



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](mailto:biblioteca.pag@juntadeandalucia.es)**

## CARACTERIZACION DINAMICA DE LOS MATERIALES

---

VICENTE CUELLAR MIRASOL \*

**E**l presente estudio se inscribe dentro del programa de investigación que actualmente está desarrollando el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, (CEDEX) para el Patronato de la Alhambra con el fin de determinar el estado de las estructuras y cimentaciones de su conjunto monumental. Ha tenido como objetivo determinar los parámetros que caracterizan el comportamiento dinámico del terreno y de los materiales que constituyen la cimentación y muros del palacio de Comares. En él se comentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para obtener la variación del módulo de rigidez transversal con el nivel de deformación tangencial en cada uno de esos materiales y se concluye sobre la bondad de las estimaciones realizadas, una vez analizada la respuesta elástica de la estructura frente a terremotos de magnitud  $M = 5$  en la escala de Richter, recientemente registrados en el piso superior y sótanos de la Torre.

### MATERIALES DEL TERRENO Y LA ESTRUCTURA

Como ya se comenta en otras contribuciones a este Simposium, la Torre de Comares (ver Fig. 1) es una estructura de planta cuadrada de 17'5 m de lado y 25 m de altura situada en la parte superior de una ladera de 50 m de altura a cuyo pie discurre el río Darro. El material del emplazamiento está constituido principalmente por un conglomerado de la "formación Alhambra", con 60% de partículas de cuarcita y esquisto de tamaño grava o superior embebidas en una matriz limo-arcillosa. Los ensayos de sismica de refracción realizados sobre la ladera, al pie de la

estructura, han revelado la existencia en el terreno de una zona superior descomprimida de 5 m de espesor, con un valor medio de velocidad de propagación de las ondas  $P$  de 570 m/s, que cubre materiales más rígidos pero de la misma naturaleza. Este mismo tipo de materiales, cementados con cal y compactados en capas delgadas, constituye el material de construcción localmente denominado "tapial" utilizado por los árabes en el siglo XIII en la cimentación y muros de la Torre.

Para definir las propiedades dinámicas de la cimentación se aprovecharon varios sondeos que, con el fin de determinar el contorno geométrico de la misma, se perforaron desde el primer piso de la Torre y en la ladera, al pie de la estructura (ver Fig. 1). Por otro lado, y teniendo en cuenta las modificaciones estructurales a las que el edificio se ha visto sometido a lo largo de su historia se creyó en principio conveniente distinguir por zonas tres tipos de "tapial", tal y como se indica en la figura 1.

### CARACTERIZACION GEOMECANICA DE LA FORMACION ALHAMBRA

Dada la gran dificultad de obtener muestras inalteradas de la "formación Alhambra" para ser ensayadas en laboratorio, sus propiedades dinámicas se han determinado "in situ" mediante ensayos cíclicos de carga horizontal con placa, realizados en dos zanjas excavadas hasta una profundidad de 2 m en los alrededores de la Torre y con ensayos dinámicos de ondas superficiales ejecutados junto a ellas. En la figura 2 se indica la distribución de ensayos en cada zanja y en la figura 3 se muestra, a título de ejemplo, los asientos obtenidos en los ciclos de carga-descarga

impuestos en uno de los ensayos de carga con placa realizados. Por otro lado, en la parte superior de la figura 4 se ha representado con línea de puntos la curva de dispersión que sintetiza los resultados obtenidos en los ensayos dinámicos con ondas superficiales realizados junto a una de las zanjas. La curva teórica, de trazo continuo, que ajusta dichos datos corresponde al perfil de velocidades de propagación  $v_i$  de ondas tangenciales indicadas en la parte inferior de dicha figura. Dicho perfil se ha calculado tal y como sugieren Roesset et al. (1991) utilizando las funciones de Green derivadas por Kausel (1981). Para ello se ha partido de un primer perfil de velocidades, que se ha definido asignando a cada valor de velocidad de la curva de dispersión obtenida experimentalmente una profundidad equivalente a la mitad de la longitud de onda correspondiente, y se ha determinado, mediante un análisis teórico en 3D con simetría axial, la curva de dispersión que corresponde a dicho perfil. Comparando esta última curva con la obtenida experimentalmente, se ha modificado el perfil de velocidades y se ha repetido este proceso iterativamente hasta conseguir un ajuste satisfactorio entre las curvas de dispersión teórica y experimental.

La importancia que desde un punto de vista geotécnico tienen estos ensayos radica en que a partir de los valores  $v_i$  así obtenidos puede definirse el perfil de módulos elásticos  $E_{max}$  del terreno utilizando las expresiones siguientes:

$$E_{max} = 2(1 + \nu) G_{max} \quad (1)$$

$$G_{max} = \rho v_i \quad (2)$$

siendo  $\rho$  la densidad aparente del terreno y  $\nu$  el coeficiente de Poisson.

Para modelar la influencia del nivel de deformación en el valor del módulo secante  $E$  cuando, como en el caso actual cabe esperar que las deformaciones inducidas por los terremotos en el terreno sean pequeñas, se ha completado la información obtenida en los ensayos dinámicos con la proporcionada por los ciclos de descarga y recarga realizados en los ensayos estáticos de carga con placa. Para ello se ha supuesto que el material es isotrópico y que, tratándose de un suelo duro y preconsolidado, su comportamiento no lineal viene regido por el siguiente modelo hiperbólico:

$$\frac{E}{E_{max}} = \frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + b G_{max} \gamma} \quad (3)$$

Para definir dicho modelo se necesitan únicamente dos parámetros  $G_{max}$  y  $b$ . El parámetro  $G_{max}$  puede deducirse directamente del perfil de velocidades  $v_i$  utilizando la Ec. (2) y para obtener el parámetro  $b$  se ha seguido un proceso de ajuste en el que se ha barrido un rango de valores del producto adi-

mensional  $b G_{max}$ , que define la forma del modelo hiperbólico, tratando de reproducir lo más ajustadamente posible las ramas de recarga de los ciclos intermedios impuestos en cada ensayo de placa. Con este fin se ha discretizado el terreno de apoyo de la placa en los nueve elementos indicados en la figura 5 y para cada hipérbola considerada se ha obtenido paso a paso la curva de asientos de la placa integrando para cada escalón de carga (10 KPa) las deformaciones  $\epsilon_A$ , en la dirección del empuje, de cada uno de los elementos del terreno teniendo en cuenta su comportamiento no-lineal. En este proceso se ha supuesto que la distribución de tensiones  $\sigma_A$ , en la dirección del empuje, y  $\sigma_R$ , en la dirección perpendicular, para cada elemento y nivel de carga  $\sigma$  es la deducida por Gerrard y Harrison (1970) para placa rígida sobre semiespacio de Boussinesq con  $\nu = 0.35$ . En función de dichas tensiones se han obtenido las deformaciones axial  $\epsilon_A$  y tangencial máxima  $\gamma_{max}$  en el centro de cada elemento utilizando las siguientes expresiones:

$$\epsilon_A = \frac{1}{E} (\sigma_A - 2\nu \sigma_R) \quad (4)$$

$$\gamma_{max} = \frac{1 + \nu}{E} (\sigma_A - \sigma_R) \quad (5)$$

En la figura 5 puede observarse para cada nivel de empuje sobre la placa  $\sigma$  la distribución de deformaciones  $\epsilon_A$  así obtenida. De esta manera, utilizando el valor de  $\gamma_{max}$  dado por la Ec. (5) se ha podido modificar en cada escalón de carga de dicho proceso el valor  $E$  de cada elemento entrando con el primero de estos dos valores en la Ec. (3).

Como curva representativa del comportamiento mecánico de la "formación Alhambra" para pequeñas deformaciones se adoptó la hipérbola dada por el producto  $b G_{max} = 1.510$ , que reproduce aceptablemente bien (ver Fig. 6) los ciclos de recarga de 0 a 300 KPa y los tramos de carga noval de 300 a 500 KPa de los gráficos de asientos obtenidos en las paredes que menos se deforman.

Por otro lado es fácil demostrar, aplicando el modelo hiperbólico a los resultados que se pudieran obtener en ensayos triaxiales de laboratorio, que, para una presión de confinamiento determinada, el parámetro  $b$  está inversamente relacionado con la resistencia última del material. Basta para ello sustituir en la Ec. (3) las variables  $G_{max}$  y  $\gamma$  por sus expresiones en función de  $E_{max}$  y  $\epsilon_A$  dadas respectivamente por las Ecs. (1) y (6) siguiente:

$$\gamma = (1 + \nu) \epsilon_A \quad (6)$$

para obtener

$$\frac{E}{E_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{b E_{max}}{2} \epsilon_A} \quad (7)$$

o su equivalente

$$\sigma_A = \frac{\varepsilon_A}{\frac{1}{E_{max}} + \frac{b}{2}} \varepsilon_A \quad (8)$$

en la que se verifica

$$\lim_{\varepsilon_A \rightarrow \infty} \sigma_A = \frac{2}{b} \varepsilon_A \quad (9)$$

De todo ello se desprende que el producto  $b G_{max} = 1.510$ , adoptado en la hipérbola representativa del comportamiento mecánico para bajas deformaciones de la "formación Alhambra", proporciona, para los valores de  $G_{max}$  compatibles con el perfil de velocidades dado en la figura 3, valores de resistencia del terreno que oscilan entre 140 KPa y 270 KPa correspondientes a profundidades comprendidas entre 1 y 5 m respectivamente.

Para definir el comportamiento geomecánico del material bajo la cimentación de la Torre se ha mantenido el producto  $b G_{max}$  del modelo anterior y se ha adoptado como valor representativo del material un valor de  $G_{max} = 790$  MPa compatible con un valor medio de velocidad de propagación de las ondas tangenciales en los ensayos *cross-hole* de 600 m/s (se obtuvo un rango de valores que osciló entre 500 y 700 m/seg) y un peso específico aparente del terreno de 21'5 KN/m<sup>3</sup>. Se obtiene así para este último modelo un parámetro  $b = 1'91$  equivalente según la Ec. (9) a una resistencia última del material de 1.050 KPa.

En lo que se refiere a la capacidad del material para disipar energía por rozamiento interno entre sus partículas, en la figura 7 se ha dibujado, junto con el modelo hiperbólico representativo de su comportamiento dinámico, la curva de variación de la razón de amortiguamiento,  $D$ , con el nivel de deformación tangencial determinada teniendo en cuenta los datos obtenidos por Kokusho y Eshasi (1981) en formaciones pleistocenas de Japón con un porcentaje de grava similar al de la "formación Alhambra".

## PROPIEDADES MECANICAS DEL TAPIAL

En los ensayos de tomografía sísmica y sísmica de refracción llevados a cabo en las paredes y muros de los pisos superiores de la Torre (Zona 1 de la Fig. 1) se obtuvieron velocidades  $v_p$  que oscilaron entre 900 m/s y 2.000 m/s. Suponiendo un coeficiente de Poisson de 0'30, a dicho rango le corresponden valores  $v_s$  comprendidos entre 500 y 1.000 m/s. Para un peso específico aparente de 21'5 KN/m<sup>3</sup> en estos

materiales, se obtienen según la Ec. (2) valores de  $G_{max}$  que oscilan entre 550 MPa y 2.200 MPa. Por otro lado tratando de ajustar un modelo hiperbólico a los resultados de ensayos sónicos y de compresión simple obtenidos en laboratorio con probetas de este tipo de tapial, en las que se determinaron resistencias comprendidas entre 2.500 y 3.000 KPa, se obtuvo el modelo  $b G_{max} = 935$ . Esto ha permitido asignar al rango de valores de  $G_{max}$  obtenido "in situ" valores de resistencia que varían entre 1.175 y 4.700 KPa, como puede comprobarse utilizando nuevamente la Ec. (9).

Esos mismos ensayos de laboratorio ejecutados en siete probetas extraídas del tapial de la cimentación (Zona 3 de la Fig. 1) con resistencias comprendidas entre 6.700 y 9.700 KPa y pesos específicos aparentes que oscilaron entre 20'5 y 23'5 KN/m<sup>3</sup> permitieron fijar para este material un modelo hiperbólico dado por el producto  $b G_{max} = 805$ , que para el rango de velocidades  $v_s$  comprendidas entre 1.000 y 1.300 m/s, obtenido en los ensayos *cross-hole*, proporciona resistencias que oscilan entre 5.500 y 9.500 KPa, muy similares a las obtenidas en laboratorio. La figura 8 muestra el ajuste conseguido con este modelo, formulado en este caso utilizando la Ec. (8), a los datos obtenidos con una probeta cuya resistencia fue de 8.000 KPa.

En la Tabla 1 se indica, para el rango de deformaciones tangenciales que cabe esperar produzcan los terremotos, la razón de amortiguamiento  $D$  (%) estimada para cada uno de estos dos tipos de tapial:

TABLA 1  
VALORES D(%) ESTIMADOS

| DEFORMACION TANGENCIAL (ZONA 1) | TAPIAL DE LOS PISOS SUPERIORES (ZONA 3) | TAPIAL DE LA CIMENTACION |
|---------------------------------|---|--------------------------|
| 10 <sup>-5</sup>                | 0'2                                     | 0'15                     |
| 10 <sup>-4</sup>                | 1'5                                     | 1'0                      |
| 10 <sup>-3</sup>                | 8'5                                     | 7'0                      |

Finalmente y salvo en dos muros de la zona de sótanos denominada Zona 2 en la figura 1, que separan los habitáculos que en su tiempo debieron estar destinados a los cuerpos de guardia del paso de ronda norte de la estructura, y en los que se obtuvieron valores excesivamente bajos de las velocidades  $v_p$ , en todos los demás ensayos de transmisión realizados en esta zona se obtuvo el mismo rango de variación de  $v_s$  que el obtenido en la Zona 1, es decir valores comprendidos entre 500 y 1.000 m/s.

## COMPORTAMIENTO DE LA TORRE FRENTE A LOS TERREMOTOS

Con el fin de registrar la respuesta de la Torre frente a futuros terremotos, a principios del año 1993 se instalaron dos acelerómetros SSA-2 de la marca KINEMATRICS: uno en la base de la estructura y otro en su piso superior (ver Fig. 1). Desde entonces se han podido registrar dos terremotos de magnitud  $M = 5$  en la escala de Richter con epicentros a distancias de 73 y 94 Km del emplazamiento: el primero el 23 de Diciembre de 1993 y el segundo el 4 de Enero de 1994. En la figura 9 se han representado las historias de aceleraciones de la componente Este-Oeste registradas en la parte superior ( $a_{max} = 9 \text{ cm/seg}^2$ ) y en la base ( $a_{max} = 3 \text{ cm/seg}^2$ ) de la estructura durante el terremoto de Diciembre de 1993. Registros similares se obtuvieron en el evento del 4 de Enero de 1994. En la parte final del acelerograma registrado en la parte superior de la estructura puede identificarse fácilmente que el período propio de la Torre es de 0,5 seg. Entrando con dicho valor y la aceleración máxima registrada en la parte superior de la Torre en la figura 10 que proporciona, para distintos valores de la razón de amortiguamiento de la estructura, los espectros de respuesta del acelerograma registrado en su base, se obtiene un valor  $D$  ligeramente superior al 1%, que, admitiendo que el nivel máximo de deformación que un terremoto de dicha magnitud puede crear en ella es del orden de  $10^{-4}$  está de acuerdo con la razón de amortiguamiento estimada en la Tabla 1 para el tapial de la Zona 1.

Por último cabe decir que los estudios, del período propio de la estructura y de su respuesta frente a los sismos, realizados mediante los modelos de barras y Elementos Finitos que se comentan en otra contribución a este Simposium han permitido identificar los módulos de elasticidad con los que ha reaccionado la Torre frente a estos terremotos. Los valores obtenidos se sitúan dentro del rango de variación acotado en este trabajo si bien más próximos a su límite inferior que al valor medio.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la posibilidad de determinar mediante ensayos "in situ" cíclicos de carga con placa y dinámicos con ondas superficiales el comportamiento no lineal para pequeñas deformaciones de los materiales densos con un porcentaje

importante de grava que constituyen el conglomerado de la "formación Alhambra". Tanto los ensayos dinámicos de sismica de refracción como de propagación de ondas superficiales han demostrado la existencia de una zona descomprimida de 5 m de espesor en la parte superior de esa formación con un valor medio de velocidad de propagación de las ondas tangenciales mitad del obtenido mediante ensayos *cross-hole* bajo la cimentación de la Torre de Comares. Por otro lado se ha podido comprobar la utilidad de la tomografía sísmica de transmisión y de la sísmica de refracción para obtener las propiedades dinámicas de la cimentación y muros de tapial de dicho palacio. La instrumentación sísmica de la Torre ha permitido definir su período natural y comprobar para pequeñas deformaciones la razón de amortiguamiento estimada para el tapial de los muros de la estructura. Los registros de los terremotos de magnitud  $M = 5$  producidos en Diciembre de 1993 y Enero de 1994 han sido de gran utilidad para identificar los módulos elásticos más adecuados dentro del rango de variación de valores obtenidos en este trabajo.

\* CEDEX, Laboratorio de Geotecnia.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece junto con la colaboración prestada para la realización de este trabajo por el equipo directivo del Patronato de la Alhambra, la ayuda financiera proporcionada por la Secretaría General del Plan Nacional de I + D al proyecto de investigación PAT 91-0141 desarrollado en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

## BIBLIOGRAFIA

- E. CARREÑO, *Comunicación personal*. Madrid, Instituto Geográfico Nacional, 1994.
- C.M. GERRARD y W.J. HARRISON, *Circular Loads Applied to a Cross-Anisotropic Elastic Half-Space*, "C.S.I.R.O. Aust. Div. App. Geomech. Tech. Pap.", nº 9, (1970).
- E. KAUSEL, *An Explicit Solution for the Green Functions for Dynamic Loads in Layered Media*, "Research Report S81-13, Department of Civil Engineering MIT", (1981).
- T. KOKUSHO y V. ESHASI, *Cyclic Triaxial Test on Sands and Coarse Materials*, "Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", vol. 1, (1981).
- J.M. ROESSET; D.M. CHANG y K.H. STOKOE II, *Comparison of 2D and 3D Models for Analysis of Surface Wave Tests*, "Proc. 5th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering", (Karlsruhe 1991).

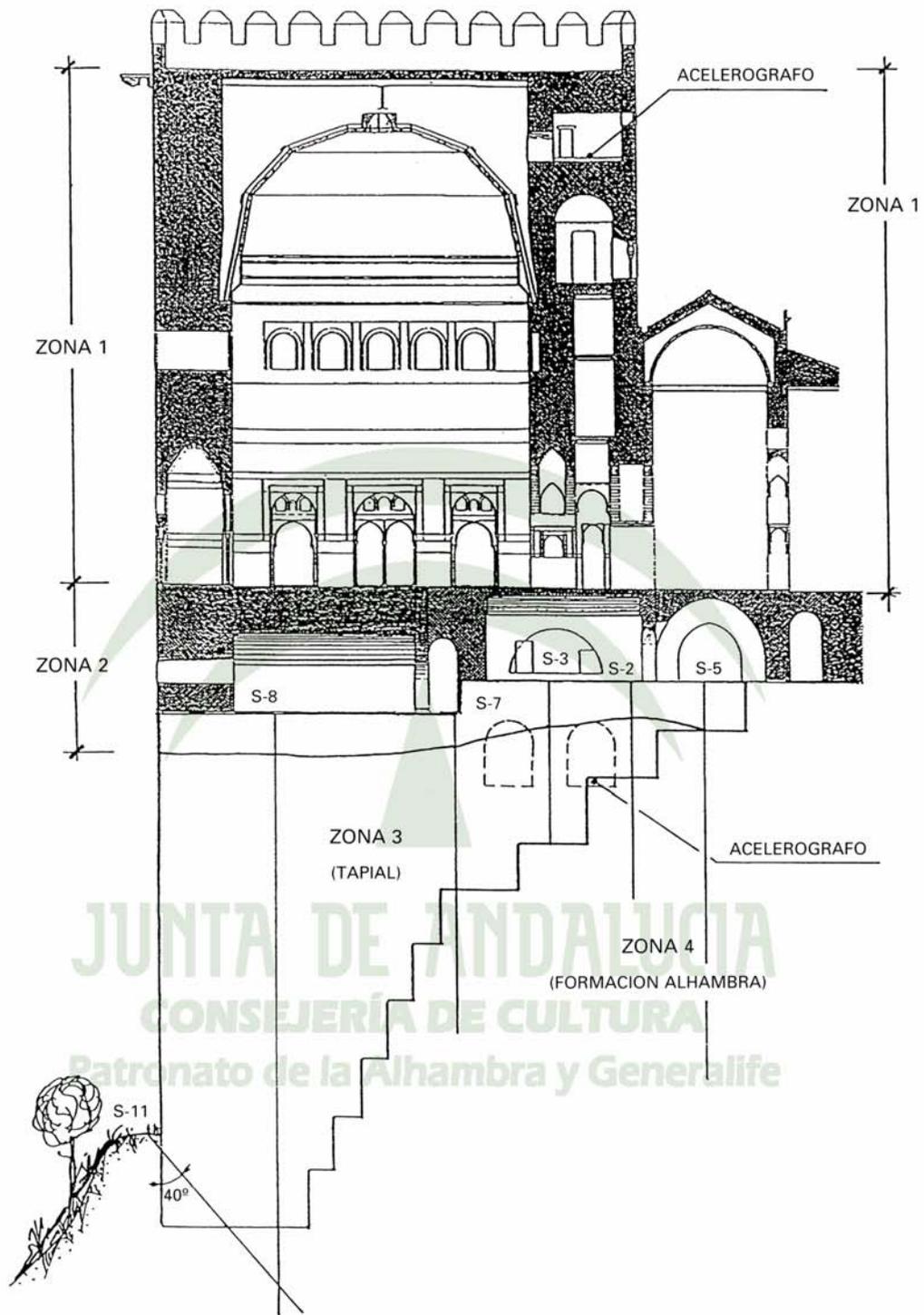


Fig. 1. Zonificación de la estructura y cimentación de la Torre de Comares.

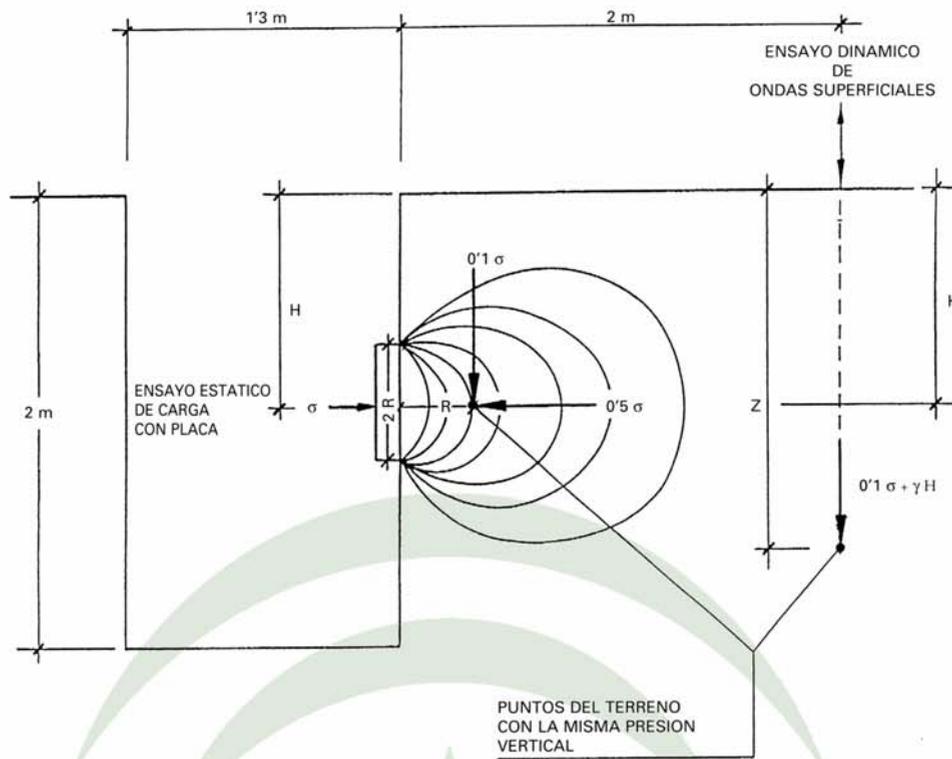


Fig. 2. Ensayos estáticos y dinámicos "in situ".

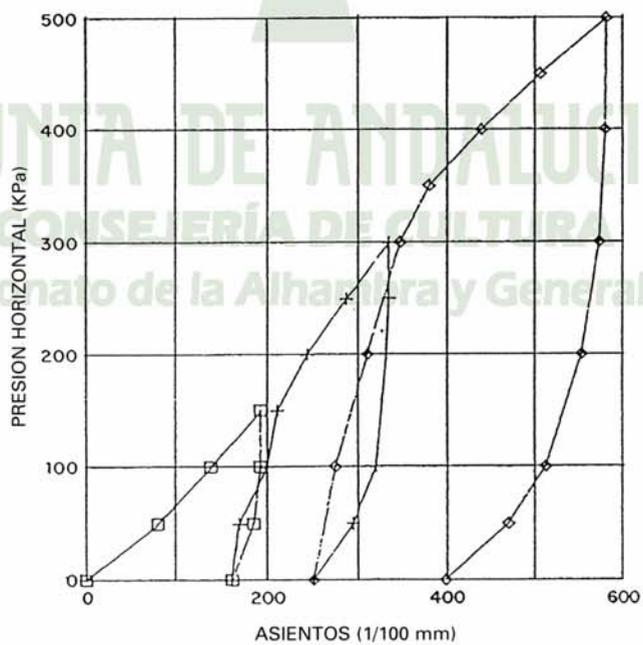


Fig. 3. Ensayo de carga horizontal con placa sobre la pared B de la zanja 1.

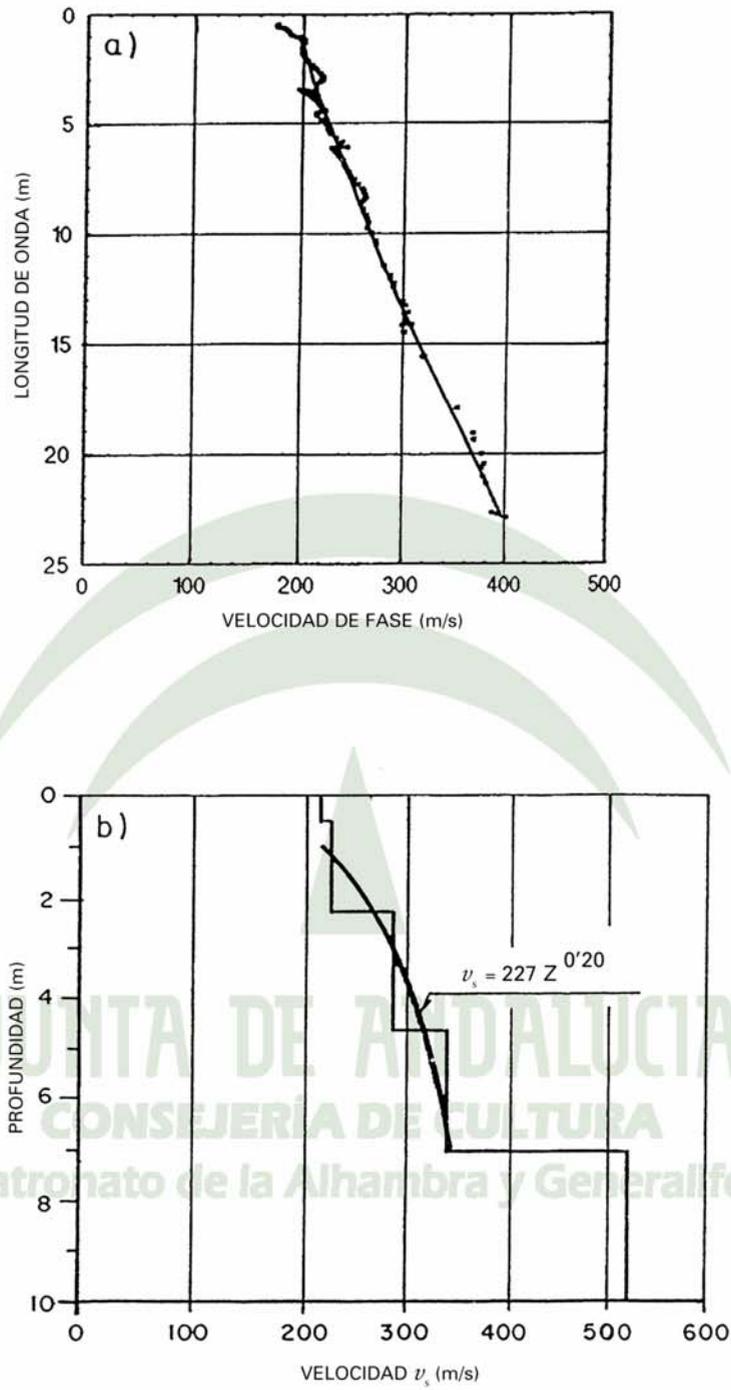


Fig. 4. Curva de dispersión obtenida en los ensayos con ondas superficiales a) y perfil de velocidades  $v_s$  correspondiente b).

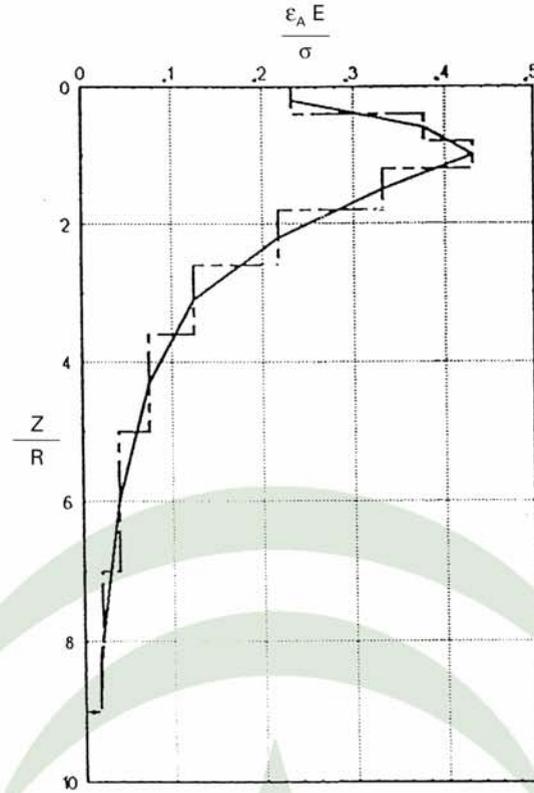


Fig. 5. Perfil de deformaciones axiales bajo el centro de placa circular rígida cargada sobre un semiespacio de Boussinesq con  $v = 0.35$ .

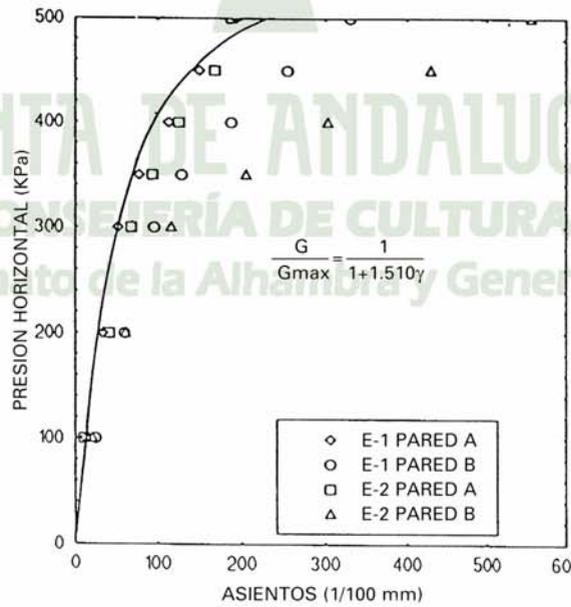


Fig. 6. Simulación no-lineal paso a paso con el modelo hiperbólico indicado en la figura de los ciclos de recarga (de 0 a 300 KPa) y de los tramos de carga noval (de 300 a 500 KPa) obtenidos en los ensayos de carga con placa realizados en la "formación Alhambra".

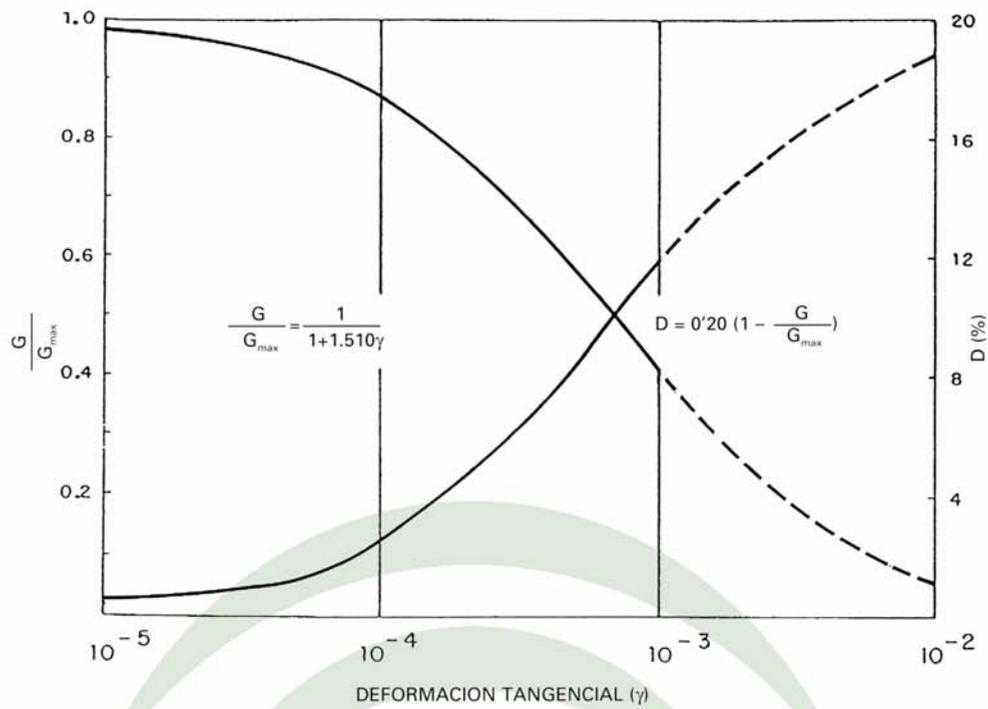


Fig. 7. Modelo hiperbólico elegido para simular el comportamiento dinámico de la "formación Alhambra".

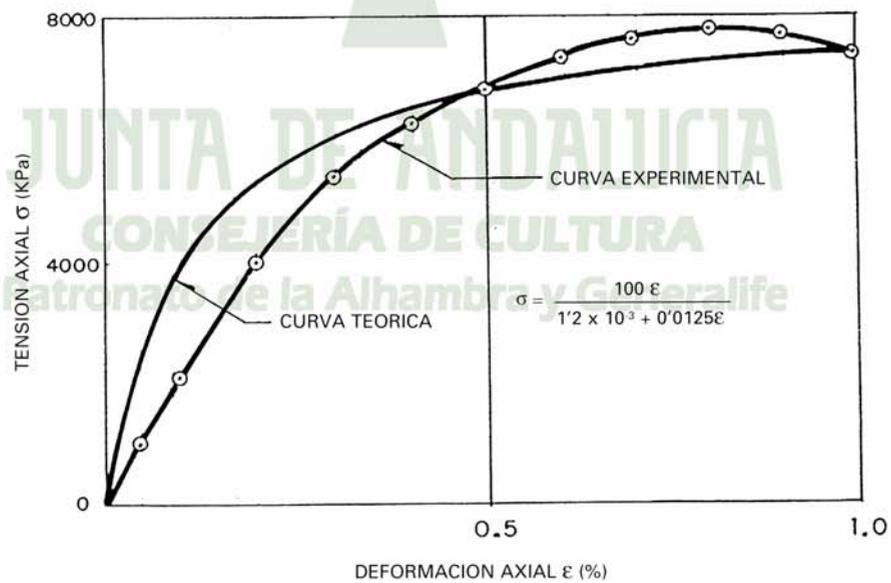


Fig. 8. Modelo hiperbólico elegido para simular el comportamiento dinámico del tapial de la cimentación de la Torre de Comares.

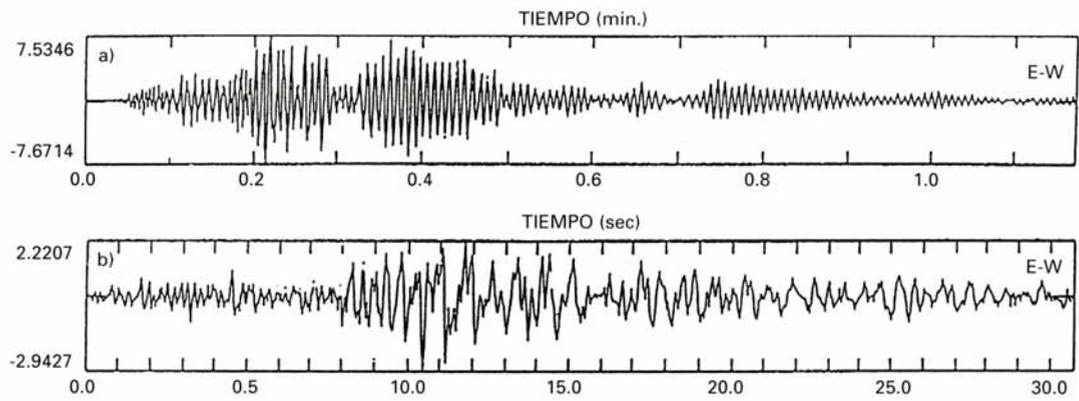


Fig. 9. Acelerogramas ( $\text{cm/s}^2$ ) registrados en Diciembre de 1993 en el piso superior a) y sótano b) de la Torre de Comares (Carreño, 1993).



Fig. 10. Espectro de respuesta del acelerograma b) dado en la fig. 9 (Carreño, 1993).