



1. La Basilica y el campanario de Santa María Gloriosa dei Frari y en el fondo el campanario de Santo Stefano (I. Cavaggioni)

El campanario dei Frari en Venecia: conocimiento y restauración

Ilaria Cavaggioni, Alberto Lionello y Angela Squassina*

Palabras clave: campanario, cimentación, estratigrafía, monitorización, fábrica de ladrillo, hidrofacturación

Keywords: belltower, foundation, stratigraphy, monitoring, brick masonry, jetgrouting

El estudio previo, proyecto y proceso de restauración del campanario de la iglesia dei Frari en Venecia constituye un caso ejemplar de intervención en un edificio histórico. Esta intervención ha partido de una investigación rigurosa de los datos documentales en paralelo con una lectura detallada de la fábrica material que ha permitido contrastar la verosimilitud y las lagunas de las fuentes históricas, la evolución del edificio, su realidad construida y los efectos de las intervenciones de reparación del pasado, al tiempo que se iban monitorizando las lesiones de la fábrica. A la luz de este conocimiento, la restauración ha actuado con una gran prudencia en aras al respeto de la historia material del edificio y de la compatibilidad estructural a corto y largo plazo.

The Frari bell tower in Venice: study and restoration. The preliminary study, project and restoration process of the bell tower of the Frari church in Venice is an exemplary case of intervention on a historic building. This intervention started with in-depth research into the documentary data along with a detailed study of the material fabric which has made it possible to compare the verisimilitude and gaps in the historic sources, the evolution of the building, its built reality and the effects of the repair works carried out in the past at the same time as the damages in the fabric were monitored. Thanks to the knowledge thus gleaned, the restoration works proceeded with great caution in order to respect the material history of the building and short- and long-term structural compatibility.

*Ilaria Cavaggioni y Alberto Lionello son arquitectos de la Soprintendenza per i beni architettonici, per il paesaggio e per il patrimonio storico, artistico ed etnoantropologico di Venezia e Laguna. Angela Squassina es profesora en la Università IUAV di Venezia.

El complejo arquitectónico de la Iglesia dei Frari en Venecia con la capilla de San Pedro y el campanario en su configuración actual son el resultado de un proceso constructivo que tiene su origen en la mitad del siglo XIV, cuando se inició la reconstrucción de la iglesia franciscana y, 20 años más tarde, la erección del campanario (fig. 1). La lectura directa de las fábricas arquitectónicas, el reconocimiento de los nexos de naturaleza estratigráfico-constructiva y el análisis histórico y documental han permitido identificar tres fases constructivas desde un punto de vista estratigráfico, aunque pertenezcan a obras cronológicamente diversas sólo en parte.

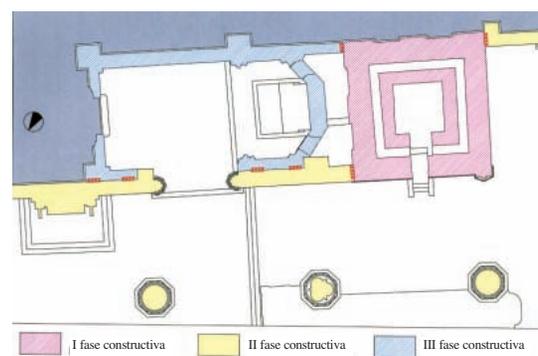
La primera fase, comprendida entre 1361 y 1396, corresponde a la construcción del campanario que se realizó con una fábrica estructural de doble fuste, interno y externo, con basamento de piedra de Istria y construcción de rampas perimetrales para el acceso al cuerpo de campanas. El campanario nace en un contexto ya edificado en el que preexistía la primitiva iglesia de los Hermanos Menores Franciscanos construida a mitad del siglo XIII, con orientación opuesta a la actual. Sin embargo, al menos en la fase inicial de construcción correspondiente a la realización del basamento en piedra de Istria, se concibió en aquel momento como un elemento arquitectónico exento, completamente autónomo respecto a otras construcciones.

La segunda fase constructiva, comprendida entre 1340 y 1432, corresponde a la reconstrucción de la iglesia en su forma actual englobando parcialmente el campanario a la altura del transepto del nuevo templo. Los paramentos verticales de la iglesia y el campanario nacen completamente desvinculados precisamente para consentir movimientos diferenciales entre las dos construcciones tan diversas entre sí en masa y dimensión. El único vínculo entre los dos cuerpos de fábrica tuvo lugar a la altura de las bóvedas de ladrillo del transepto y de la nave lateral izquierda, que se apoyan directamente sobre el muro del campanario.

La tercera fase constructiva, ubicada temporalmente en la primera mitad del siglo XV, se corresponde con la construcción de la Capilla de San Pedro realizada en 1432 en la esquina sudeste, entre el muro del campanario y el de la iglesia, con fábricas que se apoyan simplemente sobre las construcciones preexistentes. Aunque nacieron en un arco temporal muy apretado, estas tres estructuras se concibieron como unidades constructivas autónomas (fig. 2).

En septiembre de 2000, el empeoramiento de algunas grietas ya existentes en las bóvedas de la capilla de San Pedro y de la nave lateral izquierda del templo, junto a la caída de algunos fragmentos de enlucido y de ladrillo, demostraron la presencia de mecanismos estructurales activos que afectaban a las estructuras adosadas a la masa construida del campanario (fig. 3). Por esta razón, la Soprintendenza per i Beni Architettonici di Venecia emprendió una obra de emergencia para el apuntalamiento y la puesta en seguridad de las estructuras dañadas. Esta obra de emergencia se ha convertido al mismo tiempo en una ocasión para iniciar un proceso sistemático de lectura y conocimiento de la fábrica. En esta ocasión, se ha realizado una

2. La planimetría revela las tres fases constructivas identificadas: A – 1361-1396: 1ª fase constructiva, erección del campanario; B – 1340-1342: 2ª fase constructiva, erección de la iglesia; C – primera mitad del siglo XV: 3ª fase constructiva, construcción de la capilla de San Pedro



3. Las bóvedas de la capilla de San Pedro (archivo Soprintendenza BAPPSAE di Venezia e Laguna)
4. Levantamiento del 21 de mayo de 1862 en el cual se identificó el asentamiento del muro meridional de la capilla de San Pedro arrastrado por el asentamiento del gran cuerpo del campanario

investigación para reconstruir a través de varios procesos analíticos las fases constructivas y los procesos de transformación de esta construcción histórica que podían haber modificado con el tiempo su comportamiento estructural, comprender los mecanismos activos, y definir en consecuencia un proyecto de monitorización que pudiera proporcionar datos significativos para evaluar la velocidad de las deformaciones estructurales.

Más allá de representar una fase preliminar y propedéutica a la elaboración del proyecto de restauración, la aproximación analítica y cognoscitiva del estudio previo se ha constituido en el fundamento de un recorrido metodológico que ha guiado las decisiones proyectuales en primer lugar y, posteriormente, las fases de obra a través de un proceso continuo de referencia y retroalimentación que comparaba los datos analíticos y la realidad. Se ha considerado por tanto fundamental partir de un reconocimiento de toda la documentación histórica y reciente del campanario.

Paralelamente a la investigación histórica, se han realizado una serie de levantamientos instrumentales para una primera comparación con los datos ya adquiridos en el transcurso de campañas precedentes de levantamiento. En una primera fase, se ha creído más oportuno encuadrar el problema a partir del dato numérico asumido no tanto como dato cuantitativo exacto sino más bien elemento cualitativo indicador de la tendencia de un mecanismo en acción. Por esta razón, se ha efectuado una verificación de las cotas de nivelación realizadas en 1902 marcadas sobre 48 puntos en piedra en el interior y el exterior de la basílica. Se ha podido comprobar que el asentamiento de la estructura de la iglesia estaba comprendido entre 1 y 2 centímetros, mientras que el campanario y sus muros limítrofes mostraban asientos de mayor envergadura, como se recoge a continuación:

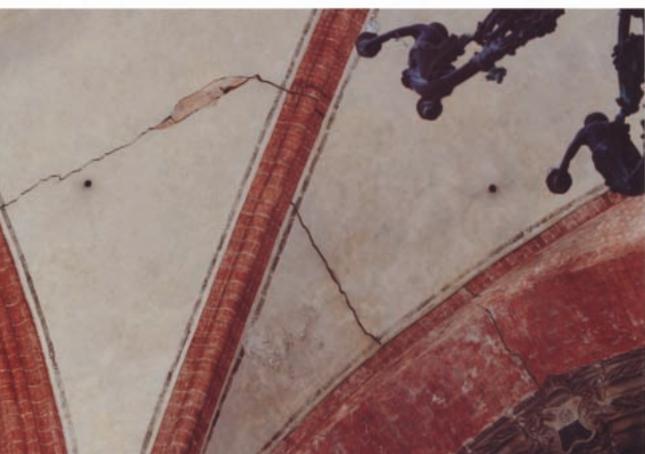
Esquina este: -4.98 cm

Esquina sur: -6.13 cm

Esquina oeste: -9.33 cm

Se ha realizado una comprobación de la verticalidad del campanario a partir de la restitución de los alzados efectuada en 1990 mediante levantamiento fotogramétrico, confrontando la posición de algunos puntos en altura de la torre. Se ha verificado la existencia de un desplazamiento medio de 2 centímetros en dirección oeste del fuste del campanario a 45 metros de altura en dirección opuesta a la inclinación existente del campanario hacia la plaza. Se trataba de un comportamiento anómalo de la estructura de la torre que, contrariamente a lo que comúnmente sucede, tenía la tendencia de volver a la posición vertical en su último tramo.

La profundización de la investigación documental y de archivo realizada entre el 2000 y el 2001 y la comparación de la información de carácter histórico y documental con los datos materiales reconocibles sobre la fábrica han permitido documentar las fases de construcción iniciales y las sucesivas intervenciones de restauración que han podido inducir alteraciones constructivas en la fábrica y, en consecuencia, modificaciones del comportamiento estructural de la misma. Los documentos de archivo

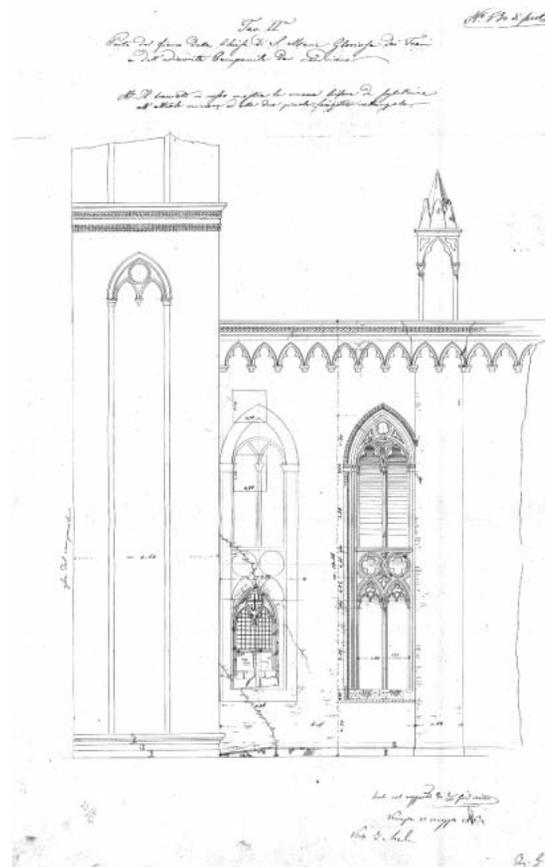


consultados han permitido la reconstrucción a grandes líneas de las tres grandes intervenciones de restauración que han afectado de modo significativo al campanario y a la capilla de San Pedro adyacente, tenidas lugar en el periodo comprendido entre la segunda mitad del siglo XIX y el primer decenio del 1900.

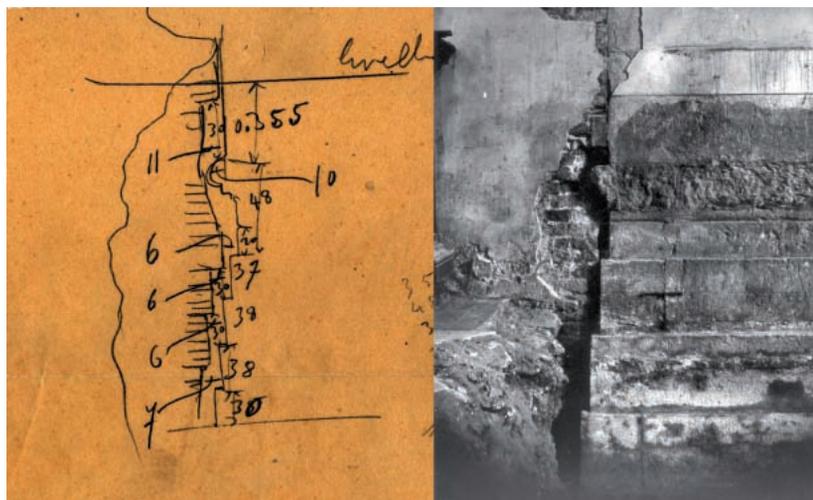
La primera intervención documentada sobre el campanario se realizó entre el 1862 y 1866. El proyecto inicial previó “Trabajos de reparación y renovación del muro externo que flanquea el campanario”. En un dibujo del levantamiento del muro este de la capilla realizado en 1862 se muestra el asiento del tramo de muro en contacto con el campanario, que aparece con graves lesiones a causa del hundimiento de la enorme masa del muro de la torre del campanario, a pesar de que las dos estructuras estaban completamente desvinculadas (fig. 4). El proyecto propuso la demolición de toda la porción de muro afectada por el asiento, con una anchura de 2,70 metros, y su reconstrucción con la formación de una ventana geminada igual en forma y dimensión de las existentes en el mismo alzado, en sustitución de dos humildes vanos rectangulares y de una ventana geminada de pequeñas dimensiones.

En 1864, en el transcurso de la excavación realizada hasta 2,40 metros bajo la cota de la calle, aparecieron los viejos cimientos del muro de la capilla de San Pedro adyacente al campanario que estaban compuestos por grandes mampuestos en gran parte disgregados por la pérdida del mortero y la presencia del subsuelo limoso de escasa resistencia en las juntas. En vez de los nuevos cimientos previstos por el proyecto para el tramo de muro que se debía reconstruir, se decidió construir un robusto arco de descarga con muro de pie y medio apoyado, por una parte sobre el zócalo de la cimentación del campanario y por otra sobre los cimientos de la capilla. Se construyó por tanto a nivel de los cimientos un primer vínculo entre las dos construcciones con la consecuente modificación del comportamiento estructural del complejo campanario-capilla.

Pero los movimientos del campanario terminaron por repercutir también en el interior de la iglesia, donde existía otro vínculo estructural entre los dos cuerpos de fábrica a la altura de las bóvedas. Se realizó un apuntalamiento empresillado a la altura de la primera arcada de la nave lateral izquierda que se apoyaba sobre un pilar englobado en el muro del campanario, y se erigió un andamio para verificar los daños presentes en la arquivolta de piedra, muy deformada y desconectada, con riesgo de caída de grandes fragmentos rotos, y observar la amplia lesión sobre el muro superior. Un dibujo de 1867 ilustra muy claramente los daños provocados por el campanario con la representación del cuadro fisurativo del muro del transepto a la altura del primer arco de la nave lateral izquierda. Resulta especialmente significativo comparar la representación de 1867 y el cuadro fisurativo actual de la pared sudoeste del campanario (fig. 3). En 1867 el muro sobre el arco de conexión entre la basílica y el campanario estaba lesionado a causa de los asientos diferenciales incompatibles de ambas estructuras.



4



5

La segunda intervención de restauración se realizó entre 1867 y 1873. Se trata del “Proyecto de restauración radical de la cubierta de la Iglesia de S. M^a Gloriosa dei Frari y otros trabajos de urgencia en el interior de la misma Iglesia” que, en términos generales, previó tres intervenciones: la reconstrucción de toda la cubierta de la capilla de San Pedro, el desmontaje y la reconstrucción del arco en piedra de la nave izquierda adyacente al campanario, y la demolición y reconstrucción de las bóvedas de ladrillo de la capilla de San Pedro. El proyecto preveía la formación de un arco de descarga con el mismo espesor del muro justo encima del arco de piedra de la nave lateral completamente deformado por el asiento diferencial de los apoyos, y, por ende, el desmontaje de la arquivolta con la restauración, el taraceado de las dovelas pétreas y la sustitución de los elementos no recuperables. La observación directa de los elementos arquitectónicos y constructivos junto a la ejecución de algunos ensayos stratigráficos en puntos concretos, buscando localizar las trazas significativas para elaborar una reconstrucción de las intervenciones realizadas, ha permitido aclarar algunas cuestiones esenciales. Las dovelas de piedra fueron desmontadas y sustituidas por elementos nuevos en su mayor parte. Resulta bastante evidente el diverso nivel de degradación y de elaboración superficial. Es improbable que se creara el arco de descarga con el mismo espesor del muro justo encima del arco de piedra, dado que esta intervención no es legible hoy en día sobre el paramento interno, desnudo de enlucidos y de revestimientos.

En definitiva, la intervención sobre el arco de piedra intentó eliminar los efectos de la degradación pero sin intervenir en las causas. Ultimados los trabajos, el hundimiento del campanario no se había detenido y los ulteriores descensos se pueden leer en la actualidad sobre las bóvedas de la nave lateral adyacente al campanario y sobre el mismo arco en piedra que, deformándose, ha registrado los movimientos. El semiarco adyacente al campanario ha perdido casi completamente su geometría y presenta notables desconexiones donde la curva de presiones sale del tercio medio de la sección y deslizamientos de las dovelas de la clave con una apertura de las juntas

5. Levantamiento y documentación fotográfica de la junta entre el campanario, a la derecha, y el muro de la basílica, a izquierda (1904); se percibe el asentamiento diferencial estimado en 35 cm (archivo Soprintendenza BAPPSAE di Venezia e Laguna)

6. La intervención en la cimentación realizada en 1904 (archivo Soprintendenza BAPPSAE di Venezia e Laguna)

de hasta 1,5 centímetros. El asiento del campanario había causado daños importantes en las bóvedas de ladrillo de la adyacente capilla de San Pedro, hasta el punto de hacer necesaria su demolición y reconstrucción con nuevas bóvedas encamonadas con un tratamiento de tres manos de aceite de linaza imitando la piedra viva. La intervención se limitó a la bóveda de crucería central ya que las plementerías de la zona del presbiterio fueron mantenidas y reparadas con sustituciones parciales y limitadas de las dovelas cerámicas inconexas pertenecientes a las nervaduras.

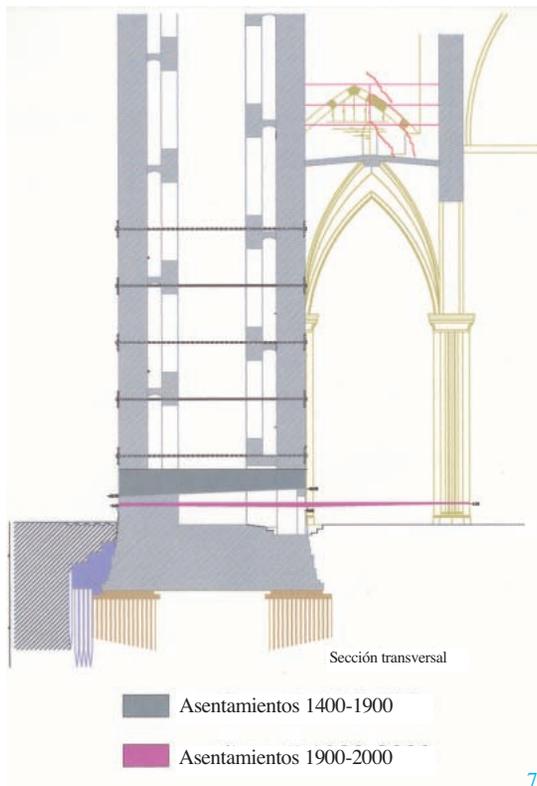
En 1902 el derrumbe del campanario de San Marco suscitó muchos temores sobre la suerte de los campanarios venecianos, un temor que venía de antiguo¹, y el campanario dei Frari no quedó al margen de estas preocupaciones: “Así, desde el día del derrumbe titánico, se generó en algunos la terrible sensación de que todo se iba a hundir (...) desde las Procuraderías Viejas al (...) campanario (...) de’ Frari (...)”².

El cedimiento de la cimentación del campanario, con un descenso diferencial con respecto de la iglesia recogido a principios del siglo XX de cerca 30 centímetros, y la consiguiente inclinación hacia el sur que, en 1904, medía 76,5 centímetros sobre una altura de 42,5 metros, habían provocado grandes daños tanto en la capilla de San Pedro como en las bóvedas de la nave izquierda de la iglesia haciendo necesarias intervenciones de consolidación de los muros y de la cimentación (fig. 5).

Los ensayos que se realizaron en la cimentación desvelaron una base de apoyo de los cimientos insuficiente para la mole del campanario, que constituía la principal causa de los asientos de la torre. Por esta razón, se inició una intervención de consolidación de la cimentación del campanario con el ensanchamiento de la misma, partiendo del lado meridional en declive donde existía la máxima inclinación. Una amplia documentación de archivo junto con numerosos dibujos, fotografías y levantamientos de la obra ha permitido reconstruir de un modo más bien preciso la naturaleza y la dimensión de la intervención realizada en sus diversas fases operativas. El trabajo se realizó por bataches que comenzaron por el ángulo sudeste y por el área frente al arco de descarga a nivel de la cimentación entre el muro de la capilla de San Pedro y el campanario que había sido construido en 1864. Al pie del antiguo entablado de base del campanario se embutió una empalizada de troncos de alerce de 380x20x20 cm con una plataforma paralela al lado de la cimentación del campanario con una longitud de 3 m a 2 m de distancia del entablado tradicional, y previo picoteado de los sillares de cimentación del campanario, labrado escalonado de sus caras verticales y extendido sobre las mismas de un enlucido grueso para favorecer el agarre estos sillares, se ha vertido el hormigón de recalce en varias capas de 15 cm de espesor medio (fig. 6).

En diciembre de 1904 se inició igualmente la intervención de perforación de los muros del campanario para insertar tirantes metálicos en el interior de su fuste. La memoria de los “Trabajos de consolidación y restauración de la Iglesia, campanario y sacristía de Santa María Gloriosa dei Frari en Venecia”, con fecha de enero de 1904, que describía el proyecto de con-





7

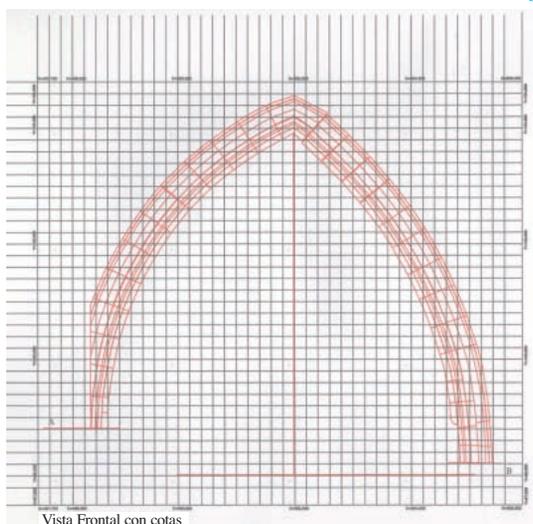
solidación de la cimentación del campanario, permite descubrir que estos trabajos deberían haberse extendido del mismo modo a los dos lados internos de la iglesia. Sin embargo, razones de urgencia que dieron prioridad a otras intervenciones de manera que la consolidación de los muros del interior del templo no se llegó a realizar. En la capilla de San Pedro se demolieron las bóvedas de crucería encamonadas realizadas en 1867 y fueron sustituidas por bóvedas de ladrillo perforado de 10 cm de espesor puestos en obra con mortero bastardo con una capa de cemento de 8-10 cm de espesor aplicada sobre el extradós de la bóveda.

Si las intervenciones decimonónicas habían intentado atenuar, si no eliminar, los efectos visibles de la degradación actuando sobre las fábricas que indirectamente se habían resentido de los mecanismos estructurales que afectaban el campanario, con la intervención de los primeros años del siglo XX se actúa directamente sobre las causas con el objetivo de resolver el origen del problema.

En el año 2000, el análisis de los asientos relativos entre el campanario y la basílica acaecidos desde su construcción hasta 1902 y de 1904 hasta nuestros días (fig. 7) desvelaba que la intervención de consolidación, además de modificar el sentido de la inclinación de la parte alta de la torre, había vinculado en manera considerable la estructura del campanario con la basílica y la capilla de San Pedro mediante los sistemas de encadenado puestos en obra. En consecuencia, parte de las cargas del campanario se transferían a las cimentaciones adyacentes disminuyendo la entidad de los asientos pero involucrando en su descenso también a parte de la basílica.

Después de cerca de un año de monitorización mediante una nivelación de alta precisión, se ha descubierto que el campanario descendía más que la estructura de la basílica y que este asiento no era uniforme, sino que era mayor en el ángulo interno hacia el ábside (1,3 milímetros). A partir de la información y los resultados obtenidos se estimó que los asientos, las deformaciones, las lesiones y el incremento de las solicitaciones en algunos puntos de los elementos estructurales, en especial en el machón de la esquina, no se podían afrontar con intervenciones de reparación sino que se debía intentar la eliminación de las causas desde su raíz (fig. 8).

8



El problema poseía una gran complejidad dada la interrelación entre las estructuras del campanario, la basílica y la capilla de San Pedro, concebidas como independientes y ulteriormente vinculadas, como confirmó la lectura directa de las fábricas, contrastada con los datos encontrados en la investigación histórica y archivística. Además, existía una estrecha correlación entre los aspectos estructurales y los geotécnicos: para garantizar la conservación del conjunto del campanario y la basílica era necesario encontrar una solución tecnológica adecuada que permitiera una intervención gradual y el control de sus efectos a lo largo de la obra.

Por estos motivos, se formó un grupo de trabajo interdisciplinar que comprendía múltiples profesionales y científicos de diversos campos que fueron contrastando sus conocimientos y enriqueciéndose mutuamente con

el objetivo común de conservar y consolidar el conjunto arquitectónico garantizando la eficacia de la intervención y el respeto simultáneo de la integridad del monumento.

El análisis de las estructuras de cimentación resultaba fundamental y precisaba el conocimiento previo de sus características constructivas y de las modificaciones introducidas con las intervenciones de restauración para confrontarlas con el estudio y análisis de las deformaciones y el cuadro fisurativo tanto en su evolución histórica como en tiempo real. Al contrario de lo que sucede habitualmente, en particular, se consideraba necesario indagar profundamente en lo que no era directamente visible y deducible al encontrarse bajo el nivel del pavimento, para conocer la geometría, los materiales, las deformaciones y las características mecánicas de la cimentación y la composición del terreno.

La verificación del perfil estratigráfico y las características físico-mecánicas del terreno y la composición y estado de conservación de la cimentación precisó una extensa campaña geognóstica basada en posteriores sondeos verticales e inclinados, y pruebas de penetración y de disipación. Los resultados de estos estudios confirmaron la geometría y la composición de la cimentación tal y como se encontraban descritas en los documentos históricos y aportaron información sobre las características del terreno y, en particular, sobre los estratos arcillosos causa de los mayores asientos.

El levantamiento y los estudios realizados en el subsuelo se contrastaron con los documentos de archivo de los trabajos realizados en los primeros años de 1900 (fig. 9), dando como resultado que los cimientos del campanario se realizaron con una perfecta geometría constructiva según las reglas de la tradición veneciana: una empalizada de madera hincada en el terreno, con troncos de un diámetro medio de 20 cm y longitud variable entre 1,50 y 2,50 metros, una plataforma de tabloncillos cruzados puestos en horizontal y la cimentación propiamente dicha, constituida por bloques de piedra de Istria.

La comparación de la configuración hipotética extraída de las fuentes documentales con el resultado de las campañas geognósticas ha llevado a la confección de una sección constructiva de referencia que ha permitido verificar los datos de manera cruzada y confirmar tanto su geometría y dimensión como los materiales empleados (gradas en piedra de Istria hasta una profundidad de cerca de tres metros, entablado en madera y pilotaje lígneo hasta una profundidad de seis metros) (fig. 10). Se ha podido confirmar también la compleja reconstrucción histórica del sistema de consolidación documentada a principios del siglo XX. De esta comparación se deduce igualmente una diferencia material entre la cimentación de la torre y la capilla de San Pedro, que se caracteriza por el empleo de un tipo de piedra diferente, arenisca y piedra blanca de peor calidad.

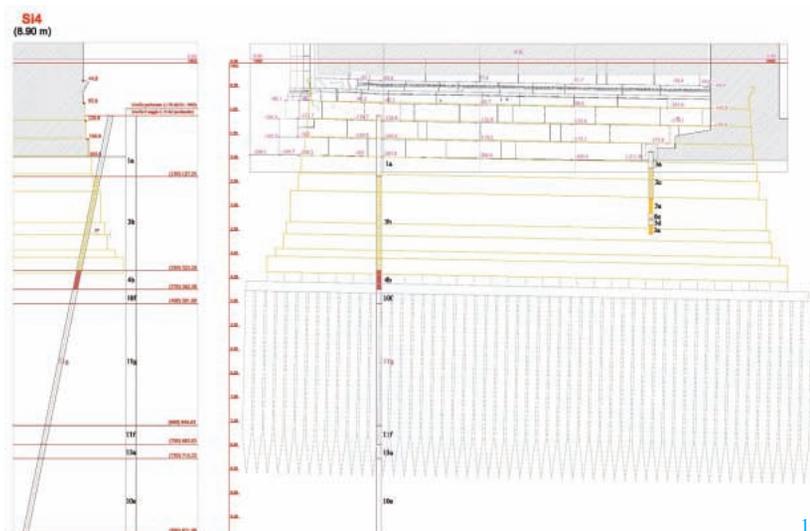
El proceso constructivo y de transformación del basamento y de la cimentación ha sido también objeto de un estudio comparativo, que ha comprendido observaciones directas del tipo geométrico, con lecturas materiales y estratigráficas e información adquirida indirectamente³.

7. Sección transversal del campanario y la iglesia. Comparación de los asentamientos tenidos lugar antes y después de la intervención de consolidación de 1904. Se percibe, al contrario de lo que había sucedido previamente, que los asentamientos mayores del campanario se verificaron en el lado interior hacia la iglesia (I. Cavaggioni; A. Lionello)

8. Levantamiento del arco deformado entre la nave lateral izquierda y el transepto (F.O.A.R.T.)

9. Empalizadas de madera venecianas hincadas hasta apelmazar el terreno (archivo Soprintendenza BAPPSAE di Venezia e Laguna)





10

El basamento del campanario de la Iglesia dei Frari está formado por una fábrica de sillares de piedra, formando un zócalo escalonado compuesto por sillares de entre 37 y 38 cm de alto y cerca de 30 cm de espesor, con perpiños de dimensiones inferiores (20-35 cm), que poseen una función de conexión en profundidad del muro del basamento. Las esquinas con sillares alternados a soga y tizón proporcionan mayor estabilidad a la traba del aparejo a lo largo de las aristas de la torre, mientras que las bandas decorativas presentan una solución en esquina diferente, adosándose simplemente a 45°. Las observaciones estratigráfico-constructivas del basamento han tenido en cuenta la naturaleza de la obra, caracterizada por su homogeneidad material, ausencia de enlucidos y revestimientos, juntas muy finas y la modalidad de las transformaciones fundamentalmente generadas por sustitución de sillares individuales, más que por rotura explícita, operaciones reconocibles por las diferencias superficiales o por el mortero de rejuntado. Por esta razón, se ha debido emplear un sistema de lectura basado en las trazas dejadas por la diversa elaboración de la piedra (fig. 11), y la función de reconocimiento estratigráfico se ha debido concentrar preferentemente en las juntas, una suerte de “microestratigrafía”, donde los morteros de colocación y rejuntado han sido las principales evidencias para poder distinguir las unidades estratigráficas.

Las características superficiales de las diversos tipos de talla de los sillares han permitido identificar las partes iniciales, caracterizadas por una diferenciación sistemática de la elaboración -mediante la alternancia de elementos lisos y partes elaboradas con martellina de grano variable-, que establece una jerarquía de tratamiento en la que la elaboración contribuye a la identificación de las partes funcionales (partes estructurales, cornisas y toros, revestimientos, decoración). Los elementos de las sustituciones sucesivas se distinguen por su diverso color y dimensión, y por parámetros como la regularidad de las marcas de martellina y la altura del toro, que caracterizan a los sillares insertados elaborados por imitación. En especial, los sillares introducidos a partir del siglo XIX se caracterizan por el uso de la bujarda.

10. Esquema reconstructivo de la masa de cimentación con sus dimensiones y la sucesión de los materiales identificados a través de ensayos geognósticos

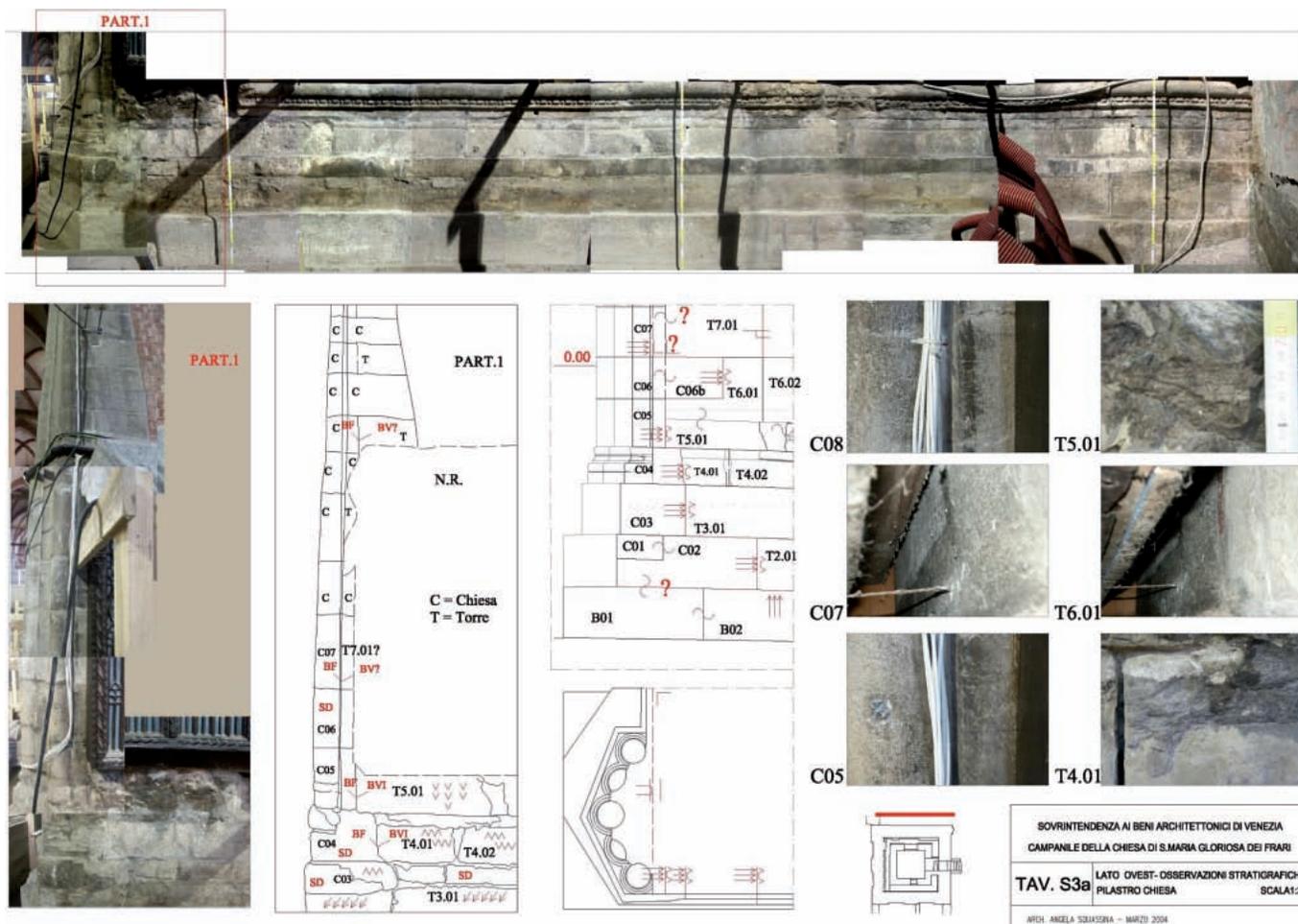
11. Tabla resumen de las diversas trazas de labra identificadas sobre los sillares del basamento del campanario

La microestratigrafía de las juntas ha revelado que el mortero de colocación del basamento inicial es homogéneo y friable, de color marfil, mientras que la junta de mortero que pertenece a la pilastra y muros de la iglesia es más claro, homogéneo, con polvo de mármol de color que tiende al blanco con escasos caliches. El color blanquecino y la consistencia arenosa identifican las zonas que han sido rejuntadas posteriormente.

La creación de la basílica provocó la elevación del nivel de pavimento visible y su acostamiento⁴ a la esquina noroeste, donde se encuentra un pilar formado por un haz de columnillas que pertenece a la iglesia. La observación del borde permite afirmar que las piezas de la esquina de la torre por encima del plano del pavimento se mordieron para permitir la traba con el pilar de la iglesia; por el contrario, las piezas bajo el pavimento se insertaron sin rotura, eliminando los dos sillares de la esquina de la torre y adaptando las dimensiones del plinto a la perforación practicada para su colocación. La forma de los sillares extraídos explicaría así la asimetría del plinto del pilar. En el lado oeste, el nexo estratigráfico entre el pilar de la iglesia y la esquina de la torre posee otro tipo de traba, formada por la alternancia de los sillares del pilar insertados previa extracción de los correspondientes a la torre o mediante roturas localizadas en la esquina del campanario, a fin de favorecer la traba de los dos muros estratificados (fig. 12).

11





12

En la parte superior del basamento, el paramento inicial está formado por ladrillos de color rojo oscuro, ennegrecidos en superficie, con marcas de un tratamiento de pulido con cal viva y acabado rojo, todavía visible en el exterior. La junta que caracteriza las áreas del paramento antiguo de ladrillo también presente en los tramos iniciales de las esquinas, es homogénea y consistente, color blanco-marfil, y muestra trazas de fileteado. Se pueden identificar algunas trazas de reconstrucción mimética del paramento de ladrillo aunque presenten un rejuntado rojizo como tratamiento superficial de acabado, porque los ladrillos más recientes tienen un color entre rojizo-rosado y amarillento con juntas de mortero arenoso de tonalidad gris-ocre. Las superficies de ladrillo internas del campanario han sido objeto al menos de dos tratamientos decorativos, con un primer enlucido agramilado que remeda un muro de ladrillos rojizo con juntas claras y un segundo tratamiento más antiguo de veladura con motivos fingidos. La excavación de las partes enterradas del basamento ha permitido medir los desniveles, evidenciando el hundimiento de la torre y los asientos diferenciales respecto a los muros de la iglesia. Los lados septentrional y meridional presentan desniveles leves pero con perfil escalonado, indicio de asientos diferenciales. En cambio, los lados oriental y occidental registran desniveles con perfil lineal que confirman la inclinación hacia la explanada exterior condicionada por

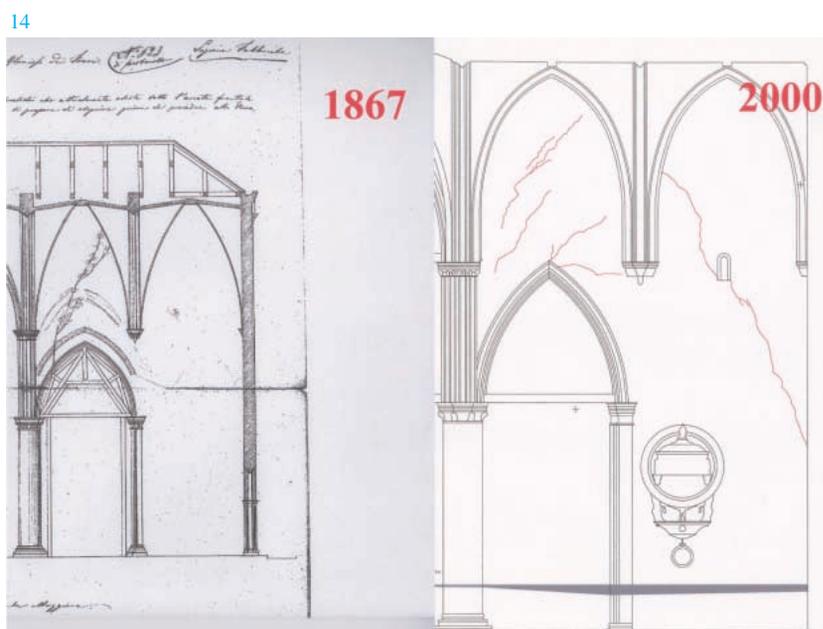
la asimetría del ensanchamiento de la cimentación de principios del siglo XX. Las discontinuidades constructivas explican en parte el mecanismo de deformación que afecta a la esquina sudeste del basamento de la torre, englobada en el muro de la iglesia, que ha sufrido un acusado asiento diferencial, con fractura y dislocación hacia la base. Se trata de una patología en parte reparada en el pasado pero reincidente, indicativa por tanto del desarrollo diacrónico de los fenómenos.

La correcta constitución del sistema de cimentación y su buen estado de conservación, a excepción de la empalizada de troncos que presentaba un avanzado estado de degradación (fig. 13), ha conferido al campanario un comportamiento estructural monolítico, al menos hasta la intervención de principio de 1900: de hecho, en esas fechas, no se había manifestado patología alguna o lesiones en el fuste. Por el contrario, si bien la intervención de consolidación de 1904 contribuyó a atenuar el proceso de hundimiento, su falta de simetría -ya que se realizó sobre un único lado- alteró probablemente la regularidad de la estructura y consecuentemente su comportamiento, haciendo surgir una lesión pasante sobre el prisma externo bien visible actualmente desde el transepto (fig. 14).

Los resultados del estudio previo, pero más aún la compleja situación estructural con la rotura en diversos puntos de los muros, las deformaciones y la desarticulación de los arcos y las nervaduras de las bóvedas, no dejaban dudas sobre la necesidad de intervenir en breve plazo para estabilizar la cimentación. Para efectuar una correcta elección y calibración de la intervención, se consideró fundamental la elaboración de un modelo de cálculo que representase de forma verosímil la situación real sobre la base de los nuevos conocimientos adquiridos. La búsqueda de archivo en torno a las fases constructivas y las principales intervenciones de restauración de la basílica, campanario y adyacente capilla de San Pedro permitieron la



13



12. Lectura estratigráfica de la esquina noroeste, donde el pilar de la iglesia se adosa a la esquina de la torre campanario
13. La estratigrafía revela el entablado de alerce en buen estado de conservación y la empalizada de madera de aliso degradada (Setten)
14. La confrontación entre los cuadros fisurativos antes y después de la intervención de 1904 evidencia la modificación del comportamiento estructural (archivo Soprintendenza BAPPSAE di Venezia e Laguna)



15

reconstrucción de un análisis histórico-estructural y la verificación del mecanismo cinético de los desplazamientos. Con esta información, se puso en marcha un modelo matemático que tiene en cuenta la mutua relación entre las estructuras y las variaciones en la distribución de las sollicitaciones en función de las diversas configuraciones acaecidas.

Los modelos de cálculo han permitido verificar las sollicitaciones que se encuentran presentes en la actualidad y realizar una hipótesis del incremento de valores en función de los asientos previstos en la cimentación. El estudio ha permitido visualizar los posibles escenarios que se podían haber dado durante los trabajos de refuerzo de la cimentación y, con los resultados, se han realizado algunas intervenciones de confinamiento para afrontar situaciones imprevistas. Se ha montado un entablillado doble de madera sobre el arco de piedra desarticulado para absorber los posibles movimientos ulteriores de los sillares de piedra. Se ha cosido la lesión pasante del fuste del campanario mediante inyecciones de mortero de cal y colocando posteriormente dos tirantes de carácter definitivo análogos a los que se encuentran insertados en el fuste del campanario. Y se ha dispuesto un tirante metálico provisional de contención a la altura de la columna entre la nave lateral izquierda y el transepto para contrastar el empuje horizontal creado por el arco natural de descarga que se ha generado (fig. 15).

El nivel de conocimiento adquirido durante la revisión y comparación continua entre los diversos levantamientos métricos, las observaciones y los análisis efectuados en obra y los documentos de archivo ha permitido concretar los principales objetivos a seguir en el proyecto de consolidación a fin de garantizar la seguridad estructural y, a su vez, la integridad artística, histórica y material del monumento.

A la vista de las patologías del campanario, que difícilmente habría soportado ulteriores agravios, se decidió excluir cualquier tipo de intervención que pudiera provocar cualquier tipo de afección incontrolada a las fábricas ya fuertemente dañadas y sollicitadas. Al mismo tiempo, para no condicionar eventuales restauraciones posteriores se han descartado intervenciones similares a la de 1904 que, además de instaurar una situación asimétrica en la cimentación, introdujo vínculos y dificultades objetivas para la realización de posibles obras integrativas.

El análisis de los movimientos del campanario y la basílica y la identificación de los fenómenos de degradación pusieron en evidencia que los problemas estructurales de mayor envergadura, como son las lesiones e incrementos de sollicitaciones que se manifestaban en las fábricas de la iglesia, eran consecuencia del asiento diferencial de la cimentación (fig. 16). El problema no consistía tanto en bloquear de forma absoluta los asientos del campanario como en reducir y hacer compatibles los descensos diferenciales entre campanario y basílica. La aplicación de las técnicas usuales de consolidación, mediante el ensanchamiento de la cimentación o introduciendo pilotes o micropilotes en profundidad, implicaba la necesidad de un sistema para transferir las cargas de la cimentación ori-

ginal al nuevo sistema. Esta solución tenía un alto coste en términos de invasividad, de conservación material y de modificación de los estados tensionales. La modificación de las características constructivas y la rigidización de la estructura de cimentación del campanario podían provocar además problemas de incompatibilidad con la basílica cimentada sobre terrenos más superficiales y sujetos en mayor medida a las variaciones estacionales y ambientales, vista la peculiaridad del subsuelo veneciano sujeto a continuas variaciones de capacidad portante y a asientos en función de los equilibrios hidráulicos.

Partiendo de la información obtenida sobre la composición, geometría y estado de conservación de la cimentación, merced a los conocimientos adquiridos sobre el comportamiento estructural, y aplicando el principio de la máxima conservación material, de la mínima intervención, del mantenimiento de las características estructurales y de la mínima alteración en términos de elasticidad, se consideró que la elección más oportuna era intervenir adosando a la estructura existente un nuevo sistema capaz de devolver el comportamiento simétrico reduciendo a su vez los asientos, dos necesidades que se consideraron fundamentales para la conservación del equilibrio de la torre.

A fin de no modificar sustancialmente el equilibrio presente, se decidió dirigir la elección hacia intervenciones que pudieran ser calibradas durante la realización de las obras, integradas o modificadas en el tiempo en función de los resultados efectivos obtenidos y verificables mediante un sistema de monitorización idóneo.

La tecnología elegida que respondía a los objetivos preestablecidos ha consistido en la consolidación del terreno perimetral a la cimentación mediante la técnica del *jet grouting* o hidrofracturación controlada del terreno y posterior inyección de una lechada cementicia para crear una suerte de envolvente de confinamiento del bulbo de presiones. Esta metodología adoptada en el norte de Europa para contrarrestar asientos en la cimentación había tenido hasta ahora un uso limitado en el campo de la edificación histórica y, sobre todo, de torres en altura con elevadas cargas concentradas sobre el terreno. La intervención se realizó en sucesivas inyecciones selectivas, con volúmenes contenidos y predeterminados de lechada de cemento, subdividida en cuatro ciclos de inyección, mediante cerca de 2.500 válvulas dispuestas en 90 manguitos fijos en torno a la cimentación.

En cada ciclo se ha realizado una inyección contemporánea válvula por válvula en la vertical contrapuesta a los ejes de simetría del campanario para limitar la influencia de la intervención sobre la estructura de la torre, cuyos efectos eran controlados en tiempo real mediante un sofisticado sistema de monitores instalado en el terreno y en las partes principales de la torre. La aplicación del método de observación ha permitido ponderar y reducir la intervención sólo a lo indispensable, con un volumen total de mezcla inyectada de 100 m³, equivalente a cerca del 20% de volumen de terreno tratado. Las pruebas de penetración realizadas al final de la inter-

15. Los dispositivos de puesta en seguridad provisionales instalados a una cierta altura: el apuntalamiento del arco con doble cimbra de madera y el tirante de retención del pilar de piedra (M. Gallo)

16. En las excavaciones efectuadas en el interior de la capilla de San Pietro se observaba claramente el asentamiento diferencial entre el campanario, a izquierda, y la basílica, a derecha (M. Gallo)

16





17

vención pusieron en evidencia un aumento notable de las características mecánicas de los estratos arcillosos y arenosos tratados y los sondeos han confirmado la formación del retículo cimentado (fig. 17).

La intervención realizada en la cimentación no puede por ahora considerarse definitiva y resolutoria. Los resultados del último año de monitorización reflejan una estabilización del fenómeno, pero sólo la verificación a largo plazo podrá asegurar el completo éxito de la intervención. Los datos obtenibles de la nivelación altimétrica (figs. 18 y 19) indican que en el año transcurrido desde el final de los trabajos se ha registrado una uniformidad sustancial de los asientos entre las estructuras del campanario y basílica. Particularmente interesante resulta la comparación entre los puntos 1 (ubicado sobre el pilar de la esquina de la basílica) y 5 (ubicado sobre la arista oeste del campanario) correspondiente a las impostas del arco de piedra deformado mayormente:

periodo	D (mm)	D/año (mm)
1400-1902	524.50	1.05
intervención de ensanchamiento de la cimentación		
1902-2000	75.50	0.77
2001-2005	4.50	1.12
intervención de confinamiento de la cimentación		
2006-2007	0.45	0.45

En cualquier caso, el fenómeno sigue bajo estrecha observación y, a tal fin, sobre la base de la experiencia adquirida, se ha optimizado el sistema de control, limitando en esta fase la adquisición a los datos más significativos. Especial atención se prestará a la identificación de las causas de los asientos; en el caso de que se verificara que la degradación de la empalizada lúnea contribuye de manera significativa a la patología estructural será necesario realizar una ulterior investigación y profundización sobre la materia, dado que en el momento actual no resulta todavía claro el proceso de pérdida de las características mecánicas y, por tanto, la tecnología de una eventual consolidación.

Múltiples y variables podrán ser los factores que influirán en el futuro equilibrio. Se puede prever con bastante probabilidad que en los próximos decenios la entidad de los asientos no será superior a la de los precedentes a la intervención de confinamiento. Se podrán entonces redimensionar y eliminar parcialmente los tirantes a ras de suelo instalados como precaución para contrarrestar posibles asientos que habían sido previstos durante la fase de trabajo, del lado de la seguridad, estimados mucho mayores que los que efectivamente se han verificado después. En el caso que la entidad de los asientos en los años venideros no tendiera a desaparecer o si se verificaran inclinaciones no previstas del campanario se podrá intervenir con nuevas y repetidas inyecciones a través de las mismas tuberías ya instaladas, del mismo modo con que se ha procedido durante la obra, calibrando y efectuando la intervención en los sectores y a la profundidad donde se considere más necesario y verificando sus efectos en tiempo real. 

17. En los sondeos efectuados tras la intervención se ha verificado la creación efectiva de una red de cemento en el terreno (Vipp)

18. Planta con la ubicación de los puntos de monitorización

19. Los resultados de la monitorización de niveles obtenidos entre 2001 y 2007 revelan cómo posteriormente a la intervención en el campanario se ha reducido el ritmo del hundimiento en más de la mitad respecto a lo que se venía verificando (FO.A.R.T.)

Notas

1 “(...) el 27 de febrero de 1774 cayó el campanario de San Giorgio Maggiore (...) en 1307, el de Santo Stefano de Murano (...). Nosotros mismos recordamos (...) el campanario de S. Ternita, (...)”, P. Molmenti, ‘Nuova Antologia’, anno 37, N.744, 16/12/1902, pp.652-53

2 P. Molmenti, “Per i monumenti veneziani”, en ‘Nuova Antologia’, anno 37, N.744, 16/12/1902, pp.652-53

3 A. Lionello e I.Cavaggioni, "Il Campanile della Chiesa di S. Maria Gloriosa dei Frari a Venezia: il progetto di monitoraggio attraverso lo studio del manufatto e delle sue trasformazioni", en ANAGKH', n.33/2002

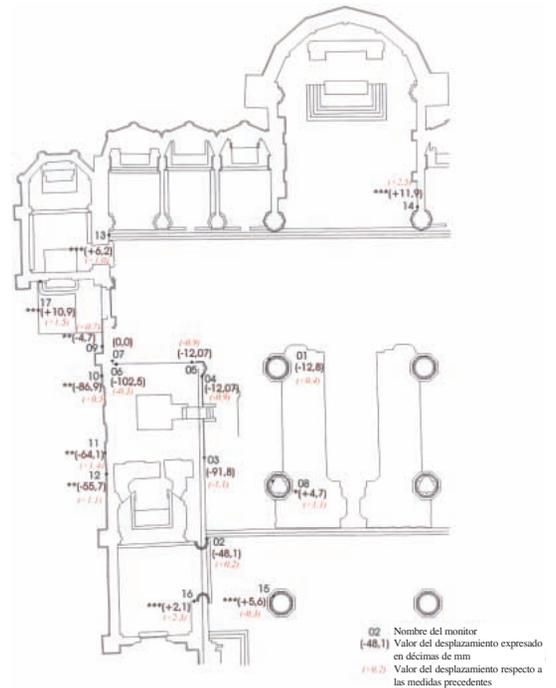
4 El término acostamiento o adosamiento indica un nexo estratigráfico (de sucesión estratigráfica o posterioridad) de la iglesia respecto al campanario preexistente y no se refiere a la modalidad técnico-constructiva de esta relación, que se configura en este caso con una traba realizada mordiendo el muro.

Bibliografía

A. Lionello I. Cavaggioni, “Il monitoraggio del Campanile di S. Maria dei Frari a Venezia tra conoscenza e conservazione” en ‘ANAGKH’ 33- Milán pp.100-113

A. Lionello, I. Cavaggioni, P.P. Rossi, C. Rossi, C. Modena, F. Casarin, G. Marchi, G. Gottardi, A. Ragazzini, “Preliminary investigation and monitoring fomr the design of a strengthening intervention of the Frari basilica, Venice”, Actas del International Seminar “ Structural analysis of storical constructions” Padova 2004 pp.1323-1334

A. Lionello, I. Cavaggioni, G. Marchi, G. Gottardi, A. Ragazzini, C. Modena, F. Casarin, P.P. Rossi, C. Rossi, “Monitoraggio e controllo del consolidamento della fondazione del campanile dei Frari a Venezia”, Actas del XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica Padova 2007 pp. 585-592



18

19

