

2. MEDICIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y SITIOS DE MEDICIÓN

2.1. Introducción

Una parte importante en la determinación de los efectos de las vibraciones causadas por voladuras se logra en el proceso de observación e interpretación. La observación en el caso de vibraciones causadas por actividad humana se realizan por medio de mediciones, las cuales se realizan con instrumentación especializada para el área.

En esta sección se tratará la parte de la experimentación relativa a las variables representativas del fenómeno vibratorio, la instrumentación utilizada para tal fin –a nivel informal– y las recomendaciones existentes sobre los lugares para realizar las mediciones en este tipo de trabajos – vibraciones producidas por actividad humana: Voladuras. Adicionalmente se describirán los equipos utilizados en este proyecto y los lugares y periodos de funcionamiento de estos.

2.2. Mediciones

2.2.1. Propósito de las mediciones

En la medición de vibraciones, el objetivo es detectar y registrar el movimiento vibratorio que es causado por fuerzas que pueden variar en magnitud y dirección, y que en el caso particular de este proyecto se deben a que parte de la energía de las voladuras es transmitida como ondas elásticas al medio. Esta información puede ser utilizada para: interpretación sísmológica, caracterización y comparación con las normas de control de vibraciones, cálculos de dinámica de estructuras, etc.

Si la medición se realiza en alguna clase de estructura civil, entonces hay que tener en cuenta que el registro –alterado por la estructura geológica– es la respuesta de esta estructura a la vibración del suelo.

El problema básico conectado con la medición de vibraciones es el de establecer un punto fijo en el espacio donde se realizaran las mediciones. Durante el paso de la energía sísmica, todo el medio esta en movimiento, al igual que el instrumento de medición, como resultado no se puede realizar una medición absoluta del movimiento, al menos no con los medios convencionales disponibles. Los instrumentos diseñados para medir vibraciones –en general

llamados sismómetros– establecen un punto interno dentro de ellos que permanece relativamente quieto respecto al suelo o carcasa durante el paso de las vibraciones; las vibraciones son entonces medidas como el cambio en la posición del entre el punto interno del sensor y el suelo o carcasa.

2.2.2. Variables medidas en vibraciones

Las cantidades medidas deben reproducir el movimiento del suelo al paso de las ondas, esto requiere que se registren tres componentes ortogonales ya sea de la variable desplazamiento de partícula (u), velocidad ($\dot{u}$) o aceleración ($\ddot{u}$), y que estén función del tiempo continuo o discreto –señal análoga, discreta o serie temporal.

Las tres variables: desplazamiento de partícula, velocidad y aceleración están relacionadas analíticamente por $\ddot{u} = d\dot{u}/dt = d^2u/dt^2$, también por $\dot{u} = \int \ddot{u} dt$, además por $x = \int \int \ddot{u} dt dt = \int \dot{u} dt$. Para vibraciones armónicas existe la relación $\ddot{u} = \omega \dot{u} = \omega^2 u$, donde ω es la frecuencia angular. Así, la medida de uno de los parámetros permite en principio la determinación de cualquiera de los otros dos. Sin embargo, debido a las inexactitudes inherentes en los cálculos numéricos, es deseable y recomendado medir el parámetro particular de interés directamente.

Prácticamente todas las normas internacionales de manejo de vibraciones¹ han sido desarrolladas a partir del parámetro velocidad² y las mediciones fueron realizadas con a partir de instrumentos que miden este parámetro, es por esto que es deseable medir esta y no otra variable.

Cada una de las variables: desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas con transductores diferentes; sin embargo, cada señal tiene información de las tres variables en rangos diferentes de frecuencia con diferente nivel de amplificación.

2.2.3. Rango de magnitud en variables de vibraciones por voladuras

El rango de magnitud de las variables medidas en vibraciones generadas por voladuras dependen de varios factores, entre ellos: distancia de la fuente, cantidad de explosivos detonados por intervalo de retardo, entre otros; la gran cantidad combinaciones posibles de los factores antes mencionados hace que el rango de magnitudes sea grande, Dowding (2001) sugiere los rangos generales que muestran en la Tabla 2.1, Bollinger (1980) mientras tanto, presenta valores algo mayores para registros a corta distancia.

Con base en la Tabla 2.1 se pueden calcular los rangos dinámicos de las variables medidas

¹Tema tratado en la sección 3, página 19

²el motivo físico se explicara mas adelante en la sección 3.2.

Tabla 2.1. Rangos típicos de los parámetros de vibraciones

Parámetro	Rango		unidades
Desplazamiento	0.0001	→	10 mm
Velocidad de partícula	0.0001	→	1000 mm/s
Aceleración de partícula	10	→	100000 mm/s ²
Frecuencia	0.5	→	200 Hz
Longitud de onda	30	→	1500 m
Duración de pulsos	0.1	→	2 s

Fuente: Cording et al. (1974) en Dowding (2001)

(sujeto a errores por la naturaleza empírica de las observaciones), se puede observar que estos valores son bastante grandes: 100 dB para los desplazamientos, 140 dB en las velocidades de partículas y 80 dB en aceleraciones. Si nos guiamos por esta información –de naturaleza empírica–, la velocidad es la variable que tiene un mayor rango dinámico, y que nos proporcionará mayor resolución.

2.3. Instrumentación

Proakis y Manolakis (1998) definen instrumentación como el mecanismo que se utiliza para reunir información de algún proceso, esto implica que un instrumento esta compuesto de varias partes, entre ellas: un sensor, un transductor y un mecanismo de grabación digital o análogo.

En vibraciones, el sensor es la parte del sistema que responde a una excitación externa mientras que el transductor es el que se encarga de convertir la respuesta del sistema en una señal eléctrica. Comúnmente a el conjunto sensor/transductor se le llama simplemente sensor.

La descripción formal del sensor, transductor e instrumentación esta por fuera del alcance de este proyecto, una explicación de ese tipo puede ser encontrada por ejemplo en Aki y Richards (1980); Thomson (1982); Ogata (1987); Proakis y Manolakis (1998) entre otros. El punto es entonces mostrar informalmente la característica esencial para este proyecto del sensor: sensibilidad, y describir los tipos de transductores que son usados generalmente cuando se quiere caracterizar señales para su comparación con las normas.

2.3.1. Sensibilidad del sensor

Para la unidad básica de medición de vibraciones, la unidad sísmica (sistema de un grado de libertad con amortiguamiento), se pueden describir tres tipos de sensibilidad: 1) Sensibilidad al desplazamiento, 2) sensibilidad a la velocidad y 3) sensibilidad a la aceleración. Debido a

la relación analítica entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, un instrumento que registra una variable, necesariamente registra las otras. La sensibilidad del sismógrafo debe escogerse para producir una señal útil de las vibraciones. En este proyecto se utilizaron sismómetros con sensibilidad a la velocidad (ver pág. 14), que son los más adecuados por ser los recomendados en las normas internacionales.

La unidad sísmica, base de muchos instrumentos de medición de vibraciones, es el sismómetro, el cual puede ser llamado de varias formas así: deplacímetro, velocímetro (geofonos en geofísica o genéricamente sismómetros en sismología e ingeniería) y acelerómetro. Estos términos conducen al hecho que la sensibilidad del sensor es constante respecto al parámetro dado sobre un rango de frecuencias del movimiento del suelo, pero no significa que no haya respuesta instrumental de los otros parámetros del movimiento.

El tipo de sensor que se utiliza depende de la aplicación particular. En el área de vibraciones de estructuras –dinámica estructural– es usual medir aceleraciones, las cuales están relacionadas directamente con las fuerzas inerciales en las estructuras; sin embargo, en vibraciones causadas por actividad humana, como voladuras en canteras y tráfico vehicular, el objetivo es la comparación con normas³, las cuales plantean el uso de sismómetros de velocidad. La razón de fondo de las normas para medir velocidad se expone en la sección 3.2 (pág. 19).

2.3.2. Tipos de transductores

Por otro lado los transductores, los cuales convierten el movimiento en una señal eléctrica, dependiendo de la sensibilidad (desplazamiento, velocidad o aceleración) pueden ser:

Transductor de desplazamiento: Sistemas capacitivos.

Transductores de velocidad: Sistemas electromagnéticos.

Transductores de aceleración Sistemas piezoeléctricos y capacitivos.

Con algunas modificaciones es posible convertir un tipo de salida en otro parámetro diferente al originalmente propuesto. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un transductor de velocidad, que es el más adecuado debido a la intención de medir velocidades.

2.4. Sitios de medición

Los sitios de medición recomendados por las normas internacionales de manejo de vibraciones pueden resumir en:

³Las normas se encaminan a minimizar el daño cosmético de las edificaciones

Representativos: Lugar en donde las condiciones geológicas (como eventuales modificadores de la vibración) son las más comunes.

Ubicación: El sitio mas cercano a la fuente de vibración donde este ubicada una edificación.

Importancia: Lugar donde se encuentre un edificación de interés, por ejemplo una edificación historica.

Los sitios escogidos para las mediciones en este proyecto entran en una o mas de estas categorías, por ejemplo: la iglesia de Mulaló es una edificación de interés –monumento histórico– y adicionalmente un lugar representativo de la región. Para mayor información ver a continuación.

2.5. Equipos, sitios de medición y periodos de funcionamiento del proyecto

2.5.1. Equipos utilizados

Los equipos utilizados en este proyecto fueron adquiridos por Cementos del Valle para su *Sistema de Monitoreo de Voladuras*, Estos equipos de medición –sistema de adquisición + sismómetros– fueron adquiridos a la empresa suiza GeoSys AG y corresponden a las series GCR16 y GSR18.

Para el análisis de vibraciones producidas por voladuras reportadas en este proyecto se ha utilizado información adquirida con los equipos GCR16 y GSR18. Adicionalmente, para verificar el correcto funcionamiento de estos, se instalaron temporalmente otros dos equipos con fines de calibración: 1) OSSOdas, un sistema digital autónomo de adquisición de señales sísmicas desarrollado en el OSSO (ver Fig. 2.1); 2) Minimate, un sistema digital para medición de vibraciones de terreno y sobrepresión del aire causadas por actividad humana, de la empresa canadiense Instantel (Fig. 2.2).

Los equipos GSR18 y GCR16 constan de un sistema digital de registro autónomo y un sensor de ingeniería externo con tres componentes ortogonales. Las características de estos equipos se muestran a continuación.

2.5.1.1. Equipo de adquisición GSR18 El GSR18 (Fig. 2.3) es un equipo de adquisición de datos sismológicos de 18 bits, es decir con un rango entre $4.77E^{-5}$ y 100 mm/s en 262144 divisiones; este sistema de adquisición puede ser usado con diferentes tipos de sensores, entre ellos: sismómetros, acelerómetros y cualquier sensor cuya salida este en el rango

Figura 2.1. Equipo de medición de vibraciones OSSOdas



0 a 5 V (Grob, 1997); si la salida no está en el intervalo se debe realizar un acondicionamiento de la señal para que los valores entregados por el sensor estén en el rango mencionado. En la aplicación particular de este proyecto se escogieron los sismómetros SSA-320 (ver Fig. 2.4 y descripción del sensor en la pág. 14).

Durante la operación normal este equipo realiza continuamente las etapas de: amplificación, filtrado análogo y conversión digital del voltaje de salida del sensor. Una vez digitalizada la señal, ésta es guardada en un segmento de memoria dedicado a pre-eventos, que posteriormente mediante un algoritmo de detección es clasificada, guardada o borrada.

En la etapa de amplificación, las señales análogas de cada una de las componentes –3 en total– son incrementadas por medio de circuitos electrónicos análogos (amplificadores operacionales) independientes. Este sistema de adquisición viene con dos valores de ganancia ajustables, sin embargo, en pruebas de laboratorio realizadas en el OSSO se pudo determinar que el equipo tiene solamente un nivel de amplificación no ajustable.

La etapa de filtrado análogo de la señal sirve para atenuar y eliminar las señales que se encuentran encima de la mitad de la frecuencia de muestreo, señales que si se conservaran producirían “alias” (señales que se encuentran encima de la mitad de la frecuencia de muestreo y que aparecen en frecuencias inferiores). Esta etapa está implementada en el

Figura 2.2. Equipo de medición de vibraciones Minimate – Instantel



sistema de adquisición con un filtro de 6 polos *Butterworth* pasa-bajo de 100 Hz. La señal analógica filtrada es luego digitalizada por un microchip conversor análogo-digital a 200 Hz.

Los algoritmos de detección incluidos en este sistema de adquisición son:

Relación STA/LTA graba un evento cuando la relación entre el promedio absoluto de la señal en una ventana de tiempo corta y el promedio en una ventana larga supera un valor preestablecido.

Nivel de señal Si la señal supera un valor preestablecido en un canal determinado, o en una combinación de ellos, entonces se graba un archivo.

Otras características particulares de este sistema de adquisición son:

- Sincronización del reloj interno por medio de GPS (Sistema de Posicionamiento Global).
- Capacidad de almacenamiento de datos de aproximadamente 144 minutos a 200 Hz.

Figura 2.3. Equipo de adquisición GSR18



2.5.1.2. Equipo de adquisición GCR16 Este sistema de adquisición fue diseñado para aplicaciones de Ingeniería Civil, es prácticamente igual en su concepción al GSR18, y la mayoría de información dada en la sección anterior aplica a éste también.

Los cambios de este sistema de adquisición respecto al GSR18 son:

- Resolución digital de 16 bits, con un rango de velocidades entre 0.0031 y 100 mm/s en 65536 divisiones,
- menor capacidad de almacenamiento (guarda aproximadamente 72 minutos registrando a 200 Hz),
- los algoritmos de detección de este sistema son: por nivel de señal, fecha — hora programada y continuo,
- sin GPS,
- tiene tres niveles de ganancia x1, x10 y x100,
- cuatro frecuencias de muestreo: 125, 250, 500 y 1000 Hz.

Figura 2.4. Sensor SSA-320 instalado en los equipos de adquisición GSR18 y GCR16



2.5.1.3. Sensor SSA-320 Este arreglo de sensores de GeoSys (fig. 2.4), esta basado en geofonos de sismica (GV-22 – OYO Corp.), a los cuales se ha cambiado la respuesta instrumental –específicamente se les ha realizado compensación en bajas frecuencias– por medio de circuitos electrónicos.

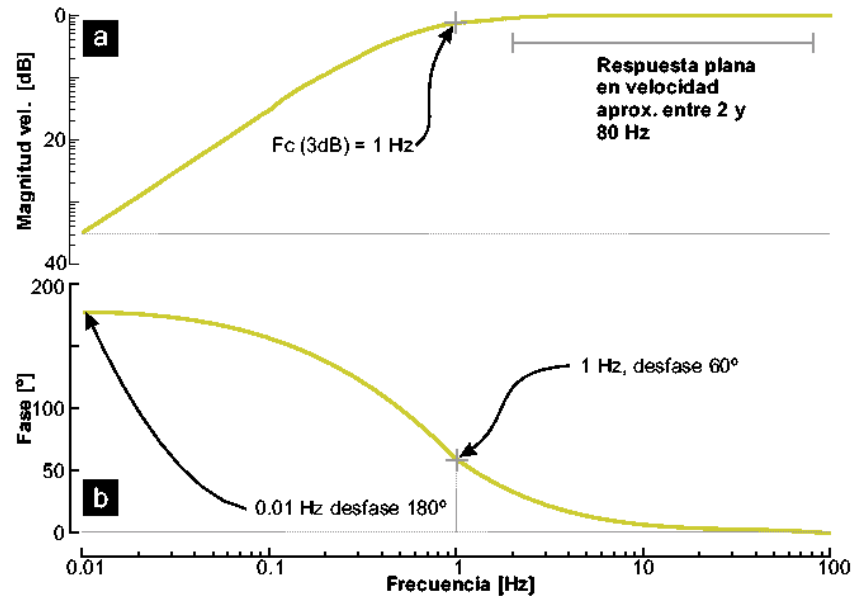
El SSA-320 consta de un arreglo ortogonal de sensores. Cada uno tiene respuesta plana en frecuencias proporcional a la velocidad en el rango aprox. de 2 a 80 Hz y una frecuencia de caída (o frecuencia de corte f_c) de 3 dB aproximadamente en 1 Hz (ver Fig. 2.5).

Un procedimiento común es la corrección instrumental (deconvolución de la señal con un filtro inverso a la respuesta del sensor), que pretende obtener la vibración real del terreno antes de haber sido modificada por el sensor. Esta operación tiene el inconveniente de ser inestable, y como las frecuencias de vibraciones medidas están aproximadamente en el rango lineal de velocidades se tomó la decisión de no realizar la operación de corrección instrumental.

2.5.2. Sitios de medición y periodos de funcionamiento

Los equipos GSR18 y GCR16, que fueron adquiridos por Cementos del Valle para su *Sistema de Monitoreo de Voladuras*, cuyos datos son la base de este proyecto, fueron operados previamente en diferentes ubicaciones de las poblaciones San Marcos y Mulaló (Figura A.2, pág. 91, Figuras A.5 y A.6, pág. 94) con el fin de valorar niveles de ruido, su influencia en

Figura 2.5. Respuesta en frecuencias de los sensores del SSA-320, -a- Magnitud en dB, -b- fase



la calidad y cantidad de voladuras registradas, y para descartar sitios con un fuerte efecto local. Los periodos y lugares de funcionamiento se detallan a continuación.

2.5.2.1. Sitios en Mulaló En esta población se realizaron mediciones previas a la instalación definitiva de la estación de monitoreo de vibraciones. Las primeras mediciones se realizaron en 1998 en el patio posterior de la iglesia de Mulaló (posición 3.6388 N y -76.4880E en coordenadas cartográficas), emplazamiento donde actualmente está instalada la estación definitiva. El experimento consistió en medir 5 voladuras con cargas entre 1 y 3 toneladas, usando un equipo acelerométrico de la Universidad del Valle (datos no utilizados en este proyecto). Con estas primeras observaciones se dieron pautas para la adquisición de equipos y se propusieron sitios para su instalación según criterios técnicos, logísticos y sociales.

En junio de 1999 se instaló uno de los equipos en la casa del señor Leo Sieber (estación "Sieber", posición 3.6394N y -76.4835E en coordenadas cartográficas), ubicada aprox. 500 m al NEE del la iglesia de Mulaló (ver etiqueta "Leo Sieber" en la figura A.2). El equipo de adquisición instalado en este lugar fue el GSR18, y se colocó en ese lugar porque: 1) cumplía con requerimientos de seguridad y 2) es un sitio donde - por cercanía al área de explotación - se pueden esperar velocidades de vibración mayores que en otras áreas de la población.

La estación funcionó en ese lugar hasta finales de mayo de 2001, cuando la instrumentación fue retirada por problemas de seguridad, y a que se observó un marcado efecto de sitio debido a los depósitos aluviales de la quebrada Mulaló y cambios antrópicos del terreno, con lo cual este sitio no era representativo para las condiciones generales de los suelos de Mulaló.

En junio de 2000 se inició la búsqueda de sitio para reemplazar la estación “Sieber”. Los días 28 y 29 de este mes se realizaron mediciones en un lugar intermedio entre el sitio donde estaba operando el equipo (estación “Sieber”) y el sitio donde se realizaron las primeras pruebas (Iglesia Mulaló). Al analizar la información de este nuevo sitio (cercano a la quebrada Mulaló) se encontraron problemas similares a los presentados en la estación “Sieber”, y se determinó que el mejor lugar para la instalación de la estación de monitoreo de vibraciones era el solar detrás de la iglesia de Mulaló. Este nuevo sitio tiene varias ventajas, como la de ser un terreno representativo del área poblada, estar localizado junto a una construcción con alto grado de susceptibilidad (una iglesia centenaria, de mampostería sin refuerzo), y ser de mucha presencia social.

En marzo del 2001 se construyó la caseta en Mulaló en los predios de la iglesia (Figura 2.6, –a–), quedando ubicada en la parte posterior del predio (Figura 2.6, –b–). Como parte del trabajo de construcción se fundió a aprox. 20 cm de profundidad un solado cuadrado de 30 cm de lado (Figura 2.4) para anclar el sensor, el mismo tipo de zócalo construido también en la caseta de San Marcos; con esta similitud se asegura la comparabilidad de los registros de ambas estaciones. La estación de monitoreo de vibraciones en Mulaló (en la Iglesia) ha operado de forma continua desde junio de 2001 hasta la fecha de impresión de este proyecto (10 de mayo de 2004).

Figura 2.6. Foto frontal de la iglesia de Mulaló -a- y caseta ubicada en ese sitio -b-



2.5.2.2. Sitios en San Marcos Para la selección del sitio de monitoreo de vibraciones en San Marcos se realizaron varias visitas a la localidad. La principal dificultad que se

encontró en la selección del sitio fueron los altos niveles de vibraciones ambientales que se registran en toda el área de San Marcos, provenientes del tráfico vehicular en la Carretera Panorama y de la actividad agraria que se desarrolla en la región. Finalmente se seleccionó un sitio alejado (posición 3.6594N y -76.4646E en coordenadas cartográficas) de la carretera y cercano a la cantera (ver Figura A.2, pág. 91), cuyos suelos son representativos del sector.

En diciembre del 2000 se construyó la caseta para la estación de monitoreo de vibraciones en el lugar seleccionado (Figura 2.7) y en enero de 2001 empezó a funcionar la estación de monitoreo, la que ha operado en el mismo lugar hasta la fecha (10 de mayo de 2004).

Figura 2.7. Fotos de la estación de monitoreo de vibraciones en San Marcos



2.5.2.3. Periodos de funcionamiento El primer sistema de adquisición instalado fue el GSR18, que operó en la estación “Sieber” (Figura A.2, pág. 91) en el periodo junio 24 de 1999 a mayo 5 de 2001. Los días 28 y 29 de junio de 2000 se realizaron pruebas con el GCR16 en un sitio intermedio entre la estación Sieber y la iglesia de Mulaló con el fin de buscar un reemplazo para la estación Sieber.

En enero 18 de 2001 se instaló en la estación San Marcos el equipo de adquisición GCR16, el cual fue retirado para mantenimiento día 13 de mayo de 2001 y fue reinstalado en el mismo sitio el 19 de mayo.

El 23 de mayo de 2001 el equipo GSR18 fue instalado en San Marcos (donde a operado hasta el momento), funciono junto con el GCR16 hasta el 24 junio de 2001, día en que fue retirado el GCR16 y trasladado la caseta de Mulaló donde a operado hasta esta fecha.

Durante todo el periodo de funcionamiento de las estaciones se han realizado visitas rutinarias –semanales o quincenales– con varios objetivos, entre ellos: bajar información, revisar el funcionamiento de los sistemas de adquisición, realizar ajustes en los parámetros de adquisición –cuando es necesario–, realizar mantenimiento de la estación. Los Tabla 2.2 contiene el resumen del funcionamiento y ubicación de las estaciones de monitoreo de vibraciones.

Tabla 2.2. Períodos de funcionamiento y ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico de voladuras de Cementos del Valle

Período			Estación	Equipo
1999/05/24	→	2001/05/05	Sieber ^a	GSR18
2000/06/28	→	2000/06/29	na.	GCR16
2001/01/18	→	2001/05/13	San Marcos ^b	GCR16
2001/05/19	→	2001/06/24	San Marcos	GCR16
2001/05/23	→	presente	San Marcos	GSR18
2001/06/24	→	presente	Mulaló ^c	GCR16

^a En Mulaló, posición 3.6394N y -76.4835E coordenadas cartográficas.

^b Posición 3.6594N y -76.4645E en coordenadas cartográficas.

^c Parte posterior de la iglesia de Mulaló, posición 3.6388N y -76.4880E en coordenadas cartográficas.