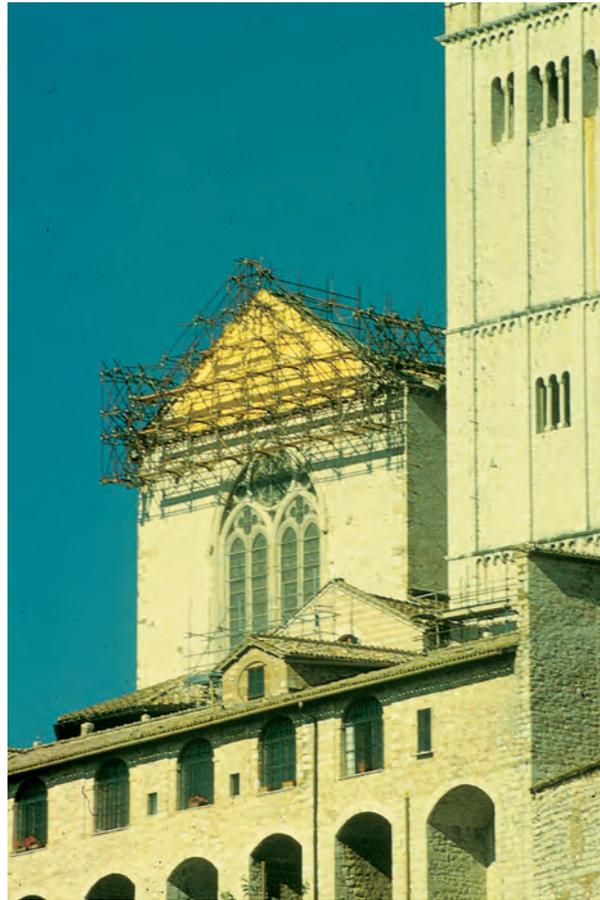


# La Basílica de San Francisco de Asís

después del terremoto del 26 de septiembre de 1997

Giorgio Croci \*



La estructura reticular de acero elevada para recibirla contra el tímpano dañado

**La Basílica de San Francisco de Asís, gravemente dañada tras los primeros terremotos de otoño de 1997, amenazaba con un colapso completo a raíz del estado de difícil equilibrio en que había quedado. La intervención descrita en este artículo explica cómo se pudo consolidar el templo dañado en tiempo récord, poco antes de un seísmo fortísimo que habría provocado con seguridad el derrumbamiento de gran parte de su cubierta, con la grave pérdida que este hecho hubiera supuesto para el patrimonio arquitectónico y la historia del arte italiana.**

*The Basilica of Saint Francis of Assisi after the earthquake on 26th september 1997. The Basilica of Saint Francis of Assisi, badly damaged in the first tremors in Autumn 1997, was threatened with total collapse due to the difficult state of balance in which it was left. The works described in this article explain how it was possible to consolidate the damaged temple in record time, shortly before the very strong earthquake took place that would almost definitely have caused most of the roof to collapse, with the serious loss this would have involved for architectural heritage and Italian art history.*

\* 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 (fig. 1) sufrió un fuerte terremoto en la noche del 26 de septiembre; fue afectada por un segundo sismo más fuerte (VIII grado en la escala Mercalli) a las 11:42 provocando el colapso de dos bóvedas afrescadas (fig. 3), además de serios daños en el tímpano del transepto izquierdo. (fig. 2).

Las aceleraciones medidas en el suelo en proximidad a la Basílica alcanzaron los 0,16 g en el eje longitudinal, y los 0,19 g en la dirección perpendicular (siendo “g” la aceleración de la gravedad).

Ulteriores terremotos continuaron afectando al templo, alcanzando varias veces el grado VII de la escala Mercalli; los sismógrafos dispuestos mientras tanto en diversos puntos de la Basílica permitieron medir una amplificación de la aceleración en el suelo con respecto a las bóvedas de cerca de tres puntos.

### El tímpano del transepto izquierdo

El tímpano, después de los primeros daños producidos por el sismo del 26 de septiembre, sufrió terribles daños por el sismo del 7 de octubre, que abrió una gran brecha y una separación del paramento de piedra de la fachada respecto del núcleo interno de argamasa del muro, dejando toda la fábrica, y en particular la cornisa, en una situación de equilibrio verdaderamente precario.

La causa del daño fue la pérdida de cohesión, debida a la antigüedad del mortero del núcleo del muro, de forma que los sillares del paramento fueron separándose progresivamente, por efecto de las propias fuerzas de inercia, cayendo sobre el techo de la capilla, donde se ubican unos frescos preciosos y otras obras de arte; una caída total del tímpano habría provocado el colapso del techo inferior con consecuencias dramáticas.

Para prevenir el colapso del tímpano se examinaron todas las soluciones posibles, comenzando obviamente por la más simple, la construcción de un andamio sobre el techo de la capilla inferior; esta solución era sin embargo impracticable por el conti-

nuo riesgo de caída de los sillares y por la dificultad de llevar a cabo las operaciones con seguridad sobre el techo de la misma capilla.

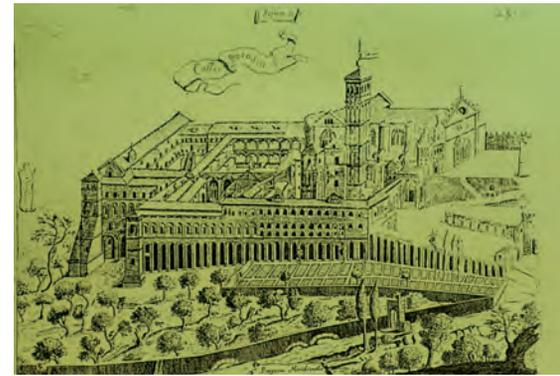
Otra hipótesis estudiada y descartada posteriormente fue el desmontaje del tímpano trabajando sobre el techo de la Basílica, debido al equilibrio precario que habían encontrado los sillares entre sí, y en particular de la cornisa: mover una piedra habría podido romper este equilibrio.

Llegados a este punto, el 18 de octubre se comenzó a pensar en una última posibilidad: utilizar una enorme grúa, con un brazo de 50 metros; esta grúa en cualquier caso no podía entrar en el patio interior a través de la puerta de entrada. Por esta razón se tuvo que recurrir a otra grúa más grande que pudiera elevar la primera salvar las edificaciones de la entrada y posarla en el patio interior.

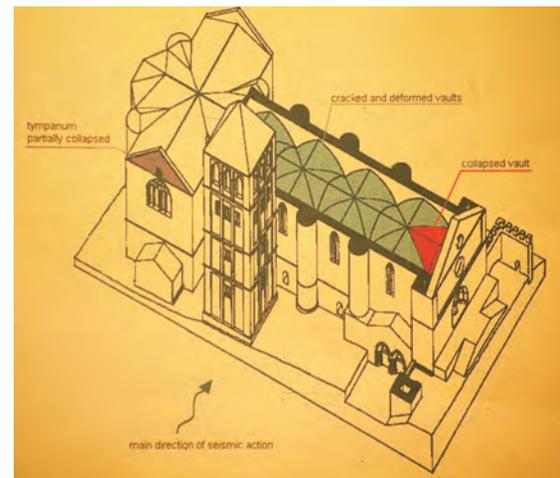
Una vez en el patio, la grúa debía en primer lugar elevar y anclar sobre dos muros portantes del transepto dos ménsulas reticulares y después elevar y anclar a estas ménsulas una segunda estructura reticular de acero en forma de tímpano (de 8 m de altura y 17 de ancho) que pesaba 4,5 toneladas de modo que contuviera la caída del tímpano dañado.

### Esta es la crónica de los acontecimientos:

- 10 de octubre: comienza la construcción en el patio del Convento de las estructuras reticulares y llegan a Asís las dos grúas
- 11 de octubre: la primera grúa deposita la segunda en el patio del Convento (6-7)
- 12 de octubre: se elevan las dos ménsulas reticulares, se anclan sobre los muros del transepto, y se dejan preparadas para recibir el tímpano reticular de acero.
- 13 de octubre: todo esta preparado para la operación y por la tarde se intenta la elevación del tímpano de acero para ubicarlo sobre las ménsulas colocadas el día anterior. El viento y la lluvia intensa impiden el buen termino de la operación, que fue finalmente suspendida: sobre el techo del transepto, detrás del tímpano, nos caen sobre el rostro fragmentos de mortero transportados por el viento.



1



2

1. Antiguo dibujo del complejo conventual de la Basílica de San Francisco de Asís

2. Zonas dañadas por el terremoto (la bóveda caída junto al transepto queda escondida en el dibujo por el campanario)



3

- 14 de octubre: la lluvia cesa, pero continúa arreciando un fuerte viento y el operador de la grúa rechaza la idea de continuar la operación porque el menor impacto sobre el tímpano podría hacerlo caer; la fábrica estaba tan deteriorada que no se podía posponer la intervención. A mediodía, la grúa eleva el tímpano de acero y después de momentos de gran tensión, durante los cuales se balanceaba peligrosamente junto a la fábrica, se consiguió anclar el tímpano de acero a las ménsulas y recibirlo contra el tímpano amenazado para su sujeción (fig. 7). A las 5:23, un fuerte terremoto sacudió la región de Umbria, creando en todas partes daños y derrumbamientos: si la operación se hubiese pospuesto solamente algunas horas, el tímpano habría sucumbido.

- 15 de octubre: las lagunas de la fábrica del tímpano se rellenan con un espuma de poliuretano que, al solidificarse, estabilizaron la estructura; el tímpano alcanzó un cierto grado de seguridad (encabezamiento).

### Las bóvedas de la Basílica Superior

Con los seísmos, cayeron dos tramos de la nave, uno junto a la fachada, otro junto al transepto. Se plantearon dos cuestiones: por qué se derrumbaron las bóvedas, y ¿por qué precisamente en estos dos puntos?

Con respecto a la primera pregunta, los análisis llevados a cabo pudieron concluir que, además del progresivo debilitamiento producido por efecto de los terremotos sucesivos y por el incremento de las deformaciones permanentes, el elemento determinante fue la enorme cantidad de rellenos acumulados durante los siglos, sobre todo material disgregado y fragmentos de tejas provenientes de antiguas reparaciones de la cubierta (fig. 8).

Este material sin cohesión entre sí, provocó especialmente por efecto de las acciones horizontales en sentido perpendicular al eje de la Basílica, presiones inaceptables sobre los gajos de plementería y sobre las nervaduras de las bóvedas, reduciendo y por lo tanto anulando la curvatura indis-

pensable para el equilibrio. El análisis estructural mostró claramente que en estos casos se producen tensiones de tracción elevadas en las nervaduras y la capacidad portante de estas se ve comprometida. Un análisis no lineal con aplicación de fuerzas horizontales crecientes, equivalentes a las fuerzas sísmicas, muestra que para valores del orden de 0,2 g la bóveda pierde su resistencia.

El mecanismo de colapso se puede observar claramente en las imágenes de televisión que casualmente recogió un operador de "Umbria TV" (figs. 5 y 11); una de las nervaduras pierde progresivamente la curvatura en la zona próxima a la fachada formando una especie de rótula en su punto central, arrastrando por tanto en su caída toda la bóveda cuya plementería, siguiendo una técnica constructiva característica del gótico, está simplemente apoyada, y no trabada con las nervaduras mismas.

La deformada mostrada por el modelo matemático coincide con el fenómeno registrado.

La figura 14 muestra la zona próxima al transepto, donde la nervadura del arco



4



5

3. Bóvedas de la Basílica Superior con los frescos de Giotto y Cimabue

4 y 5. Dos imágenes del colapso de una bóveda filmado por UMBRIA TV

transversal y dos gajos de plementería cayeron pocos segundos después del derrumbamiento de la zona de la fachada; esta fotografía muestra los arcos formeros contruados en el renacimiento para sustituir a la cubierta original (de cerchas de madera) y el forjado cerámico que en la mitad del siglo XX sustituyó a los faldones de madera.

Con respecto a la cuestión de por qué los derrumbamientos se concentraron en los extremos de la nave, se concluyó que esta circunstancia se debe a la mayor rigidez, respecto a la parte central de la nave, que el transepto y la fachada presentan cuando actúan fuerzas horizontales perpendiculares al eje de la nave (fig. 10). Las bóvedas de la nave en su conjunto se comportan de hecho como una especie de entramado horizontal empotrado a la altura de la fachada y del transepto, y precisamente en estas zonas este grado de empotramiento se suma a las sollicitaciones de “carácter local”, producidas por el relleno de las bóvedas, las “tensiones globales”, tangenciales y perpendiculares, relativas a los efectos de flexión del conjunto.

El análisis de la caída o del comportamiento estructural permitió aclarar también dos puntos importantes:

1. La reconstrucción del techo llevada a cabo hacia la mitad de este siglo, sustituyendo las vigas de madera por vigas de hormigón armado y un forjado cerámico, inaceptable por la cultura actual, no desempeñó papel alguno en la caída de las bóvedas, no habiendo alterado significativamente ni las rigideces ni el peso.

2. El relleno acumulado durante siglos en los riñones de las bóvedas, bien diverso del pequeño acuñado de las enjutas original de la fase de construcción, tuvo efectos particularmente negativos por tres motivos:

\* En los arcos de medio punto, las fuerzas aplicadas en la zona de las impostas perpendiculares al eje y dirigidas hacia el centro del arco, pueden ofrecer una contribución favorable porque colaboran centrando la línea de las presiones; cuando en cambio la curvatura es pequeña e inferior a un cier-

to valor (y esto puede suceder en los arcos góticos), esta contribución puede convertirse en desfavorable, de manera que para mejorar la situación estática se deberían aplicar fuerzas en sentido opuesto a las nombradas anteriormente; más que un relleno puede ser necesario un tirante (fig. 9).

\* En presencia de acciones sísmicas, el relleno puede en cualquier caso provocar efectos negativos porque se pierde la simetría de las fuerzas, ya que el seísmo crea alternativamente presiones sobre un solo lado del arco mientras que en el otro el relleno tiende a separarse.

\* El relleno acumulado durante los siglos sobre las bóvedas de Asís estaba absolutamente descohesionado acentuando por tanto las presiones transmitidas por el mismo; además, este material, siguiendo las deformaciones de las bóvedas, no consintió la recuperación de las deformaciones elásticas durante la secuencia de las oscilaciones, contribuyendo a la pérdida de forma de dichas bóvedas.

Las bóvedas que sobrevivieron a la caída quedaron en una situación bastante precaria; existían fisuras distribuidas por toda la superficie y se había perdido la curvatura original en diversas zonas.

Se decidió en consecuencia, no existiendo la posibilidad de intervenir de inmediato en el intradós por la eventualidad de un colapso y el riesgo de pérdida de vidas humanas, construir una pasarela colgada del techo, en el espacio entre el techo y las bóvedas (fig. 12), con una doble función de servir de inspección y de crear una base de trabajo para la consolidación de las bóvedas.

Las intervenciones de urgencia siguieron una lógica coherente con el análisis de las causas de la caída el cual ya hemos expuesto, y se pueden sintetizar en cuatro puntos:

\* Remoción de gran cantidad de material de relleno en la zona de los riñones de las bóvedas.

\* Relleno de las lesiones con un mortero especial sin sales (“MAPEI antique”) para limitar al máximo el daño a los frescos; toda precaución preventiva se tomaba bajo



6

6. Imágen de la elevación de la grúa para ubicarla en el patio pasando por encima de la cubierta del convento

7. La estructura reticular en acero elevada para adosarla al tímpano dañado



7



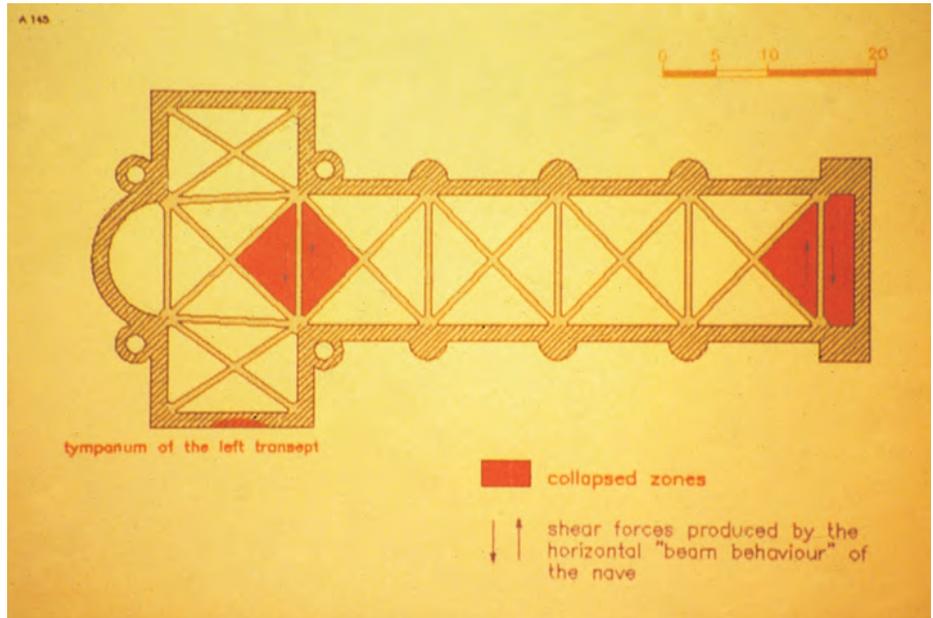
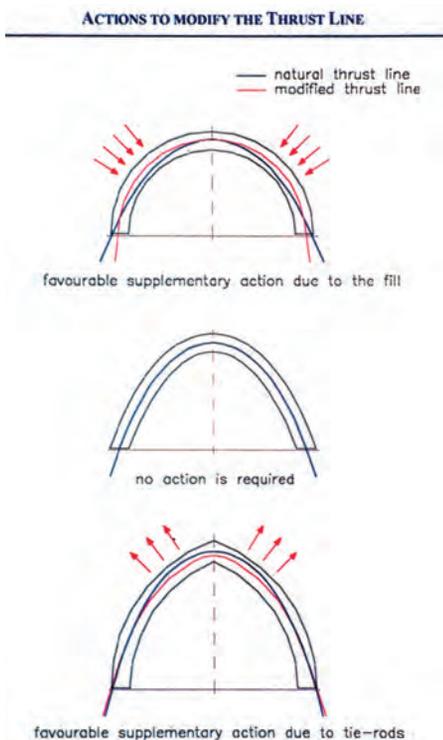
8

8. El material de relleno sobre las bóvedas acumulado a través de los siglos

9. La dirección de las eventuales fuerzas suplementarias a aplicar en las bóvedas para mejorar el comportamiento estático de su curvatura

10. La planta de la basílica con indicación de las bóvedas caídas donde a los "efectos locales" producidos por los rellenos, se añadieron las tensiones normales y tangenciales, debidas al comportamiento global del sistema abovedado

9



10

la guía del Instituto Central de Restauración, inyectando siempre que era posible en las fisuras una película de poliuretano para limitar la aparición del mortero en el intradós de las bóvedas.

\* Encolado del extradós, a la altura de las lesiones con una capa de fibras sintéticas para restablecer la cohesión estructural.

\* Suspensión de las bóvedas y las nervaduras más dañadas a los grandes arcos de piedra de la cubierta mediante una serie de tirantes, habiendo insertado en estos muelles para asegurar una fuerza constante, independiente de los efectos térmicos y de las pequeñas vibraciones (fig. 13).

El proyecto de intervención definitiva, que contempla la consolidación de las bóvedas supervivientes y la reconstrucción de las bóvedas caídas, sigue una filosofía no diversa de aquella que se ha adoptado hasta ahora, partiendo de la consideración que, en relación a la presencia de los frescos, no se puede efectuar ninguna operación sobre el intradós de las bóvedas, ni se puede intentar recuperar parte de la curvatura perdida.

Por tanto, se decidió realizar sobre el extradós de las bóvedas supervivientes una serie de nervaduras en material compuesto de fibra aramídica (kevlar), dispuestas según las líneas de fuerza típicas

de cierta arquitectura gótica (fig. 14), de manera que reconfirman a dichas bóvedas una rigidez aunque sea parcial y una capacidad portante autónoma; tal capacidad viene además integrada por un sistema de tirantes semejantes a los que se han realizado hasta ahora.

**El proyecto de restauración se completa** con la reconstrucción de las bóvedas caídas utilizando ladrillos preparados artesanalmente con características geométricas y físico-químicas semejantes a las originales; un sistema de conectores absorberá las deformaciones elásticas, plásticas y las debidas a la retracción de las porciones reconstruidas, y asegurará una distribución de tensiones coherente con el comportamiento del conjunto abovedado.

3.5. Los estudios y el proyecto aquí expuesto fueron dirigidos por el autor de este artículo junto al profesor Paolo Rocchi y con la supervisión del profesor Antonio Paolucci, coordinador por parte del Ministero dei Beni Culturali, del arquitecto Costantino Centroni, Soprintendente de la región de Umbria, y del Doctor Giuseppe Basile, experto del Instituto Central de Restauración.

Las intervenciones proyectadas, en primer lugar para salvar y por tanto para consolidar y restaurar la Basílica de San Francis-



11



12

co de Asís, han seguido la misma filosofía: usar las técnicas y la tecnología más avanzada para respetar el valor histórico y obtener valores de seguridad adecuados alterando el mínimo posible la concepción original. En particular la solución adoptada por las bóvedas es reversible y permite observar claramente la concepción original, incrementando al mismo tiempo la capacidad portante hasta alcanzar los niveles de seguridad requeridos. 



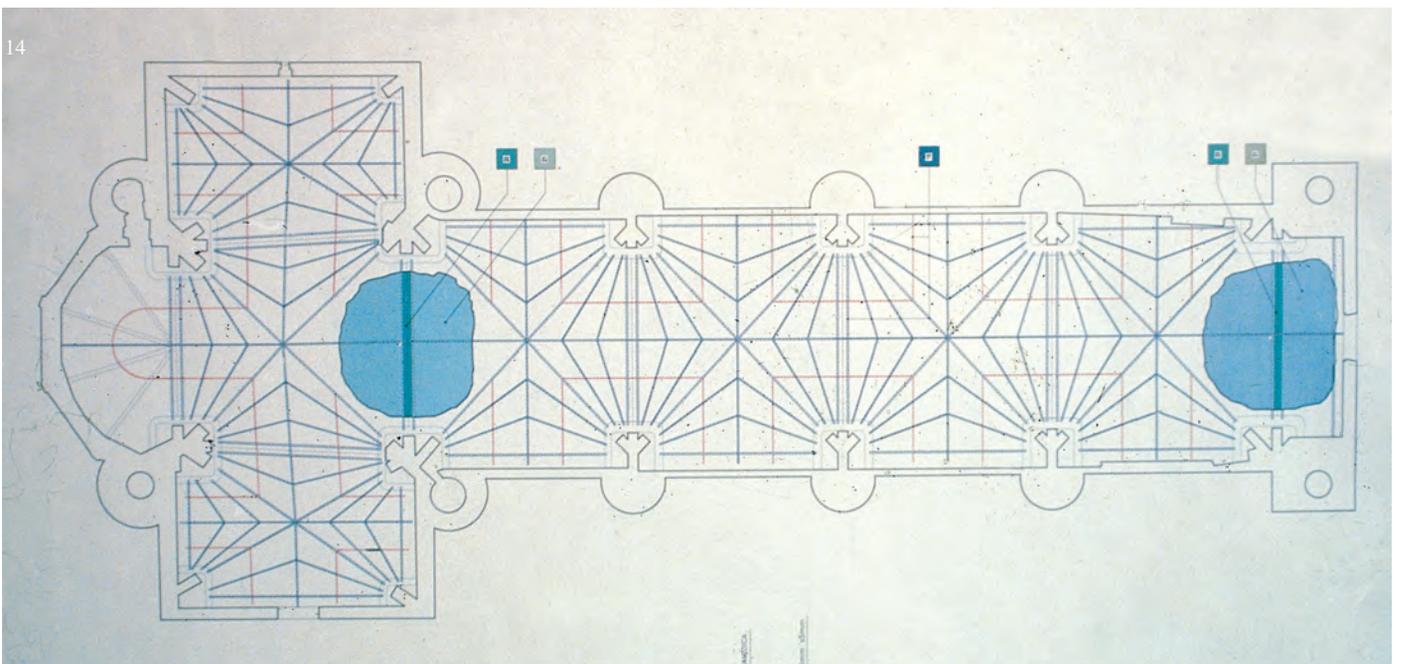
13

11. La zona próxima al transepto donde cayeron las bóvedas; se pueden ver los arcos formeros de mampostería realizados a finales del siglo XV, además de las vigas de hormigón armado y el forjado cerámico, que sustituyeron a los elementos de madera a mediados del siglo XX

12. La pasarela suspendida de la cubierta, sobre las bóvedas, realizada algunas semanas después del seísmo del 26 de septiembre de 1997

13. La cuna de acero rellena de gomaespuma para sostener las nervaduras lesionadas y deformadas

14. La distribución de las nervaduras de refuerzo que se aplicarán en el extradós de las bóvedas, según un característico trazado gótico



14