



Patronato de la Alhambra y Generalife
CONSEJERÍA DE CULTURA

La presente colección bibliográfica digital está sujeta a la legislación española sobre propiedad intelectual.

De acuerdo con lo establecido en la legislación vigente su utilización será exclusivamente con fines de estudio e investigación científica; en consecuencia, no podrán ser objeto de utilización colectiva ni lucrativa ni ser depositada en centros públicos que la destinen a otros fines.

En las citas o referencias a los fondos incluidos en la investigación deberá mencionarse que los mismos proceden de la Biblioteca del Patronato de la Alhambra y Generalife y, además, hacer mención expresa del enlace permanente en Internet.

El investigador que utilice los citados fondos está obligado a hacer donación de un ejemplar a la Biblioteca del Patronato de la Alhambra y Generalife del estudio o trabajo de investigación realizado.

This bibliographic digital collection is subject to Spanish intellectual property Law. In accordance with current legislation, its use is solely for purposes of study and scientific research. Collective use, profit, and deposit of the materials in public centers intended for non-academic or study purposes is expressly prohibited.

Excerpts and references should be cited as being from the Library of the Patronato of the Alhambra and Generalife, and a stable URL should be included in the citation.

We kindly request that a copy of any publications resulting from said research be donated to the Library of the Patronato of the Alhambra and Generalife for the use of future students and researchers.

Biblioteca del Patronato de la Alhambra y Generalife
C / Real de la Alhambra S/N. Edificio Fuente Peña
18009 GRANADA (ESPAÑA)

Tel. (+ 34) 958 027 944

(+ 34) 958 027 945

Fax. (+34) 958 210 235

biblioteca.pag@juntadeandalucia.es

EFFECTOS DEL SUELO EN LA RESPUESTA SISMICA DE LA TORRE DE COMARES

A. PAPAGEORGIOU* / JOSE M. ROESSET**

Las condiciones locales del suelo afectan la respuesta sísmica de una estructura de tres formas posibles:

1. Modificando las características mismas del terremoto que se registraría en un sitio determinado (las aceleraciones máximas así como el contenido de frecuencias). Dependiendo de las frecuencias naturales del terreno las amplitudes del movimiento sísmico se amplificarían en ciertos rangos de frecuencias y se deamplificarían en otros. Este fenómeno se conoce normalmente con el nombre de amplificación del suelo. La mayor parte de los estudios que se han llevado a cabo sobre este tema consideran un depósito de suelo con estratos horizontales (las propiedades del suelo cambian con profundidad pero se mantienen constantes en planos horizontales) y un frente de ondas plano propagándose en la dirección vertical (Seed & Idriss 1969, Roesset & Whitman 1969, Schnabel, Lysmer & Seed 1972). Las amplificaciones correspondientes a frentes de ondas planos propagándose en otras direcciones (Jones & Roesset 1970) son similares en términos generales aunque la amplitud de los picos es diferente y hay un claro acoplamiento entre ondas SV y P. Los efectos de geometrías bidimensionales (valles y cañones) o incluso tridimensionales en el fenómeno de amplificación han sido también estudiados desde hace tiempo (Aki & Larner 1970, Bard & Bouchon 1980, Dravinski 1982, 1983, Aki 1988, Papageorgiou & Kim 1992) pero la generalización de los resultados de estos estudios para casos reales con geometrías arbitrarias es difícil debido al gran número de parámetros. La mayor parte de los estudios han considerado valles trapezoidales, triangulares, circulares o elípticos.

2. Introduciendo una segunda modificación de las características del terremoto en función de la rigidez, el tamaño y la forma (geometría) de la cimentación. Cuando se trata de cimentaciones superficiales (losas o zapatas aisladas), en un depósito de suelo horizontal y un frente de ondas plano propagándose verticalmente, este efecto desaparece. En otros casos, cuando se trata de cimentaciones rígidas superficiales sometidas a trenes de ondas a distintos ángulos o cimentaciones enterradas, el efecto se caracteriza por un filtrado de las frecuencias altas (la cimentación no puede seguir las deformaciones del suelo correspondientes a longitudes de onda del orden de sus dimensiones o menores) y la aparición de componentes rotacionales. Este efecto se conoce con el nombre de interacción cinemática.

3. Una vez que se ha construido la estructura, las vibraciones causadas por el sismo darán lugar a fuerzas de inercia distribuidas sobre sus distintos elementos. Las resultantes de estas fuerzas de inercia en la base de la estructura (cimentación) consisten de una fuerza vertical (en relación con la componente vertical del terremoto), cortes basales en dos direcciones ortogonales en el plano horizontal, dos momentos de vuelco con relación a ejes horizontales y un momento torsional (alrededor del eje vertical). Estas fuerzas y momentos producen deformaciones adicionales del suelo alrededor de la cimentación, modificando de nuevo las características locales de la excitación sísmica en la base de la estructura. Este efecto se denomina interacción inercial. Para tomarlo en cuenta en el cálculo sísmico de una estructura se puede encontrar la función de transferencia entre el movimiento de la cimentación antes de construir la estructura (o con una estructura sin masa) y el

movimiento una vez que la estructura con su masa esta construida. Es más conveniente desde el punto de vista de cálculo añadir a la base de la estructura una serie de muelles y amortiguadores (cuyas propiedades dependen en general de la frecuencia) representando la rigidez dinámica de la cimentación. El efecto principal de la interacción inercial es introducir una modificación en las frecuencias naturales del sistema (reducción de la frecuencia fundamental o elongación del período propio) y en el amortiguamiento efectivo (la capacidad del sistema para disipar energía). En la mayor parte de los casos el amortiguamiento efectivo aumenta debido a la interacción inercial pero éste no es siempre el caso.

La interacción cinemática y la interacción inercial son parte del fenómeno de interacción suelo-estructura (Kausel & Roesset 1974, Roesset 1980, Wolf 1985). Para edificios relativamente rígidos con cimentaciones superficiales o poco profundas en suelos blando el efecto de interacción suelo-estructura puede ser importante y la interacción inercial es la contribución principal. Para edificios rígidos con cimentaciones enterradas en suelos relativamente blandos la interacción cinemática es la predominante.

La importancia de las solicitaciones sísmicas en el cálculo de una estructura depende de la relación entre la frecuencia natural de la estructura y las frecuencias predominantes del movimiento sísmico (el rango de frecuencias en el que se encuentra la mayor parte de la energía del sismo). Cuando la frecuencia fundamental del edificio está dentro de este rango la amplificación dinámica puede ser considerable y está controlada por la habilidad del sistema para disipar energía (amortiguamiento).

El primer paso en el estudio del riesgo sísmico de una construcción es la definición del terremoto o terremotos (más de uno) de cálculo. Estos son los terremotos a los que la estructura puede verse sometida por un período de tiempo especificado (período de retorno). La definición del sismo de cálculo, tomando en cuenta la historia sísmica de la zona, la existencia de fallas activas y toda la información geológica y sismológica que se pueda obtener, debe incluir una medida de intensidad (aceleración máxima por ejemplo) y el contenido de frecuencias. Estas características deben modificarse para incluir los efectos de amplificación del suelo y la interacción cinemática. Es preciso por otra parte desarrollar un modelo matemático de la estructura, calcular las rigideces dinámicas de la cimentación y llevar a cabo el análisis dinámico del conjunto estructura —cimentación— suelo sometido a la excitación sísmica resultante de los estudios previos.

En este trabajo se describen algunos de los estu-

dios preliminares que se han llevado a cabo para estimar el riesgo sísmico de la Torre de Comares en la Alhambra. Los estudios de amplificación local considerando la geometría bidimensional del cerro de la Alhambra se han llevado a cabo en el Instituto Politécnico de Rensselaer (R.P.I.) bajo la supervisión del primer autor. Los efectos de interacción cinemática se han despreciado porque serían de poca importancia para dos de los modelos de la cimentación que se han usado. Serían importantes para el tercer modelo. Los efectos de interacción inercial (cálculo de las rigideces dinámicas de la cimentación y análisis dinámico de la Torre con la cimentación) se han llevado a cabo en la Universidad de Tejas en Austin bajo la supervisión del segundo autor (Vasquez Chicata 1996).

EFFECTOS DE AMPLIFICACION

Para los estudios de amplificación se consideró un modelo bidimensional. La sección transversal del terreno se muestra en la figura 1. Se supone que la geometría y las propiedades del suelo se mantienen constantes en la dirección longitudinal (perpendicular al plano de la sección). Las ondas sísmicas pueden viajar con un ángulo de incidencia arbitrario en tres dimensiones. Para los estudios preliminares se supuso sin embargo un tren de ondas (SH & SV) que se propagan verticalmente.

Como se indica en la figura 1 la sección transversal del terreno se modeló con una malla de elementos finitos cuadráticos (elementos isoparamétricos: cuadriláteros con ocho nudos y triángulos con seis nudos). La base y lados de esta malla descansan sobre un semiespacio elástico homogéneo modelado con elementos de contorno también cuadráticos. Este modelo híbrido combinando elementos finitos y elementos de contorno para el semiespacio permite una gran flexibilidad en la geometría y la variación de las propiedades elásticas de los materiales.

Para tomar en cuenta las incertidumbres en las propiedades del suelo y las limitaciones del modelo se consideraron tres modelos distintos: en el primer modelo (A) las propiedades del suelo son uniformes con una velocidad de las ondas de corte de 600 m/seg, un módulo de Poisson de 1/3 y una densidad de 2.000 kg/m³. El segundo modelo (B) que representa la mejor aproximación a la situación actual (basada en los datos suministrados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX) incluye un estrato superficial de 20 m de espesor con una velocidad de las ondas de corte de 480 m/seg, el mismo módulo de Poisson y una densidad de 1.800 kg/m³. Una descripción más exacta del perfil del suelo real (con un espesor del estrato superficial de 5 m) requeriría una

mallas de elementos finitos mucho más refinada con un número de grados de libertad mucho mayor. El tercer modelo (C) tenía las mismas propiedades del semiespacio pero la velocidad de la onda de corte del estrato superficial se redujo a 300 m/seg. En este artículo se presentan sólo los resultados correspondientes al segundo modelo que representa la mejor aproximación a la situación real. Los resultados para los otros dos modelos son muy semejantes en cuanto a las características generales de las funciones de amplificación pero los valores de los picos en estas funciones aumentan al aumentar el contraste entre las propiedades del estrato superficial y las del semiespacio (un resultado consistente en los conceptos generales de amplificación ya que al aumentar este contraste disminuye el amortiguamiento por radiación). El primer paso del estudio es la determinación de las funciones de transferencia desde una superficie libre hipotética del suelo, horizontal y con las propiedades del semiespacio (velocidad de las ondas de corte de 600 m/seg) a los distintos puntos de la superficie libre del terreno actual marcados 1 a 14 en la figura 1. Es de notar que los puntos 12, 13 y 14 coinciden con la cimentación de la Torre de Comares.

El segundo paso es la generación de una colección de veinte terremotos sintéticos correspondientes a la excitación sísmica que podría esperarse en una superficie libre horizontal del terreno con las propiedades del semiespacio (velocidad de las ondas de corte de 600 m/seg). Para generar este conjunto se consideró un terremoto con una magnitud (momento) $M_w = 6$ a una distancia de 30 km de la Alhambra. La selección de estos valores no está basada en un estudio riguroso de riesgo sísmico de la zona y uno podría haber escogido igualmente un terremoto con magnitud 6.5 a una distancia de 20 km, que hubiera proporcionado resultados más conservadores pero igualmente posibles. Los valores escogidos son sin embargo razonables dada la sismicidad de la región.

El espectro de la fuente usado para la generación de los terremotos artificiales es un modelo de ω cuadrado con escalas basadas en el modelo de Brune (1970). Los parámetros del modelo son los propuestos por Boore (1983) excepto por el factor Q que se escogió igual a $75f^{0.87}$ de acuerdo con lo propuesto por Ibañez y otros (1990) en base a datos de la región de Granada. Para cada uno de los veinte terremotos artificiales se calcularon los acelerogramas correspondientes en los distintos puntos de la superficie (1 a 14). La malla de elementos finitos usada para el estudio no puede transmitir adecuadamente frecuencias mayores de 6 Hz. Por este motivo se filtraron las frecuencias mayores de los terremotos sintéticos.

La figura 2 muestra las amplitudes de los espectros de Fourier de uno de los veinte terremotos sin-

téticos usados como punto de partida para los estudios de amplificación y del terremoto resultante en el punto 9 del perfil del terreno, así como los espectros de respuesta correspondientes para 5% de amortiguamiento. Estos resultados son para el caso de ondas SH (desplazamientos en la dirección Este-Oeste, perpendicular al plano de la sección transversal). Las funciones de transferencia para ondas SH y SV desde la superficie libre horizontal (hipotética) al punto 9 se muestran en la figura 3. Las figuras 4 y 5 muestran los acelerogramas en los catorce puntos del perfil correspondientes al terremoto sintético seleccionado.

Los espectros de respuesta en los distintos puntos del modelo (puntos 1 a 14) para 2.5 y 10% de amortiguamiento correspondientes a los veinte terremotos artificiales se promediaron para obtener espectros de cálculo. La figura 6 muestra los espectros para la hipótesis de ondas SH y la figura 7 para ondas SV. Es de notar que los espectros en la dirección E-O (ondas SH) y N-S (ondas SV) tienen amplitudes distintas pero contenidos de frecuencias bastante similares. En los puntos 3, 8, 9 y 10 las amplitudes son mayores en la dirección NS. En los otros puntos ocurre lo opuesto. En los puntos 12, 13 y 14 de especial interés para el estudio de la Torre de Comares los espectros exhiben dos picos alrededor de los 3 y 5 Hz.

Estos resultados parecerían estar de acuerdo con varias observaciones y estudios teóricos (Geli et al 1988). Estos estudios indican que cerros y lomas tienden a amplificar los movimientos sísmicos en el rango de frecuencias con longitudes de onda iguales o menores que una dimensión horizontal característica (que puede variar del ancho de la base a la mitad de esta dimensión). El modelo estudiado tiene dos promontorios con dimensiones basales de 200 a 300 metros. Para una velocidad de las ondas de corte de 600 m/segundo, tomando una dimensión característica igual a la base, el rango de frecuencias donde se esperarían amplificaciones sería de 2 a 3 Hz. Para una dimensión característica igual a la mitad de la base el rango sería de 4 a 6 Hz. Las funciones de transferencia de la figura 3 muestran las mayores amplificaciones en el punto 9 para el rango de 2 a 3 Hz en el caso de ondas SH y en el rango de 4 a 6 Hz para ondas SV.

Morales et al (1993) han indicado que los acelerogramas registrados en Granada en la "formación Alhambra" exhiben casi siempre picos en el rango de frecuencias de 2 a 4 Hz, lo que sería también consistente con los resultados obtenidos.

INTERACCION INERCIAL

El primer paso en el estudio de los efectos de la interacción inercial entre la Torre de Comares y el

suelo circundante es la determinación de las rigideces dinámicas de su cimentación. La forma exacta de la cimentación no es conocida. Para tomar en cuenta esta incertidumbre se usaron tres modelos de la cimentación: en el primer modelo se supuso que se había llevado a cabo una excavación con paredes verticales como se indica en la figura 8 (Modelo I). Las paredes de la excavación y la superficie libre del suelo circundante se modelaron con elementos de contorno rectangulares y triangulares constantes (Fig. 9), llevando a cabo estudios paramétricos para determinar la extensión de la superficie del terreno que tenía que modelarse. Se supuso que la cimentación era rígida. Es de notar que en este caso el punto de referencia para el cálculo de las rigideces se encuentra en la base y el movimiento sísmico que se registraría en este punto sin la estructura sería distinto del que se podría esperar en la superficie libre del terreno (por ejemplo el punto 13 de los estudios de amplificación anteriores). Las diferencias se deberían a efectos de interacción cinemática.

El segundo modelo (denominado Modelo II en la Figura 8) supone que la cimentación es escalonada como se indica en la figura 10. Se usaron de nuevo elementos de contorno constantes (rectangulares y triangulares) para modelar la superficie de la excavación y del terreno colindante y se llevaron a cabo estudios paramétricos para observar la variación de los resultados con la extensión de la superficie del terreno incluida en el modelo. En este caso el punto de referencia para el cálculo de las rigideces y la aplicación del terremoto está aproximadamente a la mitad de la altura. En este caso habría de nuevo algún efecto de interacción cinemática pero debería ser mucho menor y el suponer que el movimiento del punto de referencia antes de colocar la estructura es el mismo calculado en el estudio de amplificación (por ejemplo el punto 13) parece razonable.

El tercer modelo (Modelo III) supone que la cimentación sigue la geometría del terreno. En este caso el efecto de interacción cinemática se reduciría a un filtrado de las frecuencias altas si la cimentación es rígida y, si se supone que las ondas se propagan verticalmente (y por lo tanto a un ángulo distinto de 90° con respecto a la superficie). El uso del movimiento predicho para el punto 13 en los estudios de amplificación como sollicitación promedio es todavía más razonable para esta situación. La figura 11 muestra una de las discretizaciones usadas para este caso.

De estos tres modelos el segundo parece el más razonable. Es difícil imaginar que se llevara a cabo una excavación de la magnitud sugerida por el Modelo I o que se colocara la base de la Torre directamente sobre una superficie inclinada (Modelo III). Es posi-

ble sin embargo que los escalones sean mayores (más profundos) que lo supuesto en el Modelo II. En todos los casos se supuso que las propiedades del terreno eran homogéneas con una velocidad de la onda de corte de 600 m/seg (el valor usado para el semiespacio en los estudios de amplificación).

Las rigideces dinámicas de una cimentación son funciones complejas de frecuencia. La existencia de un término imaginario significa que el desplazamiento no está en fase con la fuerza aplicada. Ésta es una condición asociada con la existencia de amortiguamiento. La disipación de energía resulta en parte del comportamiento del suelo como material pero principalmente de pérdidas por radiación.

Las figuras 12, 13 y 14 muestran la variación con frecuencia de las partes real e imaginaria de las rigideces traslacionales (en las dos direcciones horizontales x , y , y en la dirección vertical z) y de las rigideces rotacionales (rotaciones alrededor de los ejes x , y , y torsión alrededor del eje z). Es de notar que para cimentaciones enterradas, y en particular cuando el enterramiento no es uniforme habrá también términos representando acomplamiento entre traslaciones y rotaciones (la matriz de rigidez no es diagonal). En el estudio llevado a cabo se calcularon todos los términos de la matriz de rigidez de la cimentación, aunque sólo se muestran aquí los resultados para los elementos de la diagonal principal.

Cuando la parte real de la rigidez dinámica es una línea horizontal (resultados independientes de frecuencia) puede usarse un resorte con rigidez constante para reproducir el efecto. Si la parte imaginaria es una línea recta la pendiente de esta línea (en términos de la frecuencia circular en radianes/segundo) puede considerarse como la constante de un amortiguador viscoso. En este caso la cimentación es equivalente a un resorte y un amortiguador. En el caso de la rigidez horizontal del Modelo II en la dirección x (Fig. 12) la variación de la parte real con frecuencia es casi despreciable y la parte imaginaria es básicamente una línea recta. La rigidez dinámica puede expresarse entonces como

$$K_{xy} = 6 \times 10^6 + 0.66 \times 10^6 \text{ } i f$$

donde f es la frecuencia en ciclos por segundo. La constante del resorte equivalente sería entonces $6 \times 10^6 \text{ t/m}$ y la constante del amortiguador viscoso $(0.66/2\pi) \times 10^6 \approx 10^5$. El amortiguamiento efectivo a una frecuencia f_1 sería aproximadamente $0.055f_1$ (5.5% a una frecuencia de 1 Hz, 11% a una frecuencia de 2 Hz, etc.).

Cuando la parte real varía con frecuencia como una parábola de segundo grado, con curvatura negativa, la cimentación puede reproducirse con un resorte, una masa y un amortiguador. En la mayor parte

de los casos la variación con frecuencia es más complicada. En estos casos es más difícil encontrar un modelo mecánico de resortes (muelles), masas y amortiguadores viscosos que reproduzcan el efecto de la rigidez del suelo, pero esto es innecesario si se lleva a cabo el análisis dinámico en el campo de las frecuencias.

Las figuras 12 y 14 muestran la convergencia de los resultados con el ancho de la zona de suelo alrededor de la cimentación que se discretiza con elementos de contorno y se incluye en el modelo. En los casos con un ancho de esta franja FZ igual al tamaño de la cimentación en planta o el doble de esta dimensión (FZ = 2B y 4B) se usaron elementos rectangulares en lugar de elementos cuadrados. La precisión de estos elementos es menor, particularmente al aumentar la frecuencia. Este efecto se observa claramente en las curvas correspondientes a las rigideces reales traslacionales y es mucho menor para las rigideces rotacionales y las partes imaginarias de las rigideces. La convergencia de las rigideces estáticas, correspondientes a la frecuencia cero, se ilustra mejor en la figura 15. La tabla 1 muestra los valores de las rigideces estáticas (los elementos de la diagonal principal) para los tres modelos de cimentación. Como cabía esperar las rigideces de los modelos II y III son relativamente parecidas con mayores valores para el caso II. Las rigideces del Modelo I son mayores particularmente las rotacionales.

TABLA I
RIGIDECES ESTATICAS

	MODELO I	MODELO II	MODELO III
K_{xx} (10^6 t/m)	9'25	6'06	5'20
K_{yy} (10^6 t/m)	8'38	6'04	5'40
K_{zz} (10^9 t/m)	8'60	6'40	5'76
$K_{\alpha\alpha}$ (10^6 t/m)	2'59	1'37	1'14
$K_{\beta\beta}$ (10^9 t/m)	2'44	1'32	1'01
$K_{\gamma\gamma}$ (10^9 t/m)	2'78	1'24	0'93

El segundo paso del estudio es el desarrollo del modelo de la estructura (la Torre de Comares). Varios modelos con diferentes grados de complejidad fueron desarrollados y usados para cálculos de la Torre con base rígida por la oficina de C. Fernández Casado (Astid 1994). El modelo más sencillo era una viga en voladizo en tres dimensiones. Este mismo modelo se usó para los estudios preliminares incluyendo la interacción inercial con los modelos II y III de la cimentación. Para el Modelo I se extendió la viga hasta la base horizontal con propiedades promedias entre las del suelo y las del material de la Torre, basadas en las áreas efectivas. La figura 16 muestra las

funciones de transferencia del suelo sin estructura a tres puntos en la Torre (donde se instalaron acelerógrafos): la parte superior (denominada Torre), el paseo de Ronda, y el punto en la base (incluyendo la estructura) para el caso de base rígida. En este caso el movimiento de la base es único con o sin estructura (la función de transferencia es constante con valor unitario). La figura 17 muestra los resultados tomando en cuenta la interacción inercial con el Modelo II de la cimentación. Puede observarse que en ambos casos la frecuencia natural de la estructura en las direcciones horizontales es aproximadamente 2 Hz (un poco mayor en la dirección x). Los efectos de la interacción inercial en las funciones de transferencia para el movimiento horizontal en la parte superior de la Torre son despreciables. Son más pronunciados para el movimiento al nivel del paseo de Ronda, donde el pico que aparece en la dirección x a una frecuencia de 7'5 Hz para la base rígida se traslada a una frecuencia de 6'5 Hz con la cimentación; en la dirección y hay un pico a 6'2 Hz en el caso de base rígida y a 5'5 Hz para base flexible. Los efectos de la interacción inercial son mucho más pronunciados en el movimiento vertical. El pico que ocurre a una frecuencia de aproximadamente 10'5 Hz para la Torre en base rígida disminuye considerablemente en amplitud (de 14 a 3) y se traslada a una frecuencia de 9 Hz. La reducción en la amplitud de este pico se debe fundamentalmente al aumento en el amortiguamiento efectivo debido a la radiación. Estos resultados indicarían que para un cálculo sísmico de la Torre sometida a un terremoto horizontal (las componentes horizontales del sismo) los efectos de interacción suelo-estructura pueden despreciarse si uno está interesado particularmente en las aceleraciones que ocurrirían en la parte superior. Las aceleraciones cerca de la base (el paseo de Ronda por ejemplo) pueden verse más afectadas por la interacción inercial, aunque el modelo de la estructura usado en este estudio puede no ser adecuado para reproducir apropiadamente las aceleraciones en los niveles inferiores. La respuesta de la Torre a la componente vertical del sismo se ve en cambio fuertemente afectada por la interacción.

Acelerógrafos colocados en la parte superior de la Torre de Comares, el paseo de Ronda y Caballerizas (un edificio diferente) registraron los sismos del 30 de Diciembre de 1993 y el 4 de Enero de 1994. Se obtuvieron también registros en Santa Fe. Usando el modelo de la estructura descrito arriba y los distintos modelos de la cimentación, se calcularon a partir de los registros en la parte superior de la Torre lo que hubieran sido los movimientos en la base del modelo sin la presencia de la estructura (eliminando el efecto de interacción inercial). Los resultados para

los tres modelos de la cimentación y los dos terremotos se muestran en las figuras 18 y 19. Se puede ver que las predicciones usando los modelos II y III son casi idénticas. Las componentes del movimiento con el Modelo I son muy parecidas hasta una frecuencia de 3 Hz para las dos direcciones horizontales y para todo el rango de frecuencias en la dirección vertical. Es de notar que el punto al que se refieren los espectros de Fourier del sismo con el Modelo I de la cimentación es distinto que el punto de referencia para los otros dos modelos. En estas figuras la componente 1 representa el movimiento en la dirección Este-Oeste, la componente 2 el movimiento vertical y la componente 3 la Norte-Sur.

Las figuras 20 y 21 muestran las funciones de transferencia desde Santa Fe al paseo de Ronda y Caballerizas obtenidas dividiendo las transformadas de Fourier de los acelerogramas registrados en los dos últimos puntos por la transformada de Fourier del registro en Santa Fe (tras haber suavizado los espectros de Fourier). La tercera curva que aparece en las figuras se ha obtenido dividiendo la transformada de Fourier del movimiento calculado en la base de la Torre (tomando en cuenta la presencia de la estructura) a partir del movimiento registrado en la parte superior por la transformada del movimiento en Santa Fe. Es de observar que para ambos sismos la función de transferencia semi-analítica en la base de la Torre es casi idéntica a la función experimental de Santa Fe al paseo de Ronda hasta una frecuencia de 4 Hz para las componentes horizontales y sobre todo el rango de frecuencias para la componente vertical (hasta 10 Hz). El modelo de la estructura no es suficientemente preciso para vibraciones horizontales con frecuencias mayores de 4 Hz.

Estos resultados parecen indicar que los movimientos en la base del modelo y el paseo de Ronda son muy parecidos sugiriendo un movimiento de cuerpo rígido por debajo del nivel del paseo de Ronda. Sugieren también que el modelo analítico es razonable para frecuencias menores de 3 ó 4 Hz. Para frecuencias mayores (y vibraciones horizontales) el modelo debería refinarse.

OBSERVACIONES FINALES

Como se indicó anteriormente los estudios realizados hasta la fecha son de carácter preliminar. Sería deseable, por ejemplo, comparar las funciones de transferencia usadas en el estudio de amplificación con las resultantes de los registros de Diciembre de 1993 y Enero de 1994. Esto no es posible ahora porque los acelerogramas registrados en Santa Fe incluyen ya ciertos efectos de amplificación local. Para eliminar estos efectos habría que conocer las caracte-

rísticas (propiedades) del terreno en el lugar de emplazamiento del acelerógrafo en Santa Fe. Hay que notar por otra parte que para terremotos de muy pequeña intensidad como los dos registrados, la correlación entre los movimientos en Santa Fe y la Alhambra puede ser muy pequeña. Los movimientos predichos en la base de la Torre de Comares, eliminando la interacción inercial a partir de los registros en la parte superior de la Torre, no parecen tener un contenido de frecuencia semejante al de los terremotos sintéticos, particularmente en la dirección NS (ondas SV). Esto puede deberse a distintas causas pero merece estudios adicionales.

* Rensselaer Polytechnical Institute, Troy, New York.

** The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

BIBLIOGRAFIA

- K. AKI, "Local Site Effects on Ground Motion. State of the Art Report. Recent Advances in Ground Motion Evaluation", *Geotechnical Special Publication*, ASCE, nº 20, (1988).
- K. AKI y K.L. LARNER, "Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves", *Journal of Geophysical Research*, nº 75, (1970).
- M.A. ASTID, *Informe sobre la Situación de los Trabajos de Comprobación de la Seguridad de la Torre de Comares*. CEDEX, 1994.
- P.Y. BARD y M.A. BOUCHON, "The Seismic Response of Sediment Filled Valleys, Parts I and II", *Bulletin of the Seismological Society of America*, nº 70, (1980).
- D.M. BOORE, "Stochastic Simulation of High Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, nº 73, (1983).
- J.M. BRUNE, "Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes", *Journal of Geophysical Research*, nº 75, (1970).
- A. BUFORN; A. UDIAS y J. MEZCUA, "Seismicity and Focal Mechanisms in South Spain", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 78, nº 6, (1988).
- V. CUELLAR et al., "Dynamic Characteristics of Comares Palace in the Alhambra", *Internal Report*, (1995).
- M. DRAVINSKI, "Scattering of Elastic Waves by an Alluvial Valley", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, nº 108, (1982).
- M. DRAVINSKI, "Amplification of P, SV and Rayleigh Waves by Two Alluvial Valleys", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nº 2, (1983).
- L. GELI; P.Y. BARD y B. JULIEN, "The Effects of Topography on Earthquake Ground Motion. A Review and New Results", *Bulletin of the Seismological Society of America*, nº 78, (1988).
- J.M. IBÁÑEZ; E. DEL PEZZO; F. DE MIGUEL; M. HERRAIZ; G. ALGUACIL y J. MORALES, "Depth-dependent Seismic Attenuation in the Granada Zone (Southern Spain)", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 80, nº 5, (1990).
- T.J. JONES y J.M. ROESSET, "Soil Amplification of SV and P Waves, Report R70-3", *Civil Engineering Department, M.I.T.*, (1970).
- E. KAUSEL y J.M. ROESSET, "Soil Structure Interaction for Nuclear Containment Structures", *Proceedings ASCE*

- Power Division Specialty Conference*, (Boulder, Colorado, 1974).
- J. MORALES; K. SEO; T. SAMANO; J.A. PEÑA; J.M. IBÁÑEZ y F. VIDAL, "Site Response on Seismic Motion in the Granada Basin (Southern Spain) Based on Microtremor Measurements", *Journal of Physics of the Earth*, vol. 41, nº 6, (1993).
- A. PAPAGEORGIOU y J. KIM, "Propagation and Amplification of Seismic Waves in 2D Valleys Excited by Obliquely Incident SV and P Waves", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, nº 22, (1992).
- A. PAPAGEORGIOU, "Topographic Amplification at the Site of the Alhambra", *Internal Study Report*, (1995).
- J.M. ROESSET y R.V. WHITMAN, "Theoretical Background for Amplification Studies, Report R69-15", *Civil Engineering Department, M.I.T.*, (1969).
- J.M. ROESSET, "Seismic Safety Margins Research Program (Phase I). Project III - Soil Structure Interaction", *A Review of Soil Structure Interaction*, UCRL-15262 June 1980, (1980).
- P.B. SCHNABEL; J. LYSMER y M.B. SEED; SHAKE., "A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report EERC 72-12", *University of California*, (Berkeley 1972).
- M.B. SEED y I.M. IDRIS, "Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, (1969).
- L.F.G. VASQUEZ CHICATA, *Seismic Analysis of the Comares Tower Accounting for Soil Structure Interaction*. U.T. Austin, M.S. Thesis, 1969.
- J.P. WOLF, "Dynamic Soil Structure Interaction", *Prentice-Hall*, (1985).



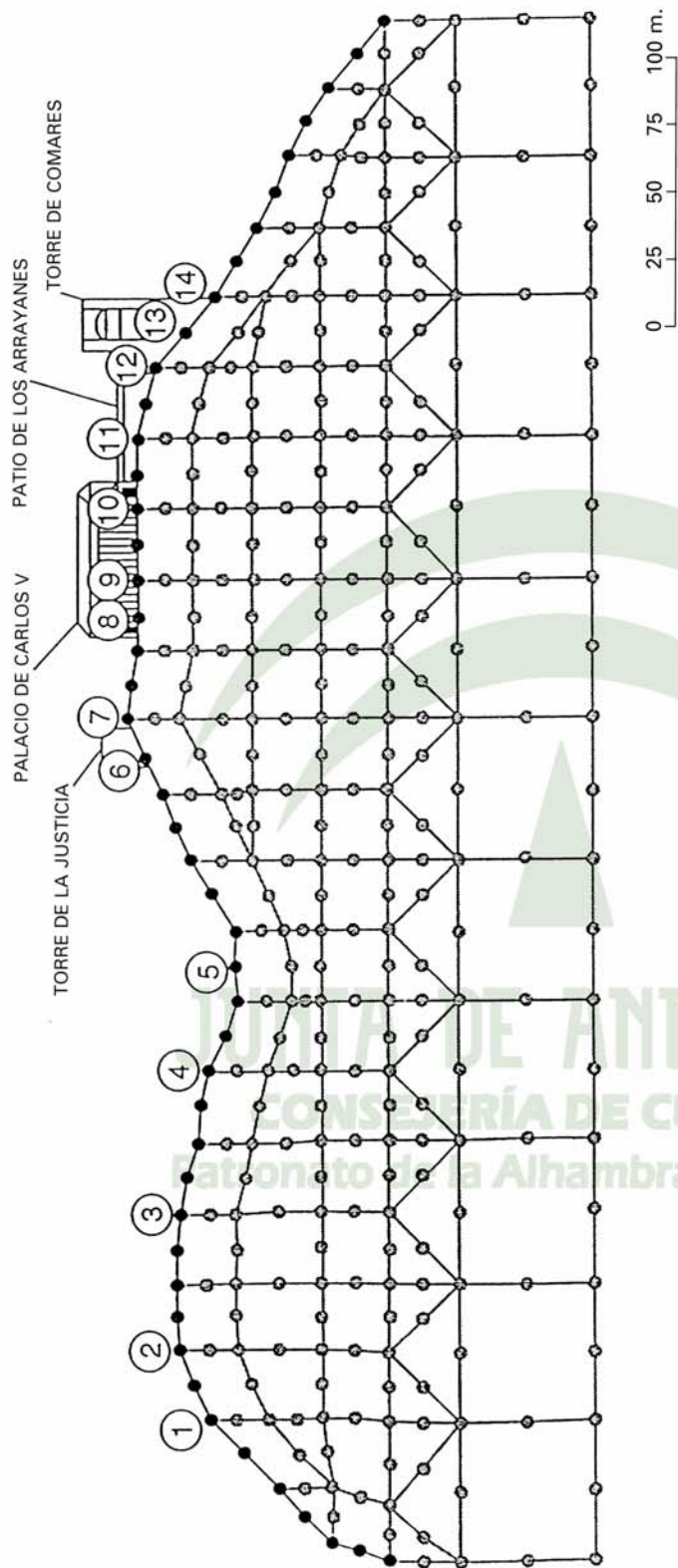


Fig. 1. Modelo bidimensional para estudios de amplificación.

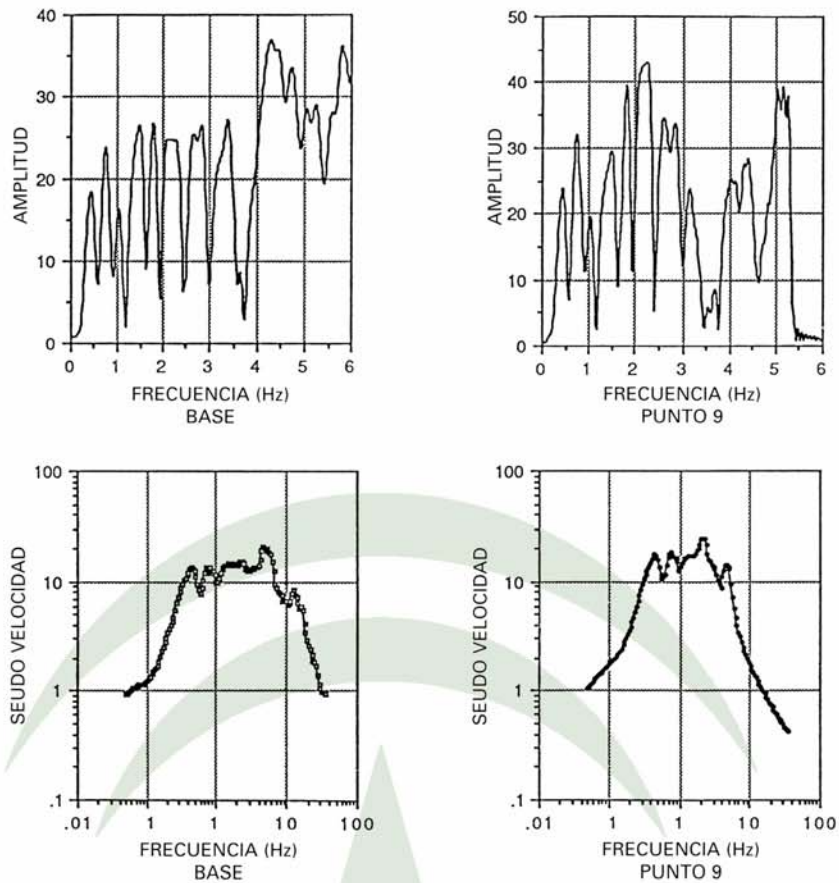


Fig. 2. Espectros de Fourier y espectros de respuesta para los terremotos en la superficie libre horizontal (Base) y en el punto 9.

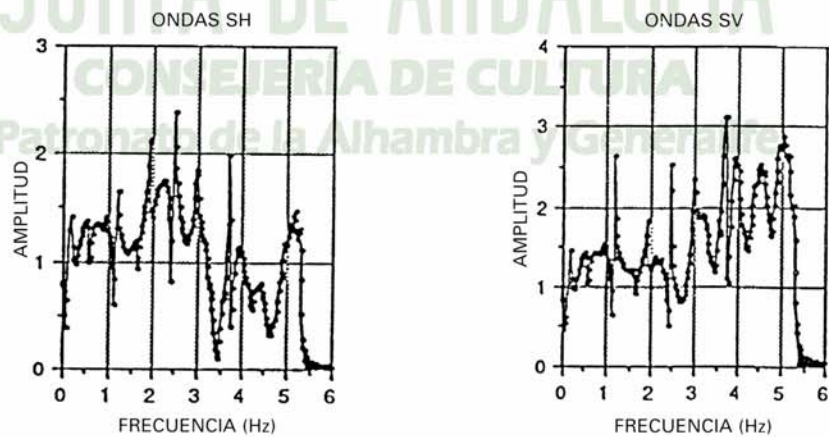


Fig. 3. Amplitud de las funciones de transferencia de la superficie libre horizontal al punto 9.

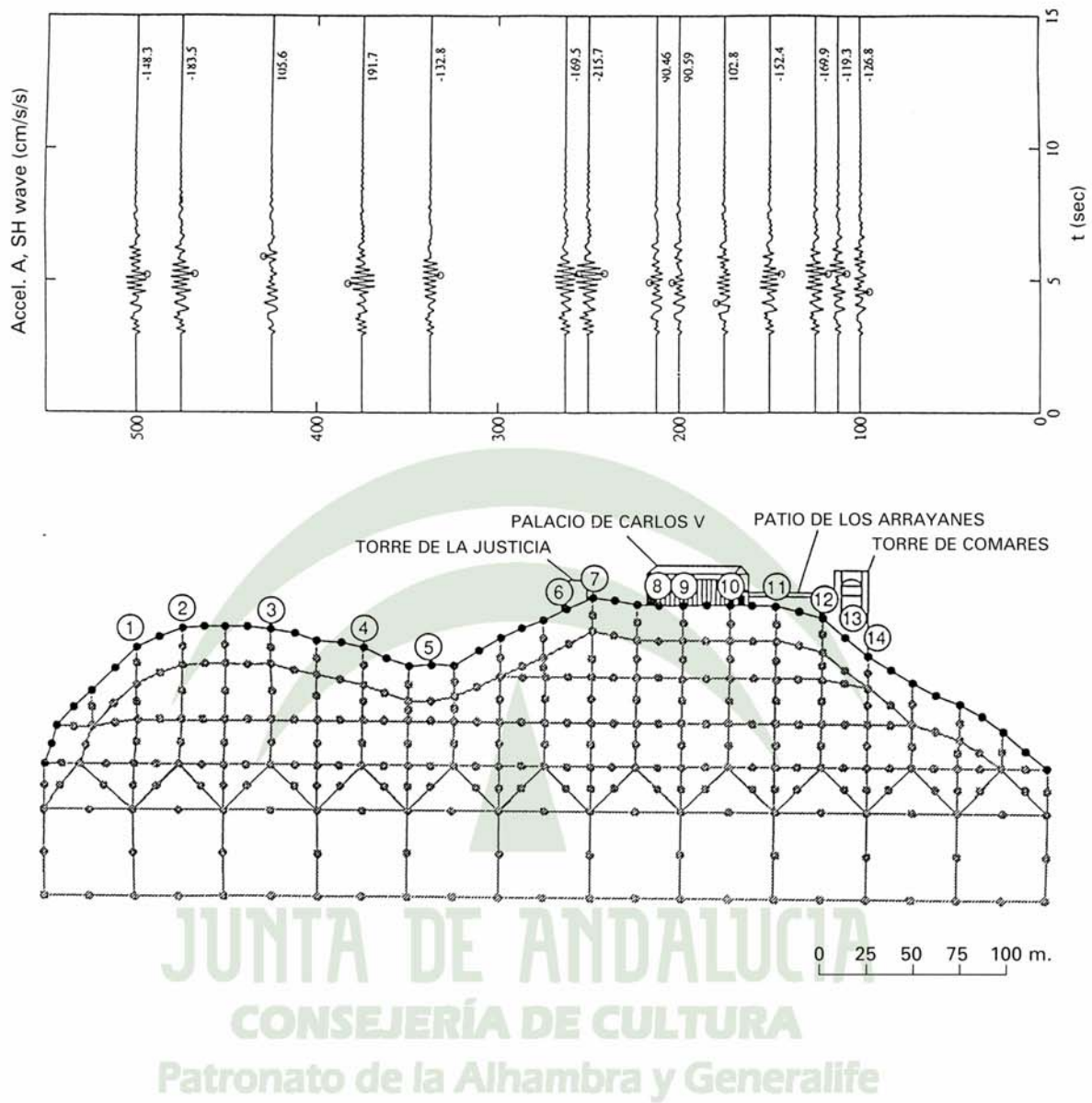
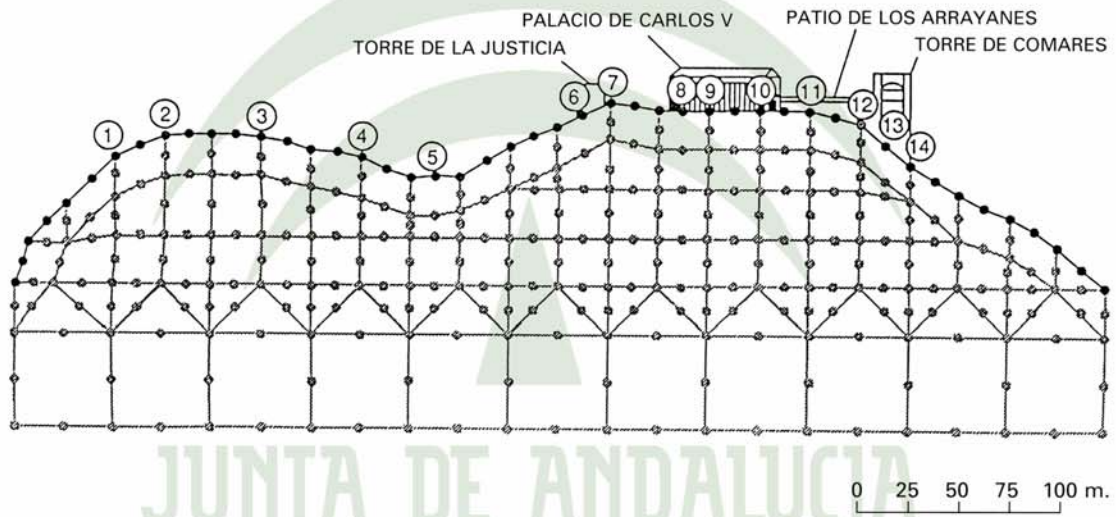
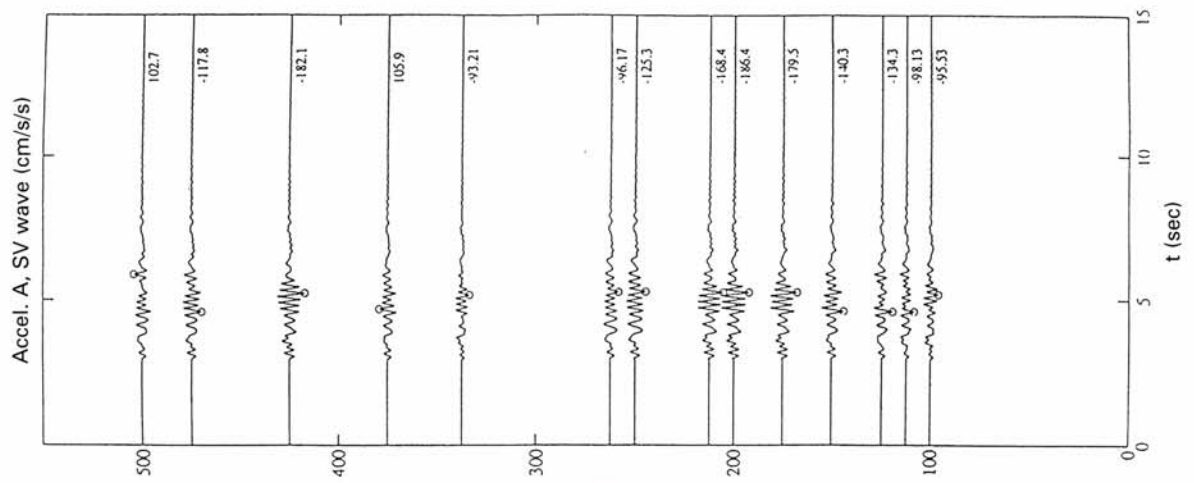


Fig. 4. Terremotos sintéticos - Ondas SH.



JUNTA DE ANDALUCÍA
 CONSEJERÍA DE CULTURA
 Patronato de la Alhambra y Generalife

Fig. 5. Terremotos sintéticos - Ondas SV.

N-S TOPOGRAPHIC CROSS-SECTION OF THE ALHAMBRA [out-of-plane response (SH wave)]

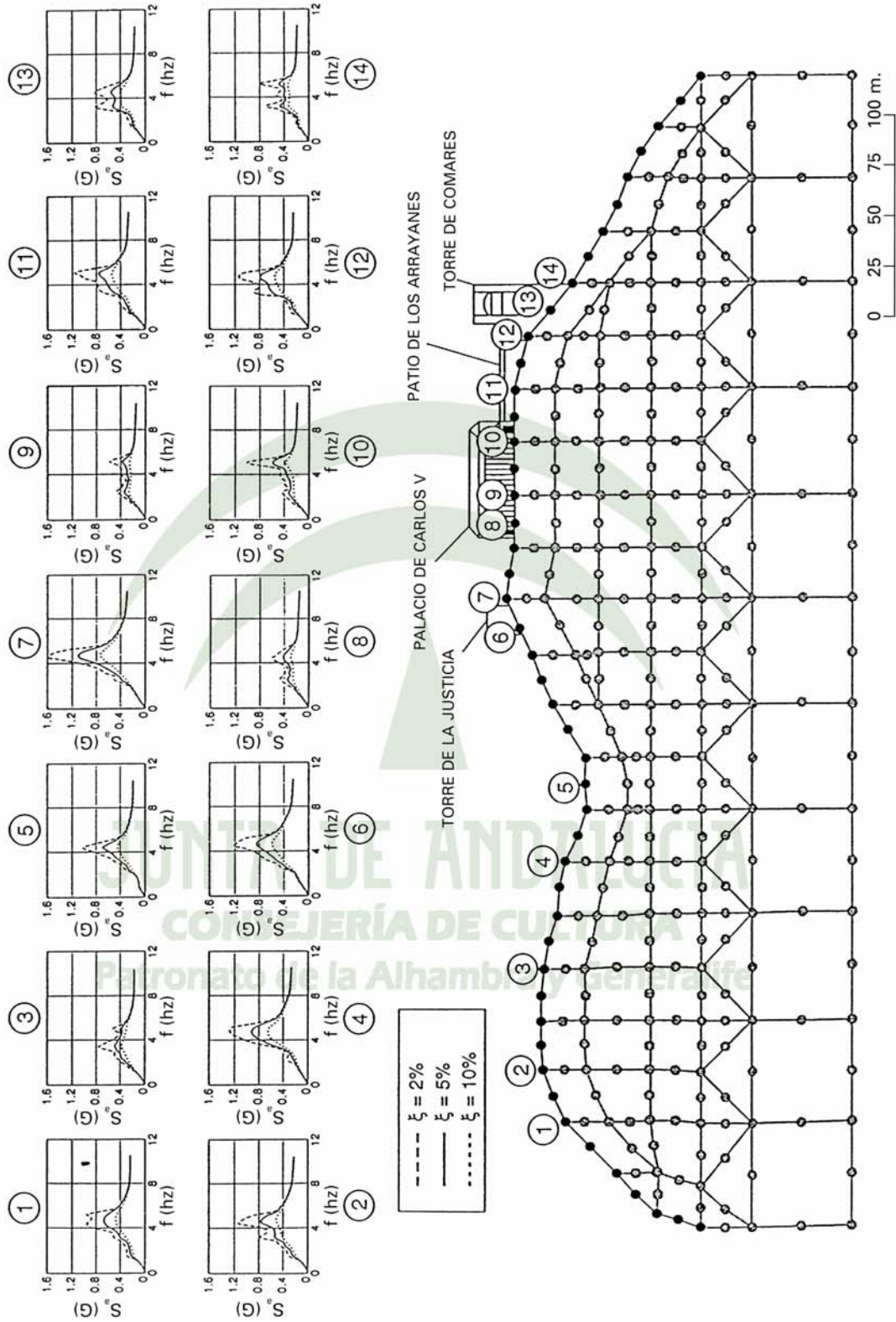


Fig. 6. Espectros de respuesta promedios - Ondas SH.

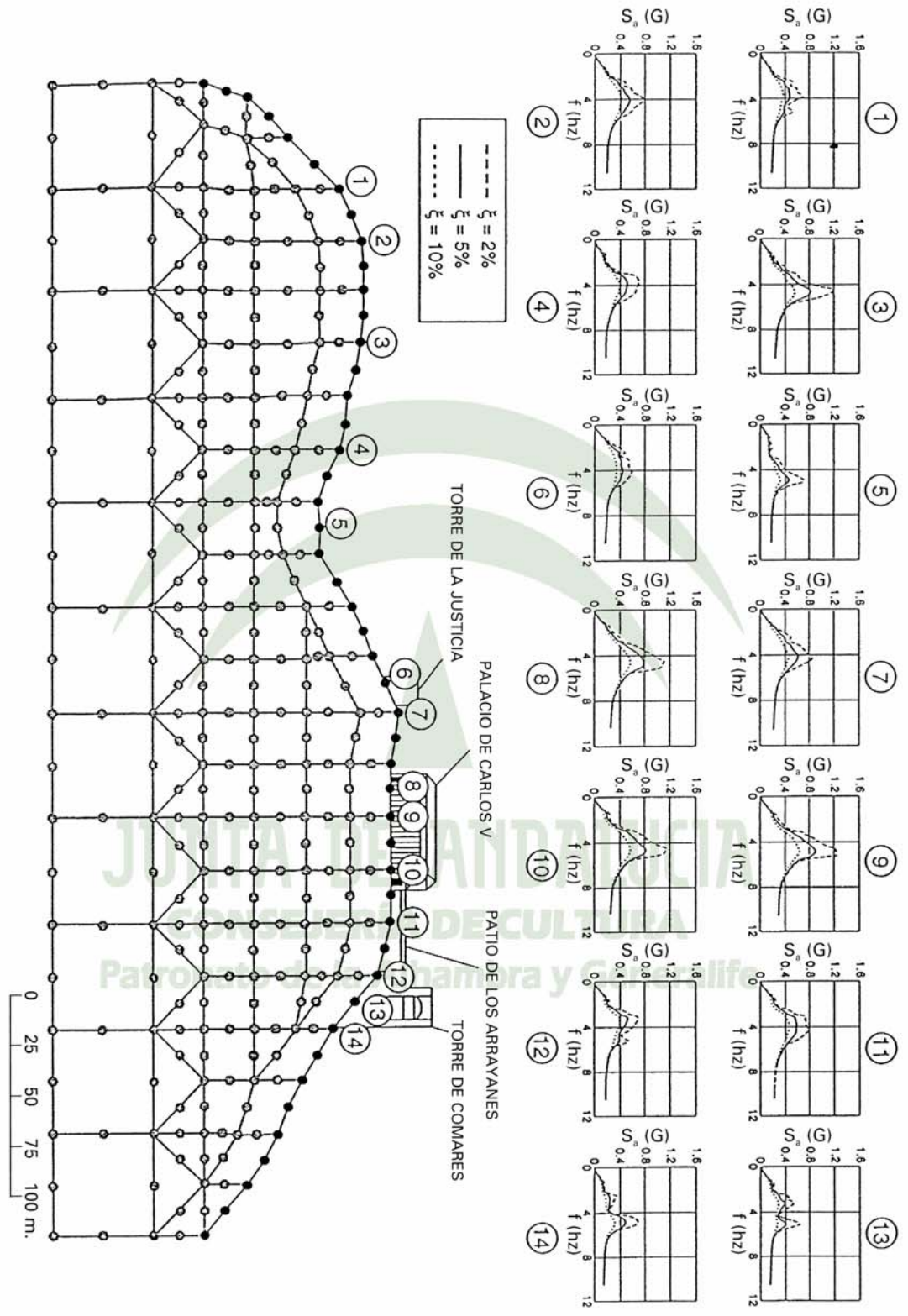


Fig. 7. Espectros de respuesta promedio - Ondas SV.

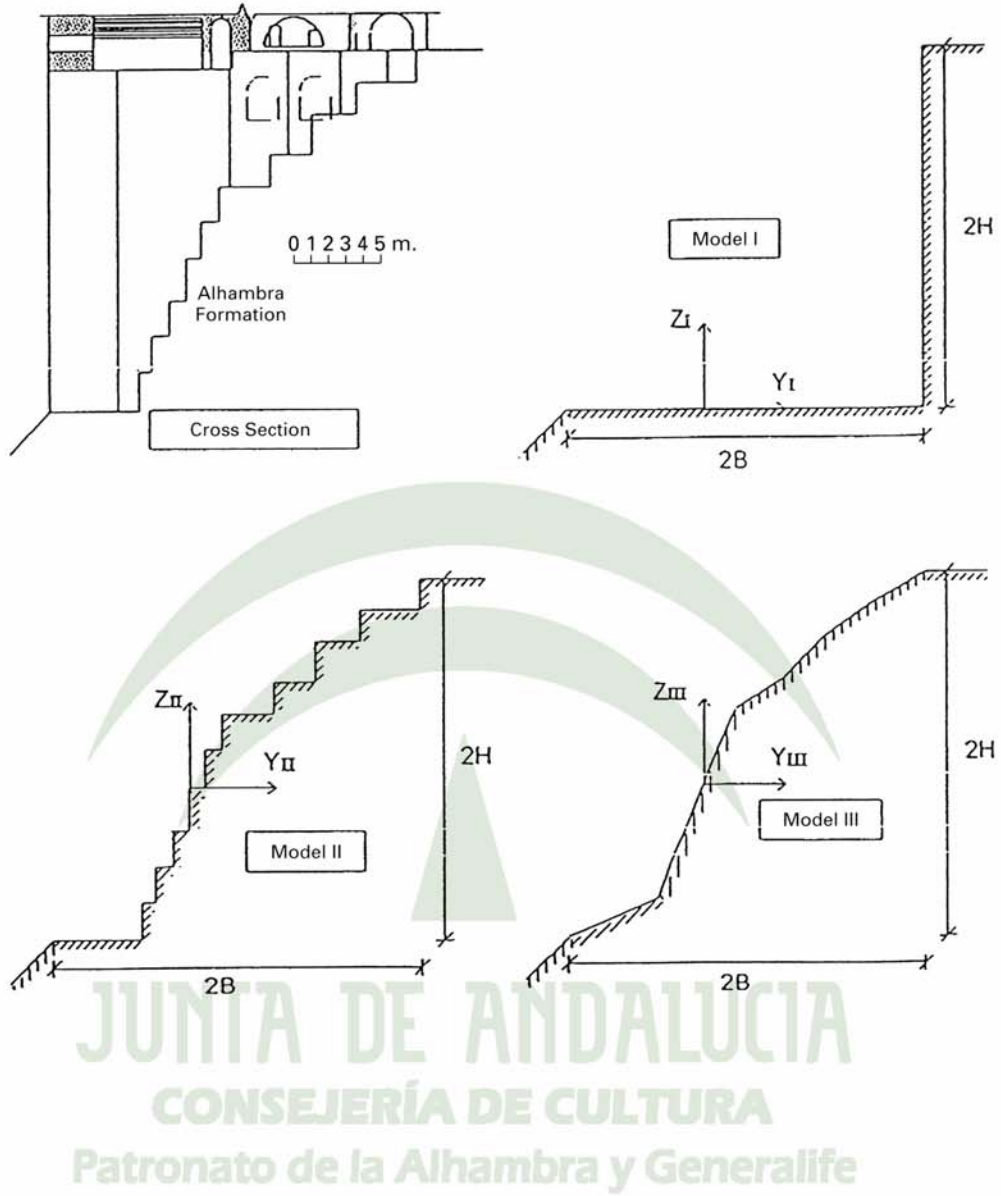


Fig. 8. Modelos de la cimentación.

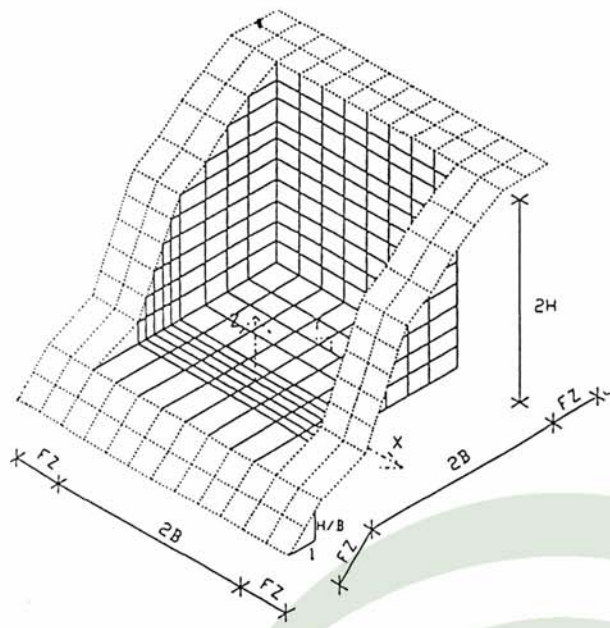


Fig. 9. Discretización del Modelo I.

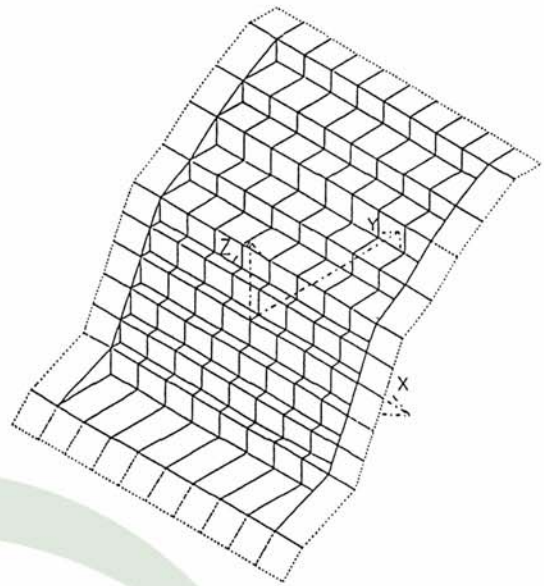


Fig. 10. Discretización del Modelo II.

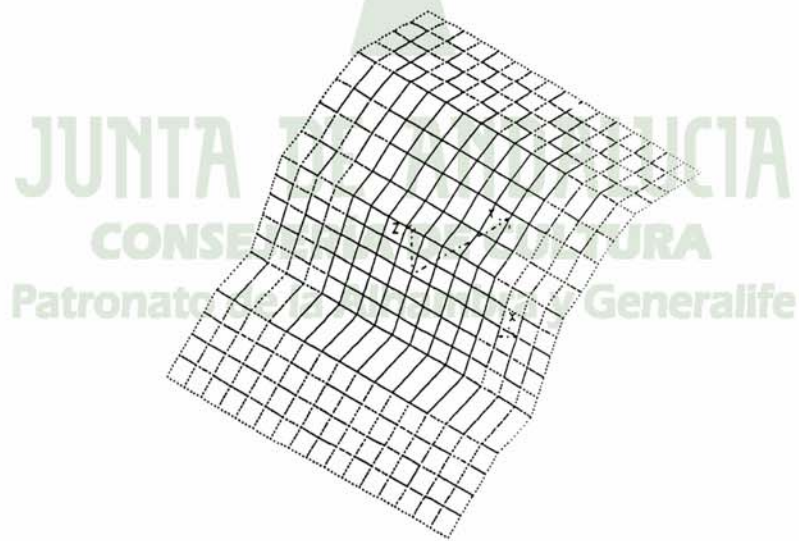


Fig. 11. Discretización del Modelo III.

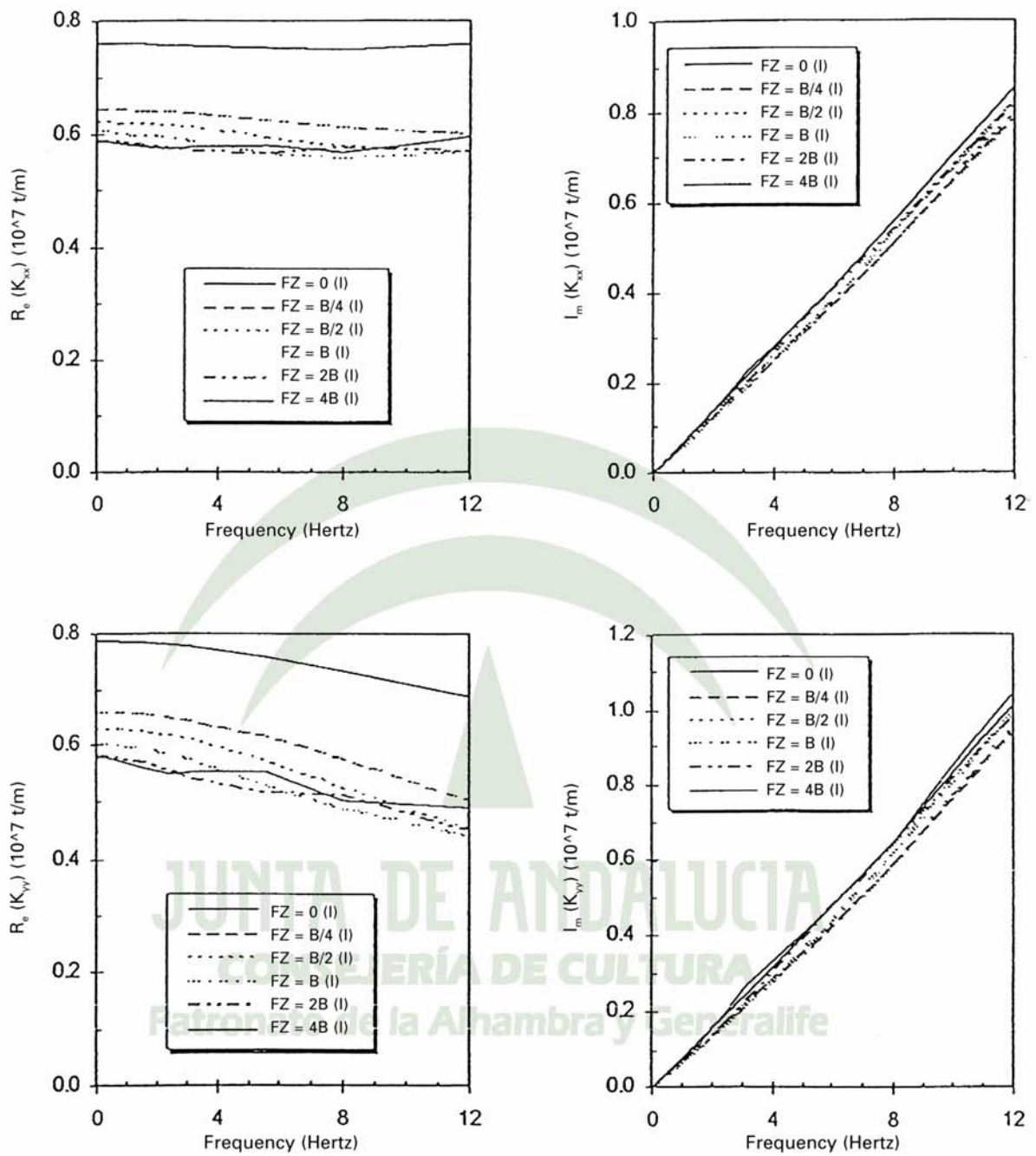


Fig. 12. Rigideces dinámicas K_{xx} y K_{yy}

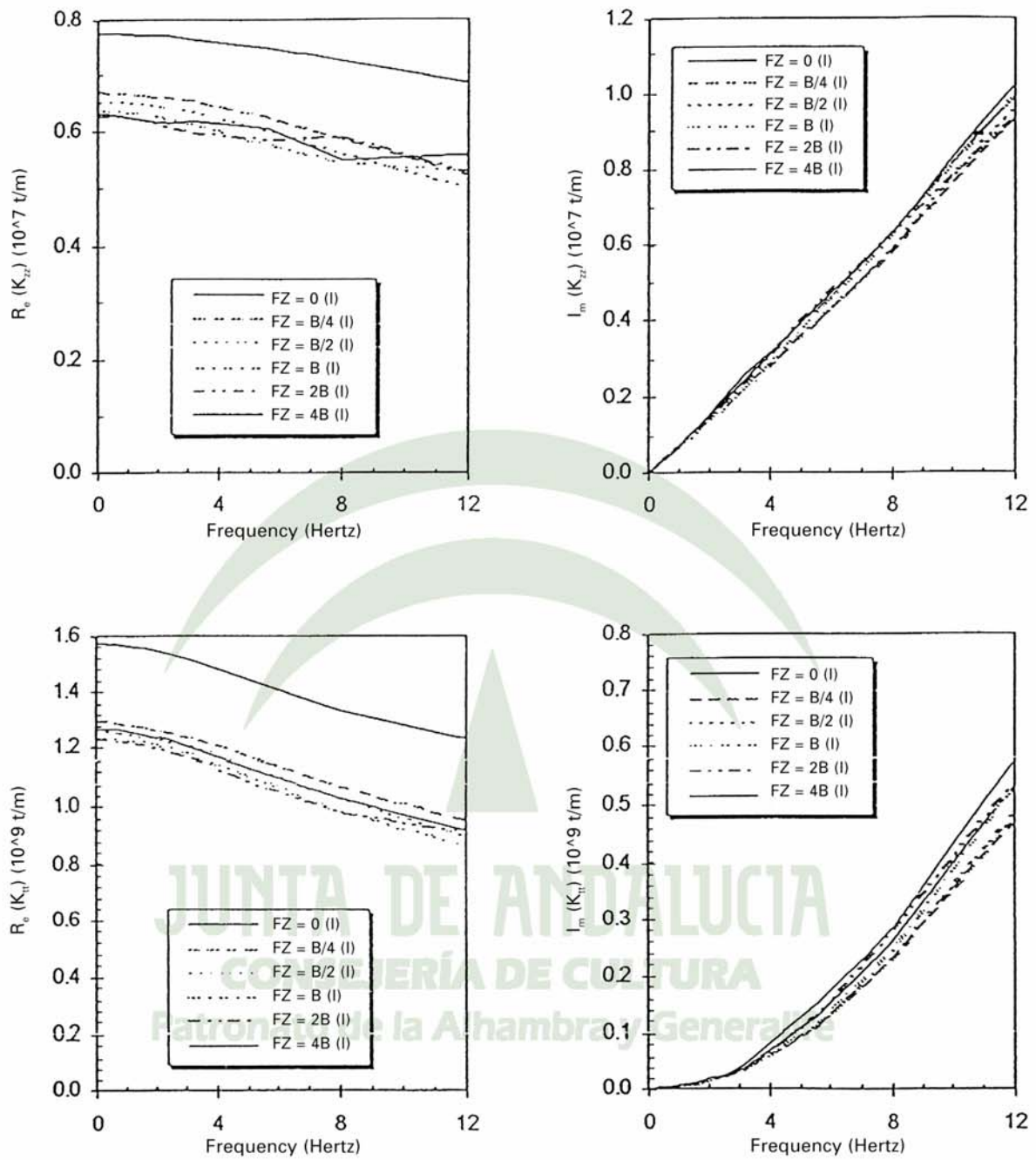


Fig. 13. Rigideces dinámicas K_{zz} y K_n

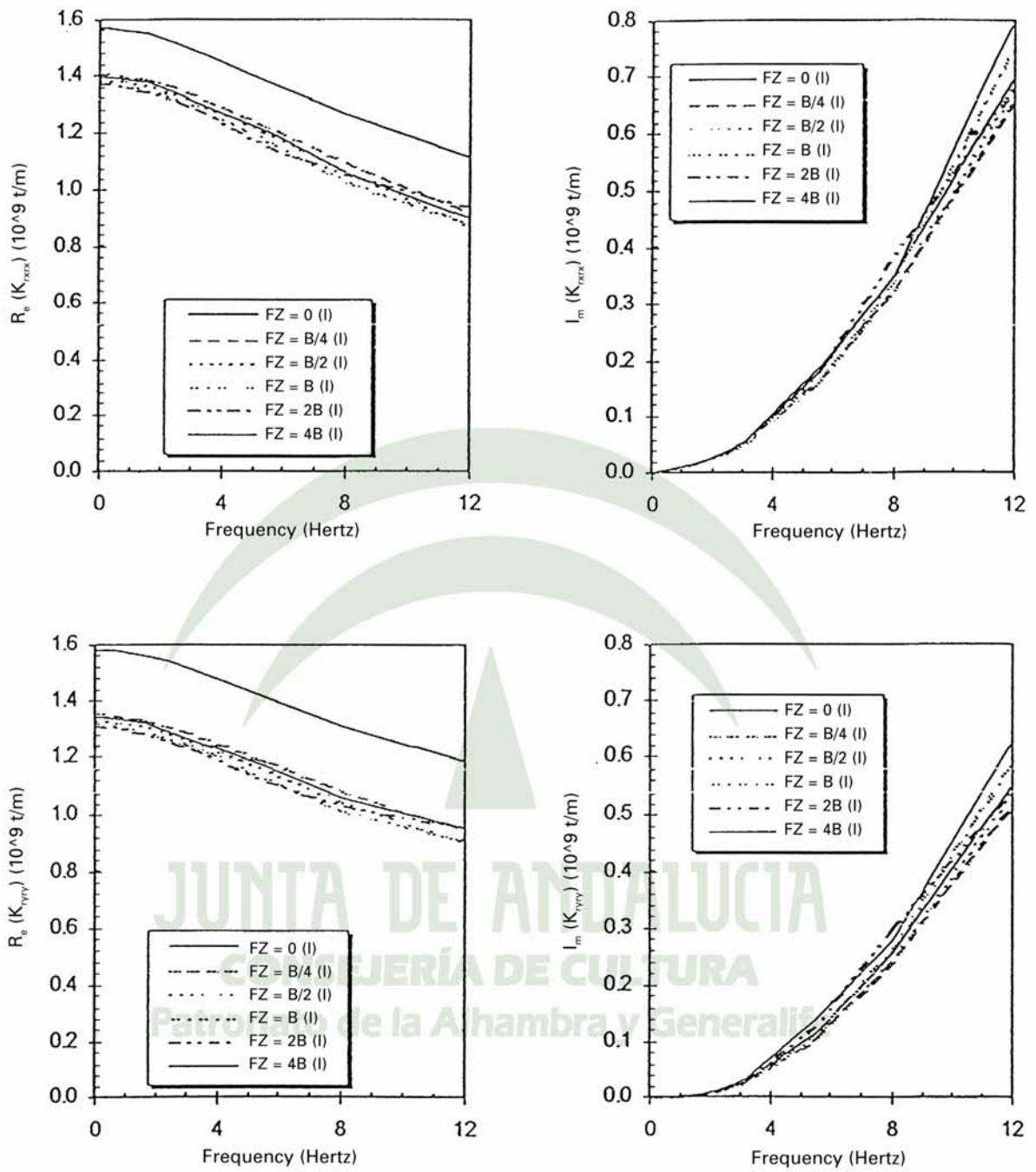


Fig. 14. Rigideces dinámicas K_{xx} y K_{yy}

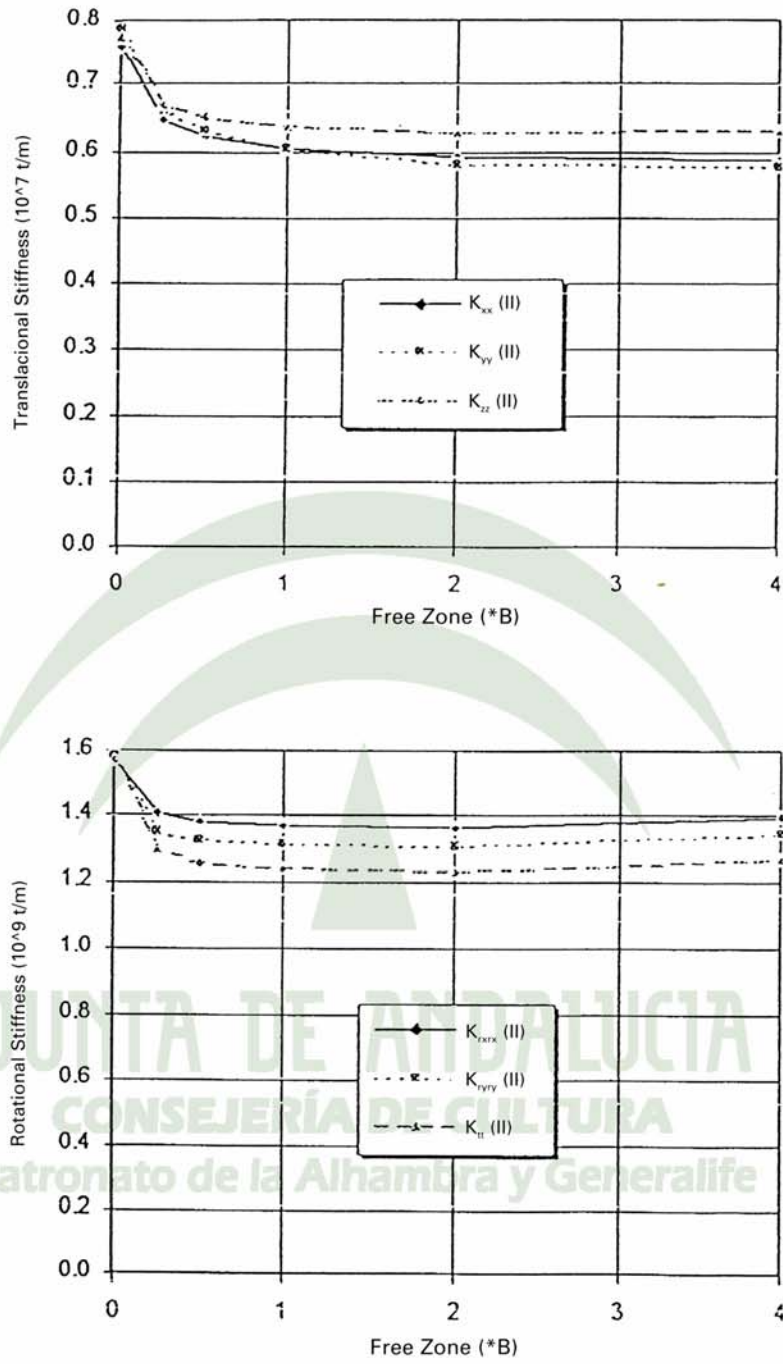


Fig. 15. Convergencia de las rigideces estáticas.

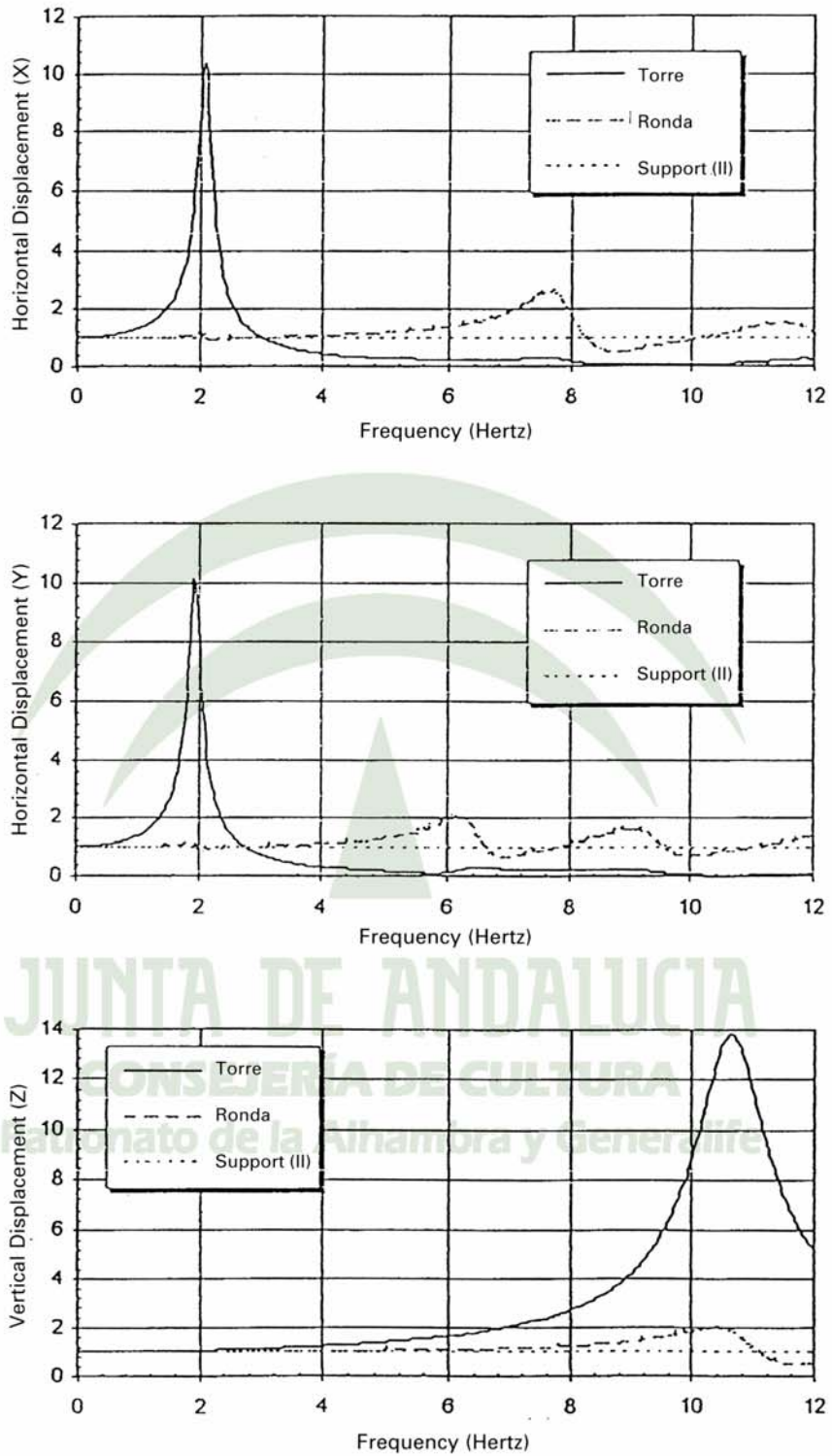


Fig. 16. Funciones de transferencia base rígida.

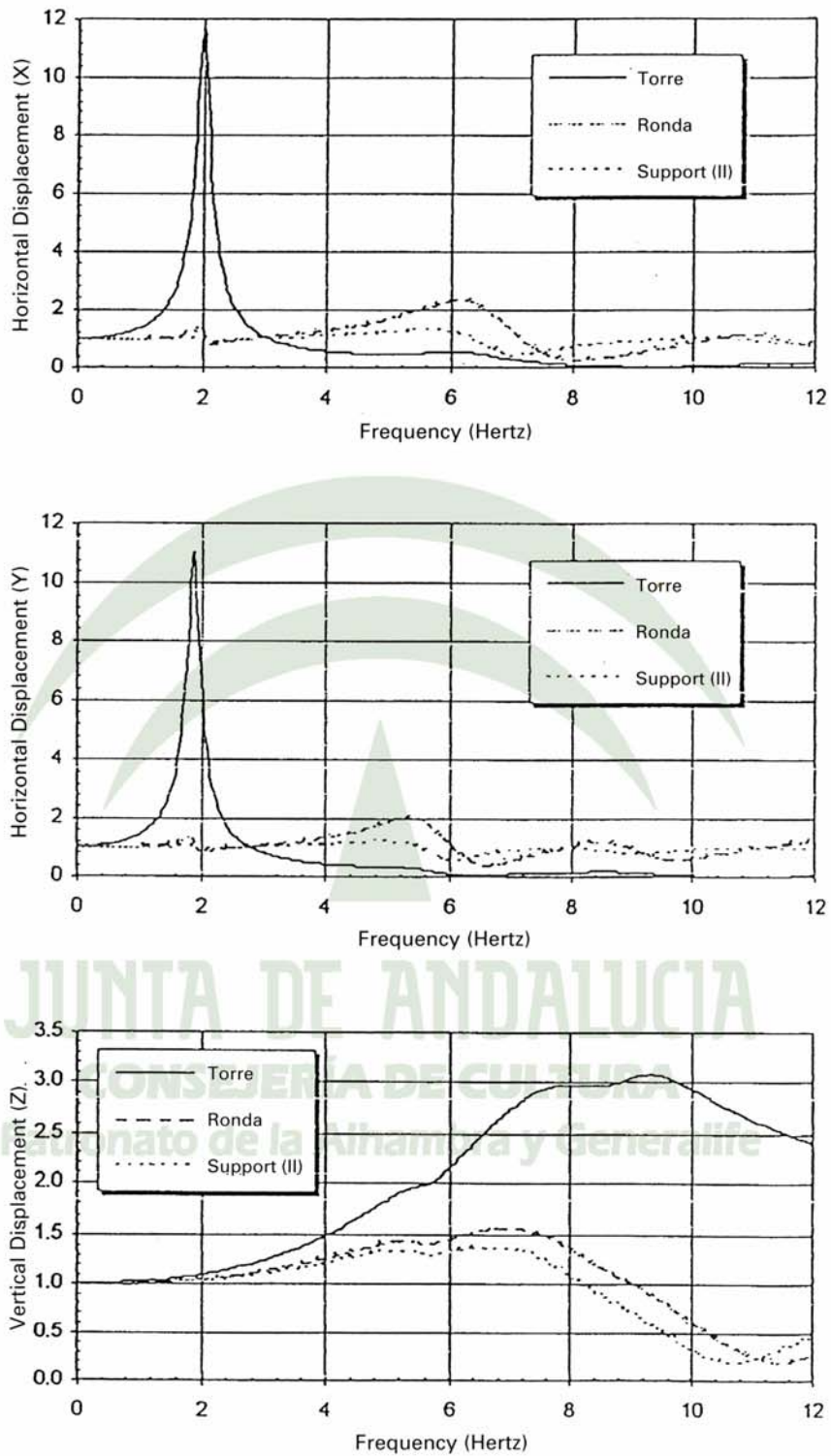


Fig. 17. Funciones de transferencia Modelo II de la cimentación.

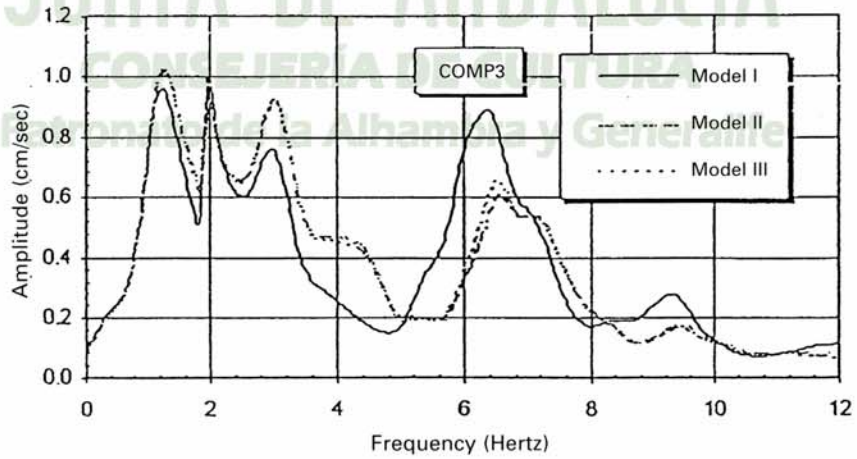
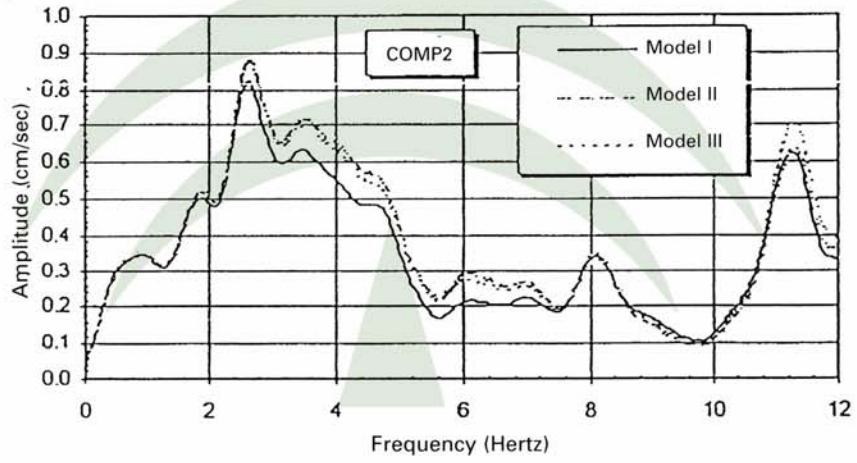
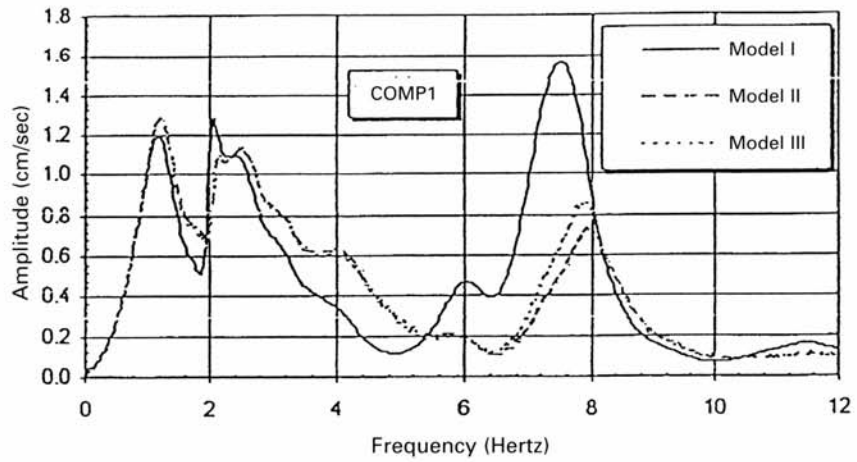


Fig. 18. Espectros de Fourier del movimiento del suelo (terremoto del 30 de Diciembre de 1993).

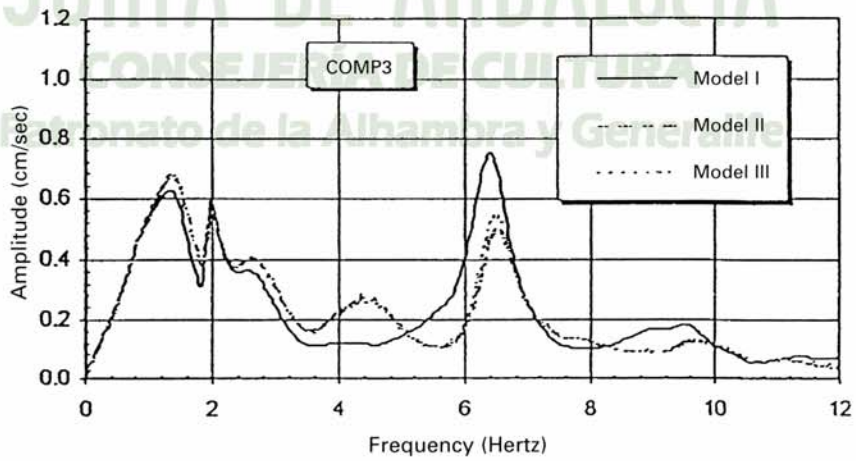
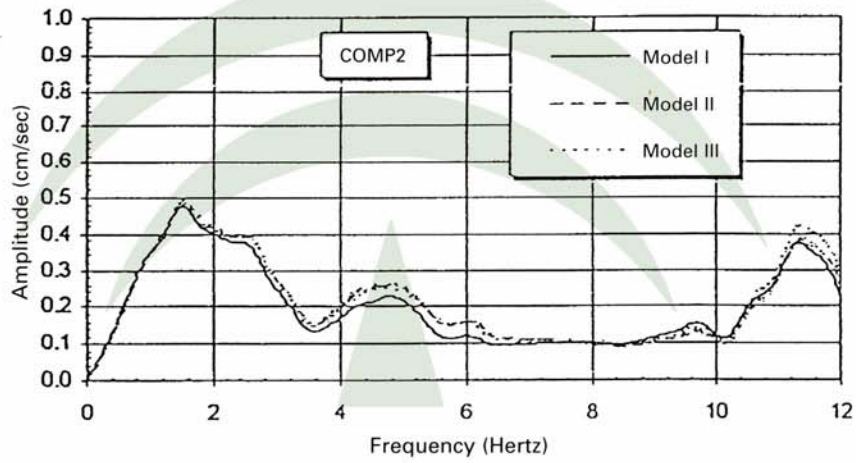
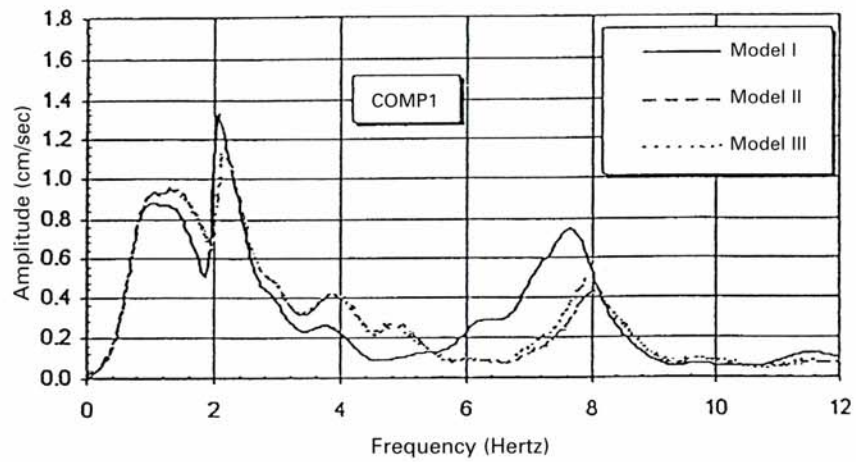


Fig. 19. Espectros de Fourier del movimiento del suelo (terremoto del 4 de Enero de 1994).

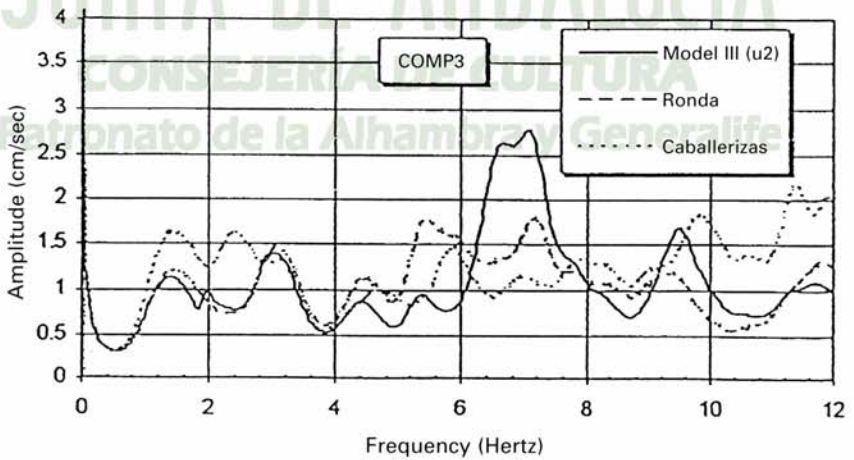
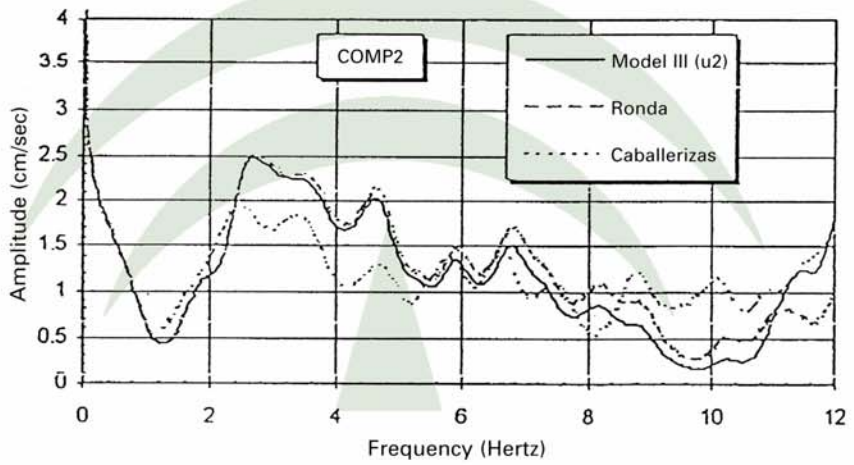
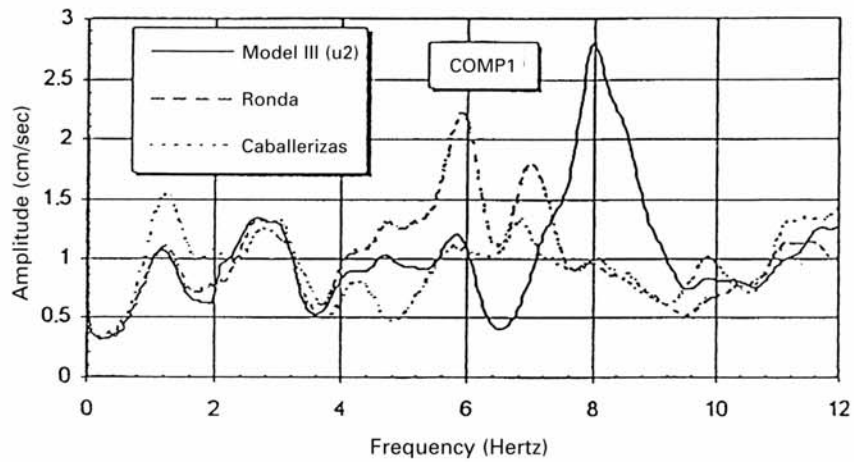


Fig. 20. Funciones de transferencia desde Santa Fe (terremoto del 30 de Diciembre de 1993).

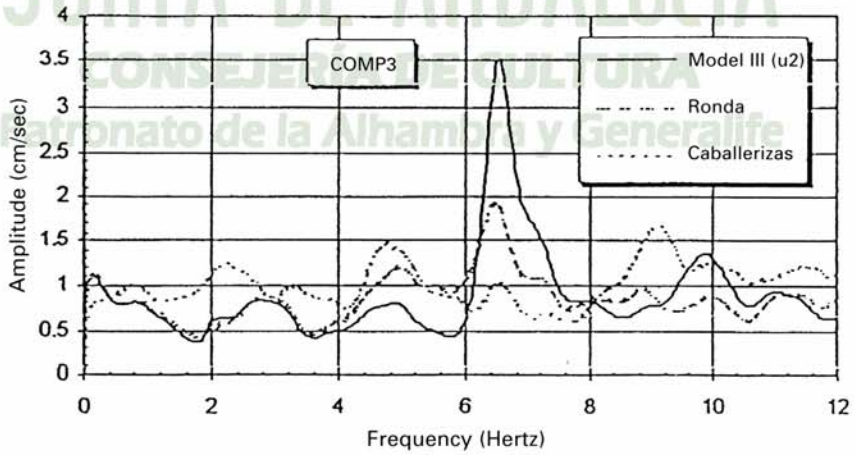
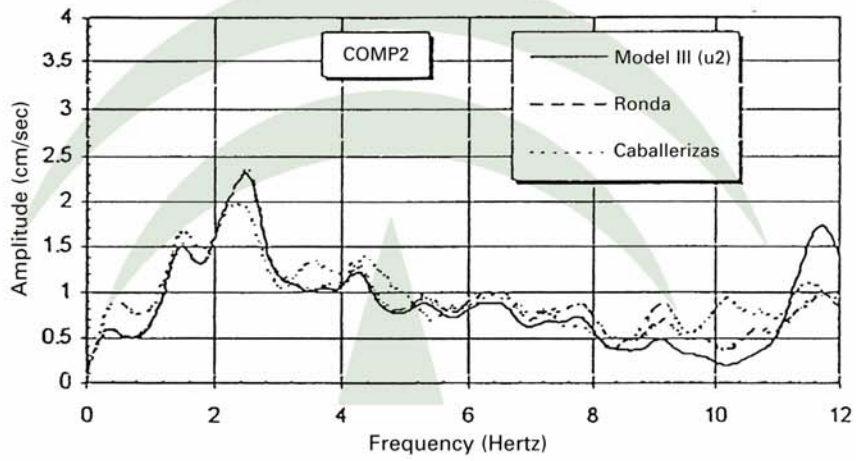
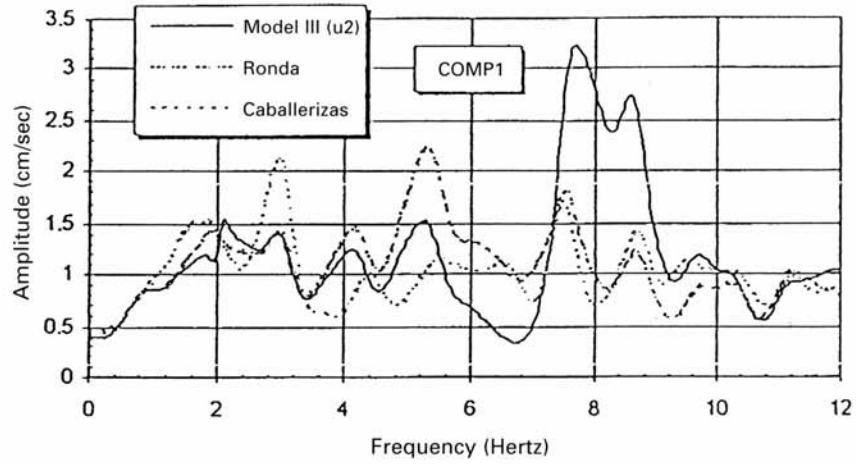


Fig. 21. Funciones de transferencia desde Santa Fe (terremoto del 4 de Enero de 1994).