



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)**

# PROBLEMAS GEOTECNICOS DE LOS MONUMENTOS Y OBRAS ANTIGUAS

CARLOS OTEO MAZO \*

**D**urante los últimos treinta años se ha venido prestando un interés creciente, desde el punto de vista geotécnico, a los problemas existentes en los edificios y obras histórico-monumentales, dentro de las corrientes de opinión que pretenden salvaguardar estas obras, que forman parte del Patrimonio de la Humanidad.

En el conjunto de dichas obras no sólo deben considerarse los edificios religiosos y civiles de tipo monumental, sino todas aquellas obras (cualquiera que sea el material empleado en ellas y su función) que nos transmiten un mensaje de funcionalidad (práctica o espiritual) del pasado, a fin de transmitirlo hacia el futuro. Así, deben incluirse obras tan espectaculares como las catedrales medievales y otras menos conocidas como las presas romanas, que dejan recuerdo de la intensa labor hidráulica del Imperio Romano. Por ello deben incluirse los monumentos megalíticos, realizados con piedras nobles y muy resistentes, y los antiguos canales con tierra y paja, verdadero adelanto de la estructura de tierra. En la figura 1 se muestra el transporte de un menhir, como ejemplo del más noble material geotécnico (la roca) y en la figura 2 puede verse el esquema de una tumba china, obra de tierra, en la que ya se distinguen rellenos drenantes, rellenos impermeables, etc.

El interés por el tema lo demuestra la realización de algunos simposios internacionales sobre el mismo (como el de Ingeniería Geológica aplicada a Obras Antiguas, Monumentos y Sitios Históricos, celebrado en Atenas en 1988), este mismo simposio o el que se celebrará en Nápoles en Octubre del presente año, organizado por el Comité Técnico TC-19 de la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones, comité *ad hoc*, creado en 1981 para la ayuda en la Preservación de Lugares Históricos.

En estas páginas intentaremos enmarcar los problemas geotécnicos de estas Obras Históricas, incluyendo tanto sus materiales (erosión superficial, principalmente) como sus cimentaciones, que no son otra cosa que problemas habituales de la Ingeniería Geotécnica: alterabilidad de materiales rocosos (como los de los terraplenes), efectos de variaciones del nivel freático (con variación de tensiones efectivas y creación de subpresión y gradientes peligrosos que pueden dar lugar a problemas de sifonamiento y arrastre), recalce de estructuras (refuerzo y mejora del cimiento y/o del terreno), etc.

## PROBLEMATICA GEOTECNICA DE LOS MONUMENTOS HISTORICOS

La problemática geotécnica de estas Obras viene a ser la misma que la de las estructuras actuales, agravada por varios factores.

- La acción activa del tiempo transcurrido (consolidación secundaria, cambios de nivel freático a gran escala, vibraciones reiteradas de terremotos, etc.).
- Los cambios ambientales que se han ido produciendo a lo largo de la vida de la Obra (variaciones de humedad, acción del viento, procesos lentos físico-químicos).
- La baja calidad de los materiales utilizados en cimientos (baja acción fraguante).
- La tecnología disponible en su momento para conseguir profundizar la cota de cimentación en el terreno, lo cual no permitía apoyos realmente profundos. Aunque se utilizaron pilotes, estos eran de madera y pequeño diámetro, por lo que era difícil bajar más de 5-6 m. En

algunos casos excepcionales se hicieron pozos de cimentación al amparo de empalizadas de pilotes. En otros se utilizó la ayuda de buceadores (excepcionalmente en la antigüedad y sólo en obras marítimas). Con buzos se pudo contar a finales del siglo XIX y principios del XX, como en el famoso recalce de la Catedral de Winchester (por obra del buzo W.A. Walker). Este sistema de buzos fue empleado en esa época para excavar pozos de cimentación, rellenándolos de sacos de cemento o cascotes, como en la estación de San Bernardo de Sevilla (1903) y en otras estaciones de R.E.N.F.E.

- La preocupación de los técnicos del pasado por las cargas verticales, que llevaba a soluciones tipo muro de carga, poco ampliado en su base y escasamente empotrado en el terreno. Así, quedaban estructuras con poca rigidez estructural en horizontal (Fig. 3).

Este último problema ha dado lugar a desplomes de estos muros por empujes horizontales de bóvedas (en ese sentido la solución gótica de los arbotantes permitía disminuir el problema al ir disponiendo varios muros de carga, escalonados en altura), acciones de viento, pequeñas excavaciones próximas a los edificios, ligeras diferencias de deformabilidad del terreno entre muros de carga próximos, etc.

En casi todas las ciudades antiguas del centro de Europa (París, Windsor, Brujas, Amsterdam, Stuttgart, etc.), se observan reparaciones de edificios antiguos mediante *vigas-llave* de fundición, que cosen y unen muros de carga próximos, en un intento de conseguir aumentar la rigidez horizontal de la estructura. También pueden verse tirantes metálicos atando los apoyos de bóvedas en diversas catedrales para luchar contra este efecto, a veces acentuado con problemas de inclinaciones de pilares por asentamientos diferenciales, como en la Catedral de Gouda (Holanda). Un intento similar puede verse en los arcos del Patio de los Leones de la Alhambra de Granada, aunque —en este caso— los tirantes no introducen ningún efecto beneficioso (más bien dañino) ya que las arcadas no están formadas por verdaderos arcos, sino que se trata de un sistema de vigas horizontales apoyadas sobre pilares a través de elementos de plomo que hacen de rótula. El arco es sólo decoración (Fig. 4). La rigidez horizontal resulta, así, muy baja y hace a estas estructuras sensibles a movimientos horizontales y terremotos, lo cual suele notarse en el desplazamiento relativo de la placa de plomo con respecto a los pilares superior e inferior.

De forma sucinta, puede indicarse que los problemas geotécnicos de las Obras y Monumentos

antiguos pueden ser —con los condicionantes ya nombrados— los siguientes:

- Falta de capacidad portante del terreno subyacente, por exceso de carga transmitida o por existencia de capas arcillosas blandas cerca de la superficie. Generalmente ello ha conducido a colapsos o descalses importantes.
- Excesiva deformabilidad del terreno de cimentación, a corto y largo plazo, general y/o local, lo que suele conducir a grandes asentamientos totales y a asentamientos diferenciales, sobre todo cuando el terreno no es homogéneo. Es el caso, por ejemplo, de la Torre de Pisa en que la presencia de capas de arcilla (con arenas intercaladas) origina la inclinación sucesiva de la Torre hacia el lado Sur, que —poco a poco— va aumentando la presión sobre la arcilla al irse acentuando el desplome (Fig. 5).
- Erosión físico-química y degradación de cimientos escasamente empotrados, bien por ataque del material (ascenso de agua por capilaridad, arrastres por flujo de agua, etc.), bien por ligeras excavaciones hechas junto a los muros de carga. Esta acción puede ser también superficial en las fábricas de piedra. Dada la variedad de materiales utilizados en los cimientos (Fig. 6) y la falta de elementos cementantes de gran calidad, estos materiales pueden ser alterados a largo plazo o putrefactados e incluso comidos (caso de la madera).
- Colapso de rellenos, realizados previamente a la cimentación, por inundación, al cambiar las condiciones del nivel freático, con el consiguiente cambio de volumen y asiento.
- Efectos de cambio de volumen al cimentar sobre arcillas expansivas, tanto en época de hidratación (hinchamiento) como en época de desecación (retracción).
- Formación lenta de simas o cuevas en zonas cársticas, con los consiguientes desprendimientos y hundimientos, favorecidos por la presencia de sótanos de almacenamiento, filtraciones, etc.
- Efectos térmicos, que afectan tanto a las superficies rocosas de las fábricas como a la estructura si la constituyen materiales diferentes, con distinta dilatabilidad térmica.
- La falta de empotramiento adecuado del cimiento en el terreno, lo cual disminuye su resistencia frente a esfuerzos horizontales (viento, vibraciones, empujes de arcos, etc.).
- Inestabilidad de taludes, tanto en suelos como en macizos rocosos, originada por la acción del agua, alterabilidad ambiental del macizo rocoso, la propia carga del edificio, etc. En

unos casos la Obra Antigua está sobre la zona inestable, en otros la zona inestable está por encima de la Obra y ésta recibe el impacto de la caída de bloques rocosos o desprendimientos.

Al caso de la estabilidad de taludes pertenece el ejemplo de la figura 7: se trata de la Iglesia del Carmen, iniciada por los monjes carmelitas hacia 1580 en Brasil. Una parte, el convento, fue destruida en un incendio durante la invasión holandesa de 1631 (GUSMAO, 1993). Está construida sobre una colina de planta circular de 10 m de altura, cuyas laderas tienen taludes de 12 a 45°. El terreno está formado por arena arcillosa con una capa de caliza como sustrato. La cimentación tiene 1 m de espesor y se apoya a 4'60 m en el estrato arcilloso (Fig. 7a).

Los daños se concentran alrededor de la torre izquierda, que tiene —actualmente— una inclinación de 1:80, con un asiento en la esquina externa de 6 cm. La solera está levantada y las cimentaciones del antiguo convento están inclinadas hacia la ladera. Los asientos iniciales de la estructura de ladrillo debieron ser del orden de magnitud de los 10 mm, valor que estaría cerca del crítico según el criterio de Burland y Wroth ( $\epsilon = 5\%$ ). Estos asientos debieron incrementarse al construir la Torre en 1726 y llegar a los 27 mm, lo que debió originar el agrietamiento de los muros de carga (Fig. 7a), valor que debió aumentar hasta los 60 mm actuales por consolidación a largo plazo. Las excavaciones de las laderas, realizadas posteriormente por las implantaciones urbanas, dieron lugar a problemas de estabilidad de taludes, produciendo movimientos horizontales adicionales (Fig. 7a). La figura 7b muestra la solución adoptada: recomposición de los taludes de las laderas (1H:4V), instalación de micropilotes para recalzar la torre izquierda y drenaje profundo de los taludes.

En cuanto al problema de desprendimiento de bloques —muy corriente en España, dado que gran número de antiguos castillos están edificadas en mesetas, sobre capas duras que descansan sobre capas arcillosas o margosas erosionables— puede afectar al edificio que se apoya cerca del borde de una meseta que se va erosionando en su base, como son los casos esquematizados en la figura 8, en la que se comparan fenómenos reales y el modelo teórico de SILBERBAUER y otros (PIERCE, 1988) y que vienen a corresponder a los casos del Parador de Carmona (Sevilla, Fig. 8d) y del Parador de Arcos de la Frontera (Fig. 8f). En otros casos, los bloques rocosos del extremo superior de la meseta caen por descalce (por erosión) de la capa blanda inferior. A este fenómeno pueden ayudar las vibraciones de terremotos, como en el caso del famoso Templo de Delfos (sede del Oráculo) (Fig. 9), construido a media ladera y arrasado por caída de bloques de una capa calcárea del

extremo superior de la montaña, como consecuencia de sucesivos terremotos y la alteración y erosión de la capa blanda subyacente.

## CAUSAS REALES DE LOS DEFECTOS

En realidad todos estos problemas, comunes a obras modernas, pueden agruparse de otra forma, según el origen del defecto:

### *Tipo A. Defectos originales*

- A.1. Cargas elevadas para el terreno existente (bien problemas de capacidad portante, bien de deformabilidad).
- A.2. Excentricidad de cargas (de origen o por crearse la excentricidad paulatinamente).
- A.3. Uso inadecuado de materiales (mezcla de ellos, productos alterables, etc.).
- A.4. Cambios de configuración durante la construcción (que, en algunos casos, duró siglos).
- A.5. Problemas de estabilidad de taludes en donde se inserta la obra.
- A.6. Mala interpretación de las condiciones hidráulicas en el terreno (posibilidad de sifonamientos, arrastres).

### *Tipo B. Defectos por evolución temporal*

- B.1. Movimientos por consolidación a largo plazo.
- B.2. Cambios de las condiciones hidráulicas (rebajamiento del nivel freático, ascensión de agua por capilaridad, etc.).
- B.3. Efectos ambientales (ciclos de calor-frío, humedad-sequedad, putrefacción, elementos de madera, acción del viento, etc.).
- B.4. Desprendimientos rocosos por acción continua de efectos erosivos.
- B.5. Terremotos e inundaciones.

### *Tipo C. Cambios de uso de la obra*

- C.1. Remodelaciones que, mal concebidas, son más dañinas que el paso del tiempo.
- C.2. Excavaciones internas para realizar sótanos, almacenes, etc.
- C.3. Apertura de luces para crear nuevos espacios, con concentración de cargas en zonas inadecuadas.

### *Tipo D. Excavaciones próximas*

- D.1. A cielo abierto, para realizar nuevos edificios o instalaciones.
- D.2. Excavación de obras subterráneas próximas, que dan lugar a movimientos de subsistencia, generalmente diferenciales.

Pueden citarse numerosos ejemplos de cada caso. En el caso A.1 cabe incluir el caso de la Torre de Pisa que ha degenerado en el caso A.2. En ese mismo caso A.1 cabe incluir varias catedrales europeas, como la de Winchister, o pagodas en Extremo Oriente, como la de Phra Pathom Chedi en Tailandia sobre arcilla blanda, construida en tres etapas y que experimentó un asiento de 2-3 m (citado en el TC-19 Report, 1993). En el caso A.2, aparte de Pisa, cabe incluir diversas torres, como la de Burano, la Torre Nueva de Zaragoza (demolida por atribuírsele riesgo de caída), etc. El caso A.3 permite el ataque de elementos agresivos al material de la cimentación (Catedral de Zaragoza). El ejemplo de la Iglesia del Carmen citado anteriormente (Fig. 7) corresponde al caso A.5 y como ejemplo del tipo A.6 cabe mencionar el caso de las Presas del Estrecho de Torres.

Este último ejemplo merece una cierta atención. Ha sido descrito con detalle por BAUTISTA y MUÑOZ (1986), de los que hemos tomado los siguientes detalles. El Estrecho de Torres está formado por molasas y margas. En 1648 se terminó la primera presa, en el primer emplazamiento (parte central del Estrecho), para defender a la ciudad de Lorca de las avenidas del Río Guadalentín (Fig. 10). Esta primera presa, de fábrica, con apoyo abovedado, se cimentó en parte sobre las laderas de molasa, y en parte sobre los acarrees del río, con ayuda de pilotes de madera, de unos 6 m de longitud (Fig. 11). No fue posible llegar en la zona central del cauce a roca firme, dado el espesor de acarrees, por lo que se recurrió a la solución antes descrita. La avenida del 5 de Agosto de 1648 erosionó la presa, socavando sus cimientos y sin que quedase nada más que los dos estribos empotrados en la roca, hundiéndose totalmente la parte central. Siglo y medio después (en 1791) se terminó una segunda presa en el mismo emplazamiento (Fig. 10). Esta vez la cimentación también fue realizada con pilotes de madera, a pesar de que se sabía que no se alcanzaba el firme. En un intento de mejorar el cimientó se hincaron pilotes en filas que se cortaban rectangularmente, colocándoles a tres pies (84 cm) unos de otros, encepándoles con mamposterías en los 2'23 m superiores. El emparrillado así conseguido se extendía 83'6 m en el sentido del río. Quedó una presa de unos 45 m de altura. La cimentación con nivel de embalse inferior a 20 m, recibió diversas críticas, acalladas durante años, dada la rentabilidad económica de la obra. Pero en Marzo de 1802, el embalse alcanzó una altura de 46'81 m, a consecuencia de fuertes lluvias, rompiéndose su parte inferior (zona central del cimientó) el viernes 30 de Abril, pereciendo 608 personas en la ciudad de Lorca. El nivel de embalse no había llegado al aliviadero superior, pero produjo un gradiente hidráulico

que socavó el cimientó, produjo arrastres de los acarrees y de los pilotes (todo el emparrillado), desprendiendo la parte baja de la presa, y provocando un embudo que hizo trabajar prácticamente en voladizo a la zona de coronación en la parte central de la presa (Fig. 13).

La solución definitiva se realizó a finales del siglo XIX, empezándose la explotación del nuevo pantano en 1834, con una presa de gravedad (Fig. 14), situada en el segundo emplazamiento (Fig. 10) y cimentando sobre las molasas, para evitar nuevos errores hidráulico-geotécnicos. Precisamente las discusiones originadas por la rotura de la segunda presa fue una de las causas por las que Agustín de Betancourt propuso al Rey la creación de una Escuela de Ingenieros de Caminos.

En este caso, no existió verdadero recalce sino sustitución total de la obra y elección de una nueva cimentación, que evitó los problemas de hidráulica subterránea presentes en su propia concepción. Eso suele ocurrir en el caso de Obras antiguas de servicio público. Predomina el sentido de la funcionalidad sobre el artístico o representativo, mientras que en los Monumentos artístico-religiosos predomina su estética y el lugar que ocuparon en el pasado, lo cual es tan significativo como su propia función. (Por eso el cambio de posición de algunos monumentos históricos, como el de los Templos de Abu-Simbel, al construir la gran presa de Assuan, supuso una violación del Conjunto espacio-tiempo).

Entre los ejemplos del Defecto Tipo B cabe citar: la propia Torre de Pisa (B.1), la Catedral de México (B.2), los daños originados en las piedras de fachadas (acanaladuras, cromatización y pátinas, erosión alveolar y picaduras, el burilado y escoriación, las costras, la arenización, la descamación, los depósitos superficiales de humo y polvo, las eflorescencias y las fisuraciones), tal como indica ORDAZ, 1982 (dentro del tipo B.3), el Monte Castillo de Arnedo y la Ciudad de Frías (B.4) y el Templo de Delfos (B.5). Dentro del Tipo C podemos mencionar: el Parador de Carmona en Sevilla (C.1), el edificio de La Equitativa de Sevilla, debido a Talavera (C.2), las Cuevas de Altamira en Santander, con apertura de fisuras en las losas calcáreas al ampliar las luces y permitir la entrada a los visitantes (C.3).

Los últimos casos (D.1 y D.2) corresponden a excavaciones de aparcamientos y obras subterráneas para servicio público, cerca de monumentos (Opera de París, Iglesia de San Esteban en Viena, etc.).

## TECNICAS DE ACTUACION

Resumimos, a continuación, las principales técnicas que se utilizan, actualmente, para actuar sobre

grandes obras monumentales dañadas, desde el punto de vista geotécnico:

- Actuaciones artesanales: se trata de intervenciones o recalces cuidadosos, con medios mecánicos muy limitados y que pueden calificarse como de artesanos o quasi-manuales. Al final se obtiene una cimentación similar a la anterior (algo mayor) o próxima a ella.
- Recalces profundos, con creación de una nueva cimentación apoyada a mayor profundidad y relacionada con la anterior, bien por perforación y adhesión a ella por contacto, bien con nuevos elementos conectados por barras. Los medios tecnológicos a utilizar son ya importantes. Se incluyen aquí los micropilotes y los pilotes.
- Actuaciones mediante las que se trata el terreno y se consigue una mejora de sus propiedades, de forma global o mediante inclusiones. Se trata de los tratamientos de inyección, la congelación, etc.

Al primer tipo de actuación artesanal, pertenecen los recalces típicos que procuran ensanchar los cimientos contiguos. La figura 15 muestra el caso de recalces de este tipo realizados en los edificios monumentales de la ciudad de Cracovia, unidos al antiguo cimiento mediante barras de acero para que el viejo y el nuevo cimiento trabajen conjuntamente (o sea, para que el viejo cimiento, al seguir asentando, transfiera carga al resto o nuevo apoyo). También pertenecen a este tipo los sistemas que crean un nuevo apoyo por el procedimiento de apeo previo del pilar a cimentar, de forma que el viejo cimiento se apoye directamente sobre uno nuevo más amplio (Fig. 16). Estos sistemas corresponden a cimientos de dimensión escasa pero terreno adecuado.

Cuando el problema proviene de la falta de calidad del terreno de apoyo primitivo, es necesario transferir las cargas a mayor profundidad mediante pilotes de diferente tamaño. Desde grandes diámetros, del orden de 1'50 m, hasta los micropilotes de  $\varnothing$  120 mm. Los de gran y mediano diámetro se perforan aparte del antiguo cimiento y se unen a este por adosamiento machihembrado, barras o pasadores inyectados, etc. En el caso de micropilotes se puede perforar la antigua fábrica y transferir las cargas a dichos elementos por adherencia micropilote-fábrica. A veces ello es insuficiente y es necesario hacer un nuevo encepado unido al antiguo por pasadores o haciendo que el viejo se apoye en el nuevo (Fig. 17).

La figura 18 muestra ejemplos clásicos de recalces de torres con micropilotes (*pali-radice*, concebidos por LIZZI), atravesando el viejo cimiento y en la figura 19 puede verse la solución adoptada en el Monasterio de Santa María de Huerta, debida al

Profesor Rodríguez Ortiz, en el que, además de drenajes, se utilizaron micropilotes y ampliación del cimiento por cosido. El ejemplo de la figura 20 corresponde a un recalce (más bien reconstrucción) antiguo, en el Acueducto de Tenocitlan (México) en el que, mediante pilotes de madera y un entramado de cuerdas (precedente de una geomalla) se pudo conseguir la estabilidad de las islas-terraplén en que se apoyaba el Acueducto.

En lo que se refiere a tratamiento del terreno, el sistema más empleado es el de inyecciones, bien para consolidar el propio cimiento (falta de elemento cementante), bien para consolidar y aumentar la calidad del terreno subyacente y circundante (caso de la figura 21, correspondiente al Arco de Triunfo de París, apoyado sobre arenas de Beauchamp, debilitadas por filtraciones).

Las técnicas de inyección son diversas: de impregnación (productos químicos, generalmente, para consolidar arenas) y relleno de huecos (con lechada de cemento de alta presión (como el *jet-grouting* utilizado modernamente en gran número de obras, incluso en el caso de circulación de agua), de compensación o compactación (inyección de mortero que permite desplazar el terreno y levantar estructuras, como en el caso de la Torre del Big-Ben de Londres, Fig. 22), etc. A veces se mezclan dos sistemas, como en el Puente de Piedra de Zaragoza, en el que, bajo la pila a recalzar, se hacía un recinto a base de columnas tangentes de *jet-grouting* (para confinar el volumen bajo el antiguo cimiento), inyectando después lechada de cemento en el interior, con la técnica de tubos manguitos.

Sin embargo no deben olvidarse otros sistemas más sofisticados, como el de congelación, utilizado en la Casa del Cordón (Burgos) para realizar pozos bajo el nivel freático y recalzar los muros de carga, creando una pantalla anclada que sirviera de cierre de nuevos sótanos. En este caso también se utilizaron micropilotes como recalce provisional de pilares (Fig. 23).

Por último podemos mencionar algunas técnicas poco convencionales, como la de contrapesar el lado norte del entorno de la Torre de Pisa, a fin de parar sus movimientos (Fig. 24).

## EJEMPLOS DE ACTUACIONES EN CONJUNTOS MONUMENTALES Y SU METODOLOGIA

### METODOLOGIA DE ESTUDIO

Cuando se trata de establecer actuaciones geotécnicas de una Obra o Monumento antiguo lo pri-

mero que hay que establecer —y comprender— es su Patología, así como el alcance y evolución de la misma y su origen. Cualquier intervención que no contemple estos factores puede conducir a un desastre.

En este sentido, la metodología a utilizar debe ser idéntica a la de cualquier otro caso de Patología Geotécnica. Estableciendo una analogía quasi-perfecta entre Medicina y Patología Geotécnica, las actuaciones se desarrollarán en varias fases:

- Primera Fase o Sintomatología: la estructura, edificio o instalación muestra algunos signos de mal funcionamiento, suficientes como para que el usuario acuda al “especialista” que cree más adecuado (la elección, como en la Medicina, no siempre es la más acertada. En algún caso, como en las Cuevas de Altamira, sólo se han contemplado aspectos biológicos e históricos y no geotécnicos).
- Segunda Fase o Preparación del Historial del caso: debe procederse a una toma de datos que muestre claramente las anomalías reales (no sólo las comentadas por el usuario). Para ello debe reunirse toda la información sobre el tema: proyecto inicial (si existe, con planos de alzados); tipo de estructura y su ejecución; variaciones reales sobre la planta original en algunas zonas; situación de toda clase de anomalías sobre planos o croquis, composición y forma, clasificando el tipo de daños (fisuras, grietas, etc.), generalmente en función de su tamaño (<1 mm, 1-3 mm, >5 mm, etc.); cronología de aparición de anomalías (cuando se conozca); nivelación de plantas del edificio; medida de desplomes; colocación de testigos y referencias para seguimiento de movimientos; realización de trabajos geológico-geotécnicos (sondeos, penetrómetros, etc.), para establecer una Cartografía del emplazamiento, etc.
- Tercera Fase o de Diagnóstico: mediante el análisis de los datos disponibles (estructurales, históricos, geotécnicos y sintomatológicos) debe elaborarse la adecuada teoría que explique lo sucedido, al menos en su morfología general. A veces algunos daños corresponden a patologías secundarias e independientes, como efectos térmicos, malos acabados, etc. y no debe permitirse que ello impida la interpretación general de los otros datos. Por eso es importante intentar separar fenómenos independientes como, por ejemplo, los daños en tabiquería debidos a excesiva flexión de forjados y los debidos a asientos diferenciales.
- Cuarta Fase o de Dictamen Facultativo: en ella se recomiendan las actuaciones conve-

nientes para resolver el problema. Unas veces puede directamente acudir a recomendar el refuerzo o sustitución de la cimentación, reparaciones, etc. Otras es necesario continuar la vigilancia del “enfermo”, con actuaciones mínimas (apuntalamientos, apoyos locales, etc.), control de la evolución de movimientos, etc., antes de dictaminar la solución definitiva.

- Quinta Fase o de Intervención: en ella se llevan a cabo las actuaciones recomendadas con acciones quirúrgicas (eliminación de elementos, con su sustitución adecuada), mejora del terreno (inyecciones, p.e.), adición de extremidades profundas (micropilotes, para apoyarse en estratos alejados de la superficies, p.e.), etc. Durante esta fase deben continuarse los controles de apertura de grietas, desplomes, etc.
- Sexta Fase o de Análisis Patológico Final: en el que —a la luz de la información obtenida en la Fase anterior— se hace una “autopsia” del problema y se comprueba lo acertado de la solución.

Todas las fases son importantes y no sólo la última. En muchas ocasiones se acude muy rápido a definir “intervenciones”, con lo que se llegan a inducir nuevos daños en el Monumento por tratamiento inadecuado del terreno. Es necesario prestar atención especial a las Segunda y Tercera Fase, antes de emitir el Diagnóstico, porque éste debe estar basado en las causas reales del daño y no en ir a establecer medidas de recalce tradicionales. A veces, medidas aparentemente conservadoras inducen movimientos mayores que los que originó la causa patológica. Ello ha de tenerse en cuenta en la Quinta Fase, al definir el proceso de reparación: si se trata de un problema originado por asentamiento de terrenos flojos y colapsables, la realización de recalces con abundante agua induce cambios de volumen adicionales que pueden no ser deseables, con lo que —antes de que el recalce está acabado— se pueden producir nuevos daños.

A continuación se describen brevemente algunas actuaciones sistemáticas (estudio y/o intervenciones) en varios Conjuntos Monumentales en los que se ha seguido esta Metodología.

#### LA ACROPOLIS DE ATENAS

En este singular Conjunto se llevó a cabo un estudio geológico-geotécnico detallado, dentro de un Proyecto general de Preservación de Monumentos de la antigua Grecia y descrito en detalle por ANDRONOPOULOS y KOUKIS (1988). Se inició con la definición de la litología y tectónica de la zona, dentro de un estudio regional de la Atica, con reunión de

datos geotécnicos del entorno. El estudio se centró, después, en los problemas geológico-geotécnicos de estabilidad de taludes, del estado de las calizas y esquistos del sustrato de la colina en que se asienta la Acrópolis, en sus factores hidrogeológicos y en la microtectónica de las calizas y en la sismicidad de una amplia área.

Atención particular se prestó a los procesos de meteorización-erosión de las rocas (monumento y cimiento), por la continua acción de los agentes climáticos superficiales, del agua subterránea, cambios térmicos, etc., conjugándoles con los sistemas de fracturas que constituyen el macizo rocoso. Efectivamente, estas acciones sobre el diaclasado aflojan los bloques rocosos y producen su inestabilidad. El análisis se completó con ensayos de laboratorio para determinar propiedades geomecánicas de la roca. Todos los estudios fueron desarrollados por el Instituto de Geología de Atenas y por el Departamento de Ingeniería Geológica de la Universidad de Patras.

Por último se hizo una cartografía detallada para localizar las zonas críticas (inseguras) de los taludes de la colina en que se construyó la Acrópolis, completando, así, las primeras fases de la Metodología antes descrita. Con estos datos se hicieron recomendaciones para actuar en esas zonas inseguras (Tercera Fase).

En la figura 25 puede verse un corte geológico vertical de la colina de la Acrópolis, en el que se aprecia que el sustrato principal y central es una formación caliza con fallas casi-verticales, bordeadas de esquistos y margas areniscosas. También se distingue algún nivel conglomerático, los derrubios de ladera o coluviones, los rellenos artificiales del trasdós de las murallas que cierran la Acrópolis (para conseguir una plataforma superior horizontal donde se asienta el Partenón y el Erecteión). El mapa geológico de detalle se hizo a escala 1:500. Las mayores fallas están localizadas en las laderas de la colina, a lo largo de dos direcciones (E-W y N-S), con saltos de las capas inferiores a 10 m, presentándose milonitizaciones en los contactos de las calizas y los esquistos areniscosos. Los monumentos se instalan en algunos bloques con insignificantes fracturas, rellenas de material cementante.

El agua se infiltra por las calizas y sale por los contactos con los esquistos, circulando por las intensas fracturas de las laderas en calizas. Se estima que la infiltración a través de las calizas viene a ser de unos 4.500 m<sup>3</sup>/año.

La presencia de fallas y cavidades cársticas hace que, con esta acción meteorizante del agua y el sistema de juntas desarrollado, las zonas peores sean las del norte y este, ya que en ellas es donde el factor meteorizante está más claramente presente. Además, en estas zonas la orientación de las diaclasas de las

laderas de caliza son desfavorables a la estabilidad. Esta caliza (de 400-450 Kp/cm<sup>2</sup> de resistencia a compresión simple y 180.000 Kp/cm<sup>2</sup> de módulo elástico en laboratorio) están afectadas por los vientos predominantes de componente Norte, como se aprecia en importantes cavernas cársticas de la zona Norte. Todo ello ha contribuido a un importante debilitamiento del macizo rocoso de las laderas que hace necesario su tratamiento. Sin embargo, en algún caso como el de la Torre de Agripa, cimentada sobre un talud de importante buzamiento, los daños observados se deben más a vibraciones por voladuras (en el Partenón hubo un polvorín) y terremotos que al problema de taludes.

Los primeros trabajos de consolidación se iniciaron en los años treinta (muros de mampostería y gravedad para sujetar algunos bloques a punto de caer, aunque mal cimentados), siguieron en los cincuenta con apoyos de hormigón y entre 1977 y 1984 se completaron con técnicas modernas (ARVANITAKIS y MONOKROUROS, 1988). En las primeras actuaciones no se siguió ningún tipo de metodología y, así, se crearon nuevos problemas estéticos y geotécnicos, al apoyarse los muros en otros bloques no muy fiables.

La estabilización se decidió tras estudios de detalle en cada zona (3ª y 4ª Fases) y, tras protección provisional con redes y barras metálicas, se procedió a sujetar bloques con bulones metálicos y anclajes inyectados (a veces con cementación química). Se completó con columnas de hormigón armado para sujetar bloques en voladizo antes de coserlos, eliminándolos después. Se dejaron en el macizo drenes californianos para drenar las filtraciones.

Los rellenos procedentes de la meteorización fueron eliminados con agua a presión, rellenando los huecos con un mortero de cemento o productos químicos, dejando su superficie irregular y discontinua. En la figura 26 puede verse las áreas de inestabilidad tratadas. A veces, los anclajes de la roca eran unidos con vigas de hormigón armado, pero siempre camuflando su superficie con granito y bloques rocosos (Fase 5ª).

Durante todo este proceso se mantuvo una vigilancia permanente de las zonas a tratar, evitando desprendimientos peligrosos gracias a las redes provisionalmente instaladas.

En otros Conjuntos Monumentales, como el de Frías, en Burgos (Fig. 27), se han desarrollado ya las cuatro primeras fases, llegando a definir el tratamiento detallado de la ladera inestable, con ayuda de fotografía terrestre. En el de la Alhambra y El Generalife, como se verá con detalle en otras comunicaciones, se está acabando un estudio de detalle al nivel de 4ª Fase, aunque en algún caso particular (Patio de



la Sultana de El Generalife) se ha llegado a las Fases 5ª y 6ª para evitar la caída de un muro, al que se había anclado un gran ciprés que tiraba de él, consolidando el muro y su trasdós mediante inyecciones controladas con la técnica de manguitos.

La figura 28 representa una planta de la Alhambra, con los más destacados puntos de actuación desarrollados en estos últimos años por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, destacando la Torre de Comares, por el nivel de intervención, el Patio de la Sultana y la Torre de los Picos.

\* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

## BIBLIOGRAFIA

- B. ANDRONOPOULOS y G. KOUKIS, "Eng. geol. problems in the Acropolis of Athens", *Proc. Int. Symp. on The Eng. Geol. of Ancient Works*, vol. 3, (Atenas 1990), 1.819-1.831.
- M. ARVANITAKIS y D. MONOKROUSOS, "Consolidation work on the sacred rock of the Acropolis, Athens", *Proc. Int. Symp. on The Eng. Geol. of Ancient Works*, vol. 3, (Atenas 1990), 1.833-7.
- M. BAGON y P. VANDANGEON, "Arc de Triomphe, París, Diagnostic des désordres et détermination des remèdes", *Proc. Int. Symp. on The Eng. Geology of Ancient Works, Monument and Historical Sites*, vol. 1, (Atenas 1990), 423-32.
- J. BAUTISTA y J. MUÑOZ, *Las presas del Estrecho de Puentes*. Murcia, Confederación Hidrográfica del Segura, 1986.
- B.J. BURLAND; M. JAMILKOWSKI; R. LANCELLOTA; G. LEONARDS y C. VIGGINI, "Leaning Tower of Pisa wat is going on", *ISSFME, News*, vol. 20, nº 2, (1993).
- R. CIESIELSKI y M. FUKSA, "Protection against settlement and the reconstruction of the foundations of the historic buildings in the old town of the city of Cracow", *Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Mov. and Structures*, (Cardiff. 1981), 595-608.
- C. DELGADO, "Obras españolas de congelación del terreno", *Curso sobre mejora y refuerzo del terreno*, CEDEX, (Madrid 1991).
- J.A. GUSMAO, "National Report", dentro del *Report. del TC. 19*, presentado en el Congreso de New Delhi, 1994, (1993).
- J. KERISEL, "Old Structures in relation to soil conditions, (15th Rautine Lecture)", *Geotechnique*, vol. XXV, nº 3, (1975), 431-483.
- F. LIZZI, "Underpinning", edited by S. Thorburn and J.F. Hutchinson. *Survey Univ. Press*, (Glasgow and London 1990).
- G. LOPEZ COLLADO, *Ruinas en construcciones antiguas*. Madrid, M.O.P.U., 1982.
- D.G. PRICE, "Eng. Geology and the protection of historical sites and monuments: Slope stability; Underground works and Caves", *Int. Symp. on The Eng. Geology of Ancient Works*, vol. 4, (Atenas 1990), 1.851-1.859.
- J.Mª RODRIGUEZ ORTIZ, *La Cimentación. Curso de Rehabilitación*. Madrid, Colegio Oficial de Arquitectos, 1984.
- J.Mª RODRIGUEZ ORTIZ, "Analysis of disorders affecting the church of the cistercian Monastery of Santa Mª de Huerta (Spain)", *Proc. Int. Symp. on The Eng. Geology of Ancient Works*, vol. 2, (Atenas 1980), 351-356.
- TC. 19 (1993), "Report", presented on the occasion of the *XIII, ICSMFE of New Delhi*, enero 1994, (1993).

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



Fig. 1. Transporte cuidadoso de menhir para dolmen.

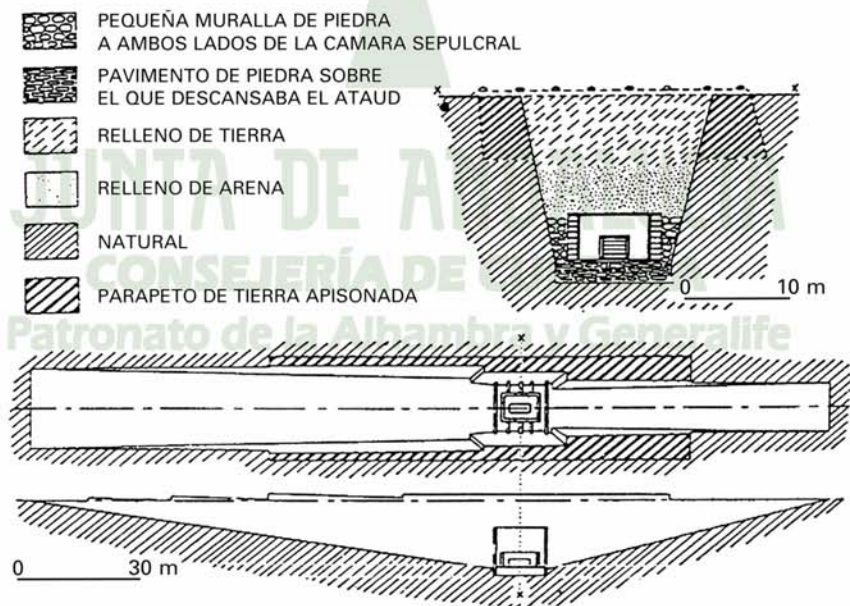


Fig. 2. Tumba de pozo con rampas dobles de Ku wei Ts'un, cerca de Hui Hsien, provincia de Honan. La cámara sepulcral y el ataúd están representados en planta y sección sobre ambos ejes. De finales del siglo V o del siglo IV a.C. (Watson, 1973).

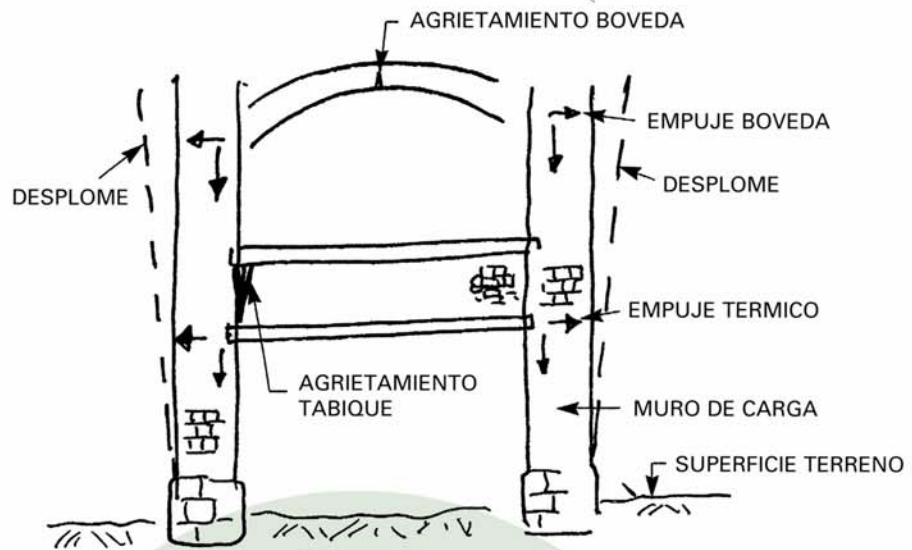


Fig. 3. Agrietamientos por falta de rigidez horizontal.

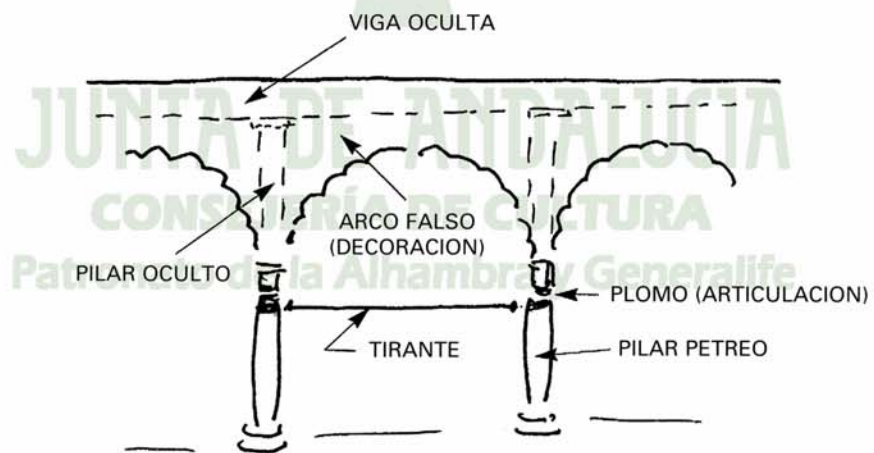
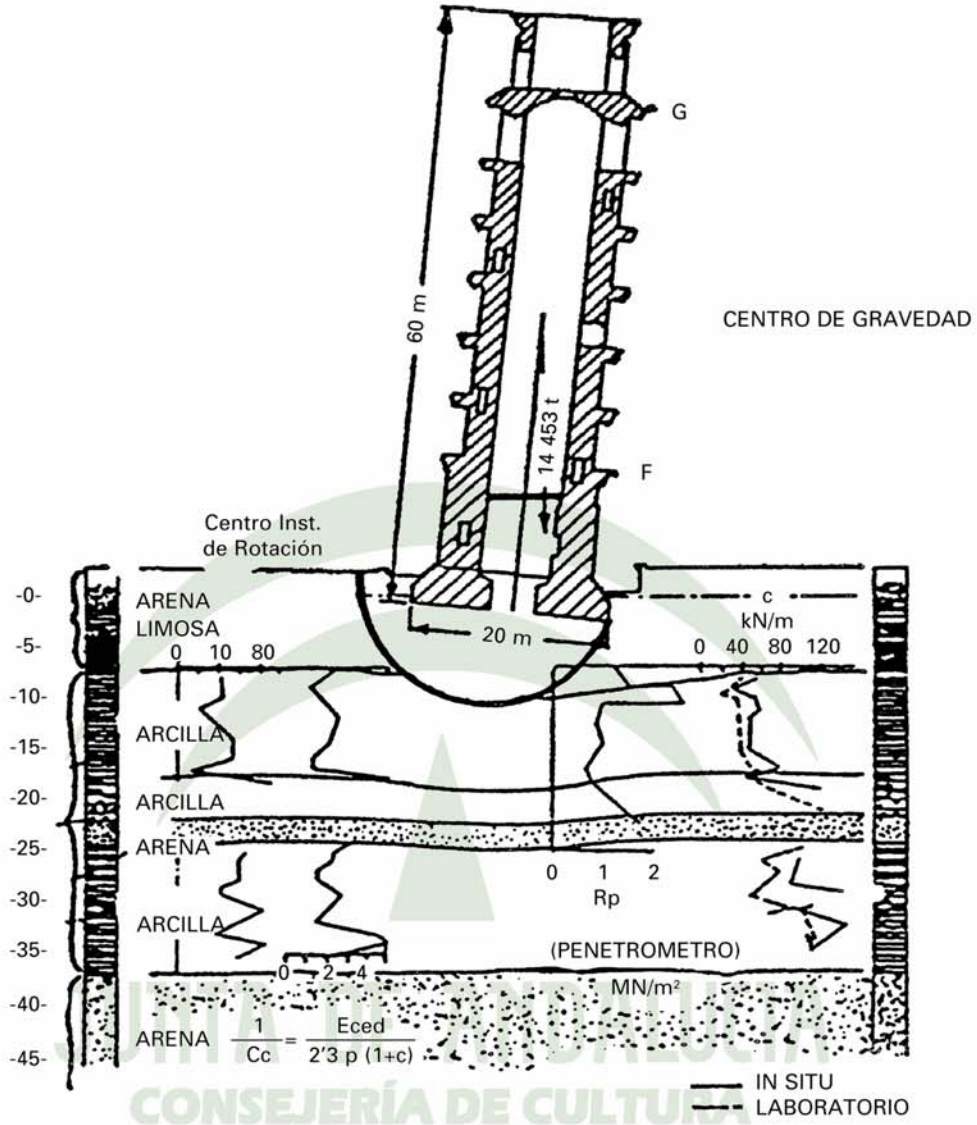


Fig. 4. Esquema estructural real de los arcos del Patio de los Leones (Alhambra de Granada).



CONSEJERÍA DE CULTURA  
Patronato de la Alhambra y Generalife

Fig. 5. Torre de Pisa: condiciones geotécnicas.

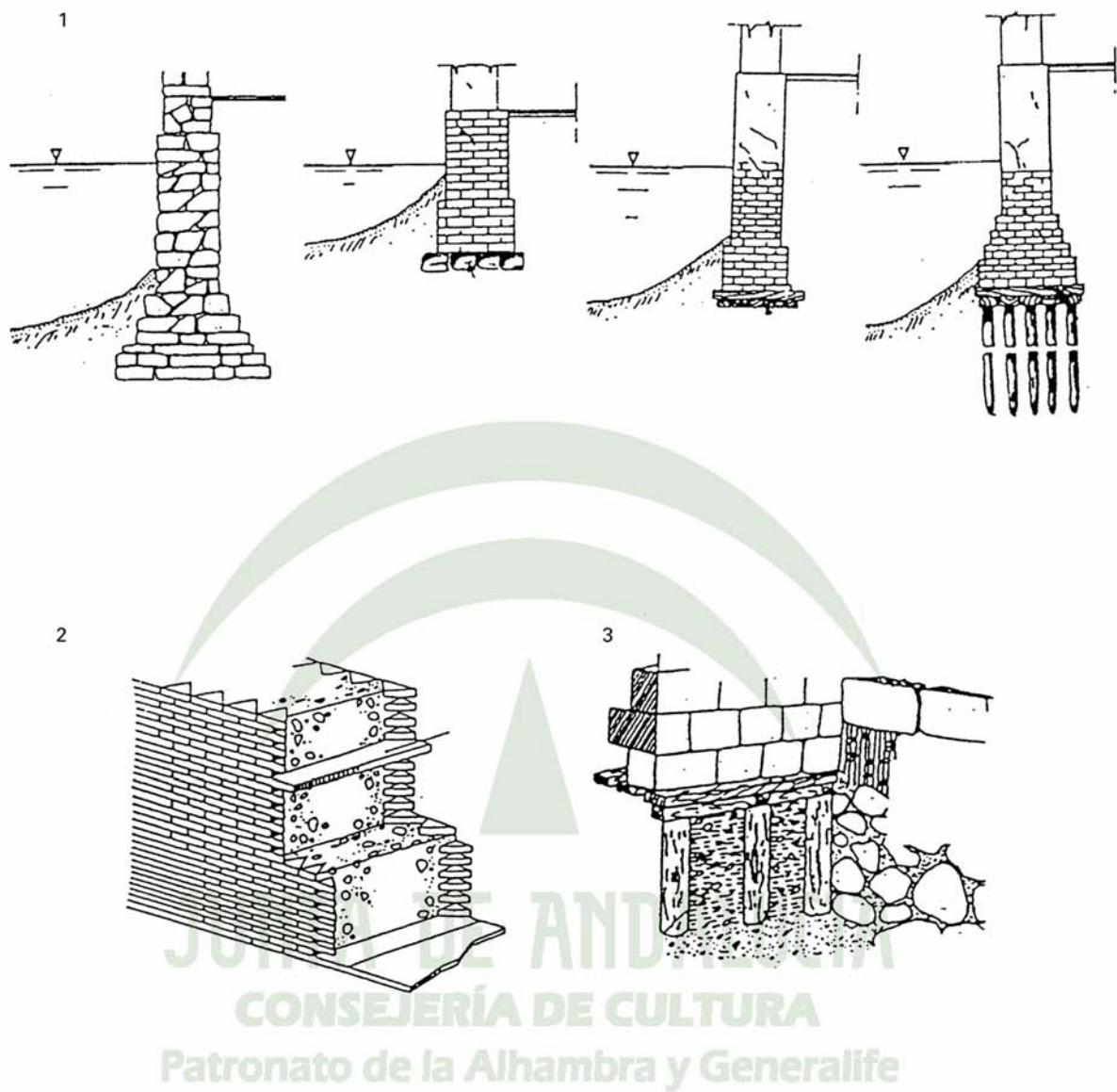
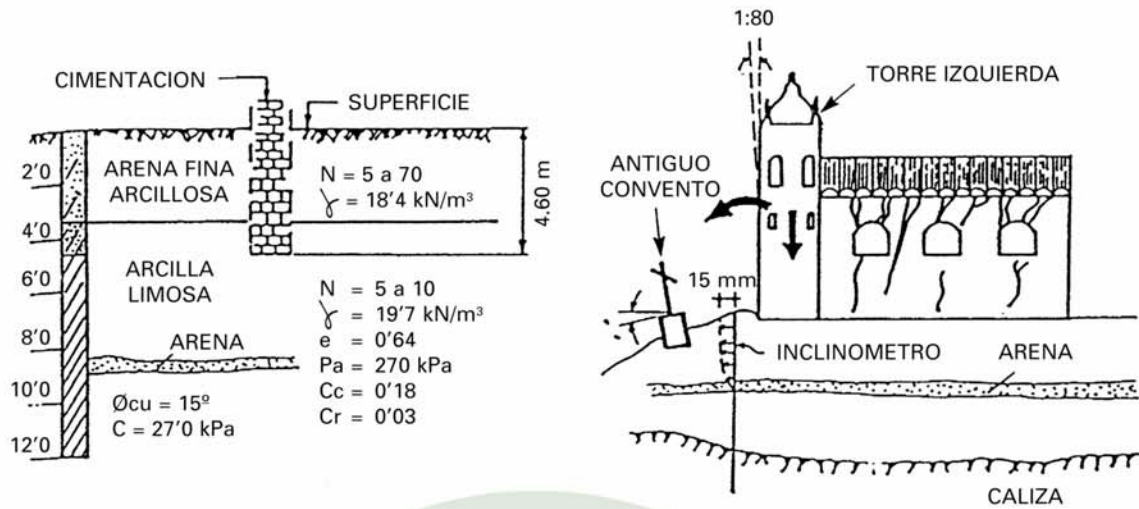
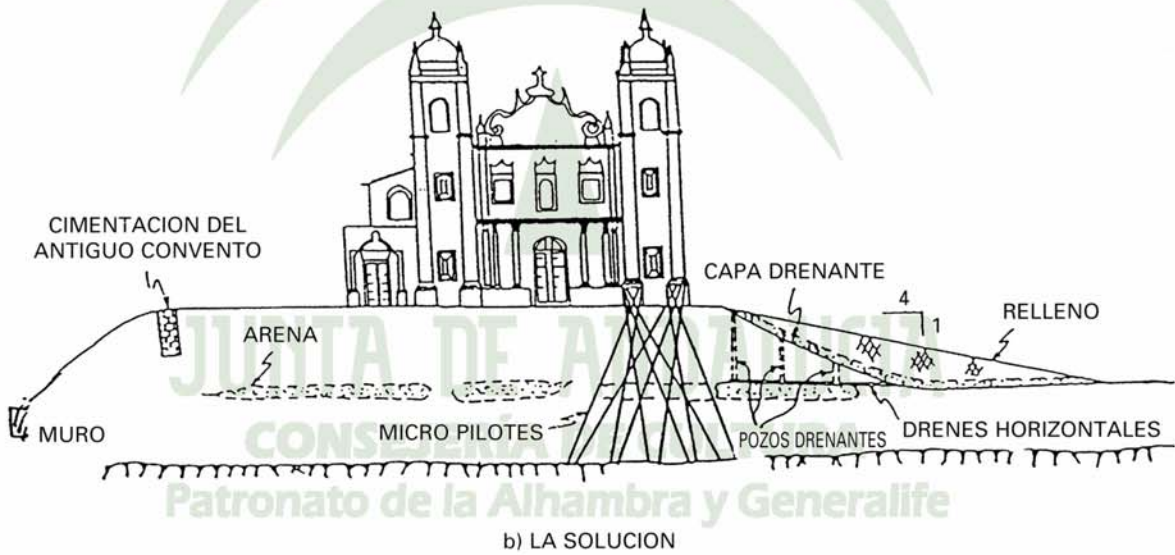


Fig. 6. Uso de diferentes materiales en cimentaciones antiguas:  
 1) Muros de carga de edificios romanos en Venecia. 2) Hormigón de cal entre encofrados de ladrillo.  
 3) Cimentaciones de un muelle en arenas del Puente de Beaugency, antes del siglo XIV. (TC-19 Report, 1993).

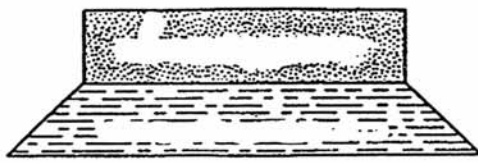


a) EL PROBLEMA

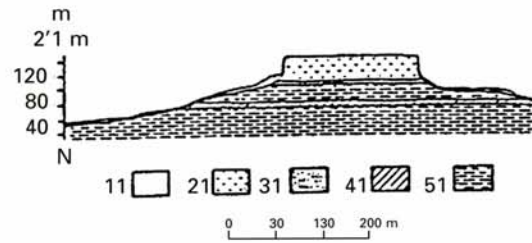


b) LA SOLUCION

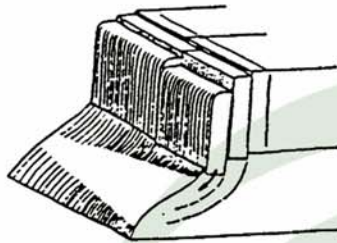
Fig. 7. Restauración de la Iglesia del Carmen en Olinda (Brasil).



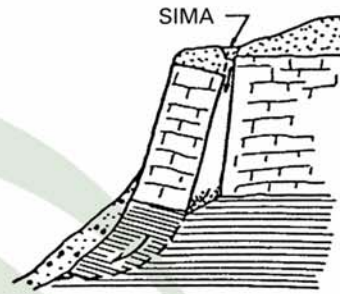
a) MODELO DE SILBERBAUER ET AL



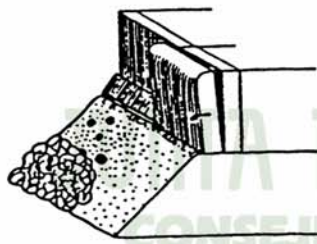
b) CONDICIONES REALES  
 ORTE HILL (RIBACHI ET AL)  
 1) COLUVION / 2) TUFFAS DURAS  
 3) GRAVAS / 4) ARENA CEMENTADA  
 5) ARCILLA



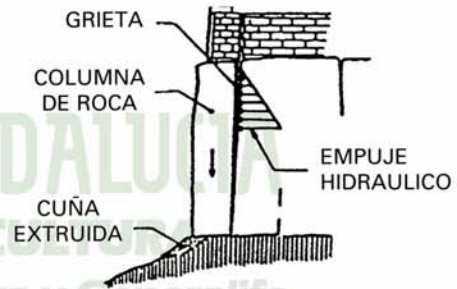
c) ROTURA DE LA BASE EN EL MODELO



d) ROTURA REAL DE LA BASE



e) VUELCO EN EL MODELO



f) VUELCO REAL DE COLUMNA DE ROCA  
 (Rodríguez Ortiz)

Fig. 8. Comparación entre modelos de colapso en mesetas, (modelo de Silberbauer y otros) y la realidad (Pierce, 1988).

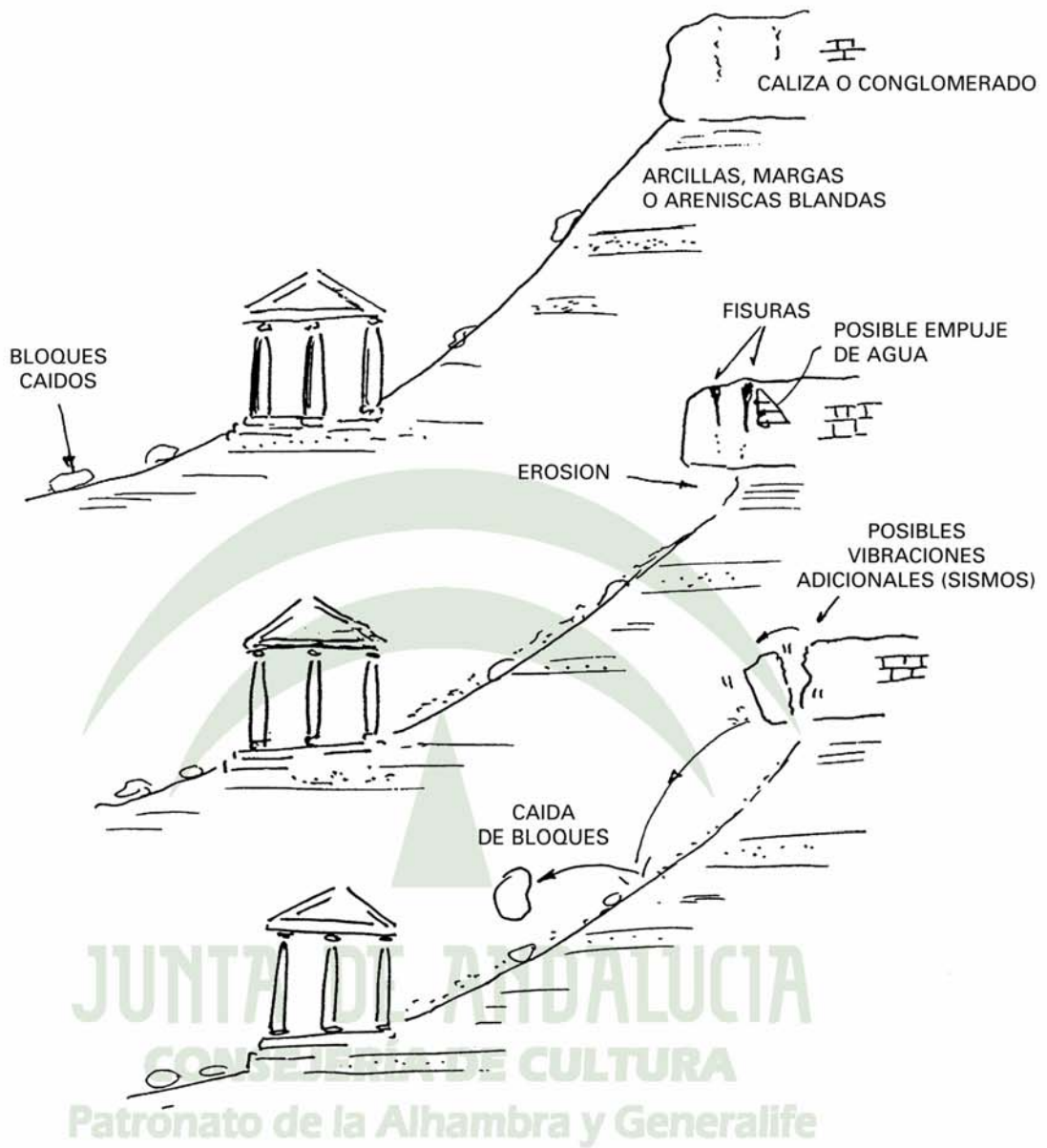


Fig. 9. Caída de bloques desde cornisa superior (esquema de la ruina del Templo de Delfos).



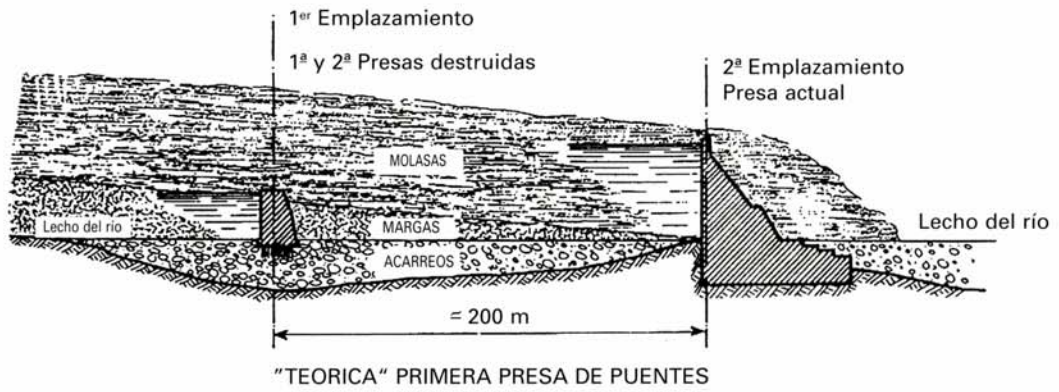


Fig. 10. Emplazamientos de las presas del Estrecho de Puentes (Bautista y Muñoz, 1986).

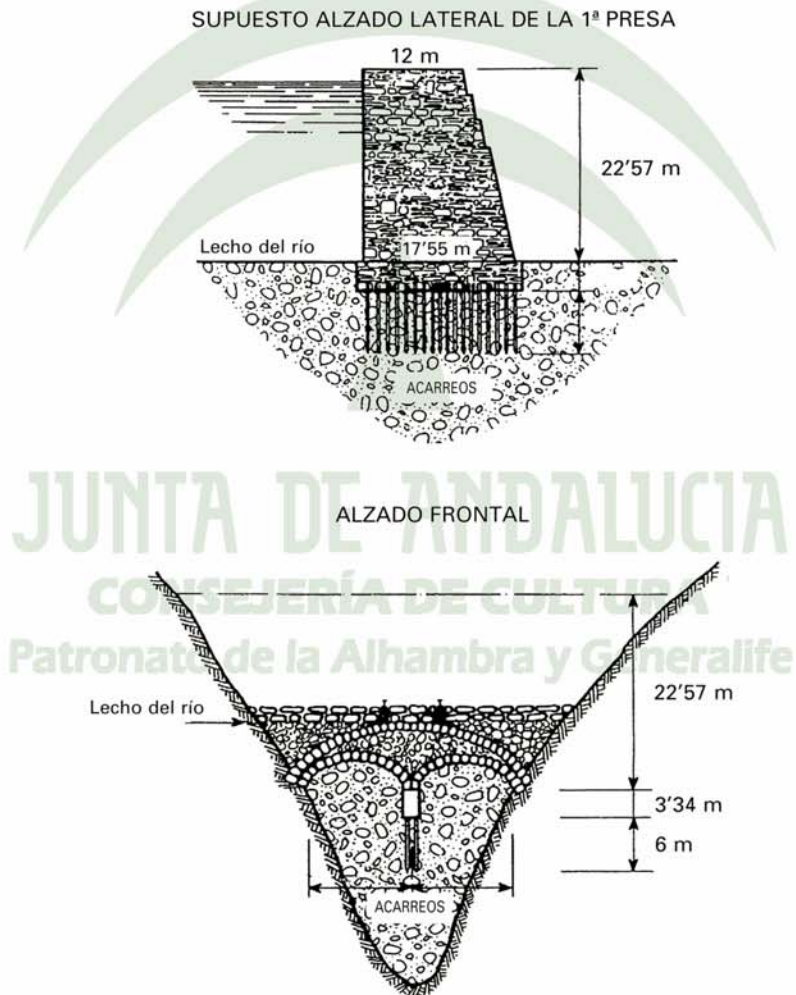


Fig. 11. Alzados de la primera presa del Estrecho de Puentes (Bautista y Muñoz, 1986).

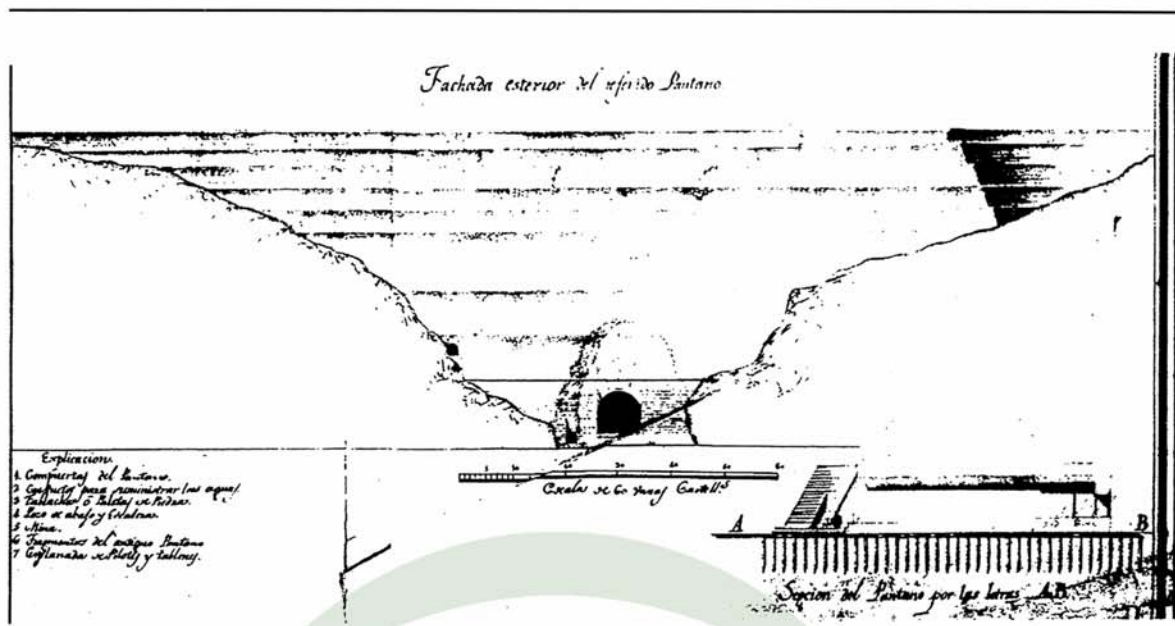


Fig. 12. Segunda presa del Estrecho de Puentes (Bautista y Muñoz, 1986).



Fig. 13. Presa arruinada del Pantano de Puentes (Bautista y Muñoz, 1986).

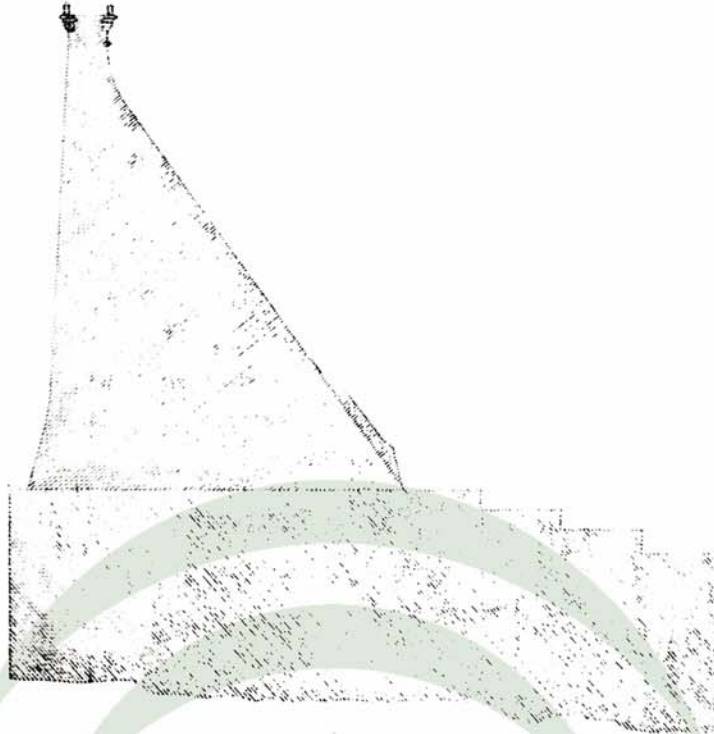
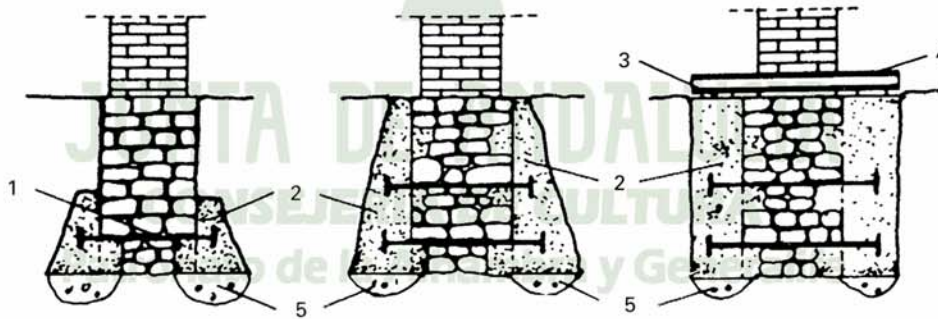


Fig. 14. Sección del cuerpo de la tercera presa del Estrecho de Puentes con cimentación (Bautista y Muñoz, 1986).



- 1 TIRANTE METALICO
- 2 ENSANCHAMIENTO DE LA BASE
- 3 ACUÑAMIENTOS
- 4 VIGA METALICA PASANTE
- 5 TERRENO COMPACTADO O INYECTADO

Fig. 15. Sistema utilizado en el casco antiguo de Cracovia: ensanchamiento de la cimentación con hormigón cosido al cemento antiguo (Ciesielki y Fuksa, 1980).

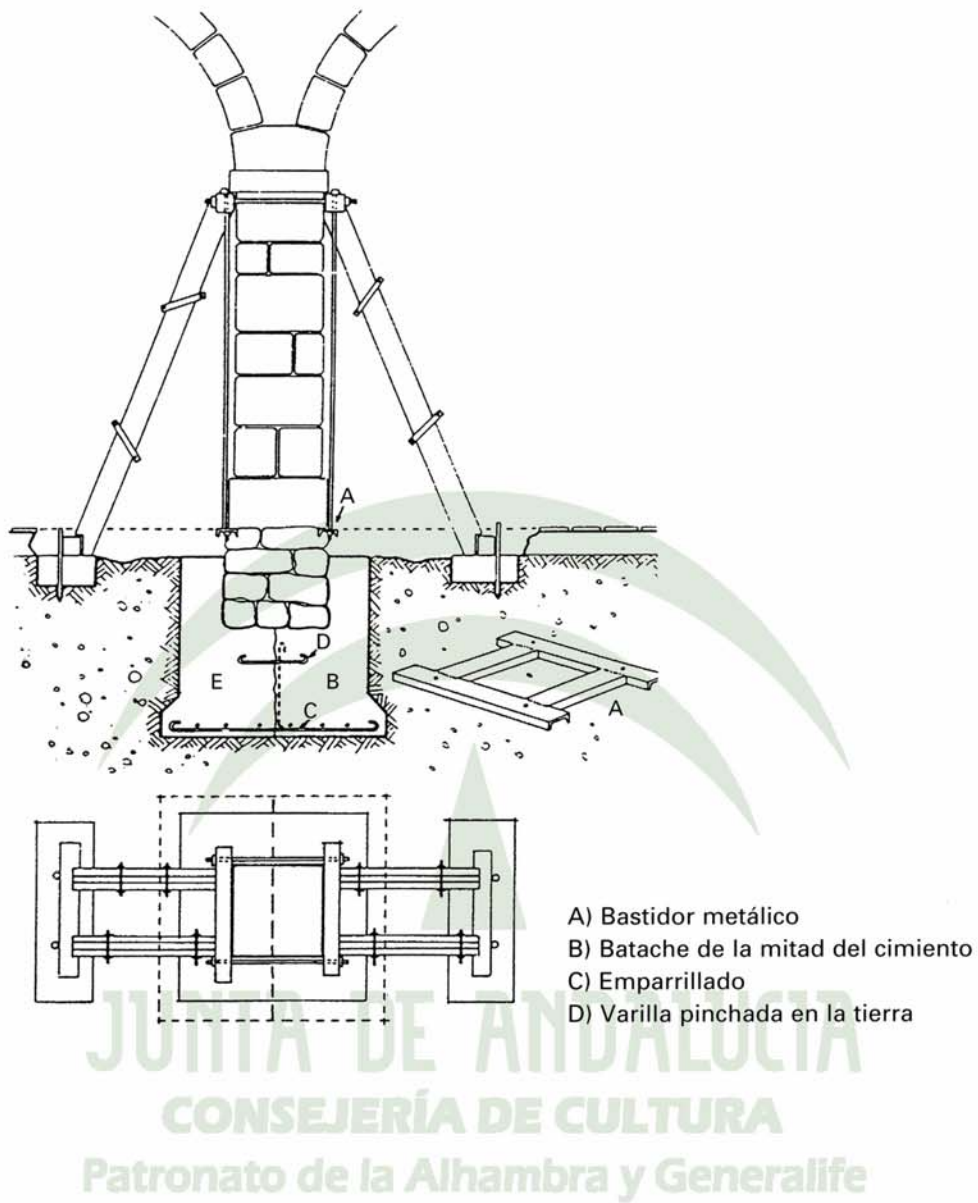


Fig. 16. Sustitución del antiguo cimiento con apeo previo del pilar o muro de carga (López Collado, 1982).

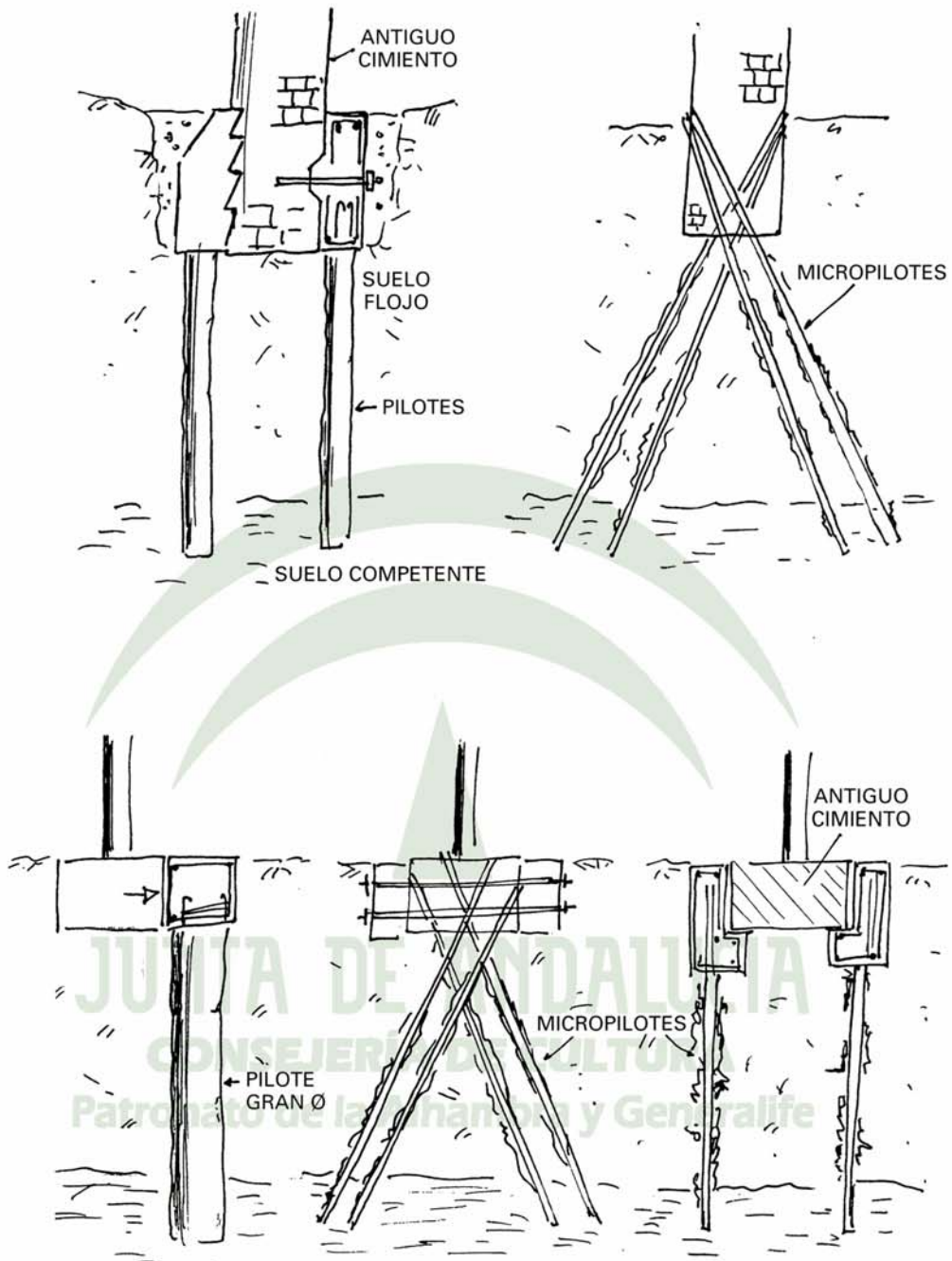


Fig. 17. Tipos de recalces con pilotes.

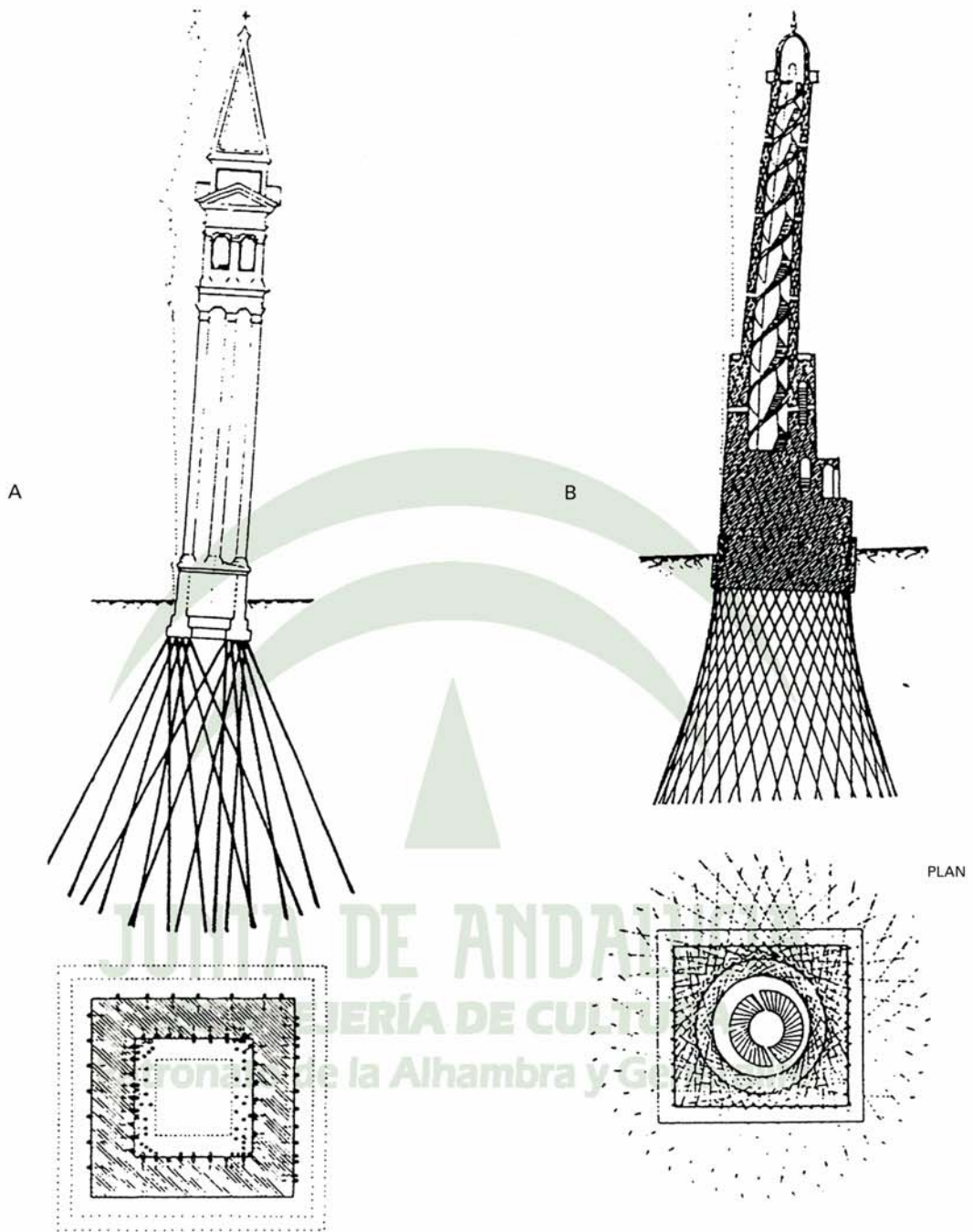
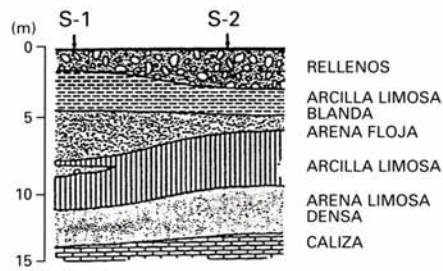
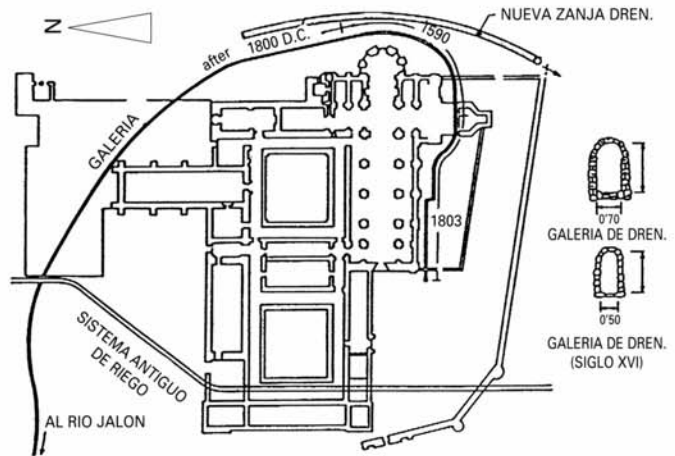


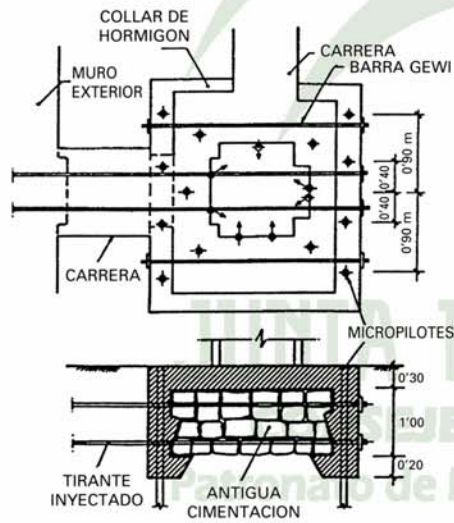
Fig. 18. Recalce de la Torre de Burano (Italia) y del Minarete de Al-Haqba (Iraq) por medio de micropilotes (Lizzi, 1985).



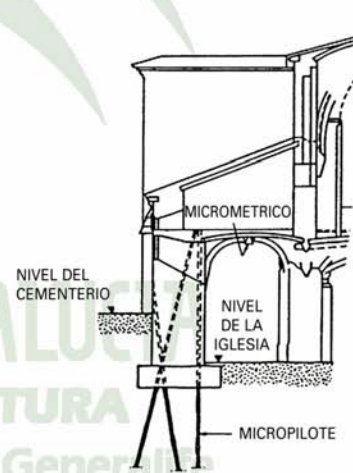
A) PERFIL GEOTECNICO



B) ANTIGUO Y NUEVO DRENAJE PERIMETRAL

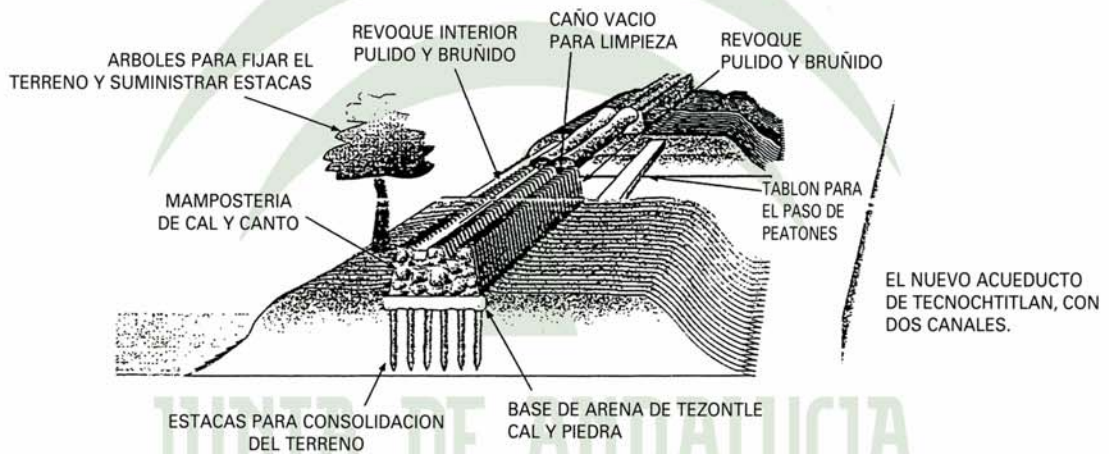
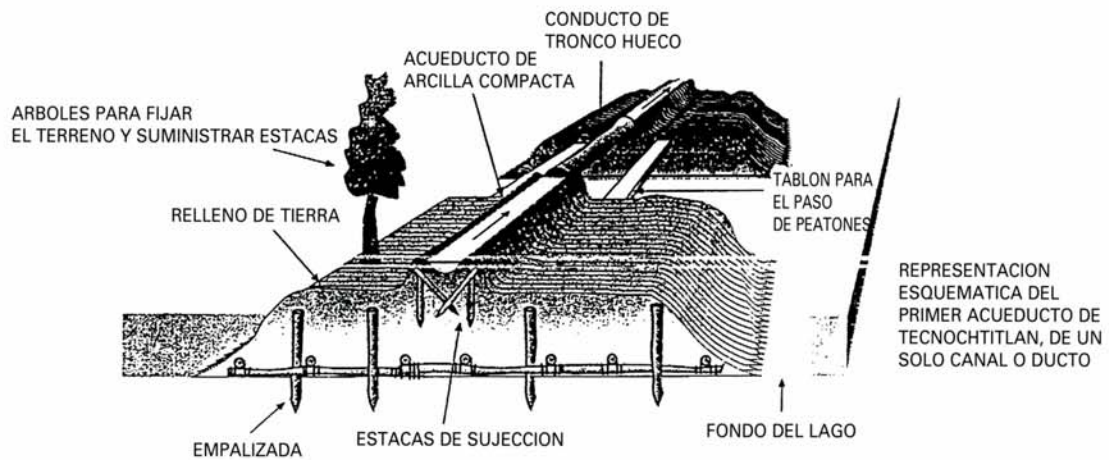


C) RECALCE DE LOS PILARES



D) RECALCE DE MUROS DE CARGA

Fig. 19. Recalce de la Iglesia del Monasterio de Santa María de Huerta. (Rodríguez Ortiz, 1988).

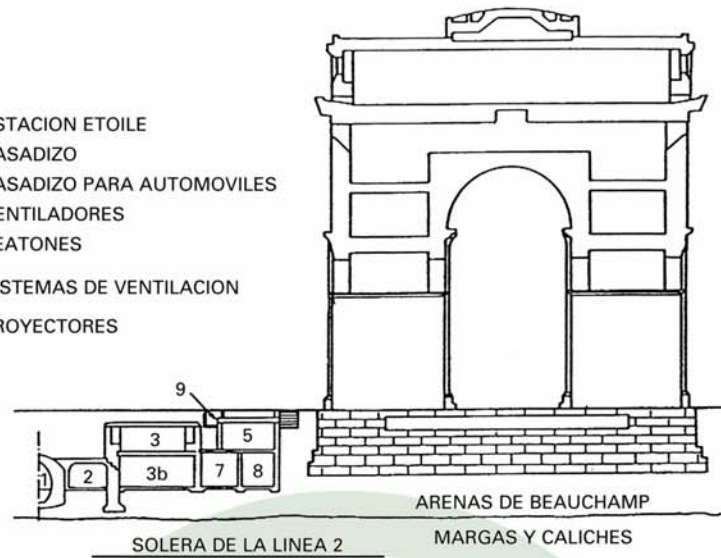


JUNTA DE ANDALUCIA  
 CONSEJERÍA DE CULTURA  
 Patronato de la Alhambra y Generalife

Fig. 20. Acueducto de Tenochtitlan. (México): primera y segunda versión.



1. ESTACION ETOILE
2. PASADIZO
3. PASADIZO PARA AUTOMOVILES
- 3b. VENTILADORES
5. PEATONES
7. } SISTEMAS DE VENTILACION
8. }
9. PROYECTORES



A) ALZADO



B) MACIZO NOROESTE

Fig. 21. Arco del Triunfo de París y ensayo de consolidación de cimientos mediante inyecciones.

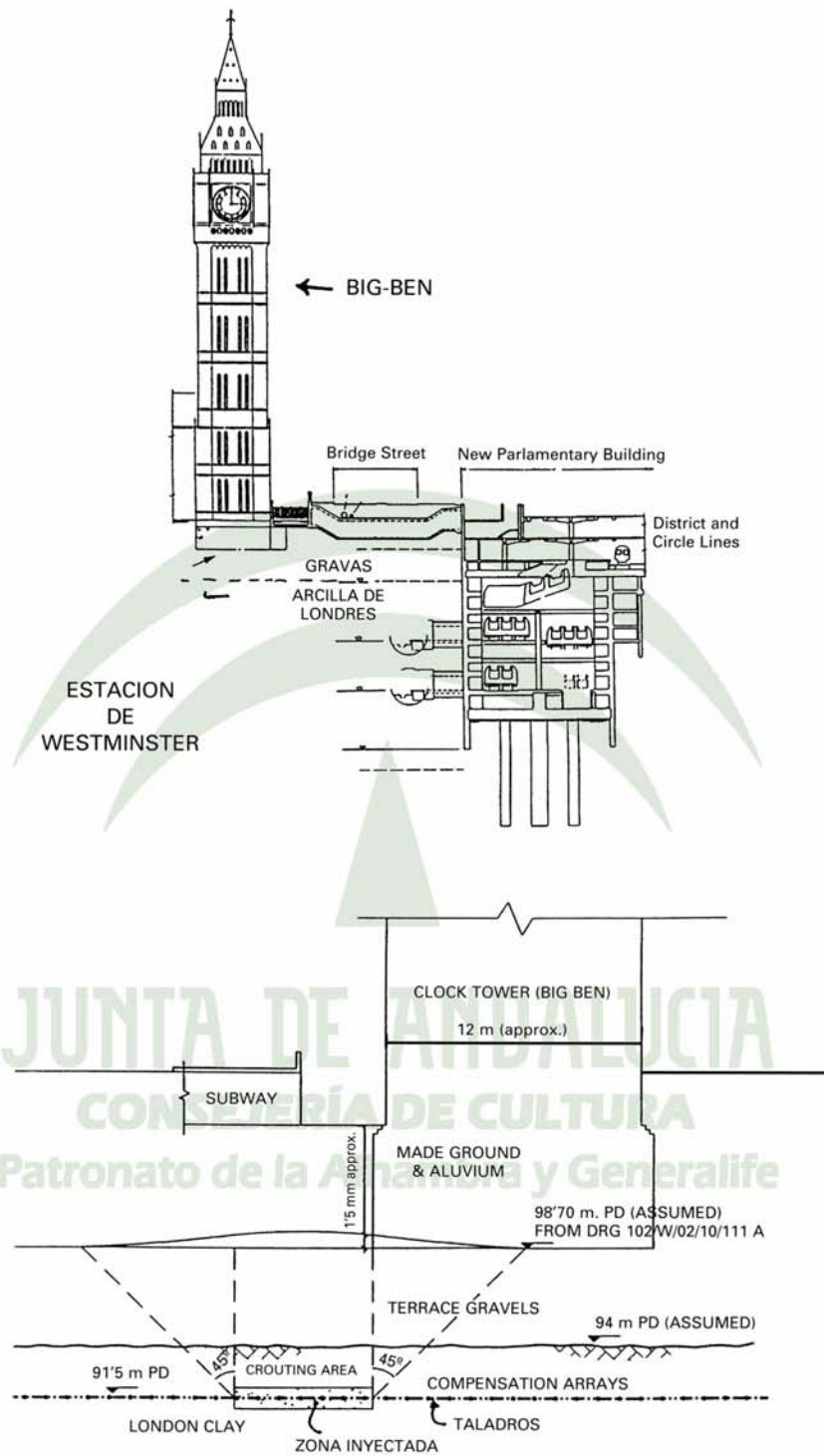
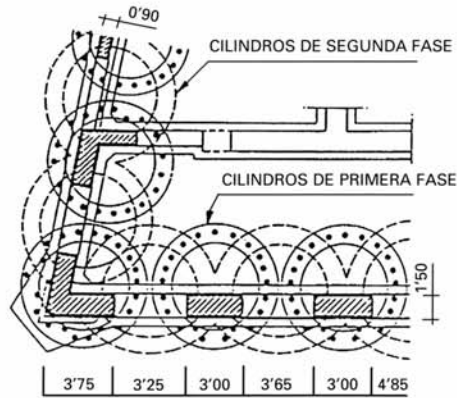
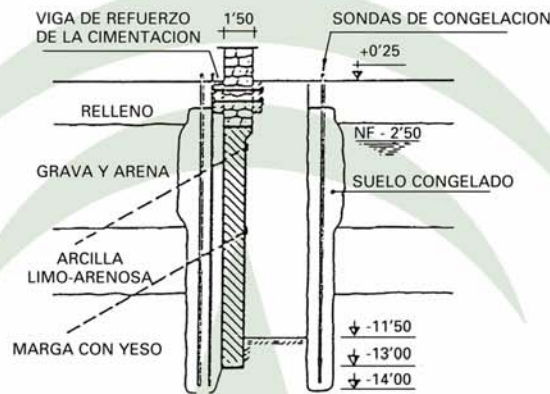


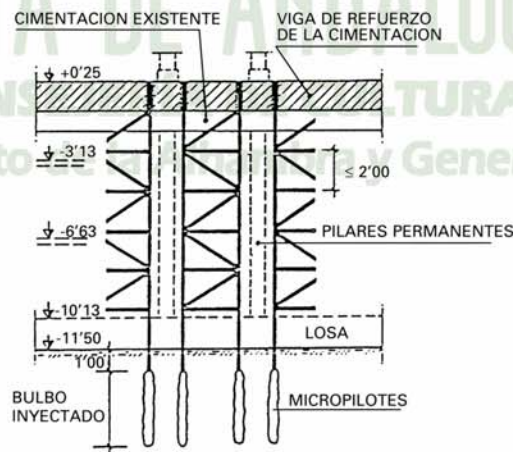
Fig. 22. Inyecciones de compensación en la zona de Westminster, en Londres. (Gentileza de Geocisa).



A) PLANTA CON CILINDROS DE TERRENO CONGELADOS



B) ALZADOS DE LOS POZOS CONGELADOS CON EL RECALCE (MURO ANCLADO) DE LOS MUROS DE CARGA



C) RECALCE PROVISIONAL DURANTE LA EXCAVACION GENERAL

Fig. 23. Ampliación y recalce de la casa del Cordón en Burgos (Delgado, 1991).

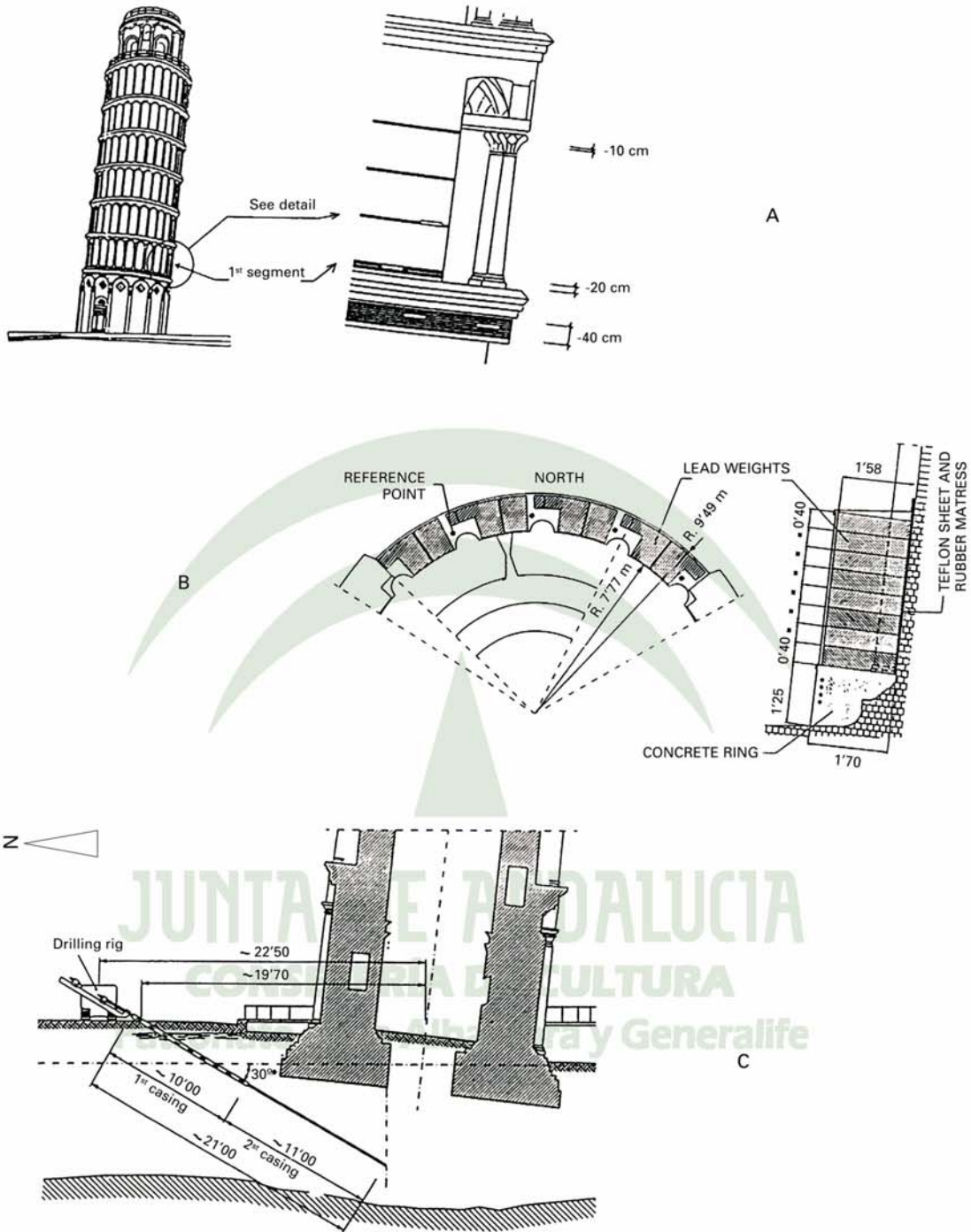
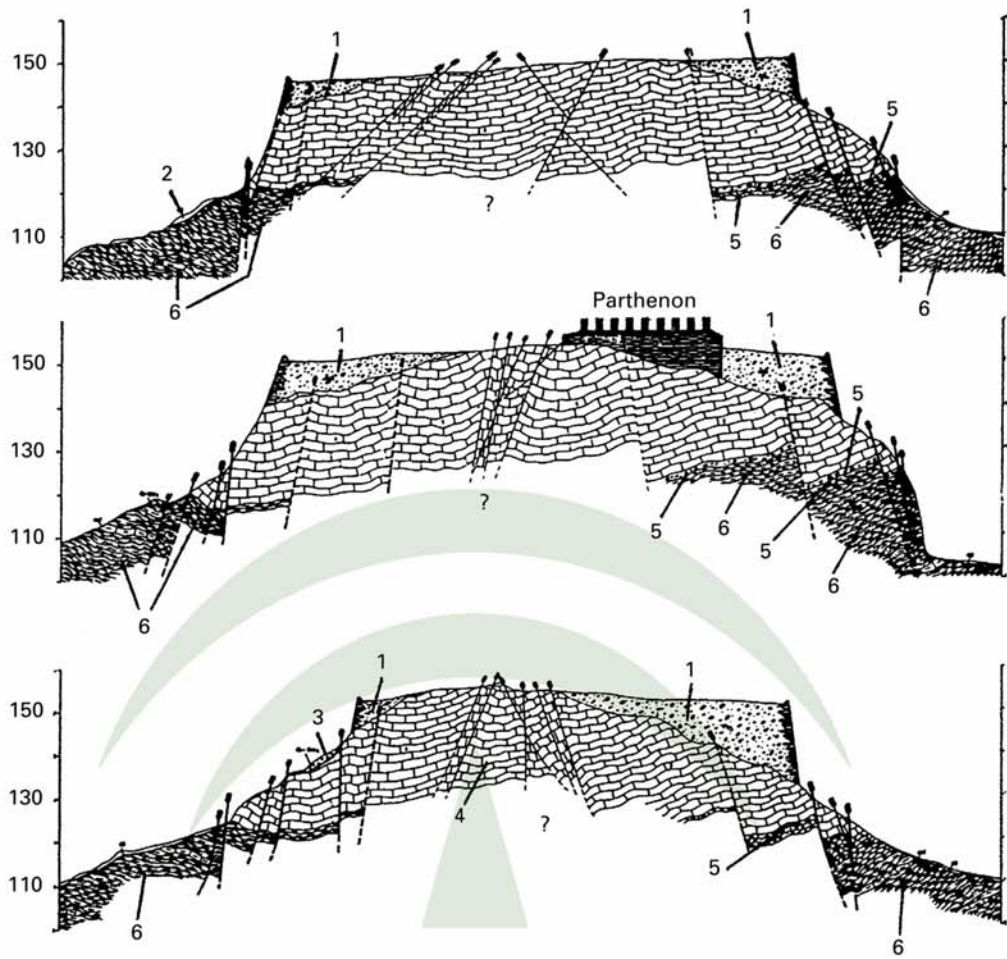


Fig. 24. Solución adoptada para parar la inclinación de la Torre de Pisa (Burland y otros, 1993).  
 1<sup>a</sup> etapa: refuerzo estructural temporal. 2<sup>a</sup> etapa: contrapeso del lado norte de la cimentación. 3<sup>a</sup> etapa: propuesta.



0 5 10 15 m

- |   |  |                         |   |  |                                    |
|---|--|-------------------------|---|--|------------------------------------|
| 1 |  | RELLENOS                | 5 |  | CONGLOMERADOS                      |
| 2 |  | ARENISCAS MUY ALTERADAS | 6 |  | ESQUISTOS - ARENISCAS              |
| 3 |  | COLUVION                |   |  | FALLA OBSERVADA                    |
| 4 |  | CALIZAS                 |   |  | FALLA PROBABLE                     |
|   |  |                         |   |  | PRINCIPALES FRACTURAS DE LA CALIZA |

Fig. 25. Perfil geológico de la Acrópolis de Atenas.

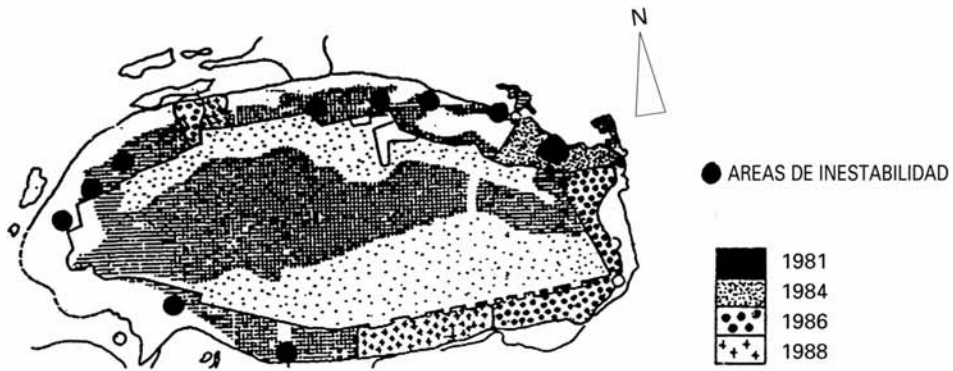


Fig. 26. Carta de las zonas de inestabilidad, indicándose la época de consolidación.



Fig. 27. Problemas típicos de la ciudad de Frías (Burgos).

- BASE TOPOGRAFICA
- ▣ INCLINOMETRO
- ▭ ACTUACIONES

0 50 100 m

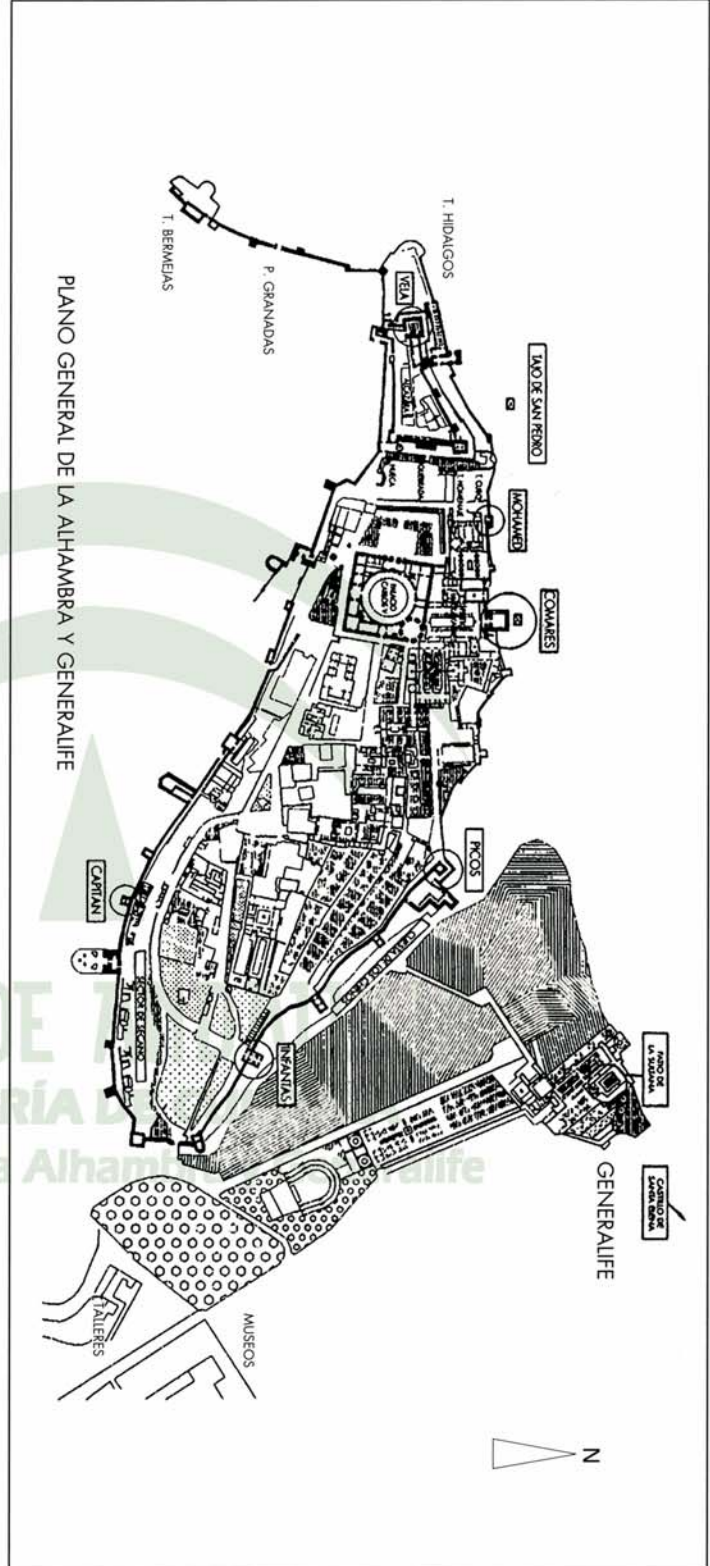


Fig. 28. Actuaciones del Laboratorio de Geotecnia en el conjunto monumental de la Alhambra (Santos y otros, 1994).