

Las torres y su asentamiento Los casos de la torre de Pisa y de las torres de Angkor

Giorgio Croci*



Cables provisionales aplicados a la Torre de Pisa

La operación de enderezamiento parcial de la Torre de Pisa brinda la oportunidad para la reflexión sobre las distintas opciones de intervención y permite contrastar de este caso con el ejemplo singular de las torres de Angkor, donde problemas de diversa índole encuentran soluciones adecuadas a su contexto, sus peculiaridades históricas y técnicas y sus coordenadas geoculturales.

Towers and their Settling. The problems involved in the partial straightening of the Tower of Pisa affords an opportunity for reflection about the possible interventions and compares it with the case of the Angkor towers. Problems of different types are given solutions in keeping with the context, the historical and technical peculiarities and the geocultural coordinates in each case.

*Giorgio Croci es Profesor Ordinario de Principios Estructurales de Monumentos y Arquitectura Histórica en la Facultad de Ingeniería de la Univ. de Roma "La Sapienza"

Los problemas

Las torres y, en general, los edificios de gran altura pueden verse afectados, principalmente, por tres fenómenos, pudiendo éstos interactuar recíprocamente: la inclinación, la desarticulación de la estructura y el aplastamiento.

La **inclinación** es debida a la deformabilidad del suelo porque el asentamiento nunca es uniforme; de hecho es suficiente una primera rotación, pequeña y casual para crear una excentricidad de la carga estática que aumente las tensiones y deformaciones en la base deprimida de la torre, iniciando un proceso que aumenta automáticamente (fig. 1).

La **desarticulación** de la estructura también se relaciona con las deformaciones del suelo y, en particular, con asentamientos no lineales que producen tensiones suplementarias, entre las cuales se cuentan los esfuerzos horizontales o diagonales de tracción.

Si la estructura no es suficientemente sólida y resistente, estas tensiones crean grietas que pueden extenderse a toda la estructura, generando desplazamientos relativos entre los bloques de sillería de piedra seca, desarticulando el edificio, etc.

El **aplastamiento** constituye otro fenómeno que puede ocurrir debido a las altas tensiones de compresión producidas por la carga estática, enfatizado por la inclinación y desarticulación de la estructura.

Las medidas de protección

Las primeras medidas de protección provisionales intentan evitar que la inclinación continúe aumentando y produzca el colapso de la torre como un sólido rígido.

Entre todas las medidas posibles a aplicar para paliar este delicado problema se cuentan el apuntalamiento del lado deprimido, la instalación de anclajes en el lado prominente...

En cuanto a los aspectos estructurales, la tarea principal consiste en prevenir las deformaciones laterales progresivas de las fábricas y proporcionar un apoyo donde el equilibrio se compense. Las cadenas, los anillos de atado, etc. constituyen posibles soluciones. En algunos casos puede ser necesario recuperar parte de la inclinación adquirida en el tiempo de la vida del monumento.

Para ello, las opciones consisten en el reflatamiento artificial de la base deprimida de la torre (mediante gatos), la creación de un asentamiento artificial en el lado prominente (compactando o ablandando la tierra), el empuje o jalado de la estructura con diversos mecanismos, etc.

En algunas ocasiones, las medidas definitivas constituyen un complemento a las anteriores, y pueden involucrar la consolidación de las fábricas, la estabilización de la tierra, el apuntalamiento de los cimientos...

1. Asentamientos y deformaciones de los minaretes y monumentos en Samarcanda debidos al pasaje de agua en el terreno



- 2. La Torre de Pisa
- 3. Sección de la torre
- 4. La evolución del asentamiento de la Torre de Pisa
- 5. Esquemas de las diferentes posibilidades para las medidas de protección de la Torre de Pisa
- 6. Posibles movimientos de la torre y carga bajo la cimentación
- 7. Rotación de la torre si las cimentaciones no estuviesen en grado de contrastar la fuerza horizontal debida a los cables

2



LA TORRE DE PISA

La torre y su historia

Las características principales de la Torre son (figs. 2 y 3): peso 14.500 toneladas; altura: 58 m; diámetro externo de la cimentación: 20 m; inclinación $5^{\circ} 28'$; excentricidad del baricentro de la estructura respecto al baricentro de la cimentación: 2,3 m; desplazamiento horizontal de la cúspide respecto al baricentro de la cimentación: 5,7 m; momento de vuelco debido a la excentricidad: 32.900 tm; hundimiento vertical del baricentro de la cimentación: 2,5 m.

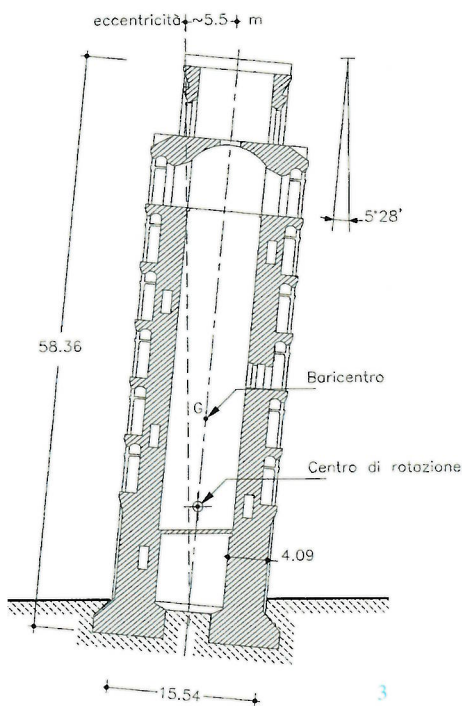
La construcción fue iniciada en 1173 según un proyecto de Bonanno Pisano, pero se detuvo al cabo de pocos años, en 1178. Cuando se emprendieron de nuevo los trabajos, después de casi un siglo (en 1272) bajo la guía de Giovanni di Simone, la Torre se había inclinado ligeramente hacia el norte pero, en 1278, al finalizar la construcción del cilindro, la inclinación había invertido su sentido, desplazándose hacia el sur debido, entre otros factores, a los intentos de corregir la inclinación inicial.

Finalmente, en 1360 se acometió la construcción del cuerpo del campanario bajo la dirección de Tommaso Pisano, que fue culminado en 1370. La evolución de la inclinación a través de los siglos se ha sintetizado en la fig. 4.

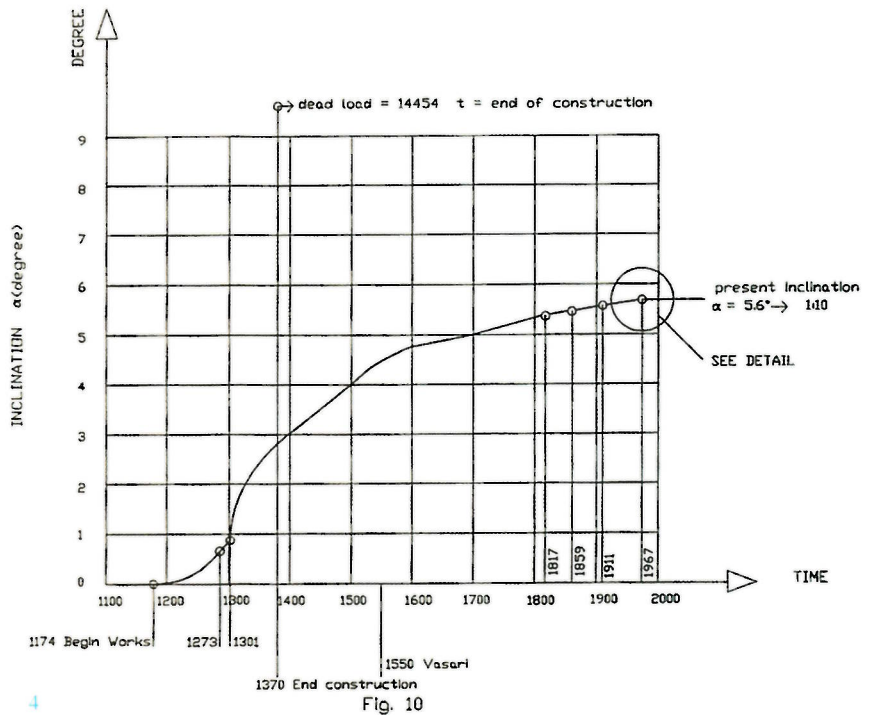
Medidas de protección provisionales

El objetivo de una estructura de refuerzo provisional reside en la mejora de los niveles de seguridad y la prevención de la inestabilidad del suelo que podría producirse durante el trabajo. Esta estructura debe aportar a su vez una serie de efectos positivos: la aplicación de un momento estabilizador, la reacción rápida e inmediata ante cualquier inclinación creciente o fenómeno desfavorable y la ayuda en la recuperación de la inclinación durante las excavaciones.

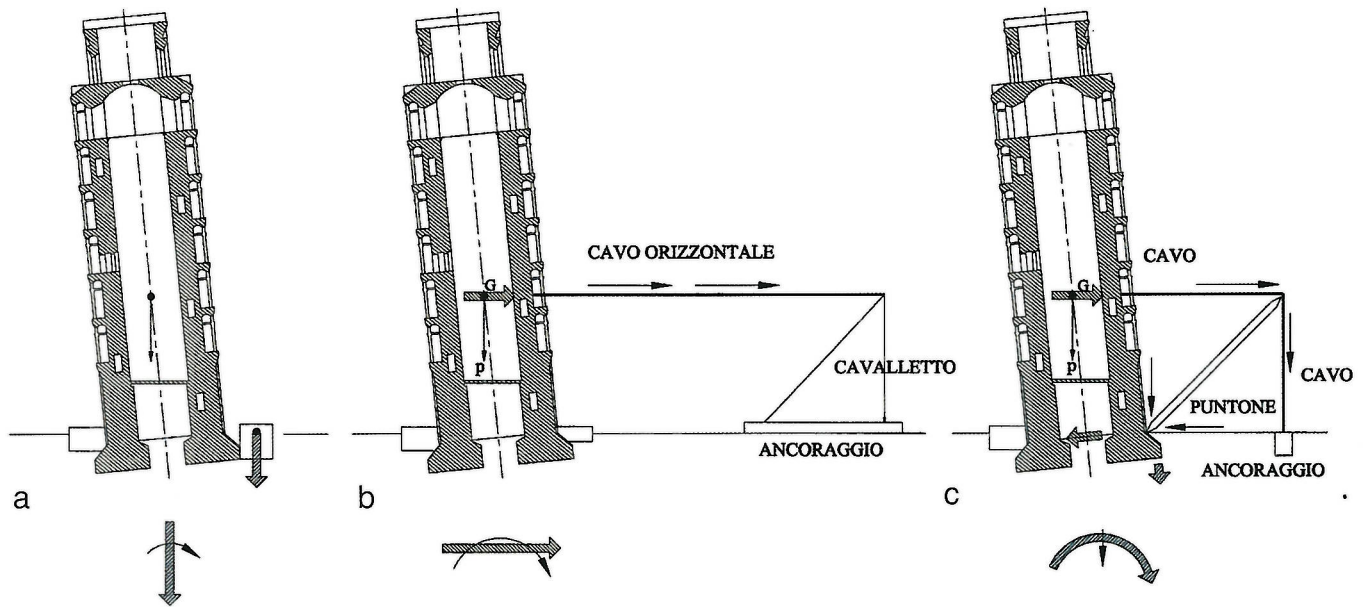
El margen de seguridad de la Torre, respecto no a su resistencia estructural, sino a su riesgo de vuelco, se ha ido reduciendo a través de los siglos hasta alcanzar una situación bastante precaria. Conceptualmente se pueden considerar tres tipos de soluciones, bien diferentes una de otra (fig. 5):



3



4



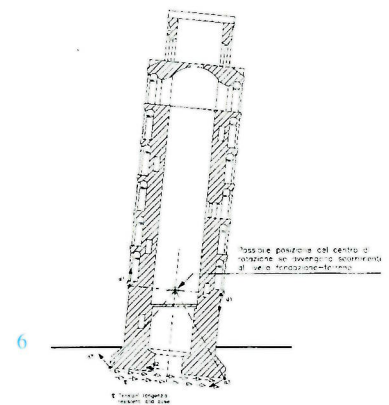
5

- Una acción excéntrica vertical aplicada sobre la cimentación (fig. 5a). Esta acción aplicable sobre el lado promi- nentemente de la cimentación puede realizarse con pesos, cables verticales preten- sados, etc. Esta solución es la más simple, pero también la menos eficaz de las opciones posibles debido a dos razones: en primer lugar, la distancia de la acción vertical al baricentro es pequeña y probablemente la excentricidad respecto al centro de rotación (cuya posición se desconoce) es todavía más pequeña; en segundo lugar, la favorable actuación del momento estabilizador está asociado a una gran fuerza vertical que produce efectos desfavorables sobre el suelo.

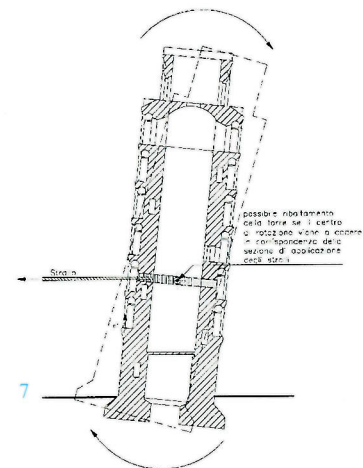
- Una acción horizontal aplicada a un cierto nivel de la torre (fig. 5b). Una acción horizontal -aplicada a través de cables horizontales o ligeramente incli- nados- reduce las tensiones tanto en la estructura como en la cimentación y produce un momento estabilizador sin ninguna fuerza vertical. Sin embargo, debido a las incertidumbres sobre la posición del centro de rotación que, durante un fenómeno inesperado, podría ser mucho más alto que el nivel

de cimentación, el momento estabiliza- dor real en la tierra puede reducirse sen- siblemente porque sólo un fragmento del tirante teórico sería eficaz (fig. 6). Si se eleva el centro de rotación hasta el nivel de aplicación de los cables la efi- cacia de esta solución sería nula (fig. 7). Otros aspectos negativos de esta solu- ción derivan de la necesidad de una gran estructura de anclaje y de la trans- misión al terreno de los esfuerzos cor- tantes horizontales.

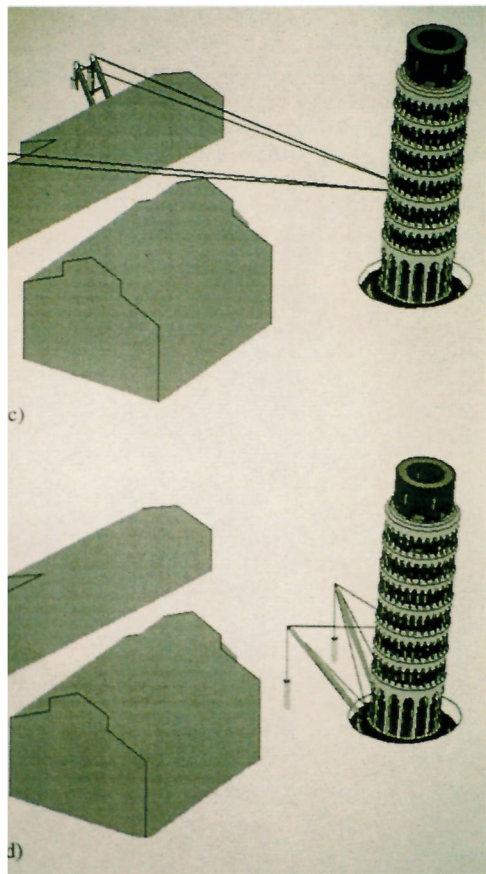
- Un sistema compuesto de una acción horizontal aplicada a un cierto nivel de la torre y una acción inclinada aplicada en la cimentación (fig. 5c). Esta opción consiste en aplicar a un cierto nivel de la torre algunos cables horizontales (seme- jante al caso anterior) asociados a un puntal inclinado comprimido que incide sobre la cimentación de la torre; el borde superior del puntal se conecta a los cables que son, por consiguiente, desvia- dos verticalmente y anclados al suelo. Si comparamos este esquema con el primero, se observa que produce una relación más favorable entre el momento estabilizador y la fuerza vertical; además éste también produce efectos positivos sobre la estructura. Respecto del segundo



6



7



8

esquema se debe apuntar que requiere de un sistema de anclaje mucho más simple (fig. 8) y es mucho más eficaz porque el puntal transmite a la cimentación una fuerza horizontal de la misma entidad (pero de signo opuesto) que la producida por los cables. Esto significa que existe un valor preciso del momento estabilizador en el cual podemos confiar porque es independiente de la altura del centro de rotación, y no se transmite al terreno ningún esfuerzo cortante.

Medidas provisionales adoptadas por el Comité en la Torre de Pisa

En 1993 se adoptó la decisión de realizar un primer intento provisional con el fin de reducir el momento de vuelco. El sistema escogido en primer término fue el indicado con la letra a) en la figura 5, sugerido por su simplicidad y por el hecho de que el borde de la cimentación prominente tendía a levantarse.

Se ha realizado por tanto en torno a la cimentación un anillo constituido por bloques prefabricados de hormigón ensamblados entre sí mediante la aplicación de una precompresión circular (fig. 9). Sobre este anillo, en el lado prominente se han

9



10



aplicado algunos bloques de plomo que suman un total de 760 toneladas que fueron incrementadas en el año 1995 a 900 toneladas para compensar un incremento repentino de la inclinación durante un intento de congelación del terreno.

El efecto del plomo fue positivo y se concretó en un momento estabilizante de 6.300 tm, que equivale a una reducción del momento de vuelco de un 20% y que, por primera vez, aunque de modo imperceptible, redujo la inclinación (52'' respecto a una inclinación de 5°28', es decir, con una reducción del orden del 3%).

En cualquier caso, los plomos no pueden considerarse una intervención eficaz a medio plazo a causa del incremento de las presiones en el terreno que terminan por influir negativamente en la zona crítica de la cimentación deprimida.

En 1998, una vez elegido el criterio para la estabilización definitiva de la Torre (del cual hablaremos en el párrafo siguiente), se tuvo que poner en marcha un sistema para mejorar la seguridad y la protección frente a incidentes imprevistos, aunque improbables, que pudieran tener lugar durante los trabajos, debidos a la inevitable perturbación que iba a sufrir el terreno. El

“Comité para la Salvaguarda de la Torre de Pisa”, del cual forma parte el autor de este artículo, después de largas discusiones, decidió adoptar el sistema indicado con la letra b) en la figura 5.

Personalmente, estoy bastante en desacuerdo con esta opción dado que el sistema indicado con la letra c), además de ser bastante más económico (puede aprovechar el apoyo del puntal el anillo de hormigón ya realizado como base de los plomos) es más eficiente y seguro, e induce, como se ha indicado, un par estabilizante de valor predeterminado independientemente de la posición del centro de rotación por efecto de deformaciones repentinas del terreno: si tuviera lugar un desplazamiento de la cimentación hacia el norte, la solución b) proporcionaría sólo un punto a modo de “bisagra” en torno al cual la torre finalizaría por rotar hasta levantarse.

Esta opción, técnicamente irracional, ha venido forzada por aspectos “estéticos”, que consideraron el sistema c) demasiado aparatoso, mientras que las torres de anclaje de los cables requeridas por el sistema b) desaparecen de la vista ocultas detrás del edificio de la Opera Primaziale, ubicado a 100 m de la torre (fig. 10). Las dos torres de anclaje están constituidas por grandes celosías metálicas de una altura cercana a los 15 metros, con un horcajo en la cúspide que desvía los cables procedentes de la Torre, puestos en tensión por una serie de bloques de plomo (fig. 11).

La posición de las torres de anclaje ha obligado a instalar dos pares de cables con una longitud de más de 100 metros, que se han anclado en la torre, a unos veinte metros de altura con un cinturón que abraza el cilindro con la mediación de un entablado de madera, colocado para evitar concentraciones de esfuerzos y cualquier tipo de daños.

Medidas definitivas adoptadas en la Torre de Pisa

La intervención de estabilización y salvaguarda de la Torre ha sido objeto de un largo debate y experimentación hasta alcanzar la solución aceptada definitiva-

mente que consiste en la realización, bajo el lado prominente de la cimentación de la Torre, una serie de pequeñas oquedades (subexcavación) que, al cerrarse provoquen un cedimiento concentrado en esta zona y, por tanto, una rotación de signo contrario a la actual (fig. 12).

Esta opción, estudiada y puesta a punto por los miembros geotécnicos del Comité, refleja completamente la voluntad de respetar no sólo la parte visible, sino también la invisible, es decir, la cimentación y el terreno, que han desempeñado un rol tan importante en la historia de la Torre hasta el punto de convertirse en un elemento que la caracteriza.

No hubiera resultado difícil, con la tecnología actual, una consolidación de la cimentación con micropilotes, es decir, con obras de subcimentación; pero la Torre no hubiera sido la misma, no sólo para el hombre de ciencia y cultura, sino quizás para el hombre de la calle que, probablemente, en la observación de la Torre no habría podido evitar pensar en el artificio escondido en el terreno que la sostenía.

El objetivo final de la intervención de subexcavación consiste en la recuperación de 30' aproximadamente, (que equivale a

8. Comparación entre dos posibles soluciones de intervención

9. Bloques de hormigón aplicados a la base de la torre

10. Cables provisionales aplicados a la torre

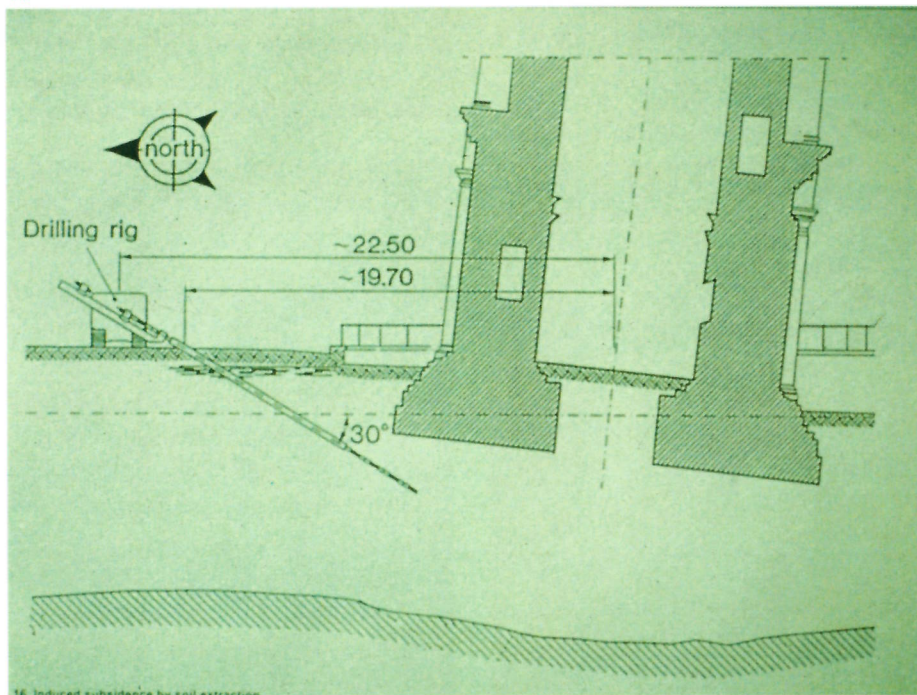
11. Estructura de anclaje de los cables

12. La técnica de subexcavación

11



12



medio metro en la cúpide), es decir, cerca de un 10% de la pendiente actual (que es de $5^{\circ}28'$), el momento de vuelco se reduce de esta manera una magnitud de 3.000 tm, volviendo a la situación en la cual se encontraba la Torre hace dos siglos; también bajo este aspecto la elección proyectual aparece sugerente, dado que lleva a la Torre a desandar parte de su pasado, es decir, su historia (hemos bautizado la intervención a modo de broma "back in the future" -retorno al futuro-).

La intervención podría detener la evolución de los cedimientos por la reducción de la presión en la zona más deformable del terreno; en cualquier caso, este objetivo podría no alcanzarse y la inclinación podría volver a aumentar, recorriendo de nuevo su "historia", si bien a una velocidad menor que en el pasado.

En la hipótesis más desfavorable, se dispondría de al menos dos siglos antes de alcanzar la misma inclinación que existía en el año 1998.

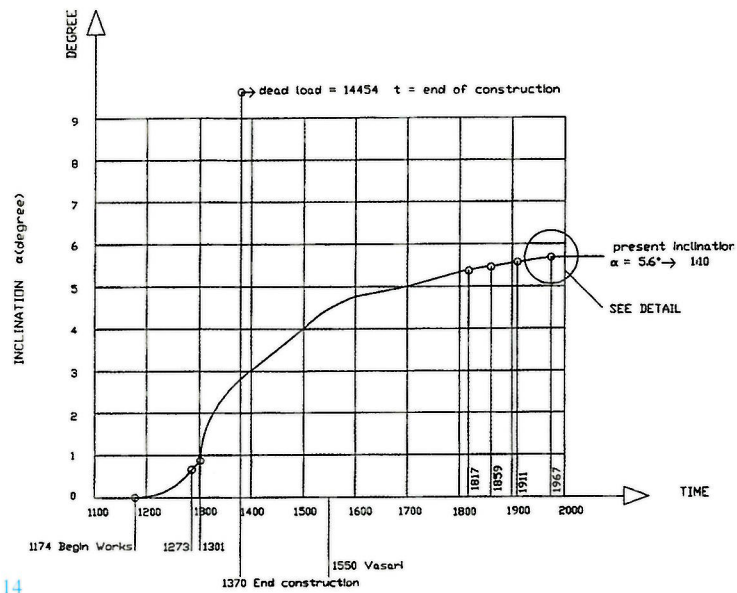
La subexcavación se efectuó mediante un instrumento de rotación, que actúa en el interior de unos tubos de revestimiento (fig. 13), de manera que extraigan paulatinamente pequeños volúmenes de terreno.

La puesta a punto de esta técnica, ya empleada con éxito en la Catedral de la

13. Los tubos para la realización de la subexcavación insertados en el terreno

14. Diagrama de la recuperación de la inclinación obtenida primero a través de la aplicación de los bloques a la base y luego mediante la técnica de la subexcavación

13



Ciudad de México, afectada de grandes cedimientos diferenciales, ha requerido de una larga experimentación y un análisis de modelos matemáticos para establecer la distancia hasta donde se puede propagar la deformación inducida por una cavidad realizada en un cierto punto para evitar el peligro que, en el terreno deprimido, próximo al estado límite, se puedan superponer efectos secundarios peligrosos e incontrolables (precisamente por estos temores se proyectó la obra de salvaguardia que se ha explicado en el capítulo anterior).

Estos estudios han podido establecer que la zona en la cual se extrae el terreno no debe superar en vertical la profundidad de 5 metros, de manera que no afecte al banco de arcilla de gran sensibilidad del sustrato (de -7 a -18 metros) y, en dirección horizontal, no sobrepasar más de un metro el borde prominente de la cimentación, para no acercarse a la zona crítica deprimida.

La subexcavación comenzó en febrero de 1999 y ha sido acompañada en todo momento de un seguimiento monitorizado de las deformaciones, de la inclinación, y de la relación entre el material extraído y los cedimientos inducidos (se prevé la extracción de 30 m³ de terreno

aproximadamente para alcanzar el objetivo de recuperación de 30') de manera de poder adoptar, en el caso de que fuera necesario, las medidas correctivas necesarias para optimizar el desarrollo de los trabajos.

A medida que se avanzaba con la subexcavación se han ido retirando los plomos de estabilización.

El diagrama de la fig. 14 muestra la recuperación de 52", tenida lugar durante la época de aplicación de estos bloques de plomo y, posteriormente, la recuperación bastante rápida aunque cuantitativamente modesta, conseguida durante los primeros meses de subexcavación.

La técnica adoptada se ha mostrado por tanto inmediatamente eficaz llevando a una respuesta positiva en la Torre; se ha previsto que los trabajos concluirán durante el año 2001.

Durante este tiempo, en lo que atañe a las intervenciones estructurales, dado que la torre se ha comportado como un cuerpo rígido sin mostrar signos apreciables de degradación (es decir, sólo se presenta el primero de los tres fenómenos presentados al principio del artículo) se ha procedido simplemente a aplicar refuerzos locales (por otra parte, no indispensables), mediante inyección y grapado.



15

15. Voladizos verticales independientes producidos por la apertura de la fábrica

16. Grietas y deformaciones de un portal y movimientos relativos en la parte inferior de la torre

17. Movimientos de pilares, rotación y grietas de los bloques de piedra en una bóveda

LAS TORRES DE ANGKOR

El daño inducido por el asentamiento del terreno

Varias torres presentan patologías de asentamiento del terreno en muchos casos también relacionadas con el cedimiento de los muros de contención de las gradas. Las consecuencias reúnen una mayor complejidad que en el caso de la torre de Pisa (que, aun cuando está en el límite de la estabilidad, se comporta como un cuerpo rígido), porque aquí la inclinación siempre va asociada a la desarticulación de la estructura debido a la falta de rigidez de la cimentación, la reducida resistencia a tracción de los ladrillos y el solape insuficiente de los bloques de piedra.

La situación más desfavorable concurre cuando la cimentación se deforma con una curvatura descendente. Las primeras señales que aparecen son grietas o apertura de huecos entre los bloques. En ocasiones, estas señales se limitan a la parte más baja pero a menudo, si la fuerza horizontal es pequeña, pueden desarrollarse hasta la cima de las torres creando una o varias "estructuras en voladizo" verticales e independientes (fig. 15).

Cuando aumentan las grietas y las separaciones, la estructura de la torre se

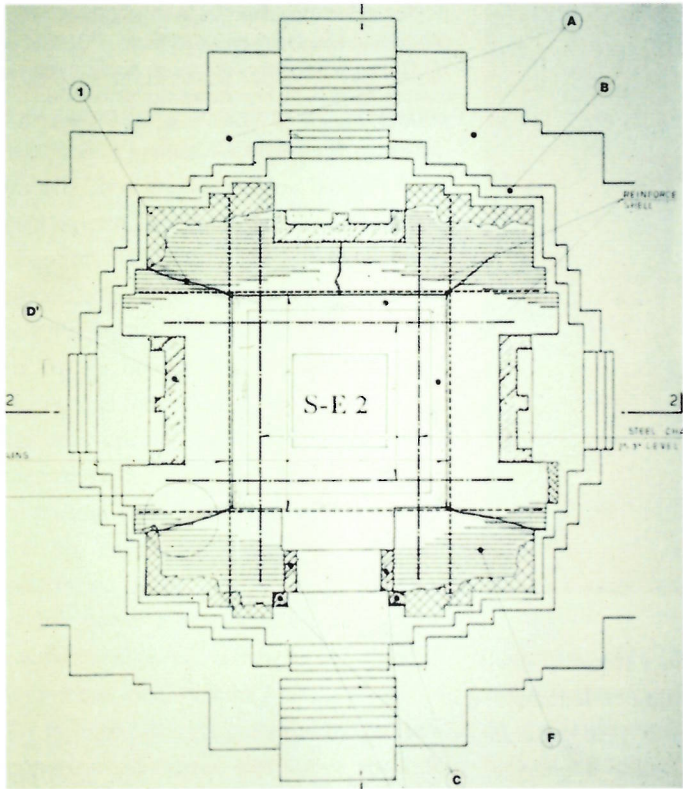
desarticula cada vez más y la estabilidad se vuelve precaria: se rompen los arqui-trabes, ceden los bloques y se generan grietas en las esquinas donde se concentran las tensiones. Por su parte, la inclinación de las "estructuras en voladizo" verticales e independientes alcanza las condiciones del límite de equilibrio, los portales y los frontones se desprenden, (fig. 16) etc. Los asentamientos del terreno también tienen consecuencias dramáticas en los arcos y bóvedas, dado que su empuje equilibrado se ve comprometido, los bloques giran y la estabilidad se vuelve precaria (fig. 17).

16

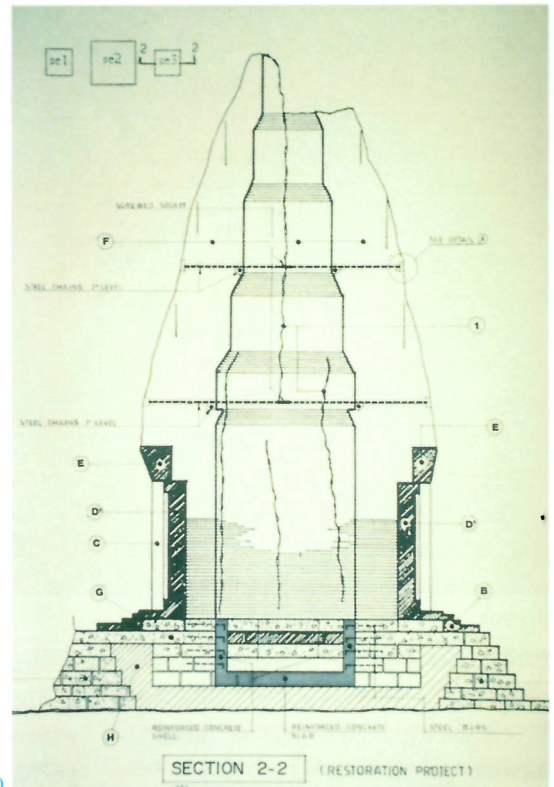


17





19



20

Medidas adoptadas para su restauración

Además de la posibilidad de dismantelar y reconstruir las torres, que se toma como última opción y que aquí no se considera, cualquier otra intervención no puede acometer por separado los problemas estructurales y de cimentación, dado que interactúan claramente entre ellos. Los criterios generales se concretan en las siguientes medidas específicas:

- **Recuperación de las deformaciones.** No se pueden seguir aquí las mismas estrategias empleadas en la Torre de Pisa ya que las Torres de Angkor no se comportan como un cuerpo rígido. Sin embargo, en algunos casos, resulta posible reducir las desconexiones y deformaciones de la mampostería a través de un sistema de gatos interpuesto, por ejemplo, entre la cimentación y la estructura. Este tipo de intervención normalmente requiere de un refuerzo preliminar de las cimentaciones y de la estructura para neutralizar las deformaciones desfavorables y las tensiones producidas durante la operación.

18

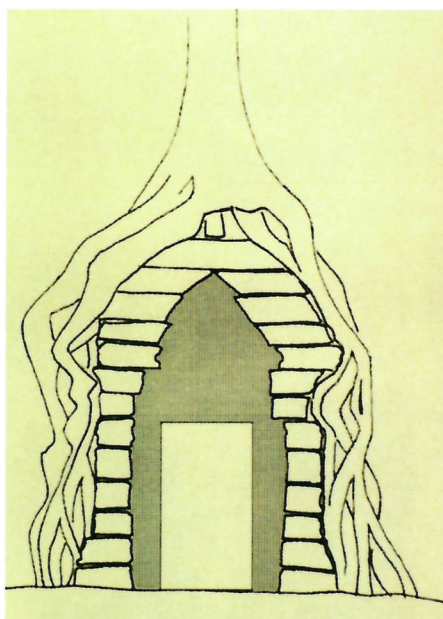


- **La estabilización de la cimentación.** A menudo, los movimientos de los cimientos de una torre se relacionan con la presencia de un estanque o con la debilidad de los muros de contención (fig. 18). Sin entrar en los aspectos mecánicos del suelo, ambas situaciones pueden producir un flujo lateral de la tierra y los consecuentes movimientos diferenciales de la estructura. En este caso, las diferentes opciones posibles son: la consolidación de la tierra (lechada a presión, etc.), la realización de un base de hormigón armado en el lado deprimido ubicado entre la torre y el muro de contención (o el estanque), el refuerzo de los muros de contención con anclajes...

- **La consolidación de la estructura y de la cimentación.** La manera más sencilla de actuar en la estructura consiste en la realización de una o más cadenas horizontales usando acero o materiales sintéticos como fibras de vidrio, fibras de carbono, fibras aramídicas, etc. A menudo esta operación debe integrarse con intervenciones de reparación y consolidación de la albañilería.

Con respecto a la cimentación una solución interesante, aplicada en una torre de Pre Rup, ha consistido en la extracción de la tierra de dentro de la torre y la realización de una caja interna de hormigón armado.

Las figuras 19 y 20 muestra este refuerzo y la posición de las cadenas. Una vez construido este dispositivo, la losa de hormigón armado que ejerce de base a esta caja se comprime contra la tierra con un sistema de gatos. Los resultados de este tipo de intervención redundan en el refuerzo de la cimentación, la reducción de las cargas y, finalmente, una distribución más favorable de las presiones en el terreno. De la misma manera, una no uniforme aplicación de las fuerzas en los gatos también podría facilitar una parcial recuperación de la inclinación y deformaciones.



21

- 18. Deformaciones de los muros de contención
- 19. Posición de las cadenas de refuerzo de la Torre de Pre Rup
- 20. Refuerzo de cimentación de la Torre de Pre Rup
- 21 y 22. Enormes árboles crecidos sobre los templos

LOS ÁRBOLES DE ANGKOR

Una observación final respecto al efecto de la vegetación y, en particular, de los enormes árboles crecidos en el transcurso de los siglos en la cima de templos. Estos árboles han sido la causa del gran daño y, en varios casos, los derrumbamientos ocurridos (fig. 21).

Sin embargo, su presencia es una señal de la historia y, en la actualidad, forman parte del ambiente y de la herencia cultural. La tecnología moderna puede conseguir que los templos sean capaces de soportar las fuerzas inducidas por los árboles y el mantenimiento periódico puede prevenir que las raíces desarticulen la estructura. Ésta es la filosofía a seguir: la destrucción sistemática de los árboles debería prohibirse.



NOTA

1 El Comité para la Salvaguarda de la Torre de Pisa está formado por M. Jamiolkowski (Presidente), J.B. Burland, R. Calzona, M. Cordaro, G. Creazza, G. Croci, M. D'Elia, R. Di Stefano, J. De Barthelemy, G. Macchi, L. Sampaolesi, S. Settis, F. Veniale y C. Viggiani

22

