

Efecto del acoplamiento sensor-roca en la medida de vibraciones por voladura

J.A. Sanchidrián¹, P. Segarra¹, I. del Castillo², L.M. López¹ & R. Castedo¹

¹Universidad Politécnica de Madrid – E.T.S.I. Minas.

²VIBRAQUIPO

Resumen. Este trabajo analiza algunos métodos de medida de vibraciones producidas en voladuras. Se han ensayado dos geófonos triaxiales de diferente tipo, tamaño y masa en un excitador de vibraciones. Los sensores se han acoplado a una losa de granito usando tres métodos: apoyado (sin sujeción) sobre la losa, sujeto con un saco con arena y anclado a la losa con un perno. La losa se sometió a un movimiento periódico horizontal de frecuencia variable entre 16 y 200 Hz, y amplitud constante. Se han aplicado dos niveles de vibraciones de 5 y 20 mm/s cuando el sensor se sujetó con un saco o perno, y tan sólo 5 mm/s cuando no se usó sujeción de ningún tipo. Para cada método ensayado, la transmisibilidad de las vibraciones de la roca al geófono se ha calculado en función de la frecuencia como el cociente entre la respuesta del geófono y el movimiento de la losa. La transmisibilidad de las vibraciones se considera como la combinación de la transmisibilidad del acoplamiento entre la roca y el sensor y la transmisibilidad del equipo de medida. Para obtener la transmisibilidad del acoplamiento se ha normalizado la transmisibilidad total con la transmisibilidad de los sismógrafos obtenida en un ensayo en él se supone que la transmisibilidad del acoplamiento es 1. Se observa que el acoplamiento entre el geófono y la roca, es un fenómeno resonante, que puede alterar la amplitud de las vibraciones por un factor que va desde 1,2 hasta valores inferiores a 0,6. Las medidas más exactas y precisas se obtienen con geófonos anclados a la roca. Los otros métodos (sensores colocados libremente o sujetos con un saco) proporcionan unas condiciones de contacto que no son reproducibles que pueden amplificar o atenuar las vibraciones en la mayor parte del rango de frecuencias analizado. Se muestra también que los criterios de aceleración existentes para seleccionar los métodos de acoplamiento no conducen necesariamente a medidas de vibración de buena calidad.

Introducción

Las vibraciones del terreno producidas por voladuras en minas y canteras son a menudo el principal motivo de quejas y litigios en áreas pobladas. La medición del campo sísmico es necesaria y obligatoria en la mayoría de los casos conforme a las regulaciones existentes (Siskind et al, 1980; AENOR, 1993, BSI, 1993, DIN 1999, Singh y Roy, 2010). Las conclusiones de los estudios de control de vibración dependen de en qué medida la onda sísmica que llega al punto de estudio haya sido distorsionada por el sismógrafo (Farnfield, 1996) y por las condiciones de medida, que básicamente dependen del acoplamiento entre el geófono y el terreno (Washburn y Wiley, 1941; Hoover y O'Brien, 1980; Drijkoningen, 2000).

Los estándares de medida de vibración de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1992) y la Sociedad Internacional de Ingenieros de Explosivos (ISEE, 2009, 2011) son seguidos ampliamente en el estudio las vibraciones por voladura. Estos estándares proporcionan, entre otros, la precisión mínima de los sismógrafos, así como una lista de los métodos de acoplamiento preferibles para las condiciones esperadas (aceleración pico y tipo de terreno) en el punto de medida. A pesar de toda esta información, la transmisión del movimiento sísmico del terreno al geófono no se conoce suficientemente, con lo que el error absoluto asociado a las condiciones habituales de medida de vibraciones por voladuras es esencialmente desconocido.

Este estudio muestra y analiza la transmisibilidad de la vibración del terreno al sensor para dos sismógrafos diferentes acoplados a la roca con tres métodos usados habitualmente.

Descripción de los ensayos

Para el trabajo experimental se ha utilizado un excitador de vibraciones (del Castillo, 2009), que genera un movimiento oscilatorio horizontal de acuerdo con una señal de referencia suministrada por un amplificador de potencia. Esta señal es una onda sinusoidal con amplitud máxima constante. La frecuencia de la señal se ha variado entre 16 y 200 Hz a razón de 0,02 octava/s. El rango de frecuencias analizado es un compromiso entre i) la memoria de las unidades de registro y muestreo, ii) las frecuencias predominantes en las vibraciones por voladura (frecuencias bajas a medias) y iii) las frecuencias de resonancia de los métodos de acoplamiento (frecuencias medias a altas). Nótese, sin embargo, que algunas de las frecuencias de resonancia de viviendas urbanas (Siskind et al. 1980) quedan, sin embargo, fuera del rango considerado.

La Tabla 1 muestra las características de los dos sismógrafos utilizados. Se identifican como X y Z para evitar referencia comercial alguna. Estos dispositivos están formados por tres geófonos orientados ortogonalmente alojados en una carcasa metálica. Los sensores cumplen las especificaciones de la ISEE (2011) para sismógrafos utilizados en voladuras y se conectan a una unidad externa de registro que muestreaba la señal a una velocidad de 2048 muestras por segundo. El sismógrafo X permite dos rangos de medida a los que corresponde una resolución diferente, ver Tabla 1.

Tabla 1. Características de los aparatos de medida

Características	X	Z
<i>Sensor</i>		
Densidad, kg/m ³	2130	2690
Masa, kg	0,905	0,508
Tipo	Cilíndrico	Paralelepipedico
Tamaño-radio ^a /altura, mm/mm	50/50	37/44
Radio orificio pasante para perno, mm	4,75	3
<i>Unidad de registro</i>		
Convertor analógico-digital (bits)	12	16
Rango/Resolución, mm/s	±254/0,127	±200/0,006
	±31,7/0,0159	

^a Radio equivalente a un círculo con el mismo área que la superficie de contacto.

En todos los ensayos el geófono longitudinal se alineó con la dirección del movimiento del excitador. Para obtener la curva de transmisibilidad de los sismógrafos (ensayos denominados como C), los sensores X y Z se anclaron directamente a la placa del excitador con pernos de 8 y 6 mm, respectivamente; los pernos se apretaron hasta que el par de apriete fue de 4 N·m. El sismógrafo fue sometido a una vibración armónica de amplitud de 10 mm/s cuya frecuencia se varió tal como se explicó anteriormente. Este procedimiento utilizado normalmente en la calibración de sismógrafos garantiza una contribución insignificante de las condiciones de medida en la señal registrada por el sensor, es decir las condiciones del ensayo permiten suponer que la transmisibilidad del acoplamiento será 1.

Para analizar la eficacia de tres acoplamientos usados habitualmente en roca, se realizaron 10 ensayos más, en los que se fijó una losa de granito gris al plato del excitador con cuatro pernos de cabeza hexagonal (8 mm de diámetro) sobre los que se aplicó un par de apriete de

4 N·m. La losa tenía un tamaño de 24,5 x 30 x 8 cm, una densidad de 2650 kg/m³ y una velocidad estimada de la onda P de 4.425 m/s (Vázquez et al., 2010); nótese que a efectos de transmisión de la onda sísmica de la losa al sensor, la impedancia acústica del granito es similar a la de los sensores. Los sensores se colocaron sobre la losa como sigue: libremente (sin sujeción), sujetos con un saco con arena, y anclados con un perno. Todos estos acoplamientos se ensayaron a 5 mm/s, y también a 20 mm/s cuando el sensor se sujetó con un saco o perno. Se descartó aplicar vibraciones de amplitud mayor que 20 mm/s debido a que producen amplitudes espurias de hasta cuatro veces la velocidad de vibración de la losa, que enmascaran el resultado de la prueba; este fenómeno descrito por Faber y Maxwell (1997) no sucede con vibraciones no periódicas como las de voladura. Con el fin de controlar la velocidad del elemento que está en contacto con los sensores (es decir, el plato del excitador en los ensayos C y la losa en los otros) se usó un vibrómetro láser Doppler (VLD). El VLD, cuya resolución es inferior a 0,003 mm/s a 200 Hz, se apuntó hacia el elemento en cuestión y el sistema se programó para no admitir errores en el movimiento oscilatorio en plato o losa superiores al 1% en amplitud y 0,01% en frecuencia. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo para los equipos utilizados en los ensayos diseñados para obtener la transmisibilidad de los sismógrafos (ensayos C).

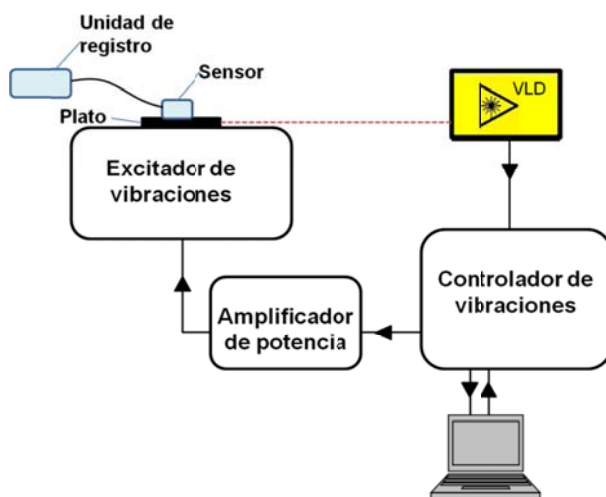


Figura 1. Equipos y diagrama para los ensayos destinados a obtener la transmisibilidad de los sismógrafos (ensayos C).

La Tabla 2 muestra las principales características de estos ensayos ordenados cronológicamente. Para cada tipo de ensayo, se analizó primero el sismógrafo X, y posteriormente el Z. La resolución del sismógrafo X se fijó en 0,127 mm/s cuando la amplitud de la señal de referencia era 20 mm/s, y en 0,0159 mm/s cuando las amplitudes eran menores.

Tabla 2. Resumen de pruebas para evaluar diferentes acoplamientos

Nombre del test	Condiciones de acoplamiento	Amplitud mov.losa, mm/s
LB	Sin sistema de sujeción (libre)	5
SB	Sacos con arena	5
SA	Sacos con arena (deteriorado)	20
AB	Taco, perno, arandelas y tuercas	5
AA	Taco, perno, arandelas y tuercas	20

La Figura 2 muestra la disposición de los sensores sujetos con un saco con arena. Inicialmente, la bolsa tenía 5 kg de sepiolita y un tamaño de 23 x 32 x 11 cm. Aunque en el campo se utilizan sacos más grandes, estos ensayos son útiles para entender el efecto que producen los sacos en la transmisibilidad de las vibraciones. Después de ensayar ambos sensores con el saco con arena a velocidades bajas (ensayos SB), el saco se deterioró. Esto implicó que para los ensayos a alta velocidad (SA), el saco tuviera un perfil diferente y que la superficie de contacto entre el saco y la roca fuera mayor; ver las fotografías (a-b) de la Figura 2 correspondientes a los ensayos SB y las fotografías (c-d) correspondientes a los ensayos SA.

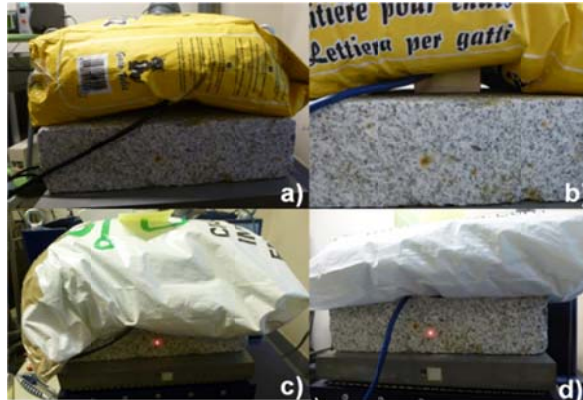


Figura 2. Disposición de los sensores sujetos con sacos a bajas-SB (a-b) y altas-SA (c-d) velocidades.

Para el anclaje del sensor a la roca se utilizó un taco de plástico (8 mm de diámetro y 40 mm de largo), una varilla roscada (6 mm de diámetro), dos arandelas y una tuerca; el par de apriete no pudo ser controlado en este caso. Se observó cierta tolerancia entre la carcasa del sensor X y el perno (ver el radio del orificio pasante en la Tabla 1).

Resultados

Se ha analizado la señal registrada por los geófonos longitudinales para todos los ensayos realizados. Es de esperar que los resultados en otras direcciones del plano horizontal sean similares ya que Segarra et al. (2012a) no pudo observar diferencias estadísticamente significativas en el error experimental o en las incertidumbres de las componentes longitudinales y transversales.

Para un primer análisis del acoplamiento del geófono a la roca se determinan los espectrogramas de las señales. Éstos se obtienen dividiendo las señales en segmentos y calculando la transformada de Fourier de tiempos cortos (STFT) de cada segmento. Los resultados se muestran en forma de contornos de amplitud espectral en función del tiempo y la frecuencia. La Figura 3 muestra dichos espectrogramas para los ensayos en los que el sismógrafo Z se colocó libremente a velocidades bajas (LB), se sujetó un saco a bajas y altas velocidades (SB y SA, respectivamente) y se ancló a altas velocidades (AA). Los armónicos fundamentales se marcan como F y los demás como H. Los resultados obtenidos con el sismógrafo X son similares. En todas las señales, la traza principal de energía se corresponde con una función potencial de frecuencia frente al tiempo, que va desde 16 a 200 Hz durante unos 182 s. Cuando no se ancla el sensor a la roca, se distorsiona la distribución de energía y el sensor vibra a otros (mayores) modos de vibración; obsérvense los armónicos en los ensayos con sacos con arena, gráficos (b) y (c), producidos probablemente por el movimiento

de la propia arena o el temblor del saco antes de alcanzar el equilibrio. Se observan, además, modos de vibración monocromáticos independientes de la excitación (contornos horizontales marcados como M en el gráfico a) en los ensayos con el sensor apoyado libremente sobre la losa.

La transmisibilidad de las vibraciones de la roca al geófono, T , se expresa en función de la frecuencia y se define como el cociente entre la respuesta del geófono y el movimiento del terreno en ausencia del mismo (Washburn y Wiley, 1941; Drijkoningen y *et al.*, 2006). Ambos términos se calculan a partir de las amplitudes espectrales obtenidas mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal medida y de la señal sinusoidal de frecuencia variable transmitida a la losa. Como la transmisibilidad resultante presenta una elevada varianza o ruido, es preciso suavizarla. Para ello se aplica una regresión local (robusta y ponderada) empleando polinomios lineales y un rango del 8% de la longitud total de la señal (Cleveland, 1979). La transmisibilidad se puede entender también como una estimación cuantitativa del error en la medida, y se expresa como ganancia $G = 20 \cdot \log(T)$.

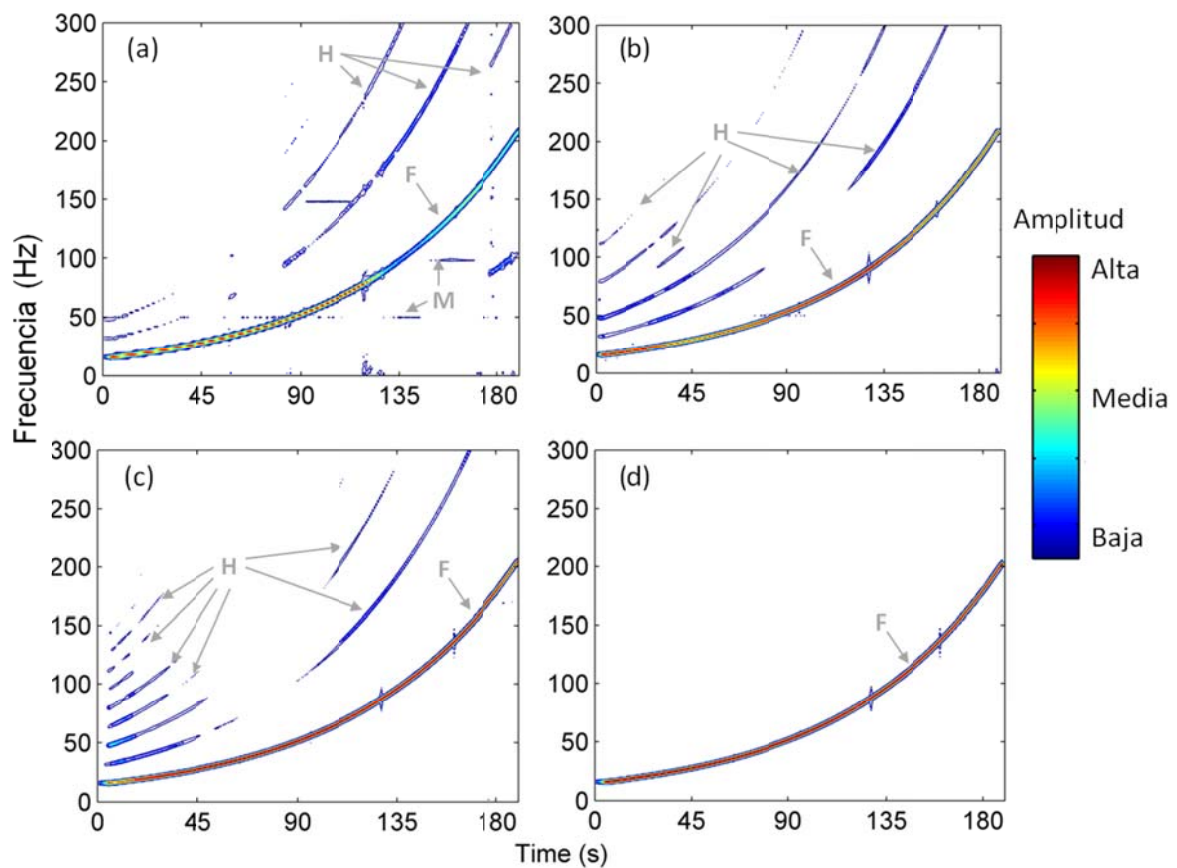


Figura 3. Espectrogramas para el sismógrafo Z: colocado libremente a baja velocidad, LB (a), sujeto con saco con arena a baja, SB (b) y alta velocidad, SA (c), y anclado a alta velocidad, AA (d)

La Figura 4 muestra la transmisibilidad de los sismógrafos (o el error de los mismos) obtenidos en los ensayos tipo C; los límites de tolerancia fijados por ISEE (2011) se muestran también a modo indicativo. La configuración del sismógrafo X con una resolución diferente, supone que la señal procedente del geófono se procese con un amplificador distinto. Esto implica, tal y como muestra la Figura 4, curvas de transmisibilidad distintas (su forma es constante, pero no la amplitud de las vibraciones transmitidas) a baja y alta resolución (véase

la Tabla 1). Los valores de transmisibilidad están dentro de los límites fijados por la ISEE, alrededor de 0,96 y 1,04 (-0,35 a 0,34 dB).

Para calcular la transmisibilidad del acoplamiento (o errores de medición), la transmisibilidad obtenida en cada ensayo se normaliza con la transmisibilidad del sismógrafo correspondiente. Las curvas de transmisibilidad resultantes para sensores anclados a la roca se muestran en la Figura 5, y para sensores colocados libremente y sujetos con sacos en la Figura 6; los límites de tolerancia fijados por ISEE (2011) se muestran en ambas Figuras. El acoplamiento de los sensores se puede describir como un fenómeno de resonancia caracterizado por una frecuencia de resonancia y un factor de amortiguación (Washburn y Wiley, 1941; Hoover y O'Brien, 1980; Khron, 1984). La transmisibilidad de cada uno de los acoplamientos se analiza a continuación.

Sensores anclados (Figura 5)

Cuando los sensores están anclados, el movimiento de la losa se amplifica sólo hasta 1,01 (0,09 dB) en el rango de frecuencias más usuales en voladuras (frecuencias inferiores a 100 Hz); la resonancia producida por el acoplamiento ocurre por encima de 200 Hz. La dispersión es baja; la diferencia máxima entre los cuatro ensayos realizados con los sensores anclados a la roca es tan solo de 0.02 (alrededor de ± 0.17 dB).

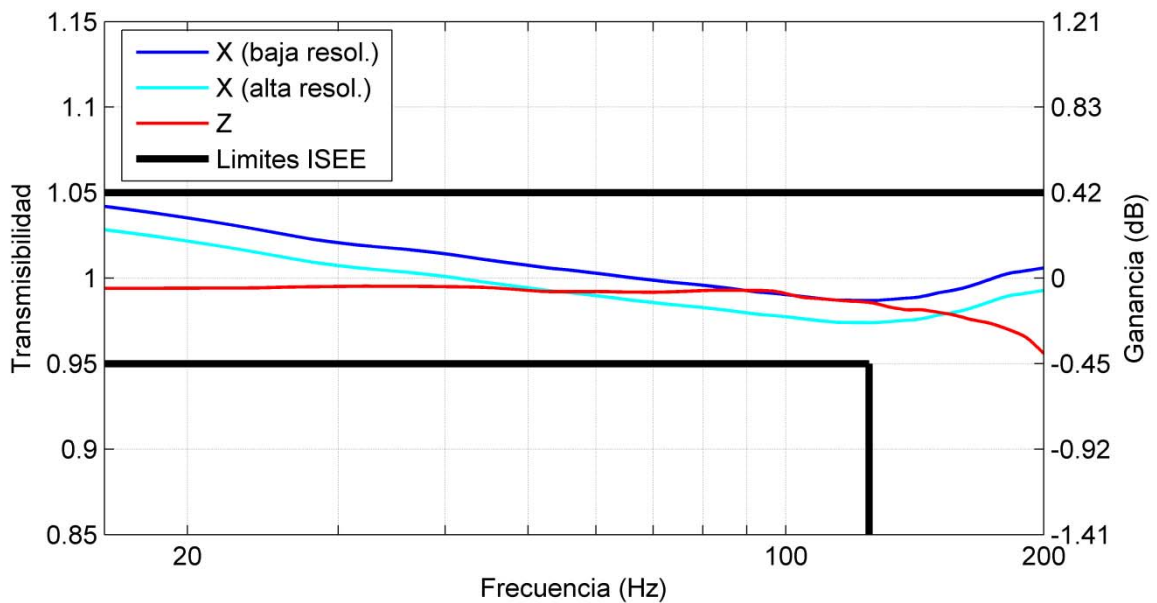


Figura 4. Transmisibilidad de los sismógrafos

Sensores sin sujeción- libres (Figura 6)

Los sensores colocados libremente (sin sujeción) sobre la losa siguen aceptablemente bien el movimiento de la misma (transmisibilidades bajas, entre 0,98 y 1,02) en un rango estrecho de frecuencias: 16-28 Hz para el sensor X y 16-40 Hz para el Z. La amplitud del pico de resonancia está en torno a 1,12 (0,98 dB) y se produce alrededor de 52 Hz para el sensor X, y 71 Hz para el Z. Por encima de la frecuencia de resonancia, el movimiento de la roca se amortigua fuertemente. Esta es la peor situación posible, cuando se evalúa el cumplimiento de los criterios de daños. Es destacable, que la velocidad en la componente vertical aumente en más de un orden de magnitud para frecuencias mayores que la de resonancia.

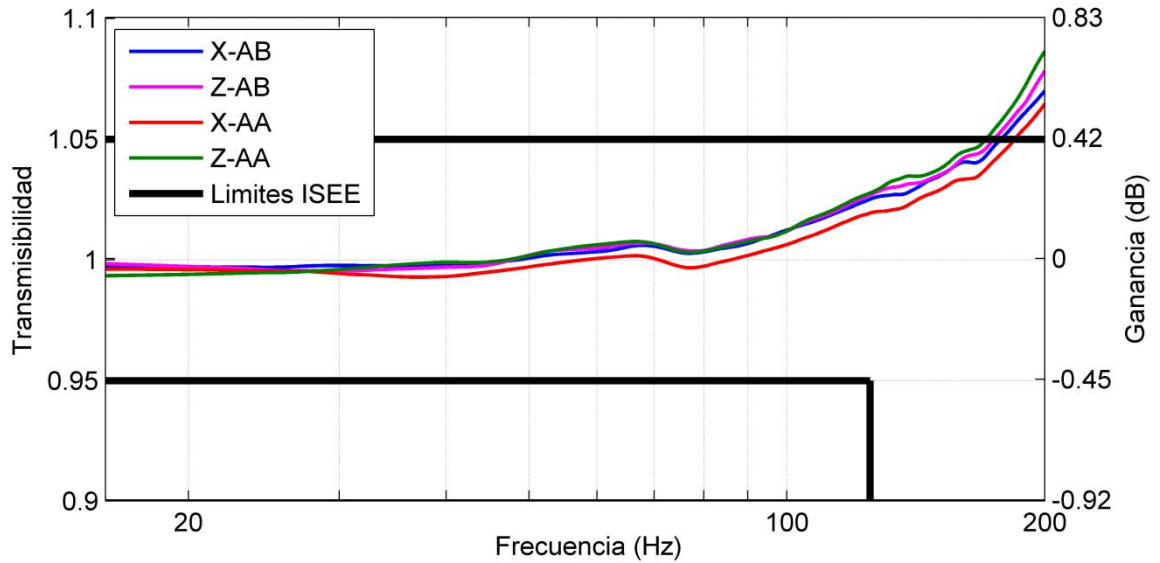


Figura 5. Transmisibilidad del acoplamiento con sensores anclados (ver detalles de los acrónimos de los ensayos en la Tabla 2).

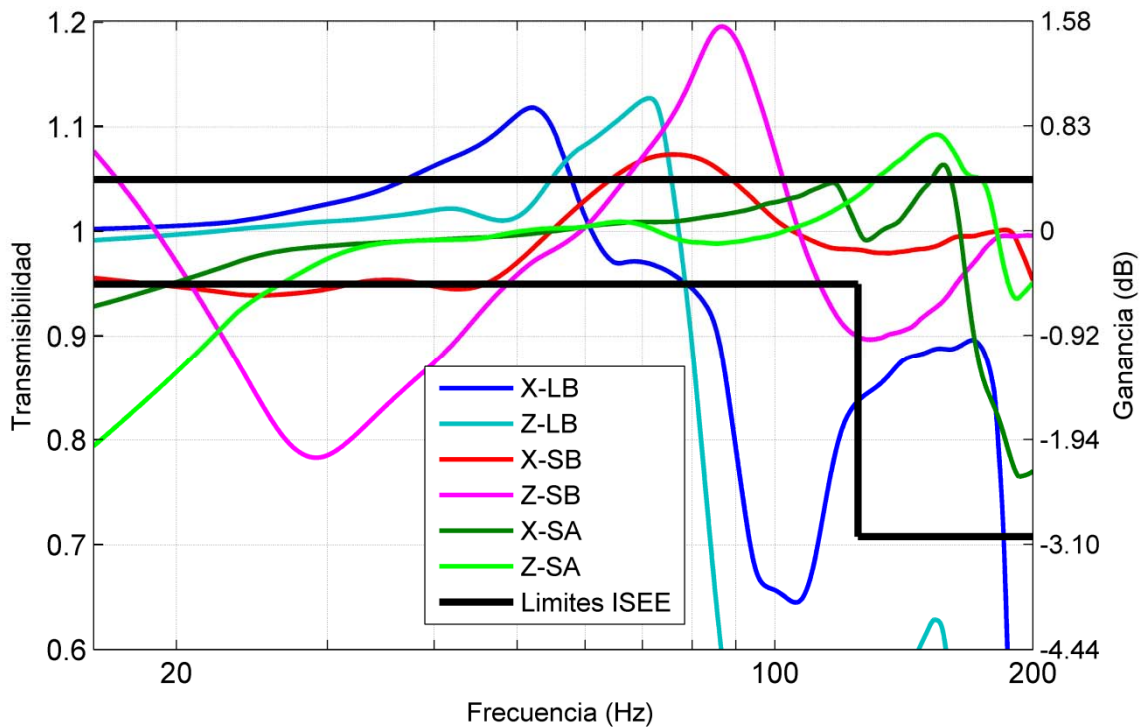


Figura 6. Transmisibilidad del acoplamiento con sensores libres y con sacos con arena (ver detalles de los acrónimos de los ensayos en la Tabla 2).

Otros trabajos (Hoover y O'Brien, 1980; Blair, 1995) utilizan el factor de colocación del sensor, P (cociente entre la masa del geófono y el producto de la densidad de la roca por el volumen de la carcasa que contiene a los sensores) para explicar diferencias en las curvas de transmisibilidad. Estos estudios muestran que al aumentar el factor de colocación, la resonancia se desplaza hacia frecuencias más bajas al tiempo que el pico se hace más abrupto o agudo. Los resultados de la Figura 6 para sensores colocados libremente contradicen esta norma (los factores de colocación son 0,9 para X y 1,1 para Z). Drijkoningen (2000) muestra

que cuando la transmisión de la onda está entorpecida por un contacto mediocre entre el sensor y la roca debido a que sólo una fracción de la superficie de la base está en contacto con la losa, tal y como sucede con este acoplamiento, la transmisibilidad está gobernada por el movimiento de la masa total del sensor, y de acuerdo con Washburn y Wiley (1941) el pico de resonancia se desplaza hacia altas frecuencias cuando disminuye el peso del sensor (como ocurre con el sensor Z).

Sensores sujetos con saco (Figura 6)

El empleo de sacos con arena para sujetar los sensores hace que la transmisión de las vibraciones sea más compleja. En general, las frecuencias bajas y medias se amortiguan, mientras que las altas frecuencias se amplifican dependiendo del nivel de velocidad. A velocidades bajas (pruebas SB), la amplitud se atenúa hasta 0,78 (-2,16 dB) desde 16 Hz hasta unos 50 Hz. La resonancia se produce alrededor de 76 Hz para X y de 87 Hz para Z, con transmisibilidades entre 1,07 y 1,2 (0,59 y 1,58 dB), respectivamente. En los ensayos a alta velocidad (SA), la amortiguación de las vibraciones es menos intensa y ocurre en un rango estrecho de frecuencias. Los sensores siguen el movimiento de la losa bastante bien entre 30 y 80 Hz; la resonancia se desplaza aproximadamente a 155 Hz con una transmisibilidad alrededor de 1.07.

El hecho de que los resultados a altas velocidades sean mejores que a bajas cuando el sensor se sujeta con un saco no parece ser debido a las distintas velocidades de vibración empleadas, ya que otros estudios (Blair, 1987; Krohn, 1984) muestran que un aumento en la velocidad de vibración afecta de una manera opuesta a la frecuencia de resonancia que la observada en este trabajo. Las variaciones en la colocación del saco mostradas en la Figura 2, producirían un contacto pequeño, de aproximadamente el 40% de la superficie del saco, en los ensayos a baja velocidad (SB) y alto, alrededor del 80% en los ensayos a alta velocidad (SA), que conducirían a unos factores de colocación de 0,66 y 0,33 respectivamente, que pueden explicar las diferencias en las curvas de transmisibilidad entre los ensayos a alta y baja velocidad.

Efecto de la aceleración en la transmisibilidad del acoplamiento

Con el fin de cuantificar los errores de medida en función de los niveles de aceleración esperados, se utiliza el valor absoluto de la ganancia del acoplamiento, $|G_C|$. Los datos de ambos sismógrafos se consideran conjuntamente para cada tipo de acoplamiento, ya que las recomendaciones internacionales (o guías de medida en campo) no tienen en cuenta diferencias en la masa o en el tamaño del sensor para decidir el método de acoplamiento a aplicar. Las aceleraciones se calculan para cada punto de medida a partir de la velocidad pico y la frecuencia, y se asocian con la ganancia a esa frecuencia. Estos datos se clasifican según los criterios de la ISRM (1992) y la ISEE (2009) en los siguientes niveles de aceleración: bajo ($a < 0,2 g$); medio ($0,2 g \leq a < 1 g$) y alto ($a \geq 1 g$). Las distribuciones de los valores de $|G_C|$ se representan en la Figura 7 para los tres niveles de aceleración considerados. Se muestran en forma de diagrama de caja para los métodos de acoplamiento ensayados. Los acoplamientos marcados con un asterisco en la Figura 7 indican que ese método es válido en ese rango de aceleraciones. El percentil 95 % se dibuja con un círculo relleno. Las líneas horizontales indican transmisibilidades de 1.01, 1.05, 1.1, 1.2 y 1.2. Los diagramas de cajas muestran para cada grupo de datos: el primer y el tercer cuartil (límite superior e inferior de las cajas), la mediana (línea central), los valores mínimos y máximo si están comprendidos en 1,5 veces el rango intercuartil (bigotes fuera de la caja), y valores extremos (puntos en rojo que se desplazan a lo largo del eje de abscisas para evitar su solapamiento).

El anclaje del sensor a la roca proporciona las medidas más exactas y precisas. Los errores están, en general, dentro del rango admitido para sismógrafos utilizados en voladuras (ISEE 2011), y aumentan con la aceleración; el 95% de $|G_d|$ es 0,58 dB ($T \approx 1,07$) a altas aceleraciones. Si se utilizan los otros acoplamientos conforme a los criterios internacionales, es decir dentro del rango de aceleración recomendado (sensores libres a aceleraciones bajas y sensores con sacos a aceleraciones bajas y medias), la mediana de los valores absolutos de las ganancias será más alta que cuando los sensores se anclan, aunque sigue siendo aceptable (hasta 0,46 dB, o $T \approx 1.05$). Las ganancias pueden ser, sin embargo, mucho mayores, y el percentil 95% del valor absoluto de la ganancia es de 0,89 dB para sensores libres ($T \approx 1,11$), y 1,96 dB ($T \approx 1,25$) para sensores sujetos con sacos a bajas aceleraciones y 1.14 dB ($T \approx 1,14$) para sensores con sacos a altas aceleraciones. El uso de sacos con arena proporciona la mayor dispersión. Si se usa un acoplamiento fuera del rango de aceleraciones sugerido, lo que es más que posible al ser difícil conocer a priori los niveles de aceleración, los errores están fuera de control para sensores libres y varían enormemente con el uso de sacos; el percentil 95% es de 12,6 y 2,1 dB (T alrededor de 4,3 y 1,27) para sensores libres y sensores sujetos con sacos, respectivamente.

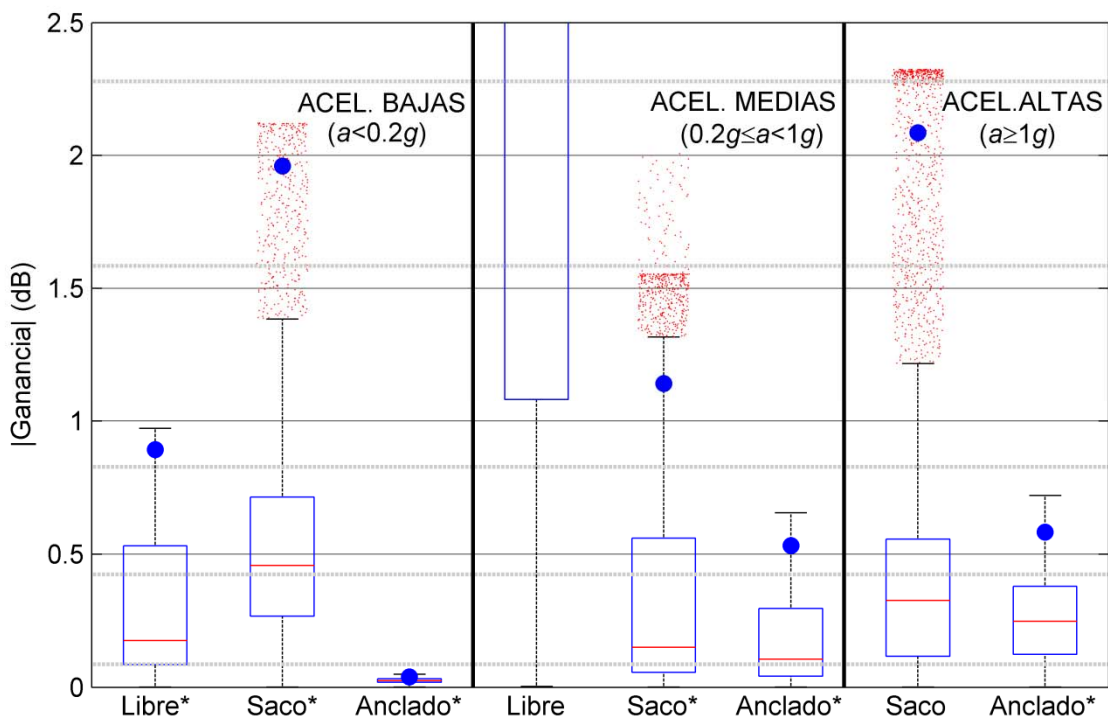


Figura 7. Distribuciones del valor absoluto de la ganancia debida al acoplamiento para diferentes niveles de aceleración

Estos resultados implican que los errores en las medidas de vibración con sensores anclados a la roca son limitados (por debajo del 7 %) a altas aceleraciones y mucho menores a aceleraciones bajas; los errores esperables con sensores colocados libremente a bajas aceleraciones son menores que el 11 %; los errores con sensores libres en el rango de aceleraciones medias, están fuera de control lo que evidencia que este método no es recomendable. Aunque la sujeción de sensores con sacos se emplea comúnmente a bajas y medias aceleraciones, los errores en este rango pueden llegar hasta el 25 %. Curiosamente los errores con sacos a altas aceleraciones no son muy diferentes que a otros niveles de

aceleración. Los errores obtenidos en este trabajo son conformes con las incertidumbres obtenidas en medidas realizadas en voladuras de producción con sensores calibrados anclados (0.5 - 6.4 %) y sujetos con sacos (0.5-13.4 %) (Segarra et al., 2012); en ambos casos los sensores estaban orientados correctamente hacia la voladura.

Conclusiones

Se han ensayado dos sismógrafos con distinto tamaño, forma y masa en un excitador de vibraciones. El excitador transmitió un movimiento conocido-periódico-horizontal de amplitud constante y frecuencia variable desde 16 a 200 Hz a razón de 0,02 octavas/s. La transmisibilidad de la vibración se expresa en función de la frecuencia y se calcula para el geófono longitudinal que se alineó con el eje del excitador. La transmisibilidad se calcula a partir de las amplitudes espectrales como el cociente entre la señal medida y el movimiento del material en contacto con el sensor (plato del excitador o roca dependiendo del ensayo). La transmisibilidad proporciona, también, un valor cuantitativo de los errores totales cometidos en las componentes horizontales (tanto longitudinal como transversal) de vibración. Se ha suavizado la transmisibilidad resultante para filtrar el ruido y retener la tendencia de los datos. La transmisibilidad de los sensores se obtiene a partir de un ensayo con el sensor anclado al plato del excitador (en el que se supone que el acoplamiento es perfecto) y una velocidad de 10 mm/s. Dicha transmisibilidad varía entre 0,96 y 1,04 veces la velocidad del plato (-0,35 a 0,34 dB). En 10 ensayos más los sensores se pusieron sobre una losa de granito gris que estaba firmemente unida al plato del excitador y se ensayaron tres métodos de acoplamiento: colocados libremente (sin sujeción), sujetos con un saco o anclados con un perno. Todos los acoplamientos se ensayaron a 5 mm/s, y también a 20 mm/s cuando se usaron sacos y se anclaron los sensores.

La transmisibilidad total se divide por la transmisibilidad del sismógrafo con el fin de obtener el error de medición o transmisibilidad del acoplamiento. Aunque la transmisibilidad depende del punto de medida, y se ha obtenido en este trabajo bajo ciertas condiciones que no se dan en la práctica, los resultados obtenidos permiten entender el efecto en la señal medida de los métodos de acoplamiento comúnmente utilizados en roca tal y como se describe a continuación:

- El acoplamiento de los geófonos con el terreno es un fenómeno de resonancia (con al menos un pico de resonancia) que para las condiciones ensayadas puede modificar la amplitud de las vibraciones por un factor que varía desde 1,2 hasta menos de 0,6.
- Cuando se anclan los sensores a la roca, se obtienen medidas exactas del movimiento vibratorio para las frecuencias esperables en voladura (menores de 100 Hz) y para el rango de velocidades analizadas. Este acoplamiento proporciona errores, que en general son menores que el error del aparato, así como la menor dispersión (0,02 ó $\pm 0,17$ dB).
- Cuando los sensores se colocan libremente o se sujetan sacos con arena las condiciones de contacto son impredecibles, pudiendo clasificarse desde malas hasta aceptables. La transmisibilidad cuando el contacto es malo se rige por el peso del sensor de forma que a medida que el peso aumenta la resonancia se desplaza hacia bajas frecuencias. Esto reduce la banda de frecuencias en que el sensor sigue con exactitud al movimiento del terreno. Si el aumento de peso se compensa con una mayor superficie de contacto entre sensor y roca se consiguen, entonces, unas condiciones de contacto aceptables.

- El uso de sacos con arena empeora el problema. Las vibraciones de la arena en el saco o los movimientos del saco (hasta que alcanza una posición fija) se superponen al campo sísmico en los primeros estadios tras la llegada de la onda amortiguando la amplitud de las vibraciones. Además, si no se logra un buen contacto entre el sensor y la roca, el aumento del peso sobre el sensor conduce a mayores amplificaciones.
- Los errores de medida se describen como el valor absoluto de la ganancia. Para sensores anclados a la roca son de hasta un 7 % en el peor de los casos (altas aceleraciones), y en la mayoría de las veces de unos pocos tantos por ciento; los errores pueden ser de hasta un 25 % cuando los sensores se sujetan con sacos a altas aceleraciones ($>1 g$), y hasta aproximadamente un 11 % para sensores libres sin sujeción a bajas aceleraciones ($<0.2 g$); para aceleraciones mayores la colocación del sensor libremente (no recomendado por la mayoría de las guías de medida de vibración por voladura) implica errores importantes, que hacen inútiles las medidas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por MAXAM Civil Explosives y VIBRAQUIPO.

Referencias

- AENOR, 1993, “Control de vibraciones producidas por voladuras”, Norma UNE 22-381-93, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- Blair, D. P., “The measurement, modelling and control of ground vibrations due to blasting”, Proc. of the 2nd Int. Symposium of Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, 1987, p. 88-101.
- Blair, D. P., 1995, “Soil-embedded detector mounts for seismic monitoring”, *Geophysics*, 60(1): 120-133.
- BSI, 1993, “Evaluation and measurement for vibration in buildings: Guide to damage levels from groundborne vibration”, BS 7385: part 2, British Standard Institution, London.
- Cleveland, W.S., 1979, “Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots”, *Journal of the American statistical association*, 74(368): 829-836.
- del Castillo, I., 2009, “Importancia de la calibración e interpretación del certificado de calibración”, *Ingeopres*, 182: 84-86.
- DIN, 1999, “Structural Vibration– Part 3: Effects of vibration on structures”, DIN 4150-3:1999-02, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Drijkoningen, G. G., 2000, “The usefulness of geophone ground-coupling experiments to seismic data”, *Geophysics*, 65(6), 1780-1787.
- Drijkoningen, G. G., Rademakers, F., Slob, E. C. y Fokkema, J. T., 2006, “A new elastic model for ground coupling of geophones with spikes”, *Geophysics*, 71(2): Q9-Q17.
- Faber, K. y Maxwell, P. W., 1997, “Geophone spurious frequency: What is it and how does it affect seismic data quality”, *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 33(1&2): 46-54.
- Farnfield, R.A., “So you think you are monitoring peak particle velocity?”, Proc.12th Symposium on Explosives and Blasting Research, 1996, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, p. 13-17

- Hoover, G. M. y O'Brien, J. T., 1980, "The influence of the planted geophone on seismic land data", *Geophysics*, 45(8): 1239-1253.
- ISEE, 2009, "ISEE field practice guidelines for blasting seismographs 2009 edition", Eltschlager K.K. (standards chairman committee), International Society of Explosives Engineers, Cleveland.
- ISEE, 2011, "Performance specifications for blasting seismographs", Eltschlager K.K. (standards chairman committee). International Society of Explosives Engineers, Cleveland.
- ISRM, 1992, "Suggested method for blast vibration monitoring", Dowding, C.H. (working group co-ordinator), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geo. Abstr.*, 29(2): 143-156.
- Krohn, C.E., 1984, "Geophone ground coupling", *Geophysics*, 49(6): 722-731.
- Segarra, P., López, L. M. y Sanchidrián, J. A., 2012, "Uncertainty in measurements of vibrations from blasting", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6): 1119-1126.
- Singh, P.K. y Roy, M.P., 2010, "Damage to surface structures due to blasting", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 47(6): 949-961.
- Siskind, D.E., Stagg, J., Kopp, J.W. y Dowding C.H., 1980, "Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Mine Blasting", USBM Report of Investigation 8507, United States Bureau of Mines, Twin Cities.
- Vázquez, P., Alonso, F.J., Esbert, R. M., y Ordaz, J., 2010, "Ornamental granites: relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network", *Construction and Building Materials*, 24(12): 2536-2541.
- Washburn, H. y Wiley, H., 1941, "The effect of the placement of a seismometer on its response characteristics", *Geophysics*, 6(2): 116-131.