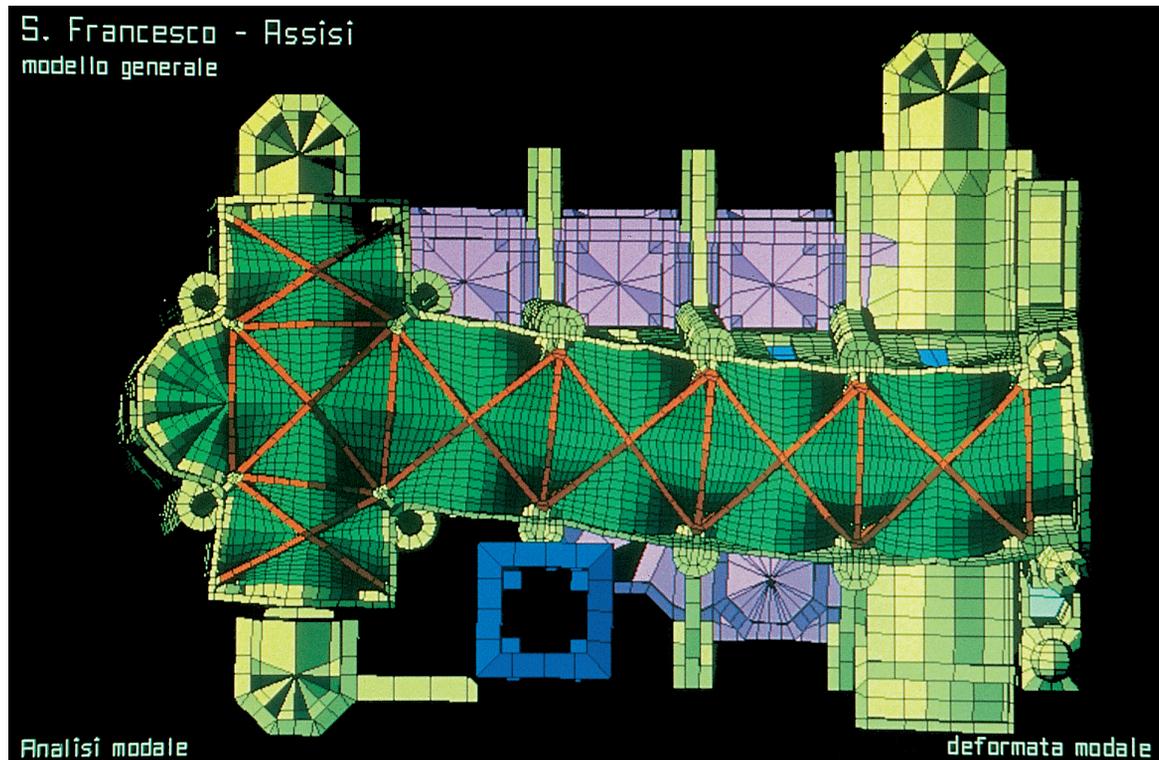


La restauración de la Basílica de San Francisco de Asís

Giorgio Croci*



1. Uno de las posibles deformadas del modelo virtual

El presente artículo complementa al ya publicado por el mismo autor en LOGGIA n° 6 que reflejaba las intervenciones de urgencia acometidas en la Basílica de San Francisco de Asís después del terremoto del 26 de septiembre de 1997. En este texto, se exponen de manera comprensiva los análisis efectuados sobre el comportamiento del organismo del templo durante los seísmos y el conjunto de operaciones de restauración realizadas con posterioridad a las primeras intervenciones de urgencia.

The restoration of the Basilica of St Francis of Assisi. This article complements one written by the same author and published in LOGGIA no. 6, in which he described the emergency measures taken on the Basilica of Saint Francis of Assisi after the earthquake that took place on 26th September 1997. This text gives a concise account of the tests performed to discover the behaviour of the church during the earthquakes and all the restoration works carried out after the initial emergency steps.

*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"

La Basílica de San Francisco de Asís, construida en el siglo XIII, ha sufrido durante su existencia los efectos de los importantes terremotos de 1279, 1328, 1703, 1747, 1781, 1799, 1832, 1859, 1917 y 1979. Ninguno de estos seísmos provocó un efecto devastador como el ocasionado por los movimientos de la madrugada del 26 de septiembre de 1999 y de la mañana del mismo día, a las 11:42 h. La acción de los mismos provocó el colapso de un fragmento del tímpano y de varios segmentos de las bóvedas en la zona de la fachada y el transepto, además de la creación de grandes grietas y la deformación permanente de todas las bóvedas de la Basílica, dejándolas en un estado muy precario y peligroso. Además del diverso impacto producido por distintos terremotos de características diferentes en el transcurso de la historia del edificio, existen otros factores que pueden haber incrementado la vul-

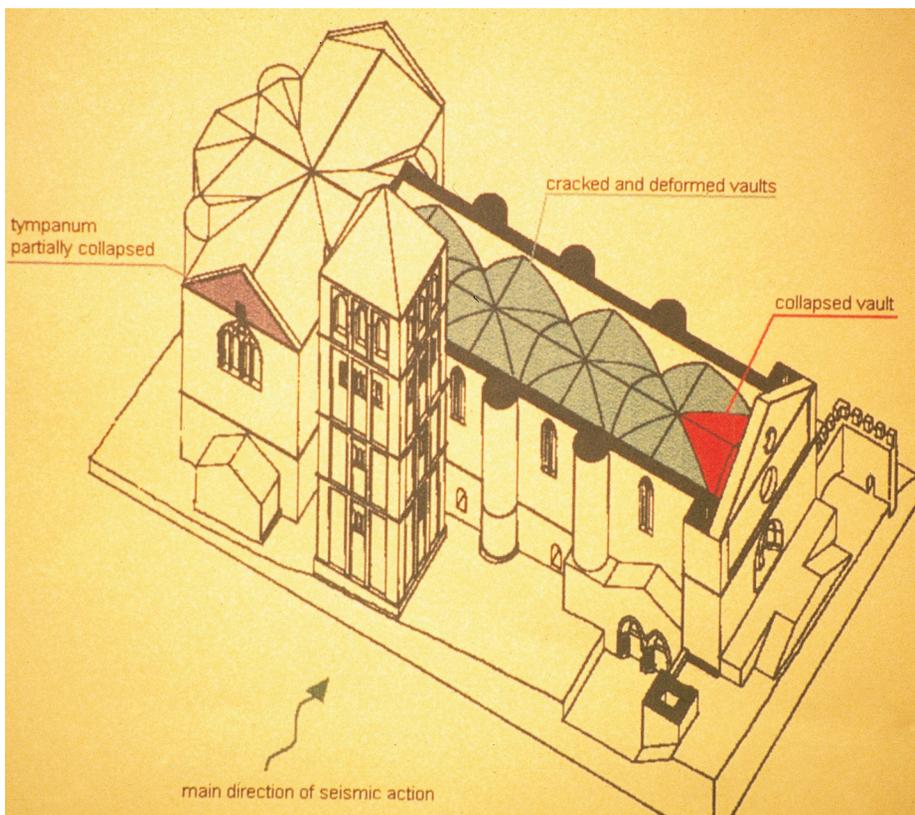
nerabilidad en este caso concreto. En lo que atañe al tímpano, compuesto por una fábrica de doble hoja con relleno interior, la causa de su colapso parcial fue la degradación del mortero que unía los sillares de la cara externa con el relleno interior (fig. 2). La falta de cohesión efectiva entre los sillares provocó su progresivo descuelgue y, finalmente, la caída de los mismos. El colapso de las bóvedas (fig. 3) fue ocasionado por la gran acumulación en los riñones de las bóvedas de materiales de relleno disgregados y por su mayor rigidez debida al grado de empotramiento existente en los extremos, tal como se explicó con detalle en el artículo publicado en LOGGIA n° 6. En aquella ocasión se especificaron las intervenciones urgentes acometidas para la consolidación del tímpano y las bóvedas remanentes, de manera que se remite a dicho texto para cualquier consulta sobre la cuestión (fig. 4).



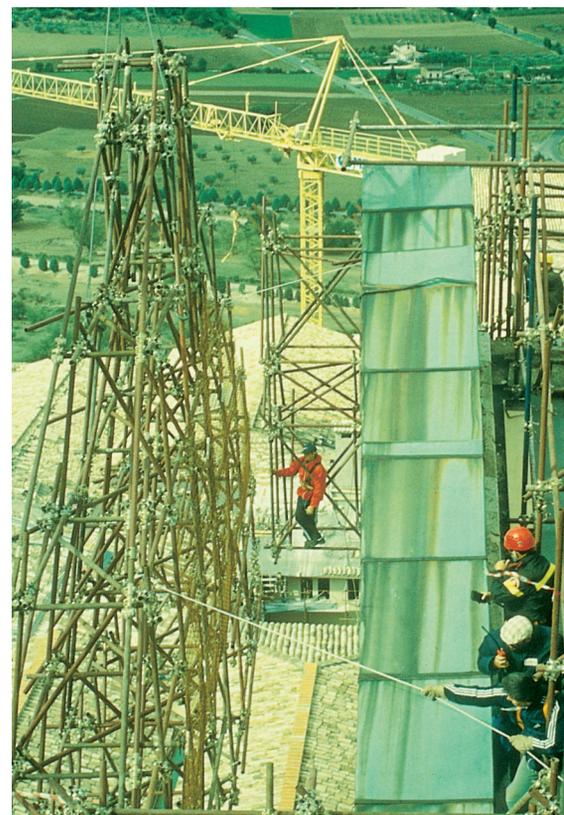
2

- 2. Los daños del tímpano el 7 de octubre de 1997
- 3. Las bóvedas colapsadas (una queda oculta detrás del campanario) y el tímpano dañado
- 4. La estructura provisional en el momento de ser adosada al tímpano

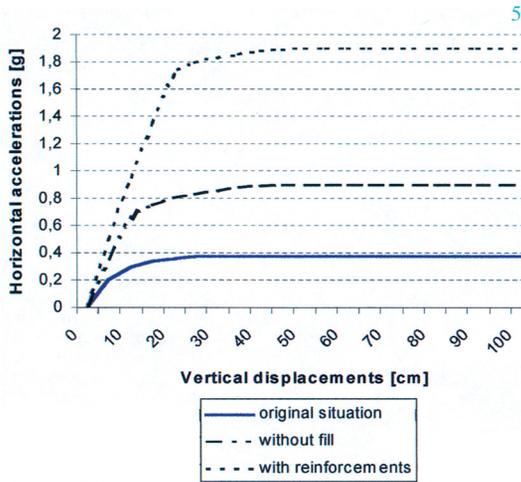
3



4



5. Fuerzas horizontales. Diagramas de desplazamiento en situaciones diferentes (con relleno, sin relleno, con los refuerzos en las bóvedas)
6. Esfuerzos y deformación de la bóveda con relleno en los riñones de las bóvedas
7. Esfuerzos y deformada de las bóvedas sin relleno
8. Grandes grietas con movimientos relativos del orden de 25 cm
9. Un momento del proceso de sutura de las grietas



FUERZAS SÍSMICAS Y MODELOS MATEMÁTICOS

Fuerzas sísmicas

La aceleración medida el 26 de septiembre de 1997 en el terreno al pie de la Basílica fue del orden de 0,16g en la dirección del eje longitudinal y de 0,18g en la perpendicular. Considerando un factor de amplificación razonable para las estructuras verticales, resulta probable que la coronación de la estructura alcanzara una aceleración transversal cercana a 0,36g. Sin embargo, el terremoto del 26 de septiembre no se cuenta entre los mayores de la zona de Asís, que suelen alcanzar magnitudes 1,5 veces mayores que éste. Más aún, la Basílica y el Monasterio están ubicados en una colina alta, estrecha y alargada en la dirección Norte-Sur, con faldas orientadas a Este-Oeste, que es la dirección del eje de la Basílica. Dicha situación conduce, en el caso de fuerzas sísmicas Norte-Sur, a mayores amplificaciones locales y aceleraciones que en el centro de la villa de Asís. Estas consideraciones nos indujeron a tomar en cuenta una posible aceleración máxima del terreno de 0,3 a 0,35g en la dirección perpendicular al eje longitudinal de la Basílica.

Las medidas tomadas con ocasión de las numerosas sacudidas sísmicas ocurridas en el transcurso del año 1998 muestran que la aceleración transversal en la coronación de las bóvedas fue de 3 a 8 veces mayor que la del terreno. Estas amplificaciones son mucho mayores que las evaluadas para el suceso del 26 de septiembre de 1997, pero se deben considerar dos factores: en primer lugar, durante los terremotos de mayor magnitud, cuando algunas partes de la estructura exceden del límite elástico, existe una mayor dispersión de energía y, por lo tanto, la amplificación se ve reducida; en segundo lugar, la retirada del relleno de los riñones de las bóvedas aumenta la amplificación local en las bóvedas.

Basándose en las consideraciones previas y ponderando el estado actual de los daños de las bóvedas, parece prudente tener en

cuenta una amplificación dinámica (desde el terreno hasta la cima de las bóvedas) del orden de 4 veces; por tanto, resulta conveniente utilizar como base para el cálculo de los refuerzos contra la aceleración horizontal transversal a la altura de las bóvedas un valor aproximado de 1,2g a 1,4g.

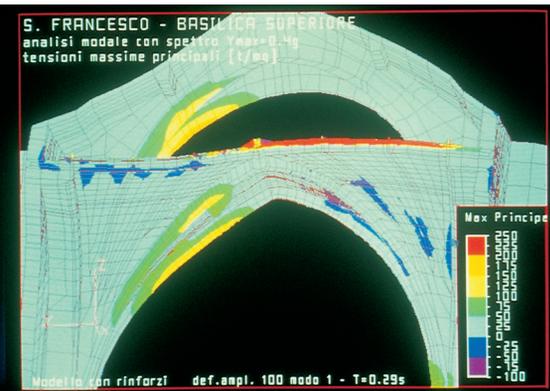
Análisis estructural

Se han elaborado diversos modelos matemáticos para estudiar el comportamiento estructural bajo el efecto de fuerzas sísmicas perpendiculares al eje de la Basílica (que constituyen el caso peor). A continuación se reflejan los mismos:

- Modelo general de la Basílica. Su objetivo ha consistido en mostrar que las bóvedas cercanas a la fachada y el transepto (fig. 1) soportan, además de los efectos locales derivados del relleno, esfuerzos suplementarios debidos al empotramiento generado por la fachada y el transepto.

- Modelo de un módulo central de la nave con relleno (situación previa a septiembre de 1997). Ha servido para demostrar que se produce un gran esfuerzo de tracción en las nervaduras y que el efecto de las cargas muertas reduce la curvatura incluso en condiciones estáticas. Un análisis progresivo preliminar con fuerzas estáticas horizontales equivalentes muestra que, cuando las fuerzas sísmicas alcanzan un valor de 0,18g aparecen grietas y deformaciones permanentes, y que, con fuerzas comprendidas entre 0,25 y 0,3g se llega a provocar el colapso (fig. 6). Estos valores de las fuerzas sísmicas son comparables a los inducidos por los terremotos de septiembre de 1997 y explican tanto el daño generalizado como el colapso de las bóvedas cercanas a la fachada y el transepto.

- Modelo de un módulo central de la nave sin relleno. El modelo reproduce el perfil deformado de las bóvedas en su estado actual, aunque no considera los esfuerzos acumulados como consecuencia de las deformaciones. Esta aproximación está parcialmente justificada por la presencia de grietas, puesto que habría sido imposible evaluar estos esfuerzos de manera fiable.



Un primer análisis elástico muestra que los esfuerzos se reducen significativamente después de la retirada del relleno. Un segundo análisis progresivo con fuerzas estáticas horizontales equivalentes muestra que se genera una gran deformación cuando estas fuerzas horizontales alcanzan valores en las bóvedas del orden de 0,4g (con la presencia del relleno el valor era de 0,18g) y que el colapso ocurre con valores comprendidos entre 0,6 y 0,7g (en vez de 0,25 y 0,3g en el caso del relleno) (fig. 7); esta mejora no es suficiente, sin embargo, para cubrir el riesgo del terremoto de mayor magnitud esperable para la zona.

- Modelo de la bóveda reforzada. Tomando en consideración las nervaduras de refuerzo que se han aplicado en el extradós de las bóvedas durante la restauración, un análisis progresivo muestra que la deformación se reduce considerablemente y que el comportamiento de las bóvedas se ve notablemente mejorado. Cuando las fuerzas estáticas horizontales equivalentes se sitúan en 1,2g (el valor considerado en el dibujo), la sollicitación en estas nervaduras alcanza la mitad de su capacidad. El modelo matemático muestra igualmente que las grandes deformaciones tienen lugar únicamente cuando la aceleración horizontal alcanza valores de 1,6g. El diagrama de la figura 5 sintetiza las diversas situaciones.

INVESTIGACIÓN Y ENSAYOS PARA REFORZAR LAS BÓVEDAS

El problema de la restauración definitiva y consolidación de la Basílica, en especial en el caso de las bóvedas, adquiere inmediatamente un cariz muy delicado porque, debido a la presencia de los frescos, resultaba imposible reducir la deformación y restablecer, por tanto, una curvatura adecuada y una capacidad portante autónoma. Se efectuaron diversos estudios, investigaciones y análisis estructurales con el fin de encontrar la mejor solución de refuerzo y estabilización permanente para las bóvedas sin generar un riesgo que pudiera dañar los frescos y sin comprometer el valor histórico de la estructura original de las bóvedas.

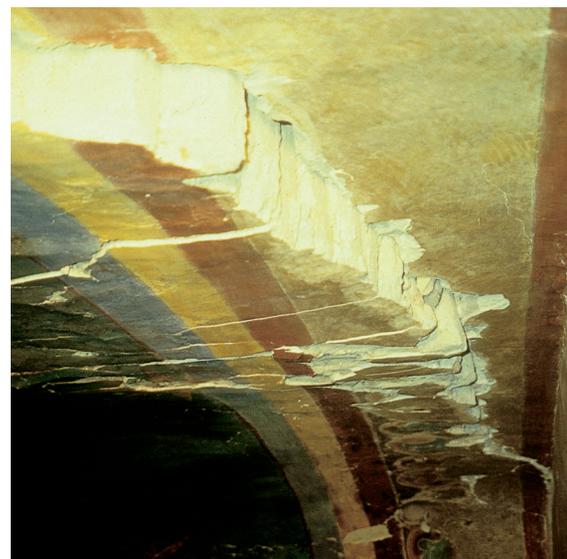
La hipótesis de construir una cáscara de hormigón armado o nervaduras del mismo material en el extradós se rechazó, a priori, por su peso excesivo y su incompatibilidad con el valor histórico del monumento. El uso de nervaduras de acero se desestimó a su vez por la dificultad de adaptarlas al perfil deformado de las bóvedas y, consecuentemente, de obtener una conexión continua entre las nervaduras y las bóvedas.

La opción final consistió, como se apuntó en LOGGIA n° 6, en utilizar materiales compuestos para crear varias series de nervaduras que siguieran la distribución propia de las estructuras góticas en el extradós de las bóvedas (fig. 10) y dejar la estructura original claramente visible. Estas nervaduras se construyen in situ de manera que les sea posible adaptarse al perfil deformado de las bóvedas; el ancho de las nervaduras permanece constante mientras que su grosor varía en función de la deformación de las bóvedas. Así, el extradós de las nervaduras sigue una curva regular paralela a la superficie original ideal de las bóvedas indeformadas.

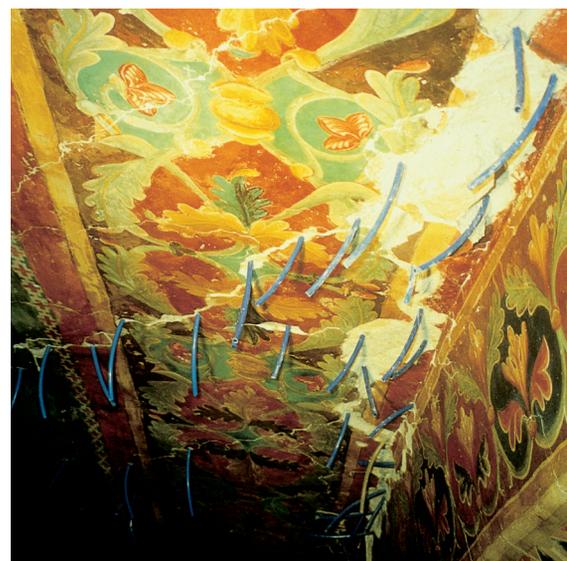
Las nervaduras están hechas de fibras aramílicas fijadas con resinas epoxi en torno a un núcleo de madera. Estas fibras son ligeras, muy fuertes (la resistencia a tracción de esta fibra es de 30.000 kg/cm² y el de la fibra con resina 14.000 kg/cm²) y menos rígida que el acero. Su módulo de elasticidad resulta de 1.200.000 kg/cm² y el de las fibras con resina 600.000 kg/cm².

Se ensayaron en laboratorios especializados diversas posibilidades de materiales constitutivos y de tipos de nervaduras, puesto que en 1997 no existía mucha experiencia en la aplicación de estos productos para la consolidación de estructuras históricas de fábrica. Los ensayos nos permitieron el perfeccionamiento del diseño de las nervaduras con vistas a la mejora de sus características mecánicas y la reducción de su sección a la mínima indispensable.

La resistencia de las nervaduras se ve incrementada insertando barras de fibra aramílica unidireccionales en el intradós y barras de fibra de vidrio unidireccionales en el

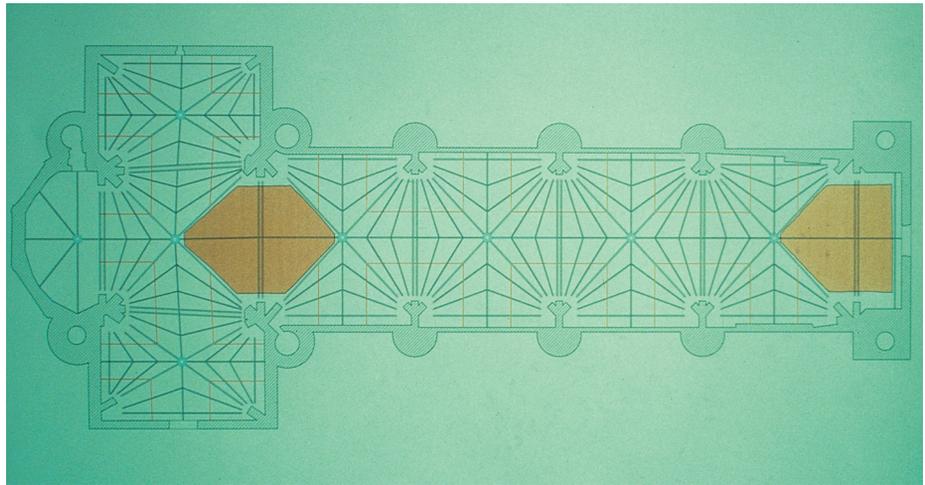


8



9

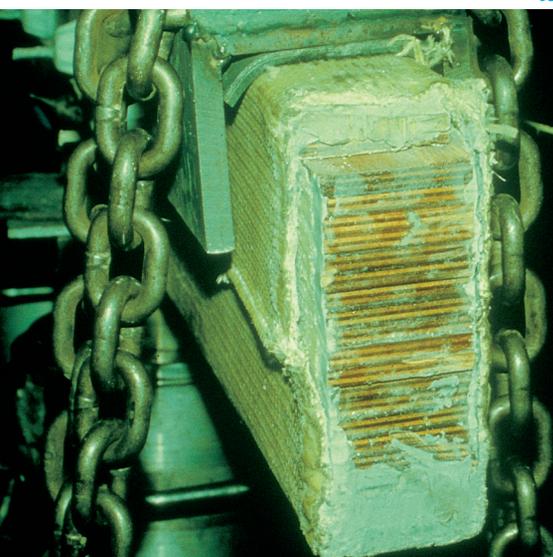
10. Distribución de las nuevas nervaturas en el extradós de las bóvedas dañadas
11. Pequeñas bandas de fibras sintéticas aplicadas sobre las bóvedas
12. Las nervaturas elaboradas con núcleo central de madera y perímetro de fibras aramídicas
13. Los zunchos que conectan la base de los arcos principales a los muros mediante barras horizontales precomprimidas
14. Las varillas de anclaje con sus muelles que conectan las nervaturas a la cubierta
15. Perspectiva de la nave con las varillas de anclaje y sus muelles que suspenden las bóvedas de la cubierta



10



11



12

extradós, dado que las fibras de vidrio poseen una mayor resistencia a compresión. Se tomó la decisión de utilizar un núcleo central tanto para acelerar su construcción como para garantizar una mayor resistencia y energía de disipación. Además, el núcleo central previene cualquier fenómeno de pandeo de las finas nervaturas de fibra aramídica. Se ensayaron materiales diversos para el núcleo rígido, desde espumas hasta diversos tipos de madera, pasando por combinaciones de ambas. Finalmente se escogió un contrachapado de caoba náutico para estratificar varias láminas de madera y formar el núcleo. El uso de láminas de madera contrachapada en vez de láminas de madera simple reduce la expansión transversal bajo la acción de la carga. La madera de caoba muy homogénea garantiza una gran resistencia y rigidez a compresión que, con el tratamiento náutico, según los estrictos estándares de esta disciplina, resulta una madera imputrescible de gran durabilidad. Las láminas de madera, encoladas in situ, permiten fácilmente una adaptación al perfil deformado de las bóvedas. Se llevaron a cabo varios ensayos de tracción para verificar la capacidad adhesiva entre los elementos compuestos y la mampostería, tanto en el caso de un encolado directo como en la opción de sujeción mediante pivotes de fibra aramídica (fig. 15). Los ensayos cíclicos han mostrado una buena conservación de la capacidad portante y un buen comportamiento dúctil.

EL REFUERZO DE LAS BÓVEDAS

El refuerzo de las bóvedas consistió en la realización de cinco operaciones: adosado de las nervaturas en el intradós, anclaje de estas nervaturas a la cubierta, sutura de las grietas (fig.11), conexión de los arcos que soportan la cubierta a los muros perimetrales e inclusión de una viga metálica en la nave sobre la cornisa de los muros.

a) Las nervaturas.

Su distribución se muestra en la figura 10:

- Se ubicaron un par de nervaturas (sección 22x10 cm) a la altura de los arcos transversales, que eran los más débiles en el caso de actividad sísmica debido a su curvatura reducida o perdida,
 - Se colocaron varias nervaturas (sección 30x12 cm) sobre los arcos diagonales,
 - Se situaron algunas nervaturas de menor dimensión (sección 20x5 cm) sobre los gajos de plementería,
 - Se montaron nervaturas longitudinales en la cima de las bóvedas (sección 18x12 cm) y a mitad de su altura (sección 12x5 cm).
- Las nervaturas se crearon in situ como resultado de la estratificación de varios materiales. Éstas fueron las fases de su construcción:
- En la superficie del extradós de las bóvedas, después de una limpieza adecuada, se encoló con la ayuda de resinas epoxi el primer tejido de fibra aramídica en disposición tetradireccional (capas en ángulos de 0°, ±45°, 90°).

- Sobre esta primera capa, se encolaron las barras planas de fibra aramídica, que se cubrieron a su vez con un segundo tejido de fibras aramídicas idéntico al primero.

- Comenzó la fase de colocación de estratos de contrachapado de caoba para crear el núcleo de la costilla.

- Se cubrió el núcleo de madera con un tercer tejido de fibra aramídica tetradiereccional de 360 gr/m² más espeso que los previos, ya que entraba a formar parte de los laterales de las nervaduras.

- Llegado este punto, se encolaron las barras planas de fibra de vidrio.

- Finalmente, todo se cubrió con otro tejido de fibra aramídica tetradiereccional de 360 gr/m².

El cálculo de las nervaduras se llevó a cabo sin tener en cuenta la cooperación con las bóvedas y la contribución del núcleo de madera.

b) Las barras de anclaje de las nervaduras.

Las nervaduras están unidas a un sistema de barras que se ancló a la cubierta. Cada barra incorpora un muelle similar al de la solución adoptada durante las medidas urgentes (fig. 14). Este refuerzo pretende reducir la deformabilidad bajo el efecto de las fuerzas sísmicas.

c) La sutura de las grietas de las bóvedas.

El refuerzo de la estructura agrietada de las bóvedas, cuya continuidad se ha visto comprometida, se ha conseguido utilizando un mortero capaz de satisfacer las condiciones poco habituales, extremas y específicas que rodean a este caso. Este mortero, escogido tras un largo estudio e investigación, no posee sales y es compatible con los frescos; es suficientemente fluido para penetrar y difundirse por todas las grietas y microfisuras; es susceptible de ser inyectado en mampostería en seco (no se permite el uso de agua); y posee una buena capacidad de resistencia y adherencia, de manera que se puede restablecer la continuidad estructural en las grietas.

d) Zunchos para anclar los arcos principales.

Los arcos de mampostería que soportan la cubierta se apoyan sobre pequeñas bóvedas ubicadas sobre las impostas de las bóvedas principales sin conexión estructural de ningún tipo y con una cierta excentricidad respecto a los pilares principales.

En vista de la situación, se decidió en consecuencia anclar la base de los arcos a los muros y las torres ubicados tras ellos que, en esta estructura tan peculiar del gótico italiano, desempeñan la función de contrafuertes. El anclaje se realizó con la ayuda de un zuncho metálico que incorpora barras horizontales precomprimidas, tal como se muestra en la figura 13.

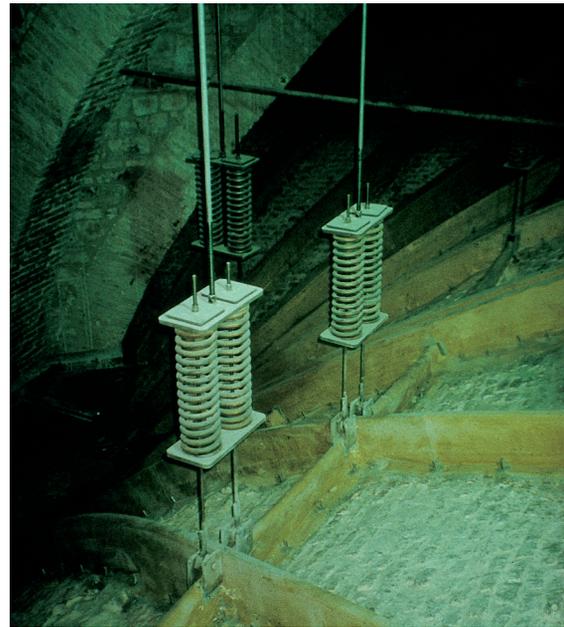
e) La viga metálica en celosía.

A través de los siglos, los frescos de los muros han sufrido daños frecuentes y se han generado grietas debidas a la deformación producida por los terremotos, aunque afortunadamente el muro se mantuvo en pie. Para limitar este fenómeno se ha ubicado una viga metálica horizontal en celosía sobre la cornisa de los muros en el interior de la basílica (en la parte inmediatamente



13

14



15



16. Recuperación de algunos ladrillos con frescos para ser utilizados de nuevo en la reconstrucción de las bóvedas

17. Reconstrucción de los nervios de las bóvedas

18. Reconstrucción del tímpano después de su demolición parcial

19. Piezas especiales metálicas de unión entre el tímpano y la cubierta

inferior a las vidrieras), con la que quedan reforzados los muros cubiertos por los frescos de Giotto. La conexión entre esta viga, que recorre el perímetro, y los muros tiene lugar a través de un material especial viscoso que permite los desplazamientos relativos debidos a los efectos termales y que, sin embargo, se vuelve rígido bajo las fuerzas dinámicas, proveyendo una resistencia completa en caso de terremoto (transmisor de shock).

RECONSTRUCCIÓN

Las bóvedas

La reconstrucción de las bóvedas caídas ha representado otro problema de consideración. Afortunadamente, después de una laboriosa y ardua investigación, se identificaron varios ladrillos afrescados que pudieron reutilizarse para esta delicada operación de recomposición.

En particular, la operación ha resultado un éxito en el caso de las nervaduras que, a pesar de haber caído libremente desde 25 metros de altura, habían mantenido una cierta integridad y cohesión entre los ladrillos.

En consecuencia, ha sido posible ensamblar en el laboratorio las partes rotas de las nervaduras de tal modo que se han conseguido recuperar segmentos de hasta 40-60 cm de longitud. Estos fragmentos se colocaron posteriormente en un emplazamiento provisional de trabajo para proceder a la reconstrucción previa y concertada de cada una de las nervaduras (fig. 16).

Por el contrario, no ha sido posible finalmente recuperar elementos significativos de la plementería de las bóvedas de crucería, que se encontraba completamente hecha añicos, y se han debido fabricar a este propósito ladrillos nuevos especiales con la misma composición que los originales y similares características (fig. 17).

La reconstrucción de las bóvedas ha tenido en cuenta el delicado problema del restablecimiento de la continuidad, no sólo estructural sino también tensional, entre los sectores de la bóveda originales y los que se añaden de nueva construcción.

Para este fin se ha previsto un sistema de gatos, ubicado en una junta provisional en la coronación de las nuevas bóvedas, que pueda compensar la deformación -incluida la retracción del mortero- y calibrar la distribución de las solicitaciones.



16



17

El tímpano

La restauración de la Basílica se completó con la reconstrucción del fragmento caído del tímpano izquierdo (fig. 18), mediante el empleo de piedras de la misma cantera de las originales, y la corrección de la deformación que habían experimentado los dos tímpanos del transepto. Por último, para reducir las fuerzas sísmicas que puedan transmitirse en un futuro a estos tímpanos que, aunque consolidados, continúan siendo estructuras delicadas, se estableció una unión entre la cubierta y los mismos con la ayuda de unas piezas especiales metálicas, compuestas de una aleación con memoria de forma capaz de disipar una cierta cantidad de energía (fig. 19).

CONSIDERACIONES FINALES

Tal como se apuntó en el anterior artículo publicado en LOGGIA nº 6, la filosofía empleada durante todas las intervenciones llevadas a cabo en la Basílica de San Francisco de Asís ha consistido en la aplicación de la tecnología más moderna al servicio de la cultura, con el objetivo de respetar el valor histórico del edificio antiguo y obtener niveles de seguridad adecuados sin apenas cambiar la concepción original. Algunas de estas técnicas, nunca aplicadas con anterioridad en el campo de la restauración, se han estudiado específicamente para esta ocasión y ofrecen posibilidades nuevas y sugestivas para la salvaguarda del patrimonio arquitectónico. A continuación se enumeran las más interesantes:

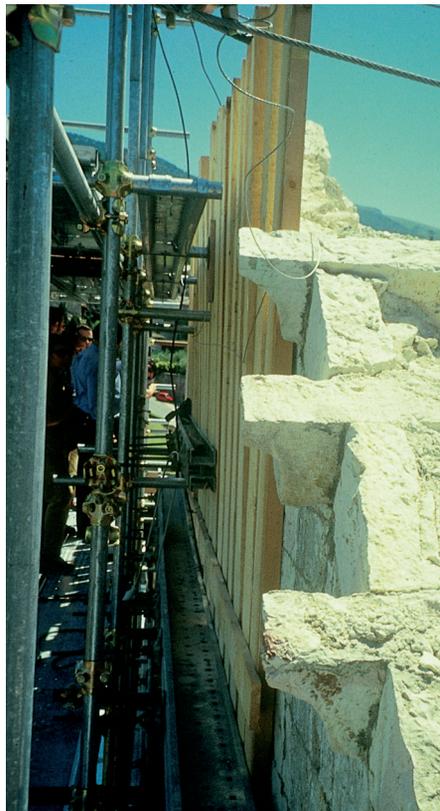
- El uso de un equipo especial durante los trabajos, como fue el caso de las dos grandes grúas empleadas para la elevación de una estructura metálica de sujeción para el tímpano dañado: en primer lugar sobre los muros del convento y en segundo lugar hasta la altura del tímpano.
- El uso de la espuma de poliuretano para bloquear la posición de la mampostería deteriorada del tímpano, sin precedentes en la disciplina de la restauración.

- La utilización de barras metálicas con muelles para suspender provisionalmente las bóvedas agrietadas y deformadas de la cubierta (para mayor detalle, véase LOGGIA nº 6).
- El empleo de un material compuesto con fibras aramídicas para crear una serie de nervaduras en el extradós de las bóvedas con el fin de reforzar definitivamente la estructura.
- La creación de una conexión especial (utilizando una aleación con memoria de forma) entre el tímpano dañado y la cubierta para permitir una disipación parcial de la energía.
- La inclusión de una viga metálica en celosía sobre la cornisa intermedia interior, conectada con los muros a través de transmisores de shock.

Como se ha mencionado anteriormente, esta tecnología innovadora no sólo nos ha proporcionado la posibilidad de salvar a la Basílica histórica y culturalmente sino que ha abierto nuevas perspectivas para arquitectos y empresas del mundo de la restauración.



18



FICHA TÉCNICA

- Arquitecto director: Prof. Giorgio Croci
- Arquitecto colaborador: Prof. Paolo Rocchi
- Ingeniero consultor: G. Carlucci
- Supervisión:
 - Arquitecto del Ministerio: Antonio Paolucci
 - Soprintendente de Umbria: C. Centroni
 - Experto en frescos del Instituto Central de Restauración: Giuseppe Basile
- Colaboración en los modelos matemáticos:
 - Ingeniero: Fabio Sabbadini
 - Ingeniero: Alessandra Carriero
 - Ingeniero: Marco Losappio
 - Arquitecto: Herzalla Aymen
- Colaboración en el ensayo de nuevos materiales y cálculo de los refuerzos:
 - Ingeniero: Alberto Viskovic

19

