



MEDIDA DEL ESPESOR DE HORMIGÓN DEL SOSTENIMIENTO DE UN TÚNEL CON IMPACTO-ECO

MERCEDES GARRIDO RODRÍGUEZ¹, RAFAEL MEDINA FERRO²

Universidad Politécnica de Madrid, ETSIM

¹Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas

²Departamento de Física Aplicada a los Recursos Naturales
Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España

(Recibido 13 de octubre de 2003, para publicación 24 de marzo de 2004)

Resumen – El método de impacto-eco puede emplearse en medios heterogéneos y es útil para detectar interfaces de materiales, lo que permite aplicarlo bajo ciertas condiciones a medir posibles variaciones en el espesor de hormigón del sostenimiento de túneles en suelo o roca. Se modeliza por elementos finitos un túnel con sostenimiento de hormigón de espesor constante rodeado de roca y se estudia la respuesta en diferentes puntos de la superficie. Las múltiples ondas que se generan al producirse la reflexión en la interfase dificultan la interpretación de las señales resultantes. Es necesario filtrar la onda Rayleigh y tratar las señales en frecuencia para poder determinar el espesor de hormigón a partir del espectro. Se aplica lo anterior para modelizar un sostenimiento de hormigón con dos espesores diferentes y se analiza cómo pueden detectarse ambos. La presencia de una discontinuidad produce un frente de difracción que se añade a las ondas reflejadas. La modificación de la posición del impacto y del transductor que recoge la señal produce espectros de respuesta diferentes cuya interpretación permite obtener aproximadamente la forma de la capa de hormigón.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se realiza una excavación subterránea, el campo de esfuerzos es alterado localmente y se produce una redistribución de las tensiones originales que existen en el medio. Las tensiones que actuaban en la roca extraída para realizar el túnel se redistribuyen y deben ser soportadas por la roca que se encuentra en las proximidades de la excavación. En la mayoría de los casos, la excavación tiende a cerrarse con el paso del tiempo y sin la colocación de un sostenimiento adecuado llegaría a colapsar. Este sostenimiento suele hacerse de hormigón, empleando diferentes espesores. La irregularidad de la roca circundante o un posible fallo en la proyección del hormigón puede ocasionar que el espesor de éste sea diferente al deseado, lo que sería necesario detectar.

El impacto-eco es un método no destructivo de testificación de hormigón y estructuras de mampostería basado en el uso de impactos que generan ondas de tensión de baja frecuencia. Las ondas se propagan en el medio y se reflejan en los fallos de los materiales y en las interfases o en los malos contactos entre capas de diferentes materiales [1]. Las señales se recogen en un transductor en la propia superficie de impacto y se estudian en el dominio de la frecuencia. El uso de este método es adecuado para ciertos medios heterogéneos (hormigón, asfalto, rocas y suelos) donde habitualmente se usan métodos destructivos, al no dar buenos resultados otros métodos no destructivos como ultrasonidos, pues las altas frecuencias que emplean (100 kHz y más) son fuertemente atenuadas por estos medios heterogéneos.

Sin embargo la experiencia ha mostrado que el conocimiento de la estructura es muy importante para obtener resultados satisfactorios. La modelización numérica previa al ensayo [2] y el tratamiento de las señales [3] es indispensable para la interpretación de los resultados experimentales y para comprender la influencia de los diferentes factores que pueden afectar al ensayo experimental posterior.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA MODELIZACIÓN

La variación con el tiempo de la fuerza del impacto, generado por el choque de una pequeña esfera sobre la superficie, puede representarse por una media senoide. La duración del impacto, o tiempo de contacto, t_c , suele variar dentro del rango de 15 y 100 μs . La distribución de las amplitudes y frecuencias producidas por dicho impacto se puede obtener mediante el uso de la transformada de Fourier de la señal. La mayor parte de la energía del pulso se puede suponer contenida en frecuencias hasta $1,5/t_c$, por lo que no se podrán detectar frecuencias por encima de este valor [4]. El impacto se simula introduciendo una presión de la forma indicada en varios de los elementos de la superficie del material.

La máxima frecuencia de interés para el estudio f_{\max} depende de las características de las reflexiones en los fallos o superficies del material. Así si una onda se propaga con una velocidad c_p por el material y la reflexión se produce en una zona situada a una distancia d de la superficie, la frecuencia de la llegada a la superficie es, teóricamente:

$$f_t = \frac{c_p}{2d} \quad (1)$$

En la práctica, sin embargo, la frecuencia viene dada por $f_p = \beta f_t$, siendo β un coeficiente próximo a uno, que depende de la geometría [1]. El tiempo de muestreo de las señales Δt_c se determina a partir de la frecuencia de Nyquist, doble de la máxima frecuencia de interés f_{\max} :

$$\Delta t_c = \frac{1}{2f_{\max}} \quad (2)$$

Las frecuencias de interés práctico no superan los 80 kHz, lo que conduce a tiempos de muestreo máximos de 6.25 μs . La resolución en frecuencia de la señal será:

$$\Delta f = \frac{1}{n\Delta t} \quad (3)$$

siendo n el número de muestras tomadas.

Para la modelización se ha empleado el programa ANSYS® de elementos finitos. El mallado debe ser suficientemente fino para estudiar los efectos de la propagación. La menor longitud de onda puede obtenerse a partir de la máxima frecuencia de interés f_{\max} y de la velocidad de propagación de la onda P c_p , como $\lambda_{\min} = c_p/f_{\max}$.

Un túnel cuya longitud sea suficientemente grande con respecto al espesor, puede modelizarse en dos dimensiones como si se tratase de una placa rectangular, la cual correspondería a una sección longitudinal cualquiera del túnel, dado que en tales condiciones las frecuencias propias correspondientes a las secciones transversales se excitan mucho menos que las correspondientes al espesor de la placa [2]. Considérese una placa donde la capa superior tiene un espesor d_1 , densidad ρ_1 y velocidad de la onda P c_{p1} y la capa inferior tiene, respectivamente, d_2 , ρ_2 y c_{p2} . La onda que se forma es más compleja que en una placa de un único material y pueden aparecer múltiples frecuencias de ondas P reflejadas, dependiendo de los valores del coeficiente de reflexión C_γ y del coeficiente de transmisión C_t de la interfase [5]:

$$C_\gamma = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (4)$$

$$C_t = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (5)$$

siendo z_1 y z_2 las impedancias acústicas respectivas de los materiales.

Un estudio detallado sobre las frecuencias que pueden o no aparecer se puede encontrar en [6]. Es necesario considerar dos casos: $z_1 > z_2$ y $z_1 < z_2$. Si $z_1 > z_2$ (como ocurre con cualquier interfase con el aire o del hormigón con un suelo de baja impedancia acústica), la frecuencia de reflexión de la onda P es:

$$f_i = \frac{c_{p1}}{2d_1} \quad (6)$$

Cuando $z_1 < z_2$ (como el caso de asfalto o acero sobre hormigón, o de hormigón sobre una roca de mayor impedancia acústica), la frecuencia de las ondas que refleja la interfase es, entonces:

$$f_i = \frac{c_{p1}}{4d_1} \quad (7)$$

En este caso, la frecuencia teórica (ya que un coeficiente β puede aparecer en la práctica multiplicando a c_{pi}) de las ondas P reflejadas entre la base y la superficie es:

$$f_i = \frac{1}{\frac{2d_1}{c_{p1}} + \frac{2d_2}{c_{p2}}} \quad (8)$$

Hay que observar, sin embargo, que el desplazamiento producido por las ondas P reflejadas en la interfase no son significativas cuando el coeficiente C_γ es bastante pequeño (menor que 0,24 aproximadamente).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Detección del espesor de hormigón en un túnel

Se modelizan dos placas, una de 20 m de longitud constituida por 20 cm de espesor de hormigón y una capa de roca a continuación, hasta culminar un espesor de 8 m, y otra de la misma longitud, pero doble espesor de hormigón y roca.

El hormigón considerado para estas simulaciones tiene las siguientes propiedades: $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; $E = 30 \text{ GPa}$; $\nu = 0,25$; $G = 12 \text{ GPa}$; $c_p = 3795 \text{ m/s}$; $z = 9,2 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$. El macizo rocoso de estudio tiene de propiedades: $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$; $E = 5,139 \text{ GPa}$; $\nu = 0,25$; $G = 2,077 \text{ GPa}$; $c_p = 1755 \text{ m/s}$; $z = 3,5 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Esto conduce a un coeficiente de reflexión $C = -0,46$.

El alto valor del coeficiente de reflexión (bastante superior a 0,24) y el signo negativo, indican que se va a producir una buena reflexión en la superficie de contacto y con inversión de fase. Se pueden así determinar los espesores de hormigón, pero no posibles defectos en la unión entre el hormigón y la roca. La frecuencia de reflexión, dada por la ecuación (6), es de 9487,5 Hz en la interfase existente a los 20 cm de espesor y de 4743,75 Hz para el espesor de 40 cm.

Se simula un impacto con ANSYS® en una región de 4 cm, en forma de semisenoide de 20 μs de duración y 6000 Pa de amplitud máxima. Con esta duración de impacto se podrían excitar frecuencias de hasta 75 kHz. El tiempo de muestreo empleado es de 2 μs y la simulación se extiende hasta 5 ms, para un total de 2500 pasos. El impacto debe realizarse en puntos suficientemente alejados de la boca y del frente del túnel, para evitar que la reflexión de la onda Rayleigh en los contornos interfiera con las ondas P reflejadas en la interfase y altere los resultados. En [7] se estudian detalladamente los factores que pueden influir en una correcta simulación.

En la Fig. 1 se muestran las ondas recogidas en puntos de la superficie situados entre 10 y 40 cm del centro del impacto en dirección vertical, que serían las vibraciones que se registrarían en la práctica mediante un acelerómetro. La onda Rayleigh puede apreciarse nítidamente en la figura porque corresponde al mayor desplazamiento positivo, seguido del mayor desplazamiento negativo. La onda más pequeña, con desplazamientos negativos, que justamente le precede en las gráficas corresponde a la propagación de la onda S directa (sin reflexiones en la interfase), pues al vibrar las partículas transversalmente a la direc-

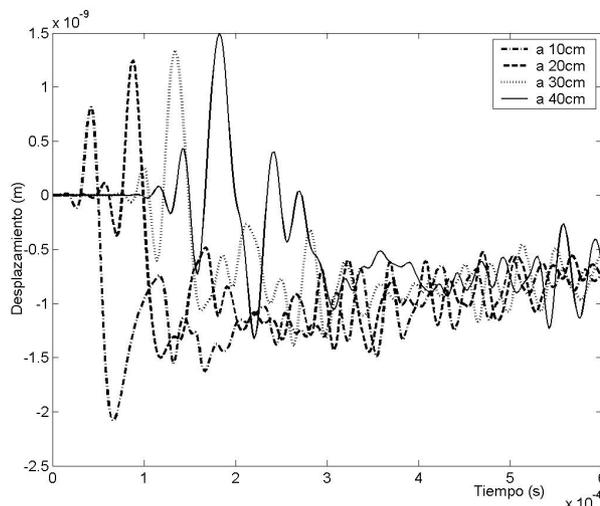


Fig. 1. Onda temporal para un espesor de hormigón de 20 cm.

ción de propagación de la onda, produciría también un desplazamiento en la dirección vertical en puntos de la superficie. No se aprecia apenas, sin embargo, la onda P directa (es una pequeña elevación que aparece en primer lugar en el tiempo), dado que al vibrar en la dirección de propagación (es una onda de compresión-dilatación) casi no produciría desplazamientos verticales en la superficie. Puede apreciarse también la llegada de la primera reflexión de la onda P (hacia 0.1 ms), cuando los desplazamientos producidos por la onda Rayleigh tienden a recuperarse, provocando un nuevo desplazamiento negativo y dando lugar a una onda muy irregular, como resultado de la interferencia de ambas ondas. Esta primera reflexión puede apreciarse mejor en la Fig. 2, correspondiente al espesor de 40 cm, dado que el tiempo de tránsito es mayor (hacia 0.2 ms). Puede observarse que prácticamente ha pasado la totalidad de la onda Rayleigh antes de que llegue la onda P reflejada. La detección de este pico en la onda temporal a $T = 0,2$ ms permite determinar el espesor d de la capa de hormigón, teniendo en cuenta que $2d = c_p/T$. La dificultad en la práctica para detectar este pico es lo que lleva a la utilización del dominio de la frecuencia en el método de impacto-eco. Midiendo la distancia entre los picos correspondientes de dos ondas recogidas en diferentes puntos, se puede determinar las velocidades de las ondas S y Rayleigh, obteniéndose una velocidad de la onda S de 2272 m/s (el valor teórico es 2191 m/s), el 60% de la onda P. Para la onda Rayleigh se obtiene una velocidad de 2143 m/s, en torno al 94% de la velocidad de la onda S y del 56% de la onda P, dentro del rango teóricamente esperado. En la práctica este método se puede utilizar para determinar la velocidad de la onda P cuando es desconocida: se determina la velocidad de la onda Rayleigh midiéndola en dos puntos de la superficie y se estima la velocidad de la onda P teniendo en cuenta que es aproximadamente 1,76 veces la velocidad de la onda Rayleigh [8].

Las pequeñas ondas que aparecen a continuación corresponden a las múltiples reflexiones en la interfase. Como puede apreciarse las señales son bastante complejas al solaparse estas ondas con los fuertes desplazamientos producidos por las ondas S y Rayleigh. Además al reflejarse la onda P en la interfase no solamente se genera una onda P reflejada, sino nuevas ondas S, que se propagan a menor velocidad. También al incidir la onda S en la interfase, se generan a su vez nuevos frentes de ondas P y S que producirán interferencias en las señales recogidas [6].

Para reflejar lo anterior, en la Fig. 3 se muestran los vectores de desplazamientos para el espesor de 40 cm de hormigón, después de $200 \mu s$. Puede verse que la onda P ya se ha reflejado en la interfase hormigón-roca y que parte de la misma se ha transmitido hacia la zona de roca. En la zona más profunda (roca) se observa la forma de semicircunferencias cóncavas hacia arriba, que marcan la propagación de la onda P directa. En la zona próxima a la superficie pueden observarse semicircunferencias cóncavas hacia abajo que definen el frente de la onda P reflejada (onda 2P). También puede apreciarse un segundo frente ascendente, que corresponde a la propagación de la onda S generada al impactar la onda P en la interfase

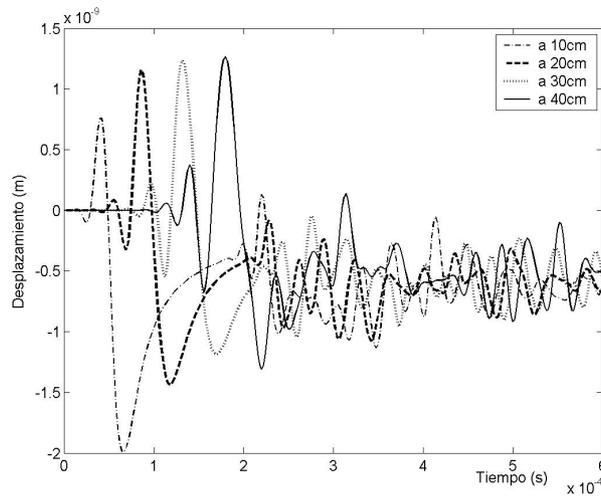


Fig. 2. Onda temporal para un espesor de hormigón de 40 cm.

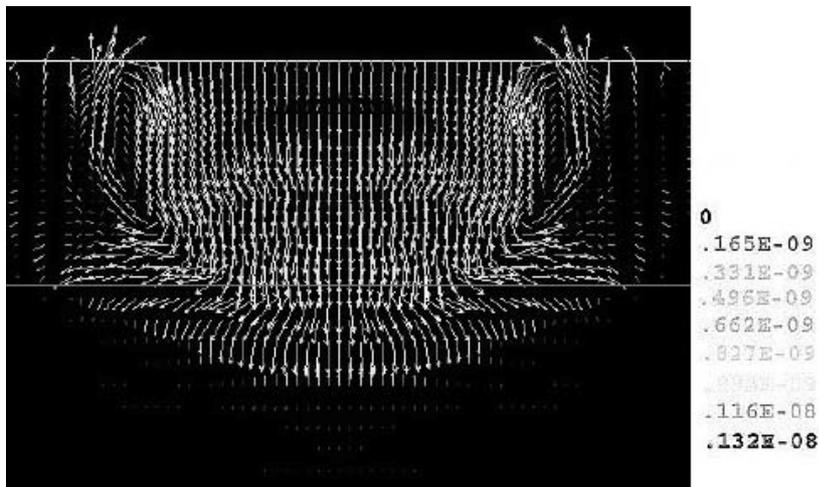


Fig. 3. Propagación de la onda a 200 μ s. Espesor de 40 cm de hormigón.

(onda PS). Los mayores desplazamientos en la superficie definen la forma característica de la onda Rayleigh. También puede verse el frente de propagación de la onda S directa, definida por una semicircunferencia cóncava hacia arriba, a continuación de la onda P directa y de menor radio que ésta.

La dificultad de interpretación de resultados puede apreciarse en la Fig. 4, tomada a 300 μ s, esto es, después de que la onda P haya llegado por primera vez a la superficie. Además de la onda P directa propagándose ya por la roca, aparece un nuevo frente de onda P descendente que se genera como resultado de la reflexión en la superficie libre (onda 3P). Y además del frente de la onda S directa que ya ha superado la interfase hormigón-roca, existen otros frentes ascendentes que corresponden a las ondas S generadas al impactar la onda P en la interfase (onda PS, llegando a la superficie libre), y las ondas P y S generadas al llegar la onda S a la interfase (ondas SP y 2S, próximos a la interfase).

En la Fig. 5 se presentan los desplazamientos producidos únicamente en dirección vertical, por la propagación de la onda tras múltiples reflexiones. Pueden apreciarse con claridad la zona afectada por dichas reflexiones y los frentes principales de propagación. El más avanzado corresponde a la onda P directa, la

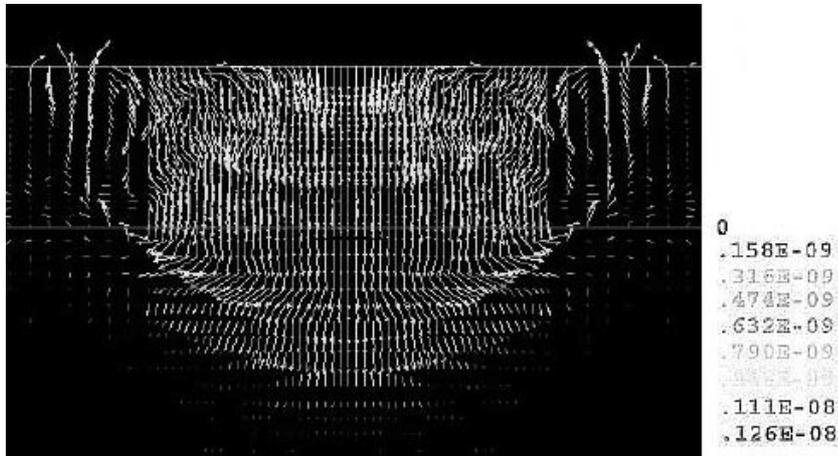


Fig. 4. Propagación de la onda a 300 μ s. Espesor de 40 cm de hormigón.

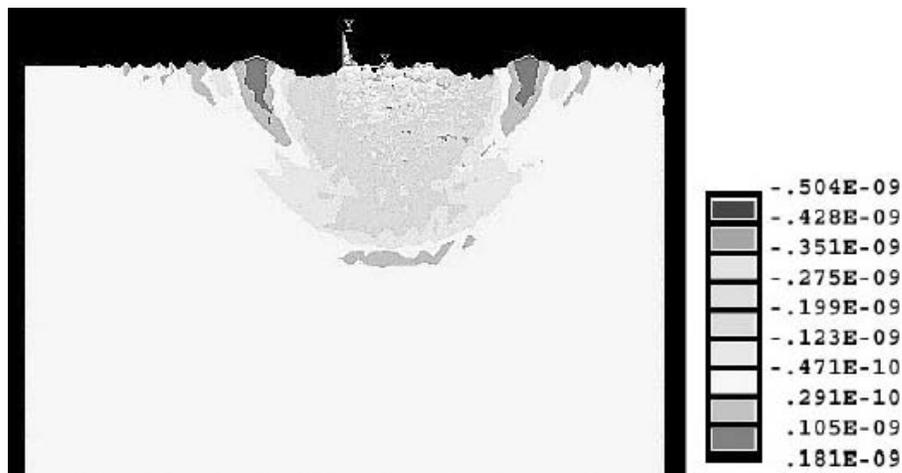


Fig. 5. Propagación de la onda a 3 ms. Espesor de 40 cm de hormigón.

que con mayor rapidez se propaga. Destacar en tono más oscuro y en la superficie la propagación de la onda Rayleigh, con los fuertes desplazamientos verticales que produce.

En la Fig. 6 se muestran alguno de los espectros obtenidos en la superficie para el espesor de 20 cm. Se ha representado un punto próximo y otro más alejado del impacto (a 20 y 80 cm del mismo). Para evitar la interferencia de la onda Rayleigh se han filtrado los primeros valores de la onda temporal y se han tomado 1000 puntos para calcular la transformada discreta de Fourier. El tiempo de muestreo es de 2 μ s, lo que da una frecuencia máxima de 250000 Hz y una resolución de $\Delta f = 500$ Hz. Esta resolución en frecuencia conduce a una incertidumbre en el espesor de $\Delta d = c_p/2\Delta f = \pm 3,795$ cm. Dado que en altas frecuencias no aparece ninguna amplitud significativa, se ha representado solamente el rango de interés, eliminando la componente de continua que representa el movimiento del cuerpo libre y que no resulta de interés para el estudio. Aunque aparecen múltiples picos, resultado de las interferencias que se producen entre ondas, puede apreciarse uno muy significativo en torno a 10000 Hz. A partir de la ecuación (6), el espesor d_1 de la capa de hormigón se obtiene de:

$$d_1 = \frac{c_p l}{2f_i} \quad (9)$$

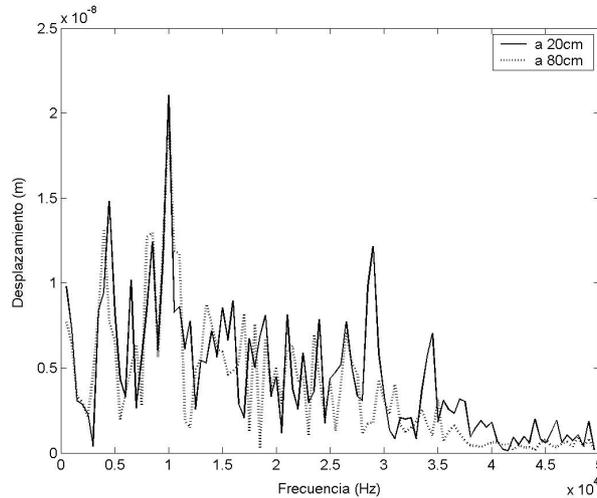


Fig. 6. Espectros a 20 y 80 cm del centro del impacto.

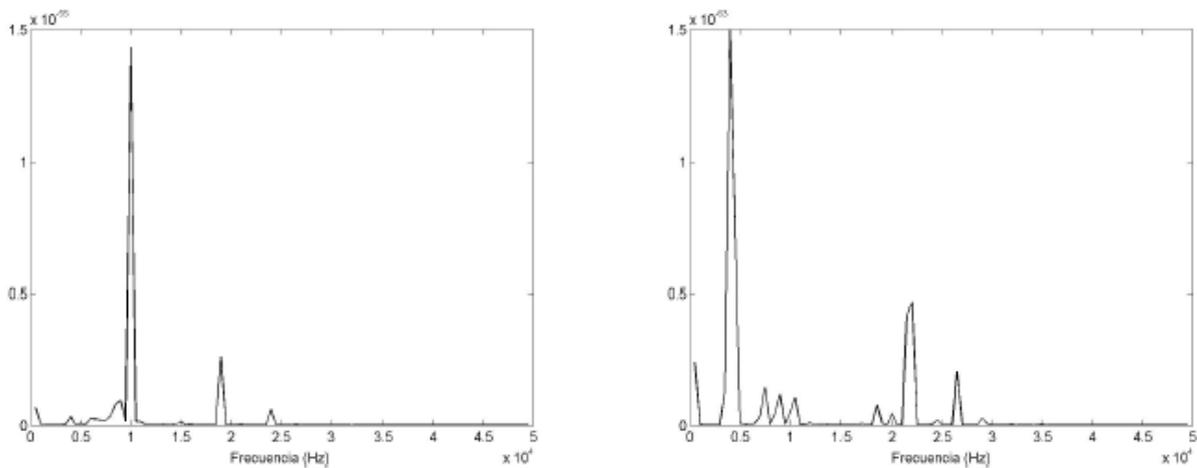


Fig. 7. Comparación de espectros para un espesor de hormigón de a) 20 cm, b) 40 cm.

que conduce a un valor de 18,975 cm. Teniendo en cuenta la resolución en espesor de $\pm 3,795$ cm con la que se trabaja, la frecuencia es representativa de la interfase de 20 cm. Para resolver las dificultades de discernir los valores significativos del espectro, se toman señales de puntos situados entre 10 y 80 cm del centro del impacto, y tras relacionarlas entre sí se obtiene la Fig. 7a). Puede apreciarse cómo la mayoría de los picos han desaparecido, y queda como representativo un pico a unos 10000 Hz que corresponde a la reflexión de la onda P en la interfase. Procediendo de igual forma para el espesor de 40 cm, se obtiene la Fig. 7b), donde puede apreciarse que ahora el pico más significativo se encuentra en 4500 Hz, correspondiente a la reflexión en la interfase de 40 cm.

3.2. Detección de variaciones en el espesor de hormigón

Considérese el caso en que el espesor de hormigón no fuera uniforme, existiendo por alguna causa una zona con menor espesor del previsto. Se simula para ello la misma placa de 40 cm de espesor de hormigón del apartado anterior, pero en esta ocasión se supone que hay una región de 1 m de longitud (entre 1 y 2 m del origen de coordenadas) cuyo espesor es de 32 cm en lugar de los 40 cm previstos.

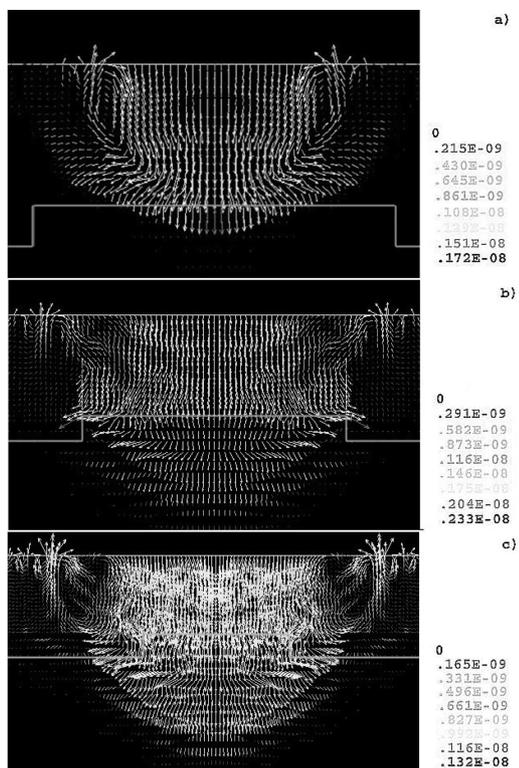


Fig. 8. Propagación de la onda para un espesor de hormigón variable: a) 150 μs, b) 300 μs, c) 400 μs.

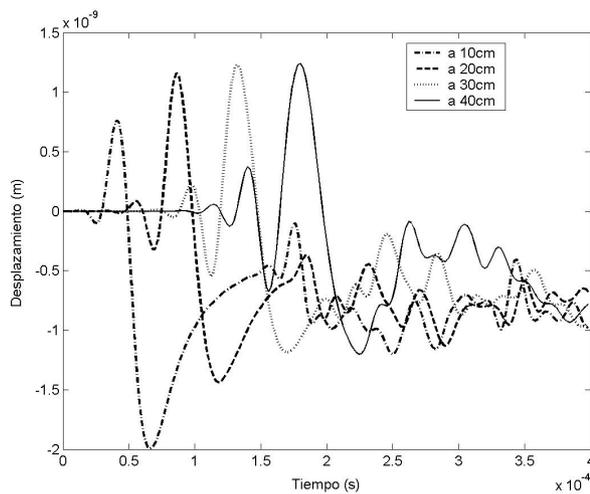


Fig. 9. Onda temporal para un espesor de hormigón variable.

En una primera simulación el impacto ocupa una posición equidistante respecto de los extremos de la discontinuidad, por lo que se espera que la respuesta sea la misma en puntos situados a igual distancia hacia la derecha o la izquierda del impacto.

En la Fig. 8 se muestra el comportamiento de la onda tras reflejarse en la interfase. En la Fig. 8 a), al cabo de 150 μs, puede observarse que la onda P ha incidido en la interfase de 32 cm, pero no ha llegado al extremo de la discontinuidad, con lo que los frentes de onda presentan una forma análoga al caso de interfase uniforme. En la Fig. 8 b), al cabo de 300 μs, pueden apreciarse mayores desplazamientos en el punto

donde cambia el espesor, debido al impacto de la onda en dicho punto. Se genera un frente cilíndrico de difracción con centro en el extremo de la discontinuidad [5], que se propaga a lo largo del material, como puede apreciarse en la Fig. 8 c), al cabo de $400 \mu\text{s}$. Este frente añadido a los anteriormente comentados, provocará la aparición de nuevas frecuencias en el espectro, haciendo más difícil la interpretación del mismo.

En la Fig. 9 se comparan las respuestas en dirección vertical en puntos de la superficie situados entre 10 y 30 cm del centro del impacto. La frecuencia esperada es de $4743,75 \text{ Hz}$ (tiempo de tránsito de $0,21 \text{ ms}$) en la zona de 40 cm, mientras que la reflexión en la interfase de 32 cm produciría una frecuencia de 5930 Hz (tiempo de tránsito de $0,168 \text{ ms}$). Según lo esperado, las ondas son idénticas independientemente de que se tomen los puntos a uno u otro lado del impacto. La forma de las ondas es aparentemente similar al caso de la placa uniforme de 40 cm, pero en los puntos más cercanos al impacto puede detectarse un pico elevado procedente de la reflexión de la onda P hacia $0,17 \text{ ms}$, como correspondería a la reflexión en el espesor de 32 cm.

Realizando un estudio en frecuencia análogamente a como se hizo con la placa uniforme, filtrando la onda Rayleigh y la componente de continua, se han calculado y tratado los espectros de puntos situados entre 10 y 40 cm del punto de impacto, cálculo que se recoge en la Fig. 10. La resolución en frecuencia es, al igual que en el caso anterior, de 500 Hz , y por tanto, la incertidumbre en el espesor es igualmente de $\pm 3,795 \text{ cm}$. Se puede apreciar en la Fig. 10 a) cómo en los espectros situados a 10 y 20 cm del impacto, lejos de la discontinuidad, aparece claramente la frecuencia de 5500 Hz , que al aplicar la ecuación (9) indica un espesor de $34,5 \text{ cm}$, que teniendo en cuenta la resolución de trabajo corresponde al espesor de 32 cm. Puede verse la presencia del pico a frecuencia de 4500 Hz en el espectro recogido a 20 cm ($42,16 \text{ cm}$ aplicando (9), representativo del espesor de 40 cm) que indicaría la presencia de dos espesores diferentes, lo que no se aprecia con nitidez en el tomado a 10 cm. Si como se hizo en el apartado anterior se relacionan las señales tomadas entre 10 y 40 cm, se obtiene la Fig. 10 b) en donde se aprecian con nitidez ambos picos (aparte de otros de alta frecuencia, resultado de interferencias), y con una amplitud considerable en el pico correspondiente a 4500 Hz , al incluirse en el cálculo puntos más cercanos al espesor de 40 cm.

Se realiza una nueva simulación, pero colocando el punto de impacto de forma que la distancia a los extremos de la discontinuidad sea distinta. La región de impacto sigue siendo de 4 cm, pero ahora se sitúa a 70 cm del borde izquierdo de la discontinuidad y tan sólo a 30 cm del borde derecho. Si se recogen las respuestas en puntos situados a ambos lados del impacto, a distancias de 20 y 30 cm del mismo, se obtienen las gráficas de la Fig. 11. Puede observarse cómo las ondas que corresponden a puntos equidistantes del centro permanecen solapadas hasta que se llega a un tiempo algo inferior a $0,2 \text{ ms}$. A partir de ese instante, que corresponde al momento en que la onda P reflejada en la interfase llega a la superficie, la

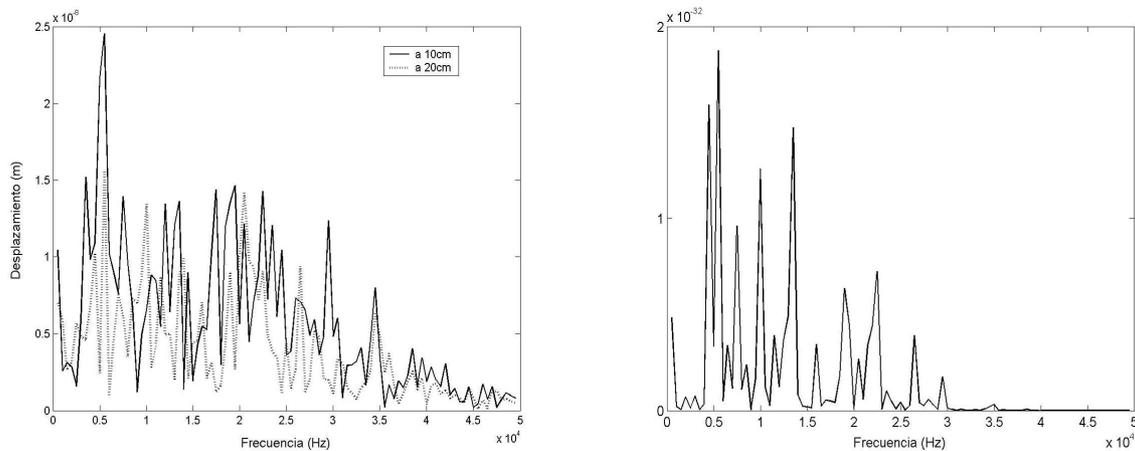


Fig. 10. Espectros para un espesor de hormigón variable: a) a 10 y 20 cm, b) Comparados entre 10 y 40 cm.

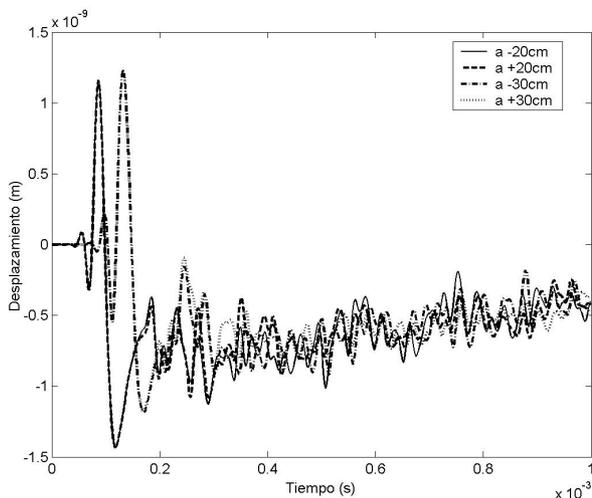


Fig. 11. Onda temporal para un espesor de hormigón variable, con el impacto excéntrico.

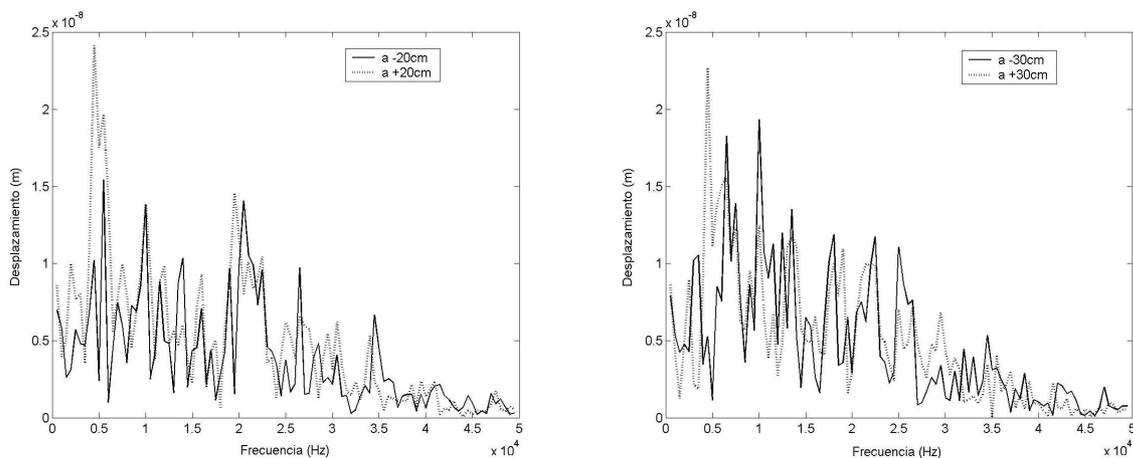


Fig. 12. Espectros para un espesor de hormigón variable.

respuesta comienza a ser diferente según el punto se encuentre a derecha o izquierda del impacto.

En la Fig. 12 se representan los espectros en los puntos anteriores. En primer lugar se comprueba cómo los espectros no son iguales aunque estén situados a igual distancia del centro del impacto. Puede verse además cómo en los picos situados a la izquierda del impacto (-20 y -30 cm), y por tanto más alejados de la discontinuidad, se recoge con mayor nitidez el pico de 5500 Hz (o 6000 Hz) correspondiente al espesor de 32 cm sobre el que están situados. En ellos aparece el pico de 4500 Hz (correspondiente al espesor de 40 cm), pero su amplitud es inferior, tanto más cuanto más lejos está el punto de la discontinuidad. Observando los espectros de los puntos más próximos a la discontinuidad (+20 y +30 cm), se aprecia tanto el pico de 4500 como el de 5500 Hz. A medida que el punto está más cerca de la discontinuidad el pico correspondiente a los 40 cm de espesor (4500 Hz), se hace más significativo respecto al pico de 5500 Hz.

4. CONCLUSIONES

El método de impacto-eco resulta útil para detectar variaciones en el espesor de hormigón del sostenimiento de un túnel, cuando la impedancia acústica de la roca circundante es bastante menor que la impe-

dancia acústica del hormigón. Las múltiples reflexiones que se producen en la interfase hormigón-roca permiten teóricamente realizar un estudio en frecuencia para detectar dicho espesor. Sin embargo, los diferentes tipos de onda que se generan en la interfase dificultan la interpretación de los resultados y hacen necesario un tratamiento de las señales recibidas. Una vez tratadas, se puede determinar el espesor de hormigón a partir de la respuesta en frecuencia.

Variando la posición del impacto y midiendo en diferentes puntos a ambos lados del mismo, se puede descubrir la presencia de capas no uniformes de hormigón, pudiendo detectarse incluso la forma de dicha discontinuidad. Se puede saber cuándo el impacto se encuentra situado en una posición equidistante de los extremos, porque la respuesta que se obtiene en puntos situados a la misma distancia del impacto es idéntica. Cuanto más alejado se halle el impacto de dicha posición centrada y más próximo esté a la discontinuidad, más diferente será la respuesta en posiciones equidistantes del punto de impacto. Además, los puntos más próximos a las discontinuidades reflejan con mayor nitidez las frecuencias representativas de ambos espesores, no ocurriendo así con aquellos que se encuentran claramente sobre uno u otro espesor.

REFERENCIAS

- [1] M. Sansalone, "Impact-echo: The Complete Story", *ACI Structural Journal*, 94(6), 777-786 (1997).
- [2] J. Lin and M. Sansalone, "Impact-Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock: Part I-Numerical Studies", *ASCE Geotechnical Testing Journal*, 17(2), 207-219 (1994).
- [3] K. Maji and M.L. Wang, "Detection of small voids by impact-echo and signal processing", *Construction Materials Serviceability/Durability*, 1223-1232 (1990).
- [4] J. Lin and M. Sansalone, "Impact-echo Studies of Interfacial Bond Quality in Concrete: Part I - Effects of Unbounded Fraction of Area", *ACI Structural Journal*, 93(3), 223-232 (1996).
- [5] J.D. Achenbach, Wave propagation in elastic solids, *Elsevier Science Publishers B.V.*, Amsterdam (1975).
- [6] M. Sansalone and J. Carino, "A Finite Element Study of Transient Wave Propagation in Plates", *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 92(4), 267-278 (1987).
- [7] R. Medina and M. Garrido, "Numerical Modelling of the Impact-Echo Method for Materials Characterisation", *Damage & Fracture Mechanics VII*, 273-282 (2003).
- [8] J. Lin and M. Sansalone, "Impact-Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock: Part II-Experimental Studies", *ASCE Geotechnical Testing Journal*, 17(2), 220-226 (1994).

DETERMINING THE THICKNESS OF CONCRETE WALLS IN TUNNELS BY THE IMPACT-ECHO METHOD

Abstract – The impact-echo method can be applied to heterogeneous media and it successfully detects interfaces between different materials. Therefore this method can be used to determine the variations of the thickness of concrete walls in tunnel liners surrounded by soil or rock. Finite elements are used to model a tunnel with a uniform wall of concrete surrounded by rock, and the signal at different points over the surface is studied. The interpretation of results is complicated by the fact that several different waves are generated when the primary wave is reflected by the interface. R-waves must be removed and signal processing in frequency must be done in order to determine the thickness of the concrete wall from the spectrum. This process is applied to concrete wall with two different thicknesses, and a discussion on how to calculate both thickness is presented. In this case the wave is not only reflected but also diffracted around the edges of the discontinuity. Changing the impact point and the position of the transducer result in a series of different spectra which can be interpreted to estimate the shape of the concrete wall.

