



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.*

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

*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)**

## TRABAJOS REALIZADOS Y COORDINADOS POR EL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS

VICENTE CUELLAR MIRASOL \*

**L**os desperfectos que se observan en el Conjunto Monumental de la Alhambra y Generalife y los signos de inestabilidad de algunas laderas sobre las que se levantan sus murallas y torres, aconsejaron realizar un estudio geotécnico en profundidad que permitiera dictaminar la causa de los daños y controlar su evolución. Todo ello con vistas a recomendar, llegado el caso, medidas de refuerzo y corrección tendentes a preservar el monumento.

Con este fin se viene desarrollando desde el año 1988 una serie de convenios entre el Patronato de la Alhambra y Generalife y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) que han permitido llevar a cabo los trabajos resumidos a continuación descritos con mayor detalle en las diferentes contribuciones a este Simposium. En ellos se ha pretendido incorporar, bajo la dirección y coordinación del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, a profesionales de reconocido prestigio pertenecientes a organismos tales como la Universidad de Granada, las universidades Complutense y Politécnica de Madrid, la Universidad de Texas, el Instituto Andaluz de Geofísica, el Instituto Geográfico Nacional y Carlos Fernández Casado, S.L. Dentro del CEDEX ha participado también en los trabajos un equipo del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.

El interés por la preservación de la Alhambra y el Generalife se enmarca en la preocupación que suscita la conservación del Patrimonio histórico y artístico mundial. En este sentido, el interés que, a nivel internacional, viene produciéndose por los aspectos técnicos vinculados a la conservación de los Conjuntos Monumentales tiene su reflejo en las reuniones que, para debatirlos, se celebran cada vez con mayor frecuencia. En la problemática geotécnica relacionada con la preservación de monumentos se

inscriben, entre otros, además del presente congreso, los siguientes simposium y conferencias internacionales: UNESCO/RILEM (1978), IAEG (1988), AIT (1990), SRMHB (1991), IABSE (1993). [Ver títulos de conferencias en Bibliografía].

### TRABAJOS REALIZADOS

Las técnicas empleadas incluyen tanto investigaciones puntuales como estudios más globales, pero cuyas conclusiones son aplicables a casos concretos. Entre las primeras hay que señalar el levantamiento de desperfectos en los edificios y el análisis de los mismos en relación con patologías de cimentación, su instrumentación y el seguimiento de movimientos, la auscultación de cimentaciones mediante técnicas directas e indirectas (geofísicas), los ensayos del terreno y el análisis de la interacción suelo-estructura. Entre los segundos, los estudios geológicos del emplazamiento, la evaluación sismotectónica y análisis de la agitabilidad sísmica y la caracterización de los materiales utilizados en la construcción de los edificios.

Cronológicamente pueden resumirse los trabajos realizados de la siguiente manera (ver plano de situación en la Fig. 1):

#### AÑO 1989

- Se realizó un análisis estratigráfico y morfológico del Tajo de San Pedro, así como una restitución fotogramétrica de la ladera. Se procedió a la instalación de hitos en su coronación para un seguimiento topográfico de su posible evolución, así como de dos bases fijas

para el emplazamiento de los aparatos de control en el Mirador de San Nicolás y en el Generalife.

- Se efectuó un reconocimiento morfológico de la Cuesta de los Chinos.
- Se procedió a la nivelación, al levantamiento de grietas y a la medida de desplomes y convergencias en las Torres de los Picos y de la Vela. Complementariamente, se efectuó una instrumentación de dichas torres para el control de desplomes, movimientos verticales, movimientos horizontales y movimientos en grietas. Se hizo una evaluación preliminar de las posibles implicaciones geotécnicas en la patología apreciada.

#### AÑO 1990

- Se continuaron las medidas de control, a partir de la instrumentación instalada, en el Tajo de San Pedro y en las Torres de los Picos y de la Vela.
- Se efectuó la nivelación, el levantamiento de grietas y la medida de desplomes en la Torre de las Infantas. Se procedió a la instrumentación de la misma para el control de desplomes, movimientos verticales y movimientos en grietas. Se hizo una evaluación preliminar de las posibles causas geotécnicas de los desperfectos observados.
- En la Torre de Comares se realizó una actuación similar a la de las Infantas, sustituyéndose la medida de desplomes por la de inclinaciones, debido a la práctica imposibilidad de utilizar la plomada óptica. Se efectuó, además, un control de movimientos horizontales entre muros enfrentados, mediante cinta de convergencia.

#### AÑO 1991

- Se prosiguió con medidas de control de la instrumentación instalada en el Tajo de San Pedro y en las Torres de los Picos, de la Vela, de las Infantas y de Comares (Lám. 1).
- Se analizaron las posibles causas del derrumamiento del muro oeste de la torre del Castillo de Santa Elena.
- Se efectuó la auscultación geofísica del trasdós del muro del Patio de la Sultana, antes y después de los trabajos de consolidación llevados a cabo en el mismo (Lám. 2).
- Se procedió a la instalación de tres bases topográficas fijas dentro del recinto del Conjunto Monumental.

- Se inició el estudio geológico integral para la definición del marco sismotectónico de la Alhambra.

#### AÑO 1992

- Se prosiguieron las medidas de control del Tajo de San Pedro y de los edificios instrumentados (Lám. 3).
- Se efectuó la nivelación, el levantamiento de grietas y la medida de desplomes de las Torres del Capitán y de Mohamed, así como la instrumentación de las mismas. Se hizo un primer dictamen geotécnico de las anomalías apreciadas.
- Se inició el análisis neotectónico del emplazamiento del Conjunto Monumental, tendente a definir el régimen de fracturación de los materiales.
- Se acometieron los trabajos de auscultación geofísica de la Torre de Comares, evaluación de actuaciones estructurales a que estuvo sometida en el pasado, reconocimiento de la cimentación de la misma mediante catas y sondeos mecánicos, análisis estructural y estudios de interacción suelo-estructura. El objetivo final de estos trabajos es la modelización de la Torre a efectos de definir posibles actuaciones en estructura y cimiento.

#### AÑOS 1993 Y 1994

- Se continuaron las medidas de control de los puntos instrumentados.
- Se completó el estudio neotectónico del emplazamiento.
- Con vistas a la definición estructural y del cimiento de la Torre de Comares, necesaria para poder acometer su modelización, se efectuaron los siguientes trabajos:
  - Sondeos mecánicos, en número y longitud precisos para evaluar las condiciones del terreno de apoyo, las características del tapial de la Torre y para establecer la geometría de la cimentación. El número de sondeos efectuado fue de doce, con un total perforado de 140'87 m. Los sondeos se realizaron con toma continua de testigo del tapial. Uno de los taladros emplazados en la zona exterior Norte se equipó con tubería inclinométrica para controlar eventuales movimientos en la ladera sobre la que se levanta la Torre.
  - Se tomaron muestras de materiales atravesados por los sondeos para su ensayo en laboratorio, tendentes, fundamentalmente, a eva-

luar sus características mecánicas: resistencia, deformabilidad y módulos.

- A partir de los taladros de los sondeos se efectuaron diagrafías y ensayos geofísicos *down-hole*, *cross-hole* y tomografía sísmica, con el propósito de completar los datos aportados por aquellos.

- Se completó la auscultación geofísica del edificio mediante técnicas de geo-radar (en plantas y muros), ondas superficiales (en sótanos) y sísmica de refracción (en zonas exteriores). La auscultación con geo-radar se extendió a la alberca del patio de Los Arrayanes.

- Se efectuó una restitución taquimétrica de las fachadas de la Torre.

- Se reconocieron los muros de la Torre mediante endoscopía, tomándose, además, muestras de los mismos con vistas a su caracterización en laboratorio.

- Se utilizaron gatos planos para evaluar el estado tensional de algunas zonas de los muros.

- Se estudió el comportamiento de los tirantes existentes en la Torre.

- Se efectuó una termografía del edificio para detectar anomalías no visibles, pero detectables en base a diferencias de radiación térmica.

- Se procedió a la instalación de dos acelerógrafos en la Torre, en niveles inferior y superior, con objeto de registrar eventuales sismos y extraer de ellos conclusiones aplicables a la modelización del edificio, con vistas a analizar la interacción dinámica estructura-terreno.

• Se efectuó una campaña de sondeos en el Sector de Secano, con el propósito de establecer la profundidad de apoyo de la muralla y el espesor de posibles recubrimientos al pie de la misma. Todo ello con vistas a detectar anomalías que hicieran aconsejable la adopción de protecciones o refuerzos en la cimentación de aquella. En total fueron ejecutados ocho sondeos a destroza, desde cuatro emplazamientos distintos, con un total de 48'6 m de perforación.

• Se realizó un reconocimiento mediante sondeos mecánicos del Tajo de San Pedro. Consistió en cinco sondeos al pie del mismo para evaluar el espesor de los derrumbes acumulados en la base del cantil, y uno en su coronación, para conocer compacidades y permeabilidades de los materiales que lo configuran. Este último sondeo, de 61'5 m, se ha dejado equipado con tubería inclinométrica para la vigilancia de eventuales movimientos en la

ladera. En total se perforaron 136'7 m. La información aportada por estos sondeos permitirá dimensionar los tratamientos de consolidación y protección del terreno que puedan precisarse para garantizar la estabilidad del Tajo.

• Finalmente, con el propósito de evaluar las características mecánicas de la "formación Alhambra", que constituye el medio de cimentación de los edificios del Conjunto Monumental, se realizaron dos ensayos de carga con placa en dicha formación, así como ensayos dinámicos de ondas superficiales junto a las zanjas excavadas para ejecutar los ensayos de carga (Lám. 4).

## AÑO 1995

- Control de movimientos y grietas en las torres ya instrumentadas.
- Supervisión de movimientos en la ladera Norte del Generalife mediante la instalación de inclinómetros de sondeos.
- Estudio, utilizando un método híbrido de Elementos Finitos y Elementos de Contorno, de la agitabilidad sísmica del conjunto monumental teniendo en cuenta la topografía del emplazamiento (Fig. 2).
- Modelización mediante sistemas de barras y Elementos Finitos de la Torre de Comares y estudio de su respuesta dinámica frente a los terremotos.
- Valoración del efecto que la interacción dinámica suelo-estructura puede tener en la respuesta de la Torre de Comares.

## TRABAJOS EN CURSO

Los trabajos previstos hasta 1997, fecha de conclusión del Convenio Marco, aunque definidos en sus directrices generales, pueden experimentar alternativas en función de necesidades concretas suscitadas por el Patronato o derivadas de los propios trabajos en curso. En síntesis, estos trabajos son los siguientes:

- Control de movimientos y grietas en las Torres del Homenaje y de las Damas y en aquellas otras cuyo estudio se decida acometer. Seguimiento de las mismas y definición, en su caso, de las campañas de reconocimiento geotécnico complementarias que sea necesario acometer en relación con la patología de sus cimentaciones.
- Análisis de las condiciones de estabilidad de

los edificios instrumentados con vistas a eventuales actuaciones de refuerzo en cimentación.

- Análisis de la estabilidad de la ladera Norte del Generalife.
- Definición de una red de vigilancia para el control de movimientos en los edificios más significativos, con vistas a monitorizar su comportamiento futuro automatizando la toma de datos.

\* CEDEX, Laboratorio de Geotecnia.

## BIBLIOGRAFIA

- ASIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, *Symposium on Geotechnical Aspects of Restoration Works on Infrastructures and Monuments*. Bangkok, 1988.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING, *Symposium on Structural Preservation of the Architectural Heritage*. Rome, 1993.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, *Symposium on The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*. Athens, 1988.
- STRUCTURAL REPAIR AND MAINTENANCE OF HISTORICAL BUILDINGS, *Second International Conference*. Seville, 1991.
- UNESCO/RILEM, *International Symposium on Deterioration and Protection of Stone Monuments*. Paris, 1978.



Lám. 2. Calicatas eléctricas en el Patio de la Sultana.



Lám. 1. Restitución taquimétrica de la fachada Oeste de la Torre de los Comares.

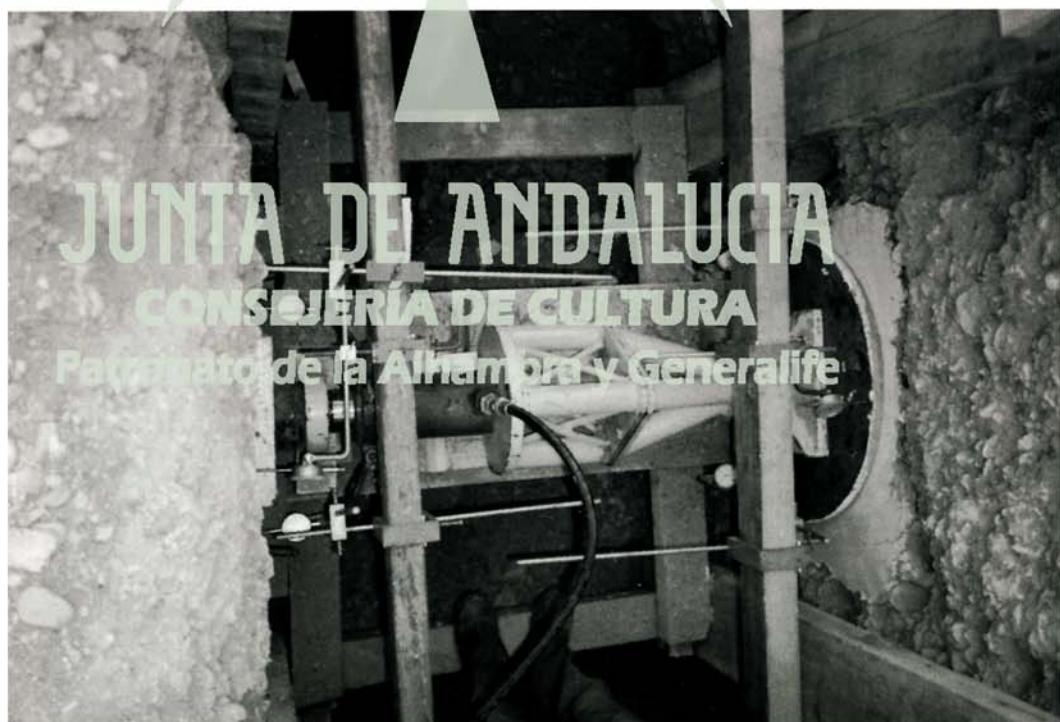


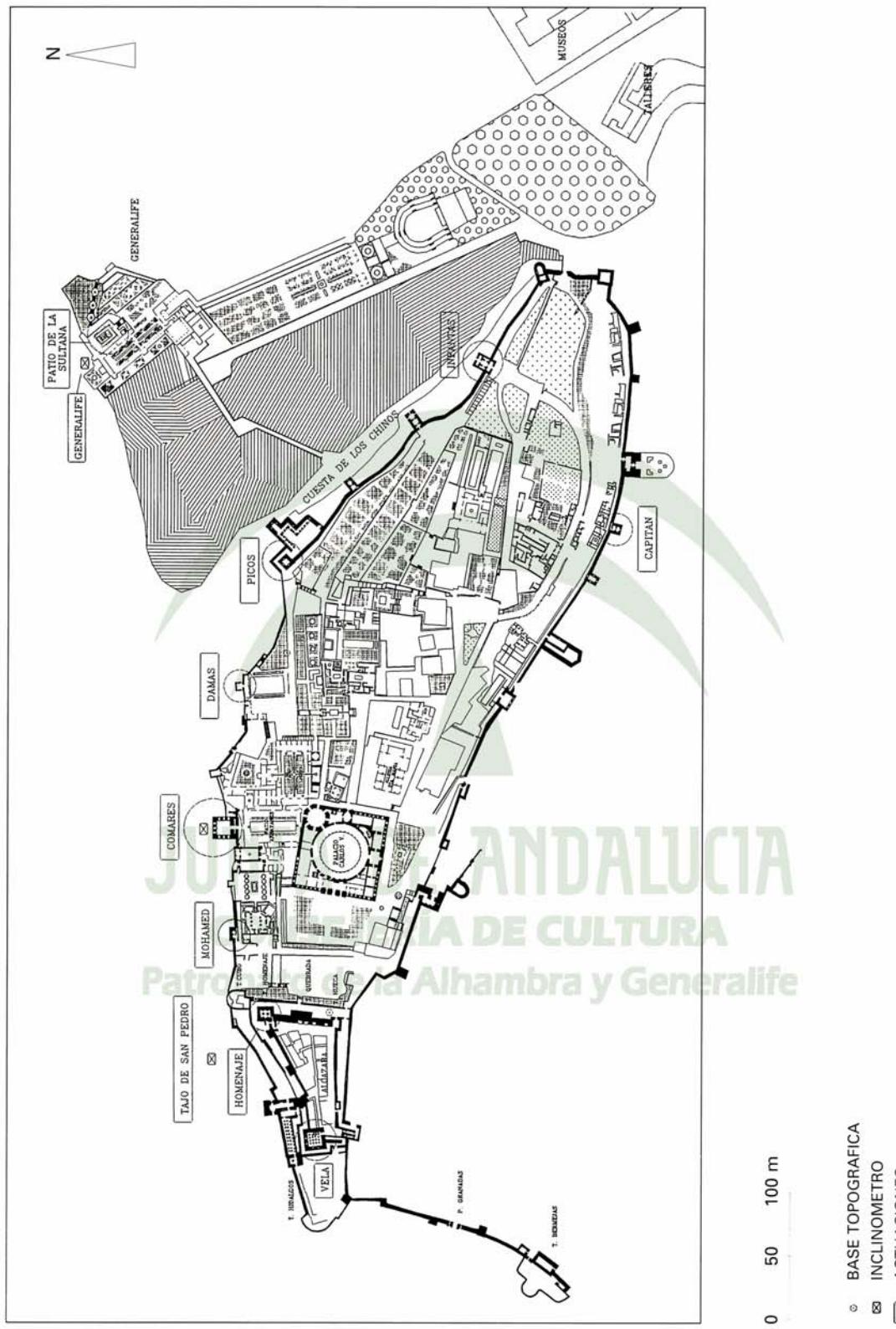
---

Lám. 3. Control de movimientos verticales en la Torre de las Infantas.

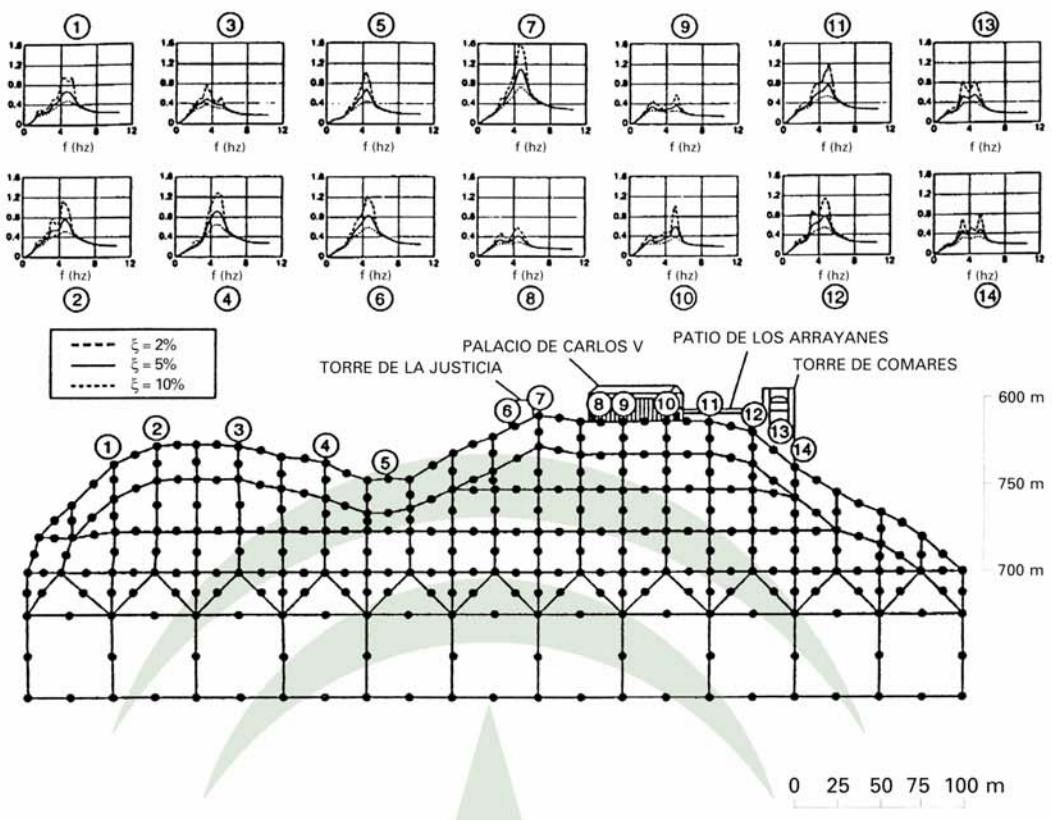


Lám. 4. Ensayo de carga con placa en la "formación Alhambra".





*Fig. 1. Actuaciones del CEDEX en el conjunto monumental.*



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

Fig. 2. Definición de la excitación de cálculo en distintos puntos de la Alhambra y de su entorno.