

EFFECTIVIDAD DE TRINCHERAS Y PANTALLAS EN EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR EL TRAFICO FERROVIARIO SUBTERRANEO.

J. Mateo (*), E. Alarcón (**)

(*) *E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Pontificia Comillas, Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid.*

(**) *E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid.*

RESUMEN

Se aborda un caso práctico de ferrocarril en un túnel soterrado en zona urbana con edificaciones tipo vivienda en las inmediaciones. Como procedimiento numérico para el desarrollo del estudio se ha adoptado el Método de los Elementos de Contorno, debido a las ventajas que presenta, frente a otros más ampliamente difundidos (Elementos Finitos, Diferencias Finitas, etc), en el modelado de medios infinitos o semi-infinitos.

Se ha definido un modelo bidimensional del terreno, en el que se incluye el túnel, con la fuente de excitación, y un edificio tipo. Las características del terreno se han obtenido mediante prospección geofísica. En base a un estudio de sensibilidad se ha simplificado el modelo, verificando su validez mediante comparación de resultados con registros de vibraciones recogidos *in situ*.

Se ha llevado a cabo un estudio paramétrico tomando como referencia el modelo simplificado, en el que se incorporan trincheras así como pantallas de distintos materiales con diversas profundidades y en dos emplazamientos diferentes, obteniendo la reducción del nivel de vibración conseguido en los puntos más significativos del modelo para las distintas soluciones.

1. PRESENTACION DEL PROBLEMA.

En las últimas décadas las compañías de ferrocarriles vienen recibiendo cada vez con más frecuencia reclamaciones acerca de las vibraciones procedentes de líneas subterráneas en zona urbana. Aunque en lo referente a molestias ocasionadas existe una componente subjetiva, lo cierto es que la vibración en un edificio puede resultar perceptible como efecto puramente mecánico o como radiación acústica procedente de los forjados y tabiques. El interés despertado por el tema ha hecho que distintos países hayan desarrollado una normativa técnica limitando el nivel de vibración en locales habitados por el hombre; por otra parte, también se establecen limitaciones en los puntos de ubicación de instrumental de precisión y de diverso material electrónico.

En España, la Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario, del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA), ha realizado un esfuerzo considerable para la comprensión de esta clase de fenómenos y estudio de las soluciones aplicables al problema.

Los métodos de reducción de los niveles de vibración en el receptor consisten básicamente en:

- Reducción del nivel de vibración en el vehículo, la vía y la plataforma.
- Interposición de obstáculos entre las fuentes generadora y receptora.
- Instalación de amortiguadores en la base del edificio o de la sustentación del instrumental.

La interposición de trincheras y pantallas de diversos materiales entre las fuentes generadora y receptora resulta un procedimiento atractivo como solución *a posteriori*. Diversos autores hacen referencia a la efectividad de pantallas y trincheras de profundidad moderada, pero se refieren siempre a vibraciones generadas en o cerca

de la superficie, donde se trata básicamente de interceptar las ondas de Rayleigh. En el caso aquí tratado las circunstancias son bien distintas; la energía no queda confinada en una capa superficial, sino que, por el contrario, se propaga ampliamente en profundidad; parece así que los primeros metros de pantalla o trinchera, en especial si están junto al túnel, no surten efecto salvo para interceptar la energía propagada a través del hastial (pequeña en el caso aquí estudiado, al no existir solera) y que su verdadera eficacia comienza al rebasar la cota de aplicación de la carga, y aún a partir de ahí las condiciones son más desfavorables que en superficie al no tender la energía a quedar confinada en ninguna zona en particular.

2. MODELADO DEL CASO PRACTICO ESTUDIADO.

La situación planteada corresponde a un caso real consistente en un túnel soterrado, de unos 5 Km de longitud, con gran número de edificaciones en sus proximidades, en el que actualmente se está llevando a cabo un estudio y ensayo de soluciones en un tramo experimental de 300 m de longitud. La sección del túnel es de doble vía, con 9 m de anchura, y altura en el intradós de la clave de 6.45 m medidos sobre el nivel del carril; es un túnel en bóveda con arco de medio punto. El espesor de los hastiales es de 0.90 m y el de la bóveda de 0.70 m, ambos de hormigón en masa. Los hastiales descansan sobre zapata corrida de 1.80x0.90 m que forma al pie de la sección un tacón de 0.90x0.90 m hacia el eje del túnel. Los carriles son de 54.4 Kg/m., sobre traviesa de madera.

Los terrenos que sustentan el túnel están constituidos por terrazas bajas holocenas que se apoyan, en profundidades superiores a 30 m, sobre areniscas, conglomerados y argilitas pontienses. Las características geológicas son homogéneas en las profundidades que afectan al estudio; no obstante, el contenido de cantos, variable decaméricamente en una terraza, implica un cierto grado de variación en los parámetros geotécnicos. Las características elásticas del terreno se han determinado a partir del registro en doce dispositivos ubicados en las proximidades de la traza del túnel, en una longitud de unos 500 m que incluye la zona en estudio. Se aprecian tres capas en el terreno: una superficial de unos dos metros de espesor, una intermedia de unos cinco, y una profunda.

La longitud de los trenes más habituales (~80 m) y la distancia al edificio (~15 m), permiten suponer un estado plano de tensiones a efectos de modelar la situación bosquejada en la figura 1. Se incluye la sección de túnel descrita, con cota del nivel del suelo a 1.50 m. sobre el trasdós de la clave. A 15 m. del eje del túnel se sitúa un edificio de nueve plantas (incluido el sótano) con 13m. de base.

La fuente de excitación se ha modelado como una carga armónica uniforme en el espectro de frecuencias, aplicada en la base del túnel en dos bandas de 0.90m. de ancho, simulando así las cargas ejercidas por el paso de un tren y considerando el efecto de reparto producido por las traviesas. La banda de frecuencias más problemática es la de 30 a 70 Hz; por lo que se ha elegido para el estudio una banda que cubra ampliamente este intervalo: la de 0 a 100 Hz.

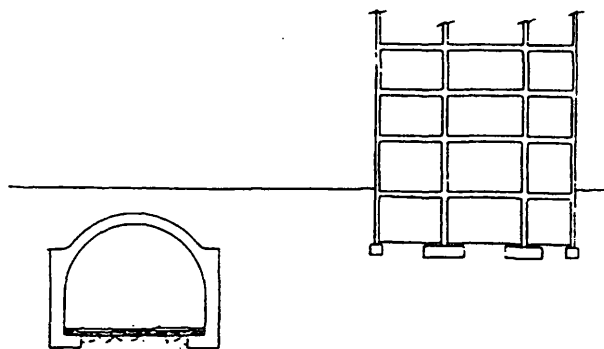


Figura 1

Como procedimiento numérico para el desarrollo del estudio se ha adoptado el Método de los Elementos de Contorno, debido a las ventajas que presenta, frente a otros más ampliamente difundidos (Elementos Finitos, Diferencias Finitas, etc), en el modelado de medios infinitos o semi-infinitos.

3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD.

Se ha llevado a cabo un cuidadoso estudio acerca de la influencia de las diferentes partes del modelo, a efectos de fijar un criterio para la construcción de un modelo lo más sencillo posible capaz de representar fidedignamente la situación sin llevar el esfuerzo computacional del estudio paramétrico más allá de los límites de lo razonable. Por otra parte, cada uno de los modelos parciales proporciona alguna aportación a la comprensión del fenómeno.

En la tabla I se resumen los resultados obtenidos de los diferentes estudios. Las variaciones de los detalles se refieren a tres modelos principales. El modelo I es un modelo simétrico sencillo, que incluye el túnel más un estrato de 30 m de espesor sobre un semiespacio de mayor rigidez; la idea es provocar una reflexión de ondas en la interfase a fin de magnificar las diferencias a estudiar. A continuación se considera un semiespacio dividido en un número variable de capas, con objeto de detectar la influencia de las variaciones de la velocidad de onda en profundidad. En el llamado modelo II, también simétrico, se estudia la influencia de una capa superficial de rellenos. Finalmente, el modelo III está constituido por un terreno de tres capas con las siguientes propiedades:

- Estrato superficial de 2.00 m de espesor y $G=1.65E8 \text{ N/m}^2$
- Estrato intermedio de 5.25 m de espesor y $G=5.05E8 \text{ N/m}^2$
- Semiespacio con $G=9.51E8 \text{ N/m}^2$

4. MODELO SIMPLIFICADO.

Las conclusiones del estudio de sensibilidad permiten establecer un modelo simplificado (figura 2) que servirá de referencia para el posterior estudio paramétrico. Se pretende prestar especial atención al nivel de respuesta en la base del edificio, careciendo de interés los efectos locales que, en otros lugares del modelo, pudieran ser ocasionados por la presencia de determinados detalles geométricos o diferencias poco significativas de las propiedades mecánicas de los materiales.

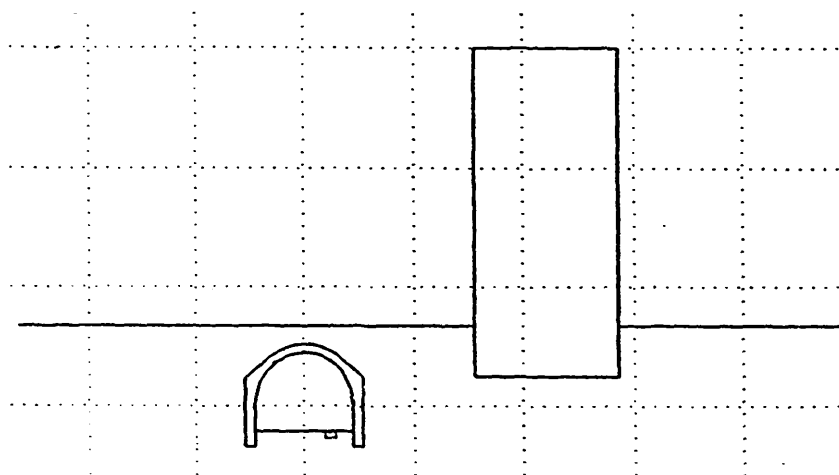


Figura 2

TABLA I. Resumen de resultados del análisis de sensibilidad:

MODELO	OBJETIVO DEL ESTUDIO	CONCLUSIONES
I con y sin tacón de hormigón	Importancia del modelado del tacón de cimentación del hastial en la respuesta	Sólo afecta a frecuencias superiores a los 60 Hz
I con distintos espesores de balasto	Importancia del espesor de balasto en la respuesta	Al crecer el espesor de balasto crece la transmisión de energía a través del hastial en frecuencias de 60-70 Hz
I con solera de hormigón	Influencia de una solera de hormigón	Reducciones de amplitud en superficie para frecuencias entre 50 y 80 Hz
Semiespacio	Importancia del número de estratos en la respuesta en superficie de un semiespacio con propiedades variables en profundidad	Puede reducirse el número de estratos para frecuencias entre 25 y 100 Hz
II con y sin distinción de capa superficial	Influencia de la representación de la capa superficial de rellenos	En el rango de frecuencias de interés sólo es importante para representar el movimiento en la acera
II y III con edificio	Influencia del tipo de edificio y repercusión en el mismo de condiciones simétricas o antisimétricas	Selección del tipo de edificio que mejor representa los resultados medidos
II y III con edificio y pantalla	Influencia de una pantalla de 20 m de profundidad situada al lado del hastial del túnel y conectada o no a él	No se ven reducciones apreciables salvo cuando al eliminar la conexión queda una trinchera
II y III con edificio y pantalla	Influencia de una pantalla de hormigón o arcilla, de 20 m de profundidad, situada junto al edificio	El material blando de relleno produce una ligera mejora para frecuencias muy altas

De acuerdo con estos criterios, se ha prescindido del tacón que presenta el sostenimiento del túnel en su parte inferior, se ha atribuido al balasto las mismas propiedades que al terreno y no se ha diferenciado la capa superficial blanda (rellenos) del resto del terreno. En cuanto al terreno, de acuerdo con los resultados del estudio de sensibilidad, es importante fijar correctamente la rigidez global del modelo, sin que sea necesario (ni, en ocasiones, conveniente), proceder a una estratificación de las propiedades que trate de reproducir la situación real. Por ello, se ha definido el terreno como un semiespacio homogéneo con las propiedades correspondientes al terreno en profundidad según los resultados de la prospección geofísica .

La validez de las hipótesis que han conducido al modelo establecido queda confirmada por la concordancia de los resultados numéricos del modelo con medidas realizadas *in situ*.

5. ESTUDIO PARAMETRICO

En el modelo básico descrito en el apartado anterior se añade un nuevo elemento:

- a) Trinchera.
- b) Pantalla de hormigón.
- c) Pantalla de material blando (arcilla o limo).

cada uno de ellos con dos posibles emplazamientos: junto al edificio y junto al túnel, y con diferentes profundidades.

En el análisis de resultados se ha prestado especial atención a la respuesta en la base del edificio, por ser factor determinante del movimiento del mismo; a modo de comprobación se considera también la respuesta en otros dos puntos: uno a nivel de la tercera planta y otro sobre la azotea. De igual forma, se ha juzgado de interés la apreciación de las reflexiones producidas por la pantalla o trinchera a nivel de la superficie de la calle.

Se ha prescindido deliberadamente de las posibles dificultades constructivas que pudieran surgir. Sin duda, este sería un factor de importancia a la hora de decidir la solución a adoptar en un caso práctico. Dichas dificultades pueden ser grandes en los casos de trinchera y de pantalla con material blando, dado que, según se ha comprobado en alguno de los modelos, si se conectan las paredes de la zanja excavada mediante algún elemento rígido, se pierde la efectividad del aislamiento. Recientemente (1986) ha sido desarrollado por una firma comercial un procedimiento que permite establecer una barrera prácticamente hueca en forma fiable; se trata de insertar en la zanja unos globos tubulares cuya presión se ajusta a los empujes geostáticos, lo que permite alcanzar fácilmente profundidades del orden de 15 m en cualquier tipo de suelo; es de esperar que en un futuro próximo se alcancen profundidades mayores. Por el momento, el interés fundamental de incluir en el estudio trincheras de 30 y 40 m de profundidad, es la determinación de la tendencia asintótica de la capacidad de aislamiento.

En la tabla II se expone un resumen de resultados del estudio paramétrico. La figura 3 muestra la discretización llevada a cabo para uno de los casos, y la figura 4 presenta las amplitudes de los desplazamientos para una de las frecuencias. A título de ejemplo, y al objeto de comparar las reducciones obtenidas con trinchera y con pantalla de hormigón en la base del edificio, la figura 5 recoge los resultados en dB para frecuencias agrupadas en bandas de tercio de octava. En el caso de la pantalla de hormigón, se observa que los niveles de reducción son muy bajos (2 dB) y negativos en las proximidades de 50 Hz, mientras que las trincheras alcanzan niveles de reducción con un orden de magnitud superior. En particular es atractiva la curva correspondiente a una trinchera de 10 m de profundidad situada junto al túnel. A 31,5 Hz se consigue una reducción de 9,8 dB y a 40 Hz una reducción de 6,3 dB.

TABLA II. Resumen de resultados del estudio paramétrico.

SERIE DE MODELOS N°	OBJETIVO DEL ESTUDIO	CONCLUSIONES
1	Influencia de trincheras situadas junto al edificio (profundidades de 10, 20, 30, 40 m)	La efectividad de ambas posiciones es similar. Crece a partir de los 10 m. siendo necesaria una profundidad del orden de los 20 m. para alcanzar niveles de reducción aceptables en la banda 25-60 Hz.
2	Idem junto al túnel.	
3	Influencia de pantallas de hormigón situadas junto al edificio (profundidades de 10, 20, 30, 40 m)	Solo se consiguen reducciones para frecuencias superiores a los 70 Hz. con independencia de la profundidad de la pantalla. No son útiles en este tipo de terreno.
4	Idem junto al túnel.	
5	Influencia de pantallas de arcilla situadas junto al edificio (profundidades de 10, 20, 30, 40 m)	Las conclusiones indicadas para el grupo anterior se ven empeoradas ya que se introducen en la banda de interés modos propios de vibración de la propia pantalla
6	Idem junto al túnel.	

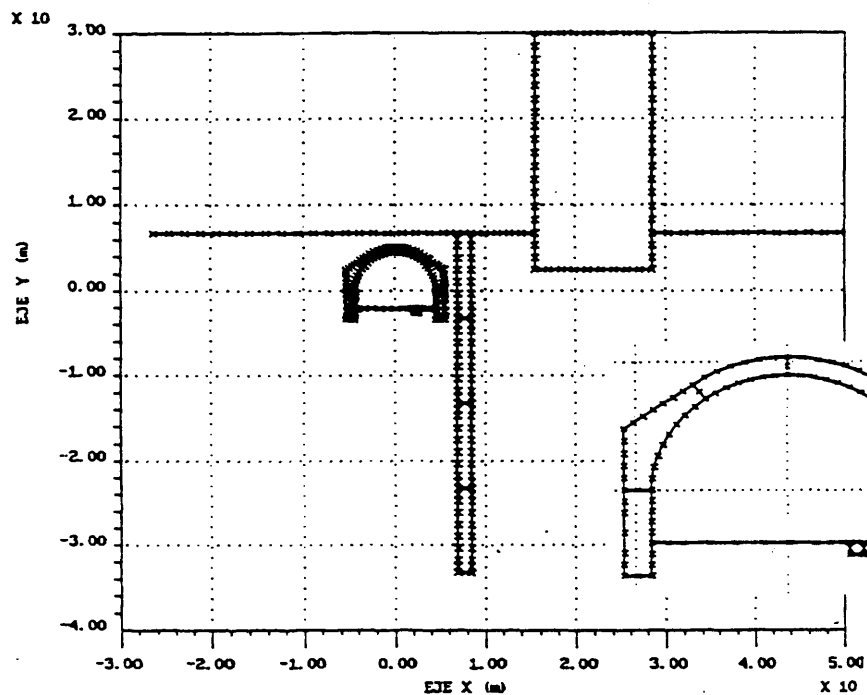


Figura 3

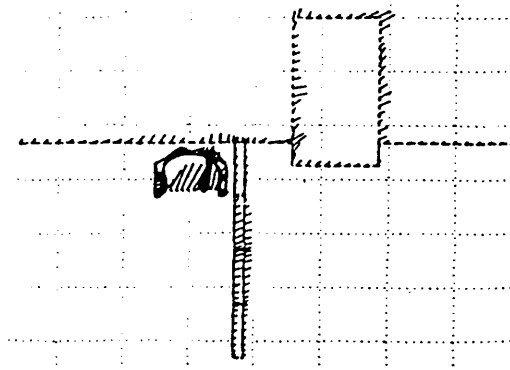


Figura 4

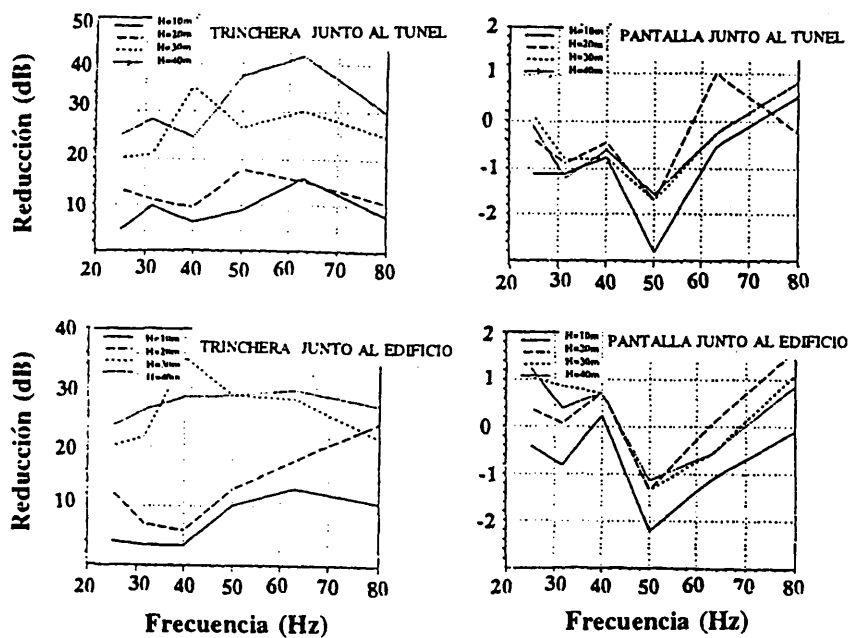


Figura 5

6. CONCLUSIONES.

Dentro de los límites impuestos por las hipótesis de trabajo utilizadas en los casos estudiados (propiedades del terreno, características del edificio, profundidad de las cargas, etc), la situación se puede resumir en las siguientes conclusiones:

- Las trincheras proporcionan mejores resultados que las pantallas.
- Para una profundidad similar a la de la cota de aplicación de las cargas (10 m en este caso) la efectividad de la trinchera es limitada, no cubriendo satisfactoriamente mas que determinados intervalos de frecuencia dentro de la banda estudiada (0-100 Hz).
- La efectividad de las trincheras es creciente con su profundidad, existiendo un límite, que se sitúa entre 20 y 30 m. a partir del cual los niveles de reducción del nivel de respuesta permanecen sensiblemente constantes. En líneas generales los resultados son mejores a frecuencias más altas.

- Los fenómenos de reflexión se acusan bien al interponer trincheras. La energía asociada al movimiento horizontal reduce sus efectos principalmente por reflexión en dirección paralela a la superficie, tanto sobre ésta como en planos profundos, mientras que en la asociada al movimiento vertical, la trinchera favorece la propagación hacia la profundidad del semiespacio.

- Las pantallas de hormigón en un suelo como el considerado ($G=9.51E+8 \text{ N/m}^2$), presentan una eficacia limitada, que se manifiesta principalmente en frecuencias altas y depende poco de la profundidad. Es de interés contrastar esta conclusión con las de un estudio en la misma línea presentado por A.A. Stamos *et al.* (1993), en el que se llega a que, en un terreno de $G=1.00E+8 \text{ N/m}^2$, las pantallas son efectivas para 40 m de profundidad (mas propiamente filas de pilotes). Se puede así concluir que para las vibraciones generadas en un túnel, las pantallas de hormigón unicamente son efectivas en terrenos de baja rigidez (dos órdenes de magnitud por debajo de la del hormigón).

- Las pantallas de material blando (arcilla o limo) presentan el grave inconveniente de amplificar frecuencias relacionadas con sus modos propios de vibración hasta límites que las hacen inaceptables.

- Son factores de escasa influencia: el ancho de la trinchera, el coeficiente de Poisson del terreno, el factor de amortiguamiento histerético atribuido al suelo (siempre que se mantenga en límites razonablemente bajos, 0-7%).

Algunas de estas conclusiones guardan similitud con las de otros autores (Beskos *et al.*, 1986; Avilés y Sánchez-Sesma, 1988; Ahmad y Al-Hussaini, 1991; Tahmed *et al.*, 1991) que han estudiado problemas similares, pero referentes a ondas generadas en superficie. Así, todos ellos relacionan la efectividad con la relación: *profundidad / longitud de onda*, resultando mayores reducciones para frecuencias más altas, tanto en trincheras como en pantallas; establecen límites mínimos de dicha relación para conseguir resultados efectivos; en algún caso se fija también un límite máximo por encima del cual no mejora al situación.

7. AGRADECIMIENTOS

El estudio ha sido promovido por la Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario, del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Los autores quieren manifestar aquí su especial agradecimiento a D.Julián Santos y a D.Ignacio Alonso por su continua motivación y estímulo.

REFERENCIAS

Ahmad,S.; Al-Hussaini,T.M. (1991) "*SIMPLIFIED DESIGN FOR VIBRATION SCREENING BY OPEN AND IN-FILLED TRENCHES*". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, nº 1.

Avilés,J.; Sánchez-Sesma,F.J. (1988) "*PILES AS BARRIERS FOR ELASTIC WAVES*". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, nº 9.

Beskos,D.E.; Dasgupta, D.; Vardoulakis I.G. (1986) "*VIBRATION ISOLATION USING OPEN OR FILLED TRENCHES*". Computational Mechanics 1.

Stamos,A.A.; Estorff, O.von; Antes,H.; Beskos, D.E. (1993) "*VIBRATION ISOLATION IN ROAD-TUNNEL TRAFFIC SYSTEMS*". Int. J. for Engng Analysis and Design (new journal by Wiley).

Tahmeed M.; Al-Hussaini; Shahid Ahmad. (1991) "*DESIGN OF WAVE BARRIERS FOR REDUCTION OF HORIZONTAL GROUND VIBRATION*". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, nº 4.