (1980). *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Blasting*, U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8507 (USBM RI 8507), Washington, D.C.
- USGS (2007). U.S. Geological Survey, Earthquake Hazard Program, portal de Internet: <http://earthquake.usgs.gov/learning/glossary.php?term=P%20wave>.