

Informe sobre la estabilidad de las bóvedas y el sistema de contrarresto de la nave y el crucero de la Iglesia de La Peregrina (convento de San Francisco) en Sahagún

por:

Santiago Huerta Fernández

colaboradora:

Paula Fuentes González

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

en base al levantamiento realizado por:

Ana López Mozo

DEPARTAMENTO DE IDEACIÓN GRÁFICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Ayuntamiento de Sahagún
TRYCSA

Madrid, marzo de 2010

Índice

1. Introducción: Objetivo del informe	1
2. Breve resumen histórico	1
3. Marco teórico	3
3.1 El material: hipótesis del análisis límite	3
3.2 Condición de estabilidad; seguridad	3
3.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad	4
3.4 Movimientos y grietas	4
3.5 Verificación de la resistencia	5
3.6 Bóvedas tabicadas	5
4. Levantamiento de la geometría de los arcos perpiaños de la nave y de la cúpula	5
4.1 Bóvedas de la nave	5
4.2 Cúpula del crucero	7
5. Estabilidad de las bóvedas de la nave	17
5.1 Construcción	17
5.2 Daños y defectos	17
6. Estabilidad de la cúpula	18
6.1 Construcción	18
6.2 Daños y defectos	18
6.3 Pesos, tensiones y empujes de la cúpula	18
6.4 Pandeo	20
7. Demolición de las bóvedas del ábside	21
7.1 Medidas previas a la demolición de la bóveda.	21
7.2 Separación de la cúpula de la bóveda del ábside	22
8. Restauración de los rellenos y lengüetas de la nave	22
9. Conclusiones	23
10. Bibliografía	24
11. Documentación fotográfica	25

Anexo: Informe preliminar de 12 de noviembre de 2010

1. Introducción: Objetivo del informe

La iglesia de La Peregrina está situada sobre un promontorio en la localidad de Sahagún (León, España). Desde que se comenzó a construir en el siglo XIII ha sufrido diversas modificaciones. Una de las más importantes tuvo lugar a finales del siglo XVII, cuando se demolió la bóveda mudéjar del ábside, construyéndose una bóveda tabicada en su lugar. Se demolieron también los arcos fajones de la nave, y se construyeron unas bóvedas tabicadas con lunetos en la nave, y una bóveda oval en el crucero. En la actualidad, un nuevo proyecto, realizado por el arquitecto D. José Ramón Solá, pretende recuperar el ábside mudéjar que quedó oculto tras esta intervención. Esto implica la demolición de la bóveda del ábside, y por tanto, una pérdida de contrarresto de la cúpula del crucero. Por otra parte los arcos fajones de las bóvedas de la nave presentan visibles distorsiones. Los objetivos de este informe son:

- 1) Estudiar la estabilidad del sistema de contrarresto de la nave y sugerir medidas de consolidación, en su caso.
- 2) Estudiar la estabilidad de la cúpula y del sistema de contrarresto, para evaluar la posibilidad de su demolición, sugiriendo las medidas de consolidación necesarias.
- 3) Exponer las medidas de consolidación tomadas y ejecutadas hasta la fecha.

Se han realizado seis visitas: a) previas a la demolición: 9/9/2009, 9/11/2009, 24/11/2009, 2/12/2009 y 3/2/2010; b) inspección de la separación de la bóveda del ábside del arco total: 10/3/2010.

2. Breve resumen histórico

La iglesia de la Peregrina pertenece a un convento franciscano fundado en Sahagún en el 1257, y que comenzó a construirse en el año 1260. La iglesia se proyectó de una sola nave con seis tramos y ábside poligonal. En su origen tenía cubierta de madera sobre arcos fajones de ladrillo, salvo en el ábside, donde probablemente había una cubierta abovedada. Detrás del ábside se encuentra el camarín de la Virgen.

En el lado norte de la nave se construyeron tres capillas posteriores a la construcción de la iglesia. La primera de ellas es la más cercana a los pies. En el lado sur, entre el crucero y el ábside aparece otra capilla que se construyó a mediados del siglo XV, muy famosa por sus yaserías. En el lado sur se construyó el claustro.

Fueron muchas las intervenciones que sufrió el convento. La más importante tuvo lugar a finales del siglo XVII. Parte de la techumbre de madera se había caído, y los muros de ladrillo se encontraban en mal estado. A raíz de estos problemas se derribaron los arcos fajones, y

la nave se cubrió con bóvedas tabicadas de ladrillo con lunetos. Para levantar las bóvedas se construyeron unos pilares adosados, sin enjarjar, al muro existente. El tramo del crucero se cubrió con una cúpula oval sobre pechinas. En la cabecera el tramo recto se cubrió con una bóveda de cañón rebajada con lunetos, y el ábside con una bóveda de cuarto de esfera. En los pies de la iglesia se levantó un coro sobre vigas de madera apoyadas en muros de carga. La estructura de madera se cubrió por debajo con dos bóvedas tabicadas rebajadas con lunetos; sobre el coro se levantó una gran bóveda de arista que cubrió los dos tramos. Toda la intervención fue destinada a dar una imagen “moderna” al interior de la iglesia.

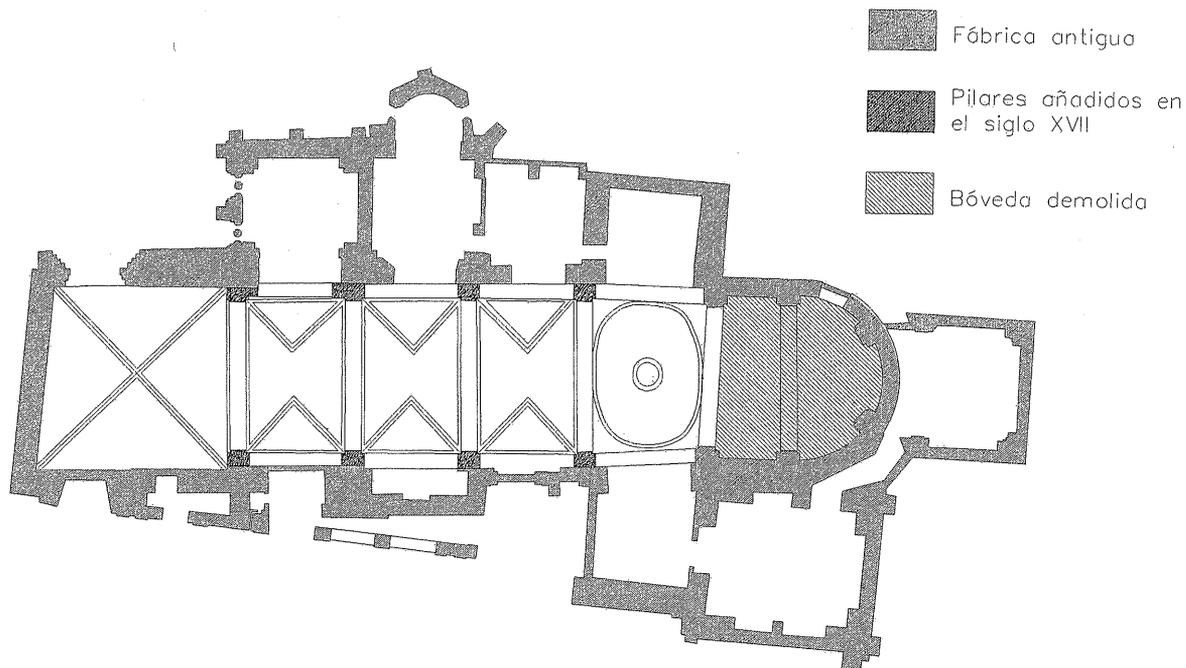
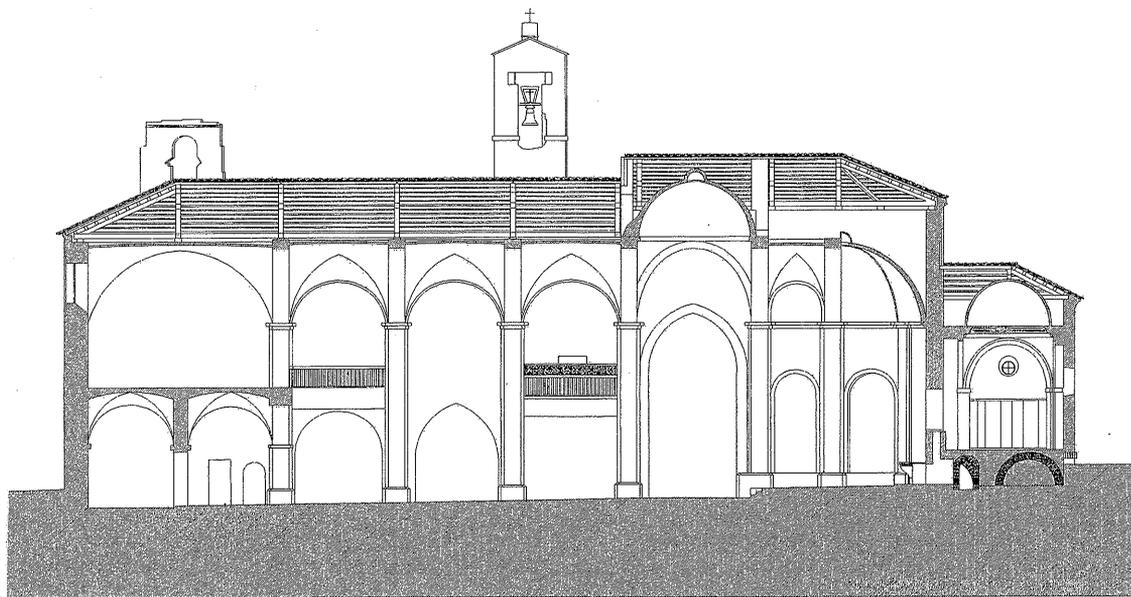


Figura 1
Planta y sección de la iglesia en el estado actual (planos de J. R. Solá)

3. Marco teórico

Para contestar a las preguntas planteadas en el presente informe, que afectan al comportamiento estructural de la iglesia, es preciso utilizar la teoría de estructuras. La teoría convencional de estructuras de barras no es de aplicación a las estructuras históricas de fábrica. Al realizar los estudios se ha aplicado la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, tal y como la ha desarrollado fundamentalmente Heyman en los últimos años —véase Heyman (1995a y 1995b). En este apartado se resumirán los principios e ideas fundamentales.

3.1 El material: hipótesis del análisis límite

Se considera la estructura de fábrica formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Es decir, imaginamos la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Supondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres hipótesis dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas:

- (1) la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita;
- (2) la fábrica tiene una resistencia a tracción nula;
- (3) el fallo por deslizamiento es imposible.

La hipótesis (1) va ligeramente en contra de seguridad y se comprobará mediante un cálculo numérico. La suposición (2) va, evidentemente, a favor de seguridad. Finalmente, la hipótesis (3), vuelve a estar en contra de seguridad, pero los casos de deslizamiento entre piedras son extremadamente raros (suelen estar asociados a movimientos sísmicos).

3.2 Condición de estabilidad; seguridad

La condición de estabilidad de una fábrica construida con un material que cumpla los principios anteriores exige que la trayectoria de las fuerzas, la «línea de empujes», esté contenida dentro de la estructura; esto es, para cada sección hipotética de la estructura la resultante de las fuerzas debe estar contenida en su interior.

La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante de tensiones (empuje) a sus bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección. Los coeficientes de seguridad dependen del tipo y uso de la estructura, y tienen un carácter empírico. En particular, para el caso de edificios, son distintos para arcos y bóvedas y para estribos; el coeficiente de éstos últimos es mucho más restrictivo, por los motivos que se discutirán en el apartado dedicado a la seguridad del sistema de contrarresto.

3.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad

Si la estructura es hiperestática, como es habitual, será posible encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro de la fábrica, que corresponden a las infinitas situaciones de equilibrio posibles (la línea de empujes no es más que una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio).

Si se cumplen los principios del análisis límite enunciados antes se puede demostrar —véase Heyman (1995, 1999)— el siguiente Teorema Fundamental del Análisis Límite (Teorema de la Seguridad o del Límite Inferior): *Dada una estructura, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material (esto es, que no aparezcan tracciones) la estructura no colapsará. Aplicado a las fábricas: si es posible dibujar una línea de empujes contenida dentro de la estructura la estructura no se hundirá.* La potencia del Teorema radica en que la línea de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser elegida libremente. Elegida una línea, podremos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico: sabemos que la estructura tiene al menos ese coeficiente de seguridad (en general, sería posible encontrar una línea de empujes que diera una situación más favorable).

El problema de la seguridad de las fábricas es, pues, un problema de estabilidad. De los tres criterios fundamentales que debe cumplir una estructura (resistencia, rigidez y estabilidad), es éste último el que gobierna el proyecto de las fábricas: las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas. El criterio de estabilidad conduce a una visión de las estructuras de fábrica basada firmemente en la geometría: es la forma la que posibilita que las trayectorias de esfuerzos estén siempre dentro de los límites de la fábrica (para una exposición clara y muy detallada de este enfoque, véase Heyman, 1999; Huerta 2001).

3.4 Movimientos y grietas

Las grietas son algo natural en un material que no resiste tracciones. De hecho, los agrietamientos son la única forma de adaptarse a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno (por ejemplo, a un pequeño desplazamiento de los estribos, etc.). Las grietas dividen la estructura en un conjunto «articulado» de bloques que se mueve y adapta a las nuevas condiciones de contorno. A cada movimiento corresponde un agrietamiento distinto y una estructura puede presentar a lo largo de su historia distintos agrietamientos, que corresponden a distintas posiciones de las líneas de empujes (distintas soluciones de las ecuaciones de equilibrio). Sin embargo, el Teorema Fundamental nos asegura que, si encontramos «un sistema de líneas de empujes» (esto es una cierta situación de equilibrio) dentro de la fábrica, aunque pueden moverse bruscamente, éstas nunca se saldrán de los límites de la fábrica con lo que la estabilidad está asegurada.

3.5 Verificación de la resistencia

Se ha dicho que la resistencia no es el criterio que rige el proyecto de las fábricas. Esta afirmación se puede comprobar calculando las tensiones de trabajo en algunas de las construcciones más grandes. Por ejemplo, la tensión media en la base de los pilares de la catedral de Beauvais que tiene las bóvedas más altas del gótico es de sólo 1,3 N/mm².

No obstante, en el caso de que la piedra sea excepcionalmente blanda o que el elemento de estudio soporte cargas concentradas muy grandes, se puede realizar una comprobación de resistencia, tras haber encontrado una situación suficientemente estable. No hay que olvidar que las bajas tensiones no garantizan, en absoluto, una estabilidad segura.

3.6 Bóvedas tabicadas

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica y se comportan estructuralmente de la misma manera. El Teorema de la Seguridad garantiza la corrección de los análisis de equilibrio (gráficos o analíticos) que pueden usarse con ventaja hoy día. La exactitud de un análisis viene dada por la corrección de las hipótesis de partida y no por la herramienta física empleada: un sencillo análisis gráfico puede ser mucho más exacto que un análisis por ordenador.

El carácter «cohesivo» no es relevante desde el punto de vista estructural. Sí lo es desde el punto de vista constructivo. Permite la construcción sin cimbra, empleando sólo ligeros elementos auxiliares de control de la forma. Las bóvedas tabicadas pertenecen a esta familia de bóvedas que se construyen sin cimbra, que incluye también las bóvedas de rosca de ladrillo bizantinas, las de tubos huecos del norte de África, las de hojas inclinadas de Babilonia o Egipto, etc. Las bóvedas tabicadas presentan, además, una cierta resistencia a la flexión que permite el paso de pesos ligeros apenas terminadas, facilitando aún más el proceso constructivo (Huerta 2001b).

4. Levantamiento de la geometría de los arcos perpiaños de la nave y de la cúpula

Para realizar un estudio de estabilidad de la fábrica, es imprescindible realizar una medición precisa. En este caso la medición fue realizada por la profesora Ana López Mozo con estación total láser.

4.1 Bóvedas de la nave

En el caso de las bóvedas de la nave los movimientos quedan registrados en los arcos perpiaños. Por este motivo se han levantado aquellos que presentaban deformaciones visibles: el arco toral adyacente a la nave y el segundo arco a partir del toral. Los resultados se han representado en las Figuras 2 y 3, respectivamente. Se ha superpuesto la geometría hipotética

original, de medio punto. Las diferencias, notables, entre la forma medida y la teórica no se explican por el desplome de los machones que han permanecido perfectamente verticales.

El motivo de la deformación debe ser, pues, una ejecución rápida, despreocupada por la obtención de una forma perfecta. La inspección del trasdós de las bóvedas, donde apenas se aprecian grietas en la zona de los lunetos (grietas de Sabouret; ver Heyman (1999)), confirma esta hipótesis. Finalmente, la ausencia de grietas visibles en el intradós enlucido de yeso demuestra que no ha habido movimientos, al menos desde la última vez que fueron enlucidas y pintadas: una bóveda enlucida de yeso y pintada de blanco funciona como un gran "testigo" de enorme sensibilidad.

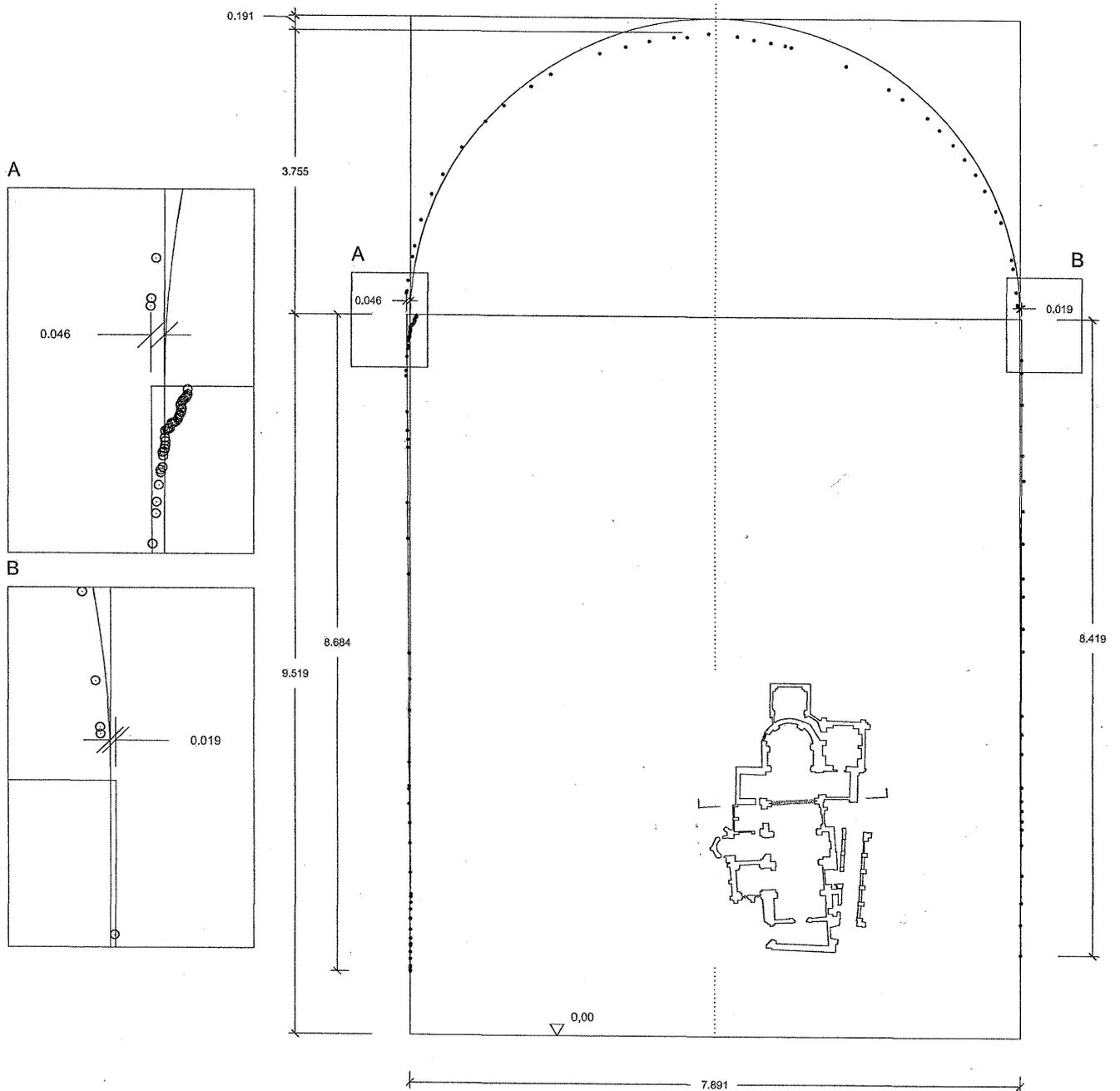


Figura 2
Arco toral de la nave (levantamiento de A. López Mozo)

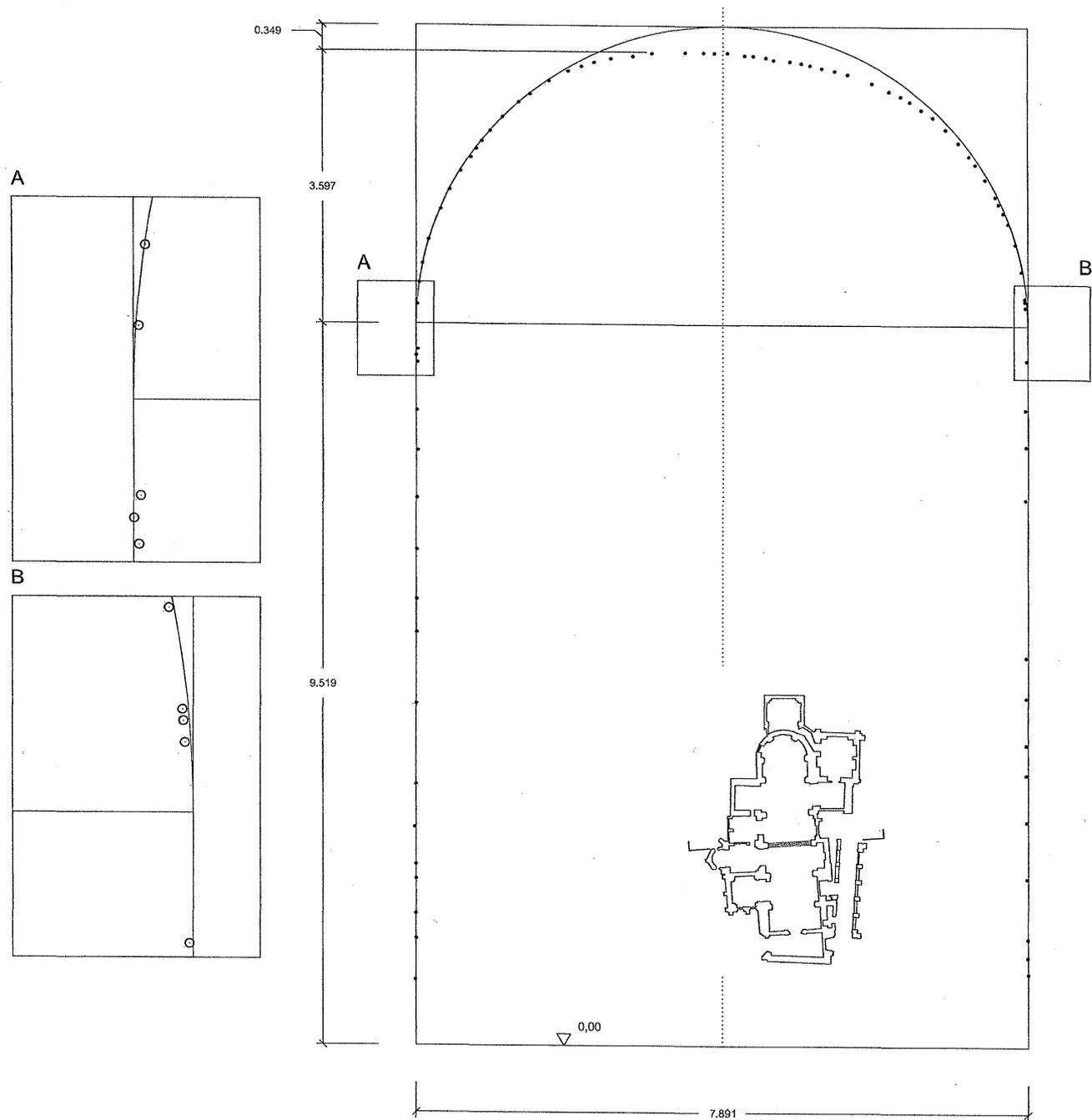


Figura 3
Arco perpiaño de la nave (levantamiento de A. López Mozo)

4.2 Cúpula del crucero

El crucero de la iglesia del convento de La Peregrina en Sahagún está cubierto con una cúpula de planta oval, apoyada sobre pechinas en los arcos torales, rematada con un óculo central. La necesidad de determinar la configuración geométrica del conjunto del crucero y arcos de la nave para poder analizar su comportamiento estructural, propició la realización de un levantamiento de las superficies de intradós con estación total láser.

4.2.1 Toma de datos

La toma de datos se realizó desde tres estacionamientos (Figs. 4 y 5), midiéndose unos 5.000 puntos, seleccionados para poder definir las superficies que conforman cúpula y pechinas. La cúpula se apoya sobre cuatro arcos que definen en planta un cuadrilátero irregular con sus lados cortos en disposición convergente. La distancia entre las claves de estos arcos determina la luz de la cúpula en las dos direcciones principales: 7,92 m y 5,81 m (Fig. 7). Las directrices de los arcos principales, la imposta de arranque de la cúpula desde las pechinas, las secciones de la cúpula y el óculo no son susceptibles de encajar en una definición geométrica precisa. Sin embargo, las superficies de trasdós de la cúpula y sus pechinas muestran continuidad, sugiriendo la posibilidad de considerar el conjunto como una peculiar bóveda vaída.

La irregularidad de todos los elementos que conforman el crucero ha llevado a definir su forma mediante la construcción tridimensional en CAD con superficies que se adaptan a los puntos de medición, Figs. 6 (a) y (b). La posibilidad de acceder al trasdós permitió, mediante la realización de catas puntuales, medir el espesor de cúpula, pechinas y arcos torales: 8, 16 y 25 cm respectivamente. La asignación de estos espesores a las superficies modeladas anteriormente mencionadas permitió definir el volumen de todos los elementos y completar las secciones longitudinal, transversal y diagonal del crucero (Fig. 7). Las directrices de apoyo de la imposta de la cúpula y su óculo tienen diferencias de cota apreciables a simple vista: el levantamiento desarrollado ha confirmado desniveles de 33,41 cm en el primer caso y 35,56 cm en el segundo. En la Fig. 8 se ofrecen líneas de nivel del intradós de la cúpula y sus pechinas, trazadas con una equidistancia de 25 cm.

4.2.2 Datos de volumen

La medición anterior ha permitido calcular los volúmenes y pesos (para un ladrillo de 1,6 t/m³) de los elementos que componen el abovedamiento del crucero:

Elemento	Volumen (m ³)	Peso (tons)
cúpula (e = 0,08 m)	4,42	7,07
óculo	0,30	0,48
imposta	1,40	2,24
pechinas (e = 0,16 m)		
	NE 1,15	1.84
	SE 1,08	1,73
	SO 0,98	1.57
	NO 0,93	1,50
Total	10,26	16,43

La cúpula (con óculo e imposta) pesa 9,8 t y las pechinas 6,7 t. Un peso muy pequeño para cubrir un espacio de unos 46 m² (repercusión 0,36 t/m²).

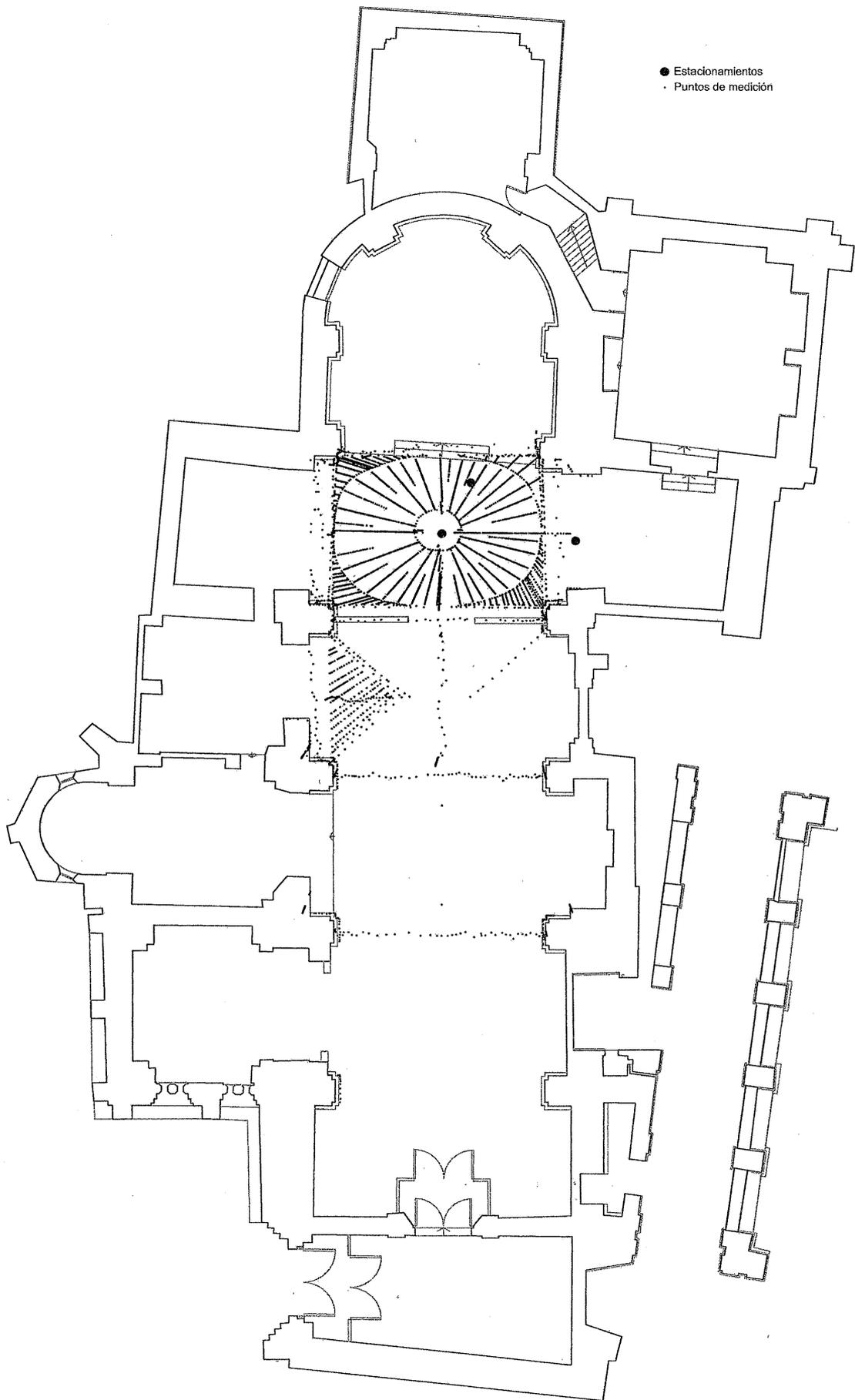


Figura 4
Puntos de estacionamiento y nube de puntos en planta (A. López Mozo)

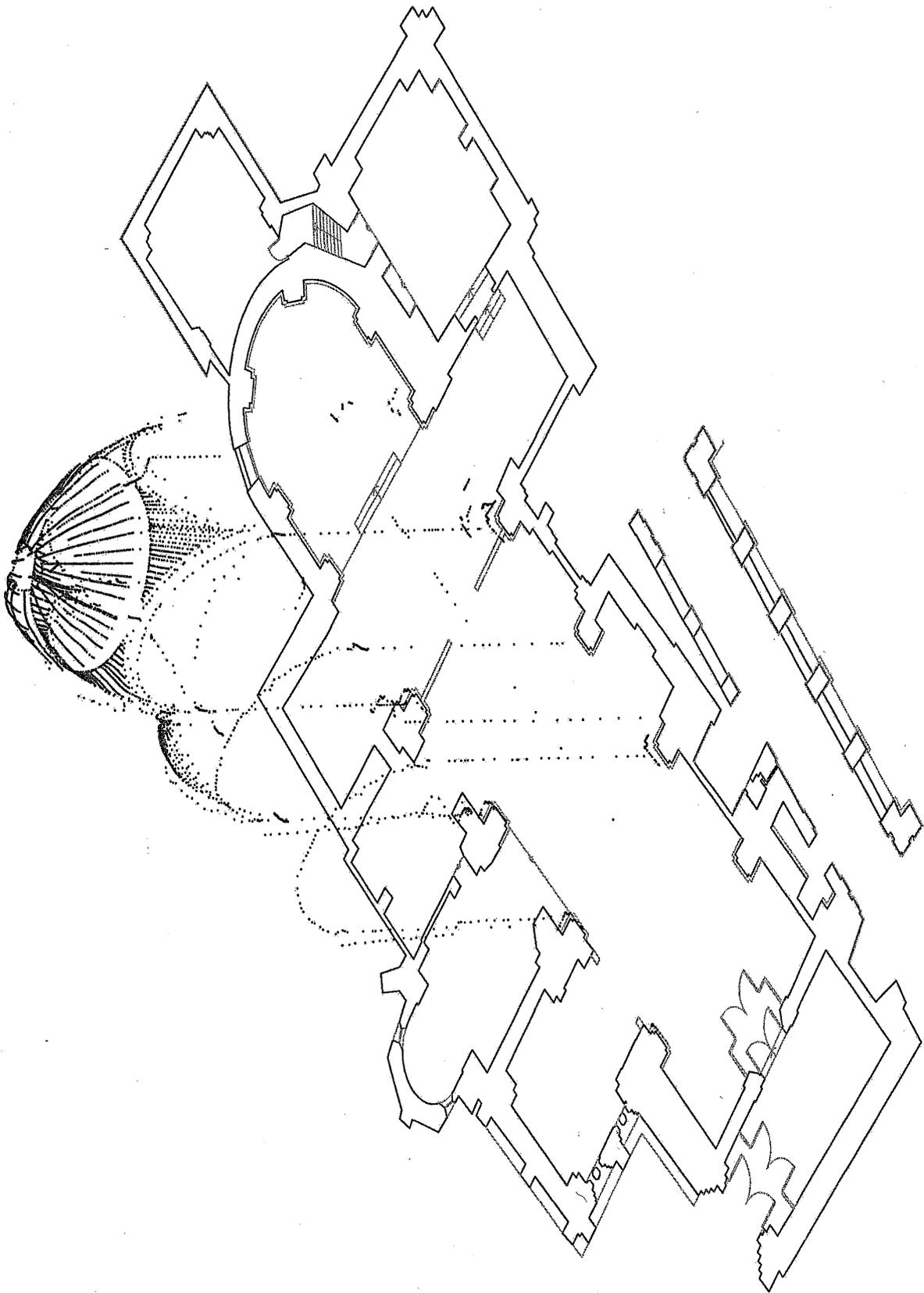
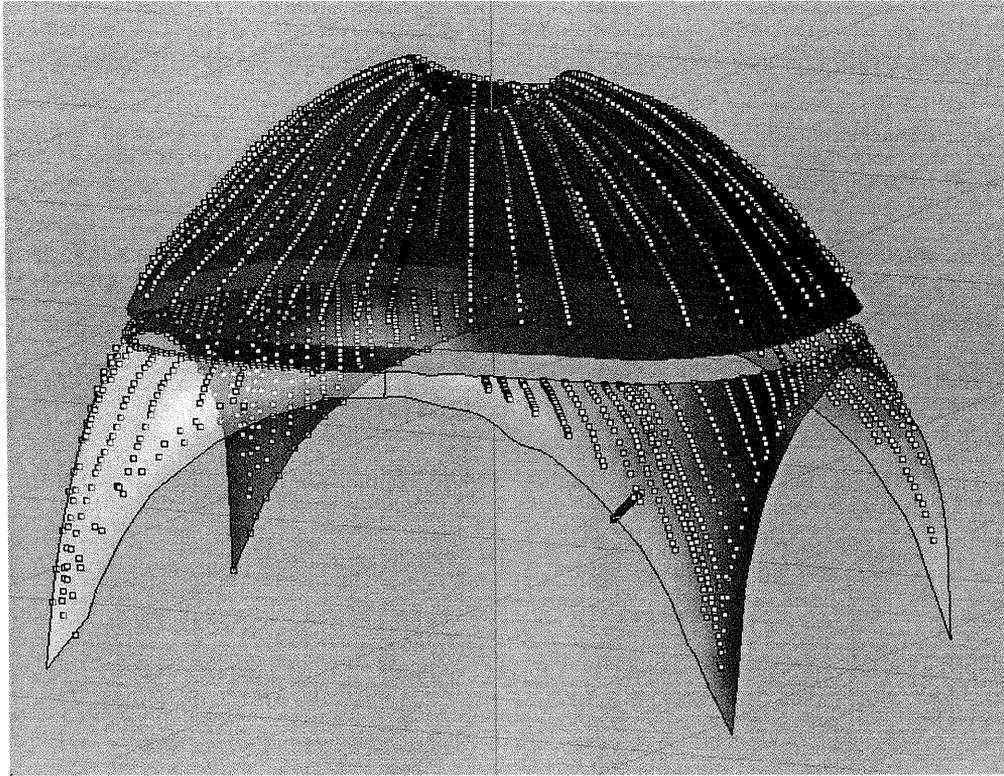
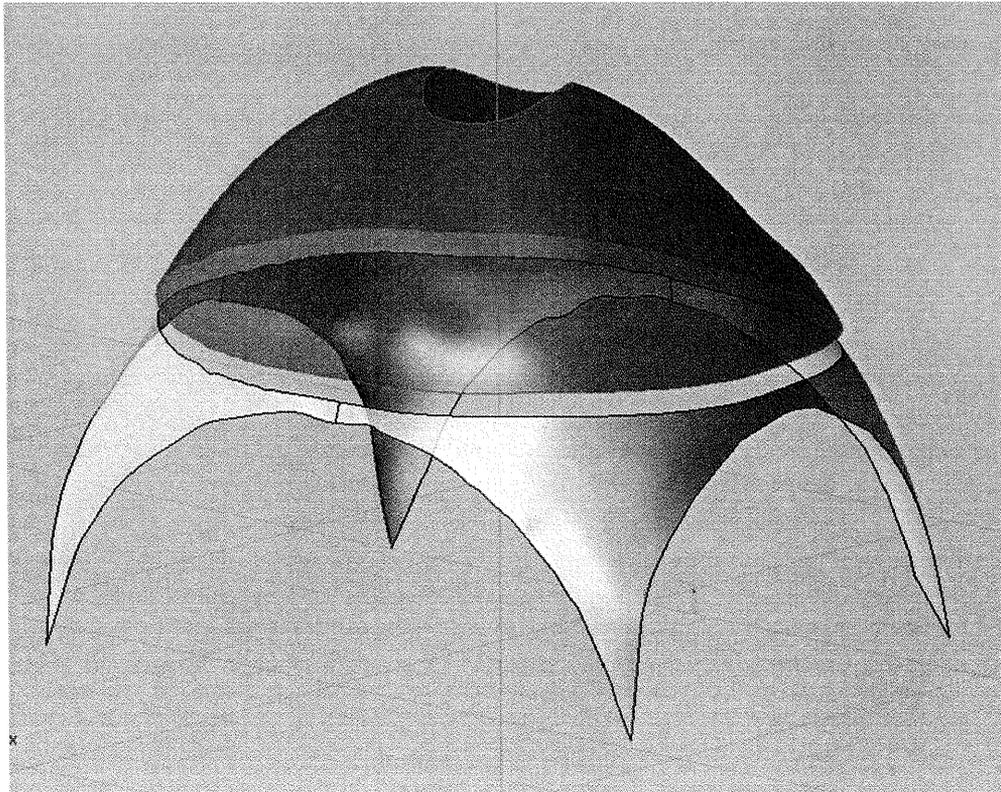


Figura 5
Nube de puntos en perspectiva (A. López Mozo)



(a)



(b)

Figuras 6

Perspectiva de la cúpula y pechinas: (a) puntos de medición; (b) superficie de intradós (A. López Mozo)

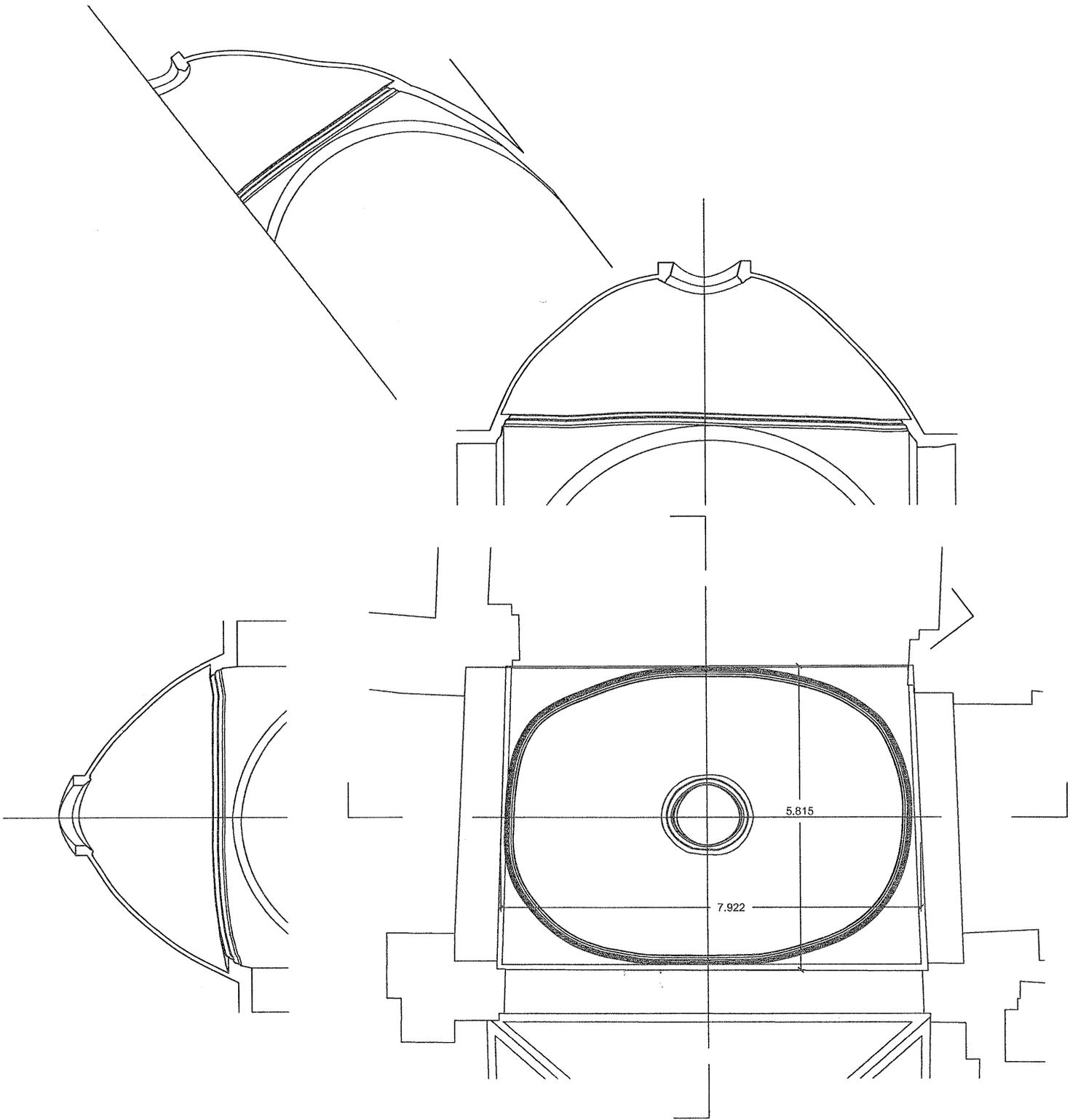


Figura 7
Planta y secciones de la cúpula (A. López Mozo)

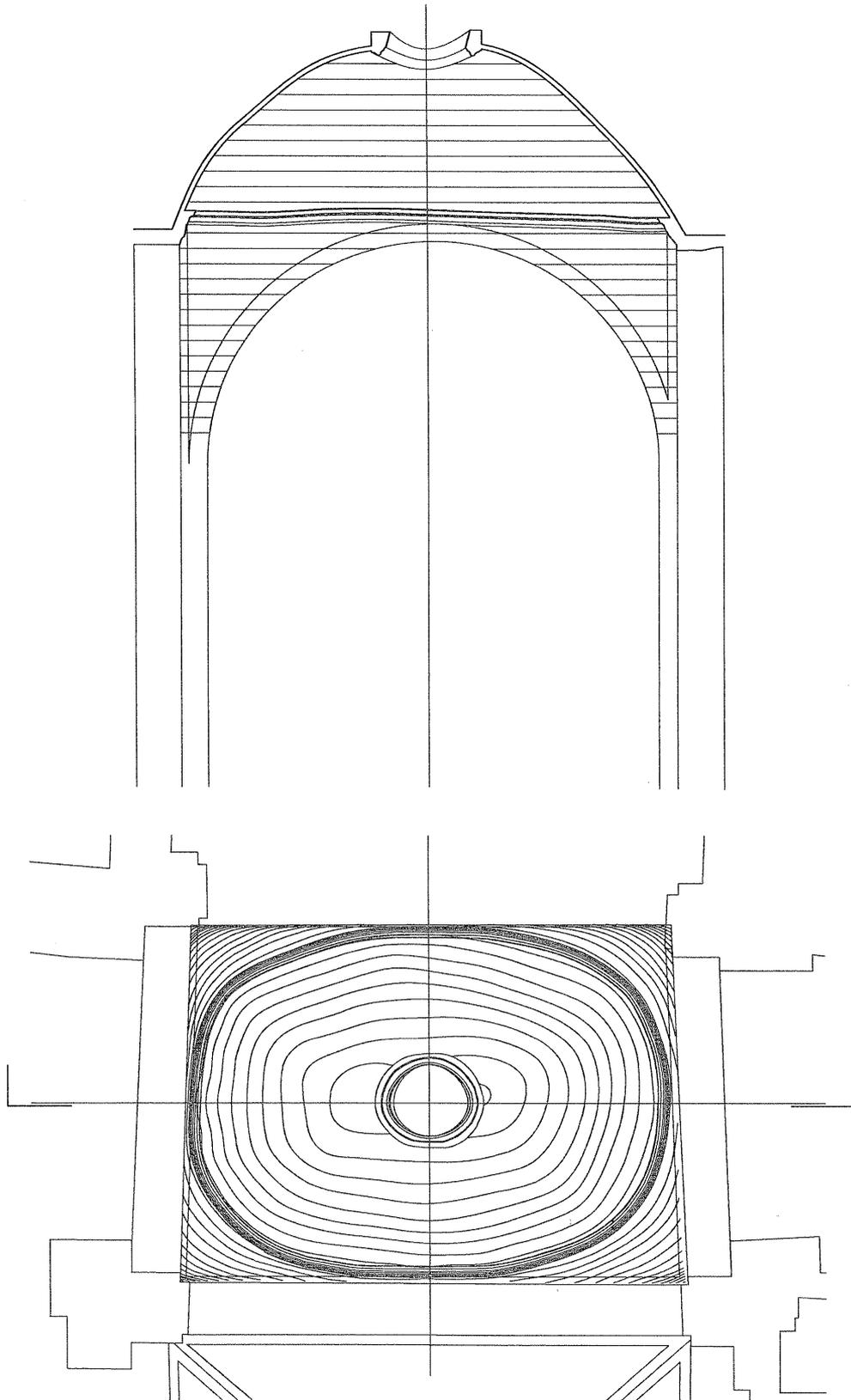


Figura 8
Sección y planta de la cúpula, con curvas de nivel (A. López Mozo)

4.2.3 Geometría de la cúpula oval

Con los puntos tomados y la ayuda de un programa informático, en este caso Rhinoceros, resulta fácil interpolar una superficie con suficiente precisión. La cúpula sobre el crucero es una cúpula oval tabicada de dos hojas (unos 8 cm de espesor) que apoya sobre unas pechinas construidas entre los cuatro arcos torales, con un óculo central. Las pechinas son de medio pie de ladrillo (unos 17 cm de espesor), sentado por hojas horizontales sucesivas en voladizo según el sistema conocido por "falsa bóveda". La cúpula está separada de las pechinas por una imposta. Tanto las pechinas como la cúpula se construyeron sin cimbra.

Los espesores se tomaron realizando perforaciones con una broca de 10 mm. Este método, sencillo y barato, en nada perjudica a la estructura y permite conocer con exactitud los espesores. (Si la bóveda fuera de sillarejos, la perforación se haría en una junta.) Los datos se recogieron en el croquis que se adjunta en la Figura 9.

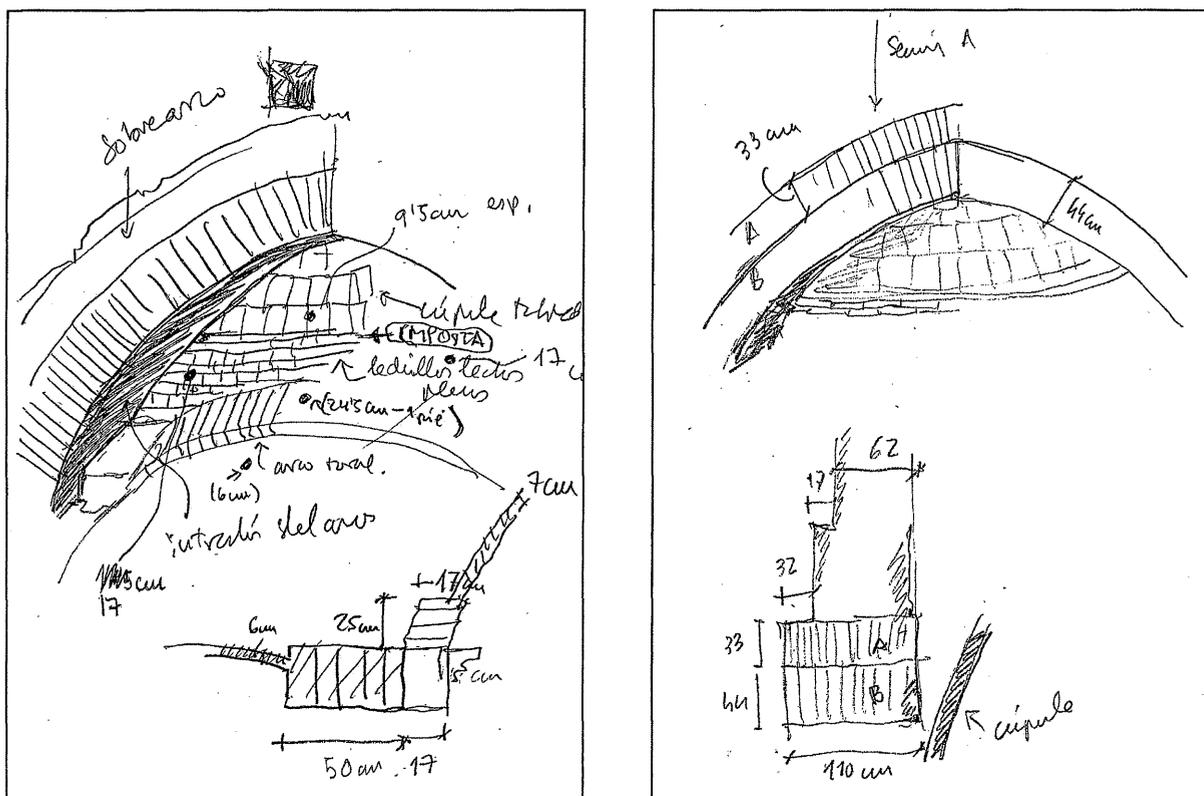


Figura 9

Croquis del trasdós de la cúpula y de las pechinas, y sección del arco toral

La estructura se aprecia con claridad por el trasdós. En particular, en las dos pechinas adyacentes a la nave el relleno ha desaparecido en gran parte, dejando al descubierto la transición entre la cúpula y la pechina (véanse las fotos y la sección diagonal de la Fig. 7). Esto

ha permitido observar una particularidad insólita, que se ha visto confirmada también con las mediciones. Cúpula y pechinas forman parte de una única superficie, no presentando la habitual discontinuidad en la zona de la imposta, es una superficie única (Fig. 6). Desde abajo, el observador tiende a interpretar la imposta en su sentido habitual, como fruto de la intersección de dos superficies de curvaturas distintas. Esto no es así en La Peregrina, donde el arquitecto buscó la continuidad de curvaturas que da una estabilidad enorme a cúpula y pechinas.

Como consecuencia de lo anterior, las tangentes a la superficie en la línea de imposta no son verticales. Este hecho tiene una consecuencia estructural muy importante. El sistema cúpula-pechinas tiene una forma que permite una solución de equilibrio de membrana a compresión. Por tanto, son innecesarios los rellenos y "lengüetas" (muretes radiales) que habitualmente se disponen en las cúpulas de fábrica hasta 2/3 de su altura. (Esta es la recomendación de Fray Lorenzo en su tratado de 1639 y puede observarse en la práctica totalidad de las medias naranjas de fábrica de espesor uniforme.) Las lengüetas existentes son el vestigio de esta práctica.

Así, con enorme habilidad, el maestro de la Peregrina ideó una forma que, adaptándose a la planta rectangular, permitía prescindir de unos rellenos y muretes de estribo que hubieran encarecido y complicado la obra. Por otra parte, al formar el sistema cúpula-pechinas una suerte de bóveda vaída oval peraltada, los arcos torales reciben mucha menos carga. Esta propiedad geométrica es la que, como se verá, simplifica enormemente el problema de la demolición de las bóvedas del presbiterio.

4.2.4 Irregularidades en la curvatura

El trasdós de la cúpula presenta evidentes irregularidades, debidas a una ejecución sin cimbra realizada sin prestar excesiva atención a la variación continua de las curvaturas; esto se hace patente sobre todo en la zona de los arranques (véase la sección diagonal de la figura 7). Quizá, podría calificarse la ejecución como "descuidada", pero lo cierto es que desde la nave estas irregularidades son inapreciables y seguramente el constructor decidió ahorrarse el exceso de coste que hubiera supuesto la definición precisa de la superficie de la cúpula. Por otra parte, las mediciones dejan ver que el rectángulo de planta es, en realidad, un cuadrilátero; los lados correspondientes a la nave son casi paralelos, pero los del crucero no lo son. Esta es una situación habitual en la construcción histórica, donde diversas condiciones en general relacionadas con la historia del edificio, impiden replantear plantas completamente regulares. Es tarea del arquitecto o maestro de obras disimular estas imperfecciones. En el caso de La Peregrina las cuatro pechinas de las esquinas, la forma quasi-regular del óvalo de la imposta y, sobre todo, el óculo central que se proyecta sobre un plano horizontal formando una circunferencia, constituyen una serie de simetrías que hacen que el ojo del observador considere la forma regular.

Las irregularidades de la curvatura de la cúpula pueden tener, sin embargo, importancia estructural. La fábrica es un material que no resiste tracciones y si hubiera una zona con concavidad hacia abajo (curvatura gaussiana positiva con los radios de curvatura principales hacia arriba), se podría producir un desprendimiento local. El que esto no haya ocurrido en los siglos que lleva en pie la cúpula, así como la inexistencia de grietas en el intradós, hacen pensar que esto no sucede en la cúpula de la Peregrina.

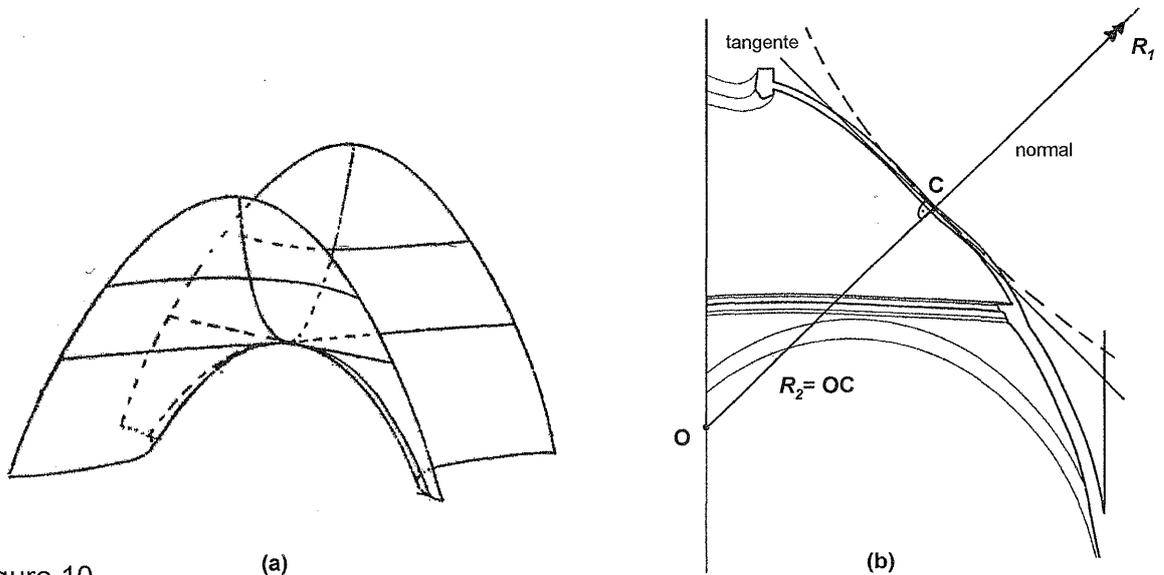


Figura 10

(a) Superficie de curvatura gaussiana negativa; (b) Radios de curvatura principales en una irregularidad de la Peregrina (el radio R_2 tiene centro en O)

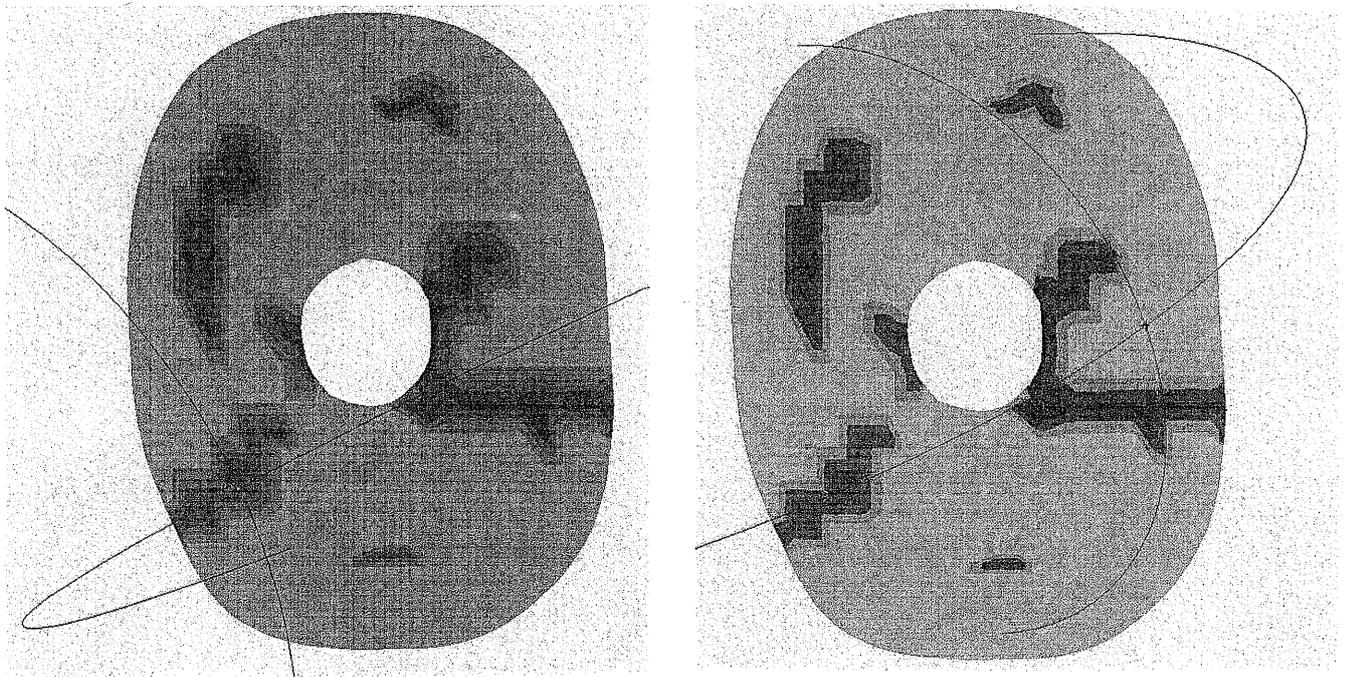


Figura 11

Mapas de curvaturas. Zonas en negro con curvatura gaussiana negativa (ejemplo, punto en dibujo izqu.). Las zonas grises tienen curvatura positiva hacia abajo (punto en dibujo derecho)

Por otra parte, una vez que tenemos la geometría “digitalizada”, el mismo programa Rhinoceros permite estudiar la curvatura local, dando mapas de curvaturas gaussianas. El estudio ha dado como resultado que no existen curvaturas gaussianas positivas que conduzcan a una concavidad hacia abajo. En algunas zonas, principalmente coincidiendo con las irregularidades, hay curvatura gaussiana negativa. Esto no supone ningún problema pues siempre es posible la formación de un arco de descarga (véanse Figs. 10 y 11, más arriba).

5. Estabilidad de las bóvedas de la nave

5.1 Construcción

Las bóvedas de la nave son tabicadas de dos hojas, de unos 10 centímetros de espesor. A los pies hay una bóveda de arista. El resto de las bóvedas son de cañón con lunetos, con arcos perpiaños separando los distintos tramos. Se construyeron sin cimbra y desde el trasdós se aprecia la doble curvatura a que conduce el procedimiento. Las aristas están siempre reforzadas por nervios superiores. En los riñones, hay un primer tramo macizo que forma el enjarje con el muro. Después aparecen muretes o lengüetas que actúan como un relleno estructural. Es decir, dan una vía de escape a los empujes de la bóveda hacia los muros. Fray Lorenzo de San Nicolás recomendaba en su libro *Arte y uso de arquitectura* (1639) que el macizo del enjarje subiera $1/3$ de la altura de la bóveda y las lengüetas o muretes otro $1/3$: esto es, los riñones están contrarrestados en $2/3$ de la altura de la bóveda.

5.2 Daños y defectos

Sólo se han detectado algunos daños locales, debidos a humedades persistentes, que han sido reparados. La humedad persistente, debida a una gotera, por un espacio de años degrada el mortero de cal y el yeso hasta que pierde toda consistencia.

Este tipo de daños locales en bóvedas tabicadas no afectan la solidez de la bóveda completa pero pueden ser muy peligrosos para alguien que pueda pisar la zona afectada: ésta fallaría sin aviso previo y la subsecuente caída podría ser fatal. En la Peregrina se descubrió una zona en uno de los arcos formeros tabicados de la bóveda de crucería a los pies de la iglesia. El deterioro era tan grande que los ladrillos se podían retirar con la mano y algunos de ellos se deshacían en los dedos. La parte correspondiente, fue desmontada y reconstruida inmediatamente. También se detectó una separación entre las dos hojas tabicadas en unos de los arcos formeros de la nave. Se levantó la hoja superior y se rehízo.

El método para detectar estos deterioros es, en primer lugar, la inspección visual. Se buscarán aquellas zonas en las que hay evidencia de humedades y se inspeccionará la bóveda con precaución. Así se localizó la zona más deteriorada.

Para localizar las zonas de separación entre hojas o de menor deterioro, se combina la inspección visual con ligeros golpes de martillo. Si el sonido es limpio y el martillo “rebota”, significa que la fábrica está en buen estado. Un sonido sordo y el ligero amortiguamiento del rebote, puede indicar una fábrica deteriorada. Por este método se inspeccionaron todas las bóvedas de la nave y se localizó la zona deteriorada del arco formero que fue reparada.

6. Estabilidad de la cúpula

6.1 Construcción

La cúpula, como las bóvedas de la nave, es tabicada de dos hojas de ladrillo y unos 8 cm de espesor. La primera hoja se construyó sin cimbra y, probablemente, su aparejo indica el sistema de guías y cintreles empleado durante su construcción (la forma alabeada del óculo debe obedecer a este sistema); el aparejo está tapado por el enlucido interior y la segunda hoja. En la segunda hoja los ladrillos están dispuestos a “matajunta” formando hiladas más o menos horizontales. En algunos sitios se ha dejado algún ladrillo sin poner para crear hendiduras que ayuden a subir el empinado trasdós de la cúpula (durante la construcción y para mantenimiento). Se trata de una construcción ligera y económica.

6.2 Daños y defectos

No se observa ningún tipo de daño en la cúpula. Ni siquiera son visibles las habituales grietas meridianas. No hay evidencia de humedades que hayan podido deteriorar el mortero. Sólo la zona del óculo requerirá un repaso para regularizar el borde.

6.3 Pesos, tensiones y empujes de la cúpula

6.3.1 Pesos

Según las mediciones la cúpula tiene un volumen total de unos 4,5 m³ (para un espesor de 80 mm ó dos hojas). Considerando el peso específico del ladrillo de entre 15 y 17 kN/m³, su peso oscilará entre 67,5 y 76,5 kN, entre 7 y 8 toneladas.

6.3.2 Tensiones

Dado el poco espesor de la cúpula, es razonable pensar en un estado de membrana a la hora de hallar los esfuerzos principales. En el estado de membrana se considera que todos los esfuerzos internos están contenidos dentro de la superficie media, esto es, las resultantes de tensiones N_φ (según los meridianos) y N_θ (según los paralelos) son tangentes a la superficie (Flügge 1973, Heyman 1977). En general, para una cáscara de revolución, las N_φ y N_θ son de

compresión en la parte superior; y a partir de un cierto ángulo, las N_θ se vuelven de tracción (las N_φ son siempre de compresión para peso propio). El ángulo que separa tracciones de compresiones depende de la forma de la cáscara; para una cáscara semiesférica es de unos 52° a partir de la clave (ver fig. 12); para cáscaras más apuntadas el punto de tracciones baja hacia abajo.

Por otra parte, en la cúpula de la Peregrina el estado tensional de membrana verifica que las resultantes de tensiones N_φ y N_θ son muy bajas y siempre de compresión. Esto se debe a que la cáscara no presenta tangente vertical en su borde. El orden de magnitud de las tensiones en una cáscara es independiente del espesor, siendo proporcional al peso específico y al radio de curvatura (Heyman 1977). Tomando un radio de curvatura máximo de unos 10 m (que se deduce del análisis de curvaturas), la tensión máxima será del orden $0,17 \text{ N/mm}^2$ ó $1,7 \text{ kg/cm}^2$, para un peso específico de 17 kN/m^3 .

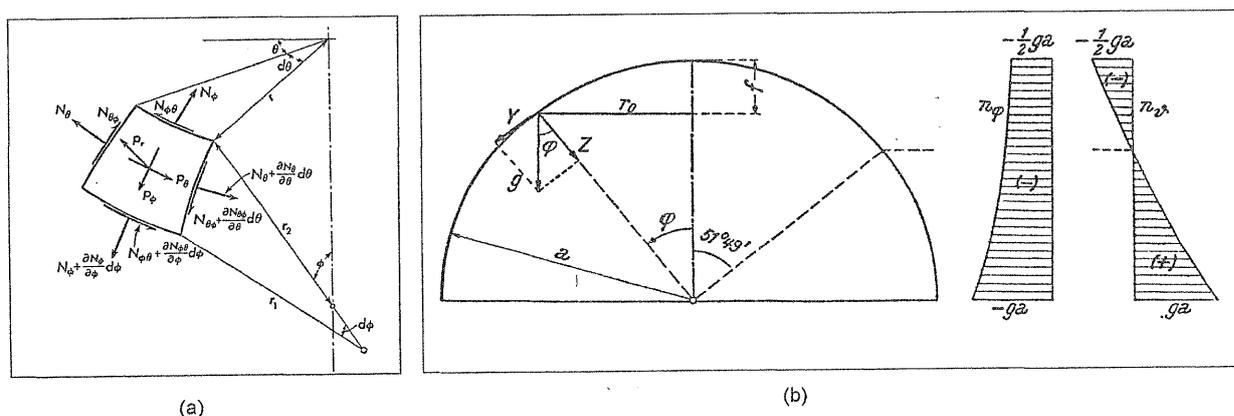


Figura 12

(a) Equilibrio de un elemento diferencial de una cáscara de revolución (Flügge 1973); (b) Distribución en una cáscara semiesférica (Girkmann 1959)

Quedaría comprobar que, efectivamente no aparecen tensiones N_θ de tracción en la zona de la base de la cúpula. La ausencia completa de grietas o fisuras serviría para demostrar este hecho. No obstante, dado que ya se había realizado un levantamiento de la geometría se ha realizado un análisis de membrana (que es un análisis de equilibrio) mediante el programa SAP2000. Los resultados arrojan, en efecto, un estado tensional de compresiones, salvo pequeñas tracciones en las irregularidades, como era de esperar. Estas pequeñas tensiones de tracción no son reales: el pequeño espesor de la cáscara permitiría (y es evidente que lo ha permitido) pequeñas separaciones de la superficie media que han conducido a estados de compresión. No obstante, en la zona de la base, el análisis del programa coincide perfectamente con las observaciones anteriores.

6.3.3 Empujes

Dado que, como se aprecia en las secciones, la tangente no es vertical a la altura de la imposta, estas resultantes de tensiones se pueden descomponer en dos componentes: una vertical y otra horizontal. La componente vertical media de $N_{\phi_{med}}$ se obtiene dividiendo el peso total de la cúpula por la longitud del óvalo de base de unos 22 m, por tanto $N_{\phi_{med}} = 80/22 = 3,65$ kN/m ó 0,365 ton/m.

En la zona de las pechinas, las fuerzas se transmiten sin problema pues, como se ha dicho, no hay variación de curvatura. Es en la zona de los arcos donde hay un cierto empuje horizontal que debe ser contrarrestado para mantener la cúpula en equilibrio. Actualmente, son los arcos torales y las bóvedas quienes contrarrestan este empuje.

Al demoler las bóvedas del presbiterio, podría parecer que la componente horizontal de la cúpula quedaría sin contrarresto en esta zona. Hay que hacer las siguientes observaciones:

- 1) la cáscara es mucho más rígida que los arcos torales y la mayor parte de la carga se transmite por las pechinas;
- 2) existen unas lengüetas o muretes que descargan ya parte del peso de la cáscara adyacente al presbiterio al grueso muro superior;

Aún suponiendo que la cáscara transmite toda la componente horizontal teórica, ésta será, dada la inclinación de la tangente del orden de la mitad de la $N_{\phi_{med}}$, esto es $H_{med} = 1,8$ kN/m = 180 kg/m. La zona que no pertenece a la pechina puede estimarse en unos 3 m de donde el arco toral debe absorber una resultante horizontal de unos 540 kg. El arco tiene un espesor de 250 mm y un ancho de unos 670 mm; pesa, por tanto, unos 2,87 kN/m. Este peso es suficiente para transmitir el empuje inclinado de la cáscara dentro del arco. Así, pues, parece que incluso se podría demoler la bóveda sin tomar ninguna acción. No obstante, se recomendarán más adelante medidas de consolidación.

6.4 Pandeo

Dado su pequeño tamaño, la cúpula no presenta una esbeltez (relación *espesor/radio de curvatura*) excesiva. Los radios máximos de curvatura (excluyendo las zonas muy irregulares) rondan los 10 m; para un espesor de 10 cm esto conduce a una esbeltez de 1/100, similar a la de la cáscara de un huevo de gallina. Existen muchas cúpulas tabicadas con esbelteces del mismo orden. En la cúpula de la Basílica de los Desamparados la relación está entre 1/200 y 1/300; en San Juan el Divino es de 1/225.

El problema del pandeo se puede verificar con la siguiente expresión para cáscaras de doble curvatura (Heyman 1977):

$$\sigma_{cri} = 0,25 \cdot E \cdot \left(\frac{e}{R} \right)$$

donde E = módulo de Young

Para $E = 4.000 \text{ N/mm}^2$ y $e/R = 1/100$, la tensión crítica sería $\sigma_{cri} = 10 \text{ N/mm}^2$ ó 100 kg/cm^2 , casi cien veces superior a las tensiones máximas calculadas más arriba. Es cierto que las irregularidades pueden disminuir el valor de la tensión crítica y existen métodos para calcular esta disminución (Zarghamee y Heger 1983), pero el hecho incuestionable de la estabilidad de la cúpula durante más de tres siglos, el valor bajísimo de las tensiones máximas y la ausencia de daños visibles, hacen superflua esta verificación.

7. Demolición de las bóvedas del ábside

7.1 Medidas previas a la demolición de la bóveda.

A pesar de que los cálculos realizados anteriormente llevan a una posible demolición sin necesidad de tomar medidas adicionales, se decidió realizar una serie de tareas con el fin de garantizar al máximo la estabilidad. Las medidas se llevaron a cabo antes de la terminación del presente informe y se realizaron en base a un informe preliminar que se adjunta como Anexo. Las medidas iban destinadas a:

- 1) reponer las zonas de relleno desaparecidas y restaurar las lengüetas existentes muy deterioradas.
- 2) reforzar el arco toral adyacente al ábside.

Se recomendó y se ha ejecutado a la fecha de terminación del informe:

a) Añadir dos lengüetas o muretes más entre el trasdós de la cúpula y el muro sobre el arco toral del presbiterio. Al estar más cerca de la clave del arco, permitirán una descarga mayor del peso de la cáscara a las pechinas.

b) Reforzar el arco toral con un sobrearco de 1 pie (unos 25 cm) de espesor y el mismo ancho del arco toral, quedando enrasado con el muro adyacente y se rellenaron las enjutas del citado sobrearco con buena fábrica de ladrillo del mismo ancho (50 cm). De esta manera, el peso del arco, que podría actuar de contrarresto se duplica, y la buena fábrica puede permitir incluso que se forme una platabanda o arco recto "tumbado". Además, se construyó sobre el trasdós horizontal del sobrearco un fábrica a sardinel de ½ pie de espesor, para que pueda realizar la función de arco plano si fuera preciso.

c) Ejecutar un muro de ladrillo sobre el arco toral de la nave, trasdosado horizontalmente al nivel hasta el nivel de la imposta de la cúpula y llegando hasta los muros laterales.

d) Realizar un relleno entre el trasdós de las pechinas (antes descubierto del lado de la nave) y el citado muro. El relleno se realizó con capas sucesivas de tierra y mortero de cal pobre, apisonado, de manera que adquiriera una consistencia suficiente.

e) Resanar y rejuntar los muros y lengüetas de estribo visibles de la cúpula.

7.2 Separación de la cúpula de la bóveda del ábside

Tras realizar estas tareas, y esperar el tiempo suficiente para el fraguado de los morteros se procedió a la separación de la bóveda del presbiterio.

Para realizar la demolición de la bóveda, la primera operación consistió en separarla de la cúpula oval y comprobar que no había movimientos. En primer lugar se realizó un corte con sierra radial, en la parte adyacente al arco toral, hasta los arranques. Tras observar el estado del corte se realizó otro corte paralelo a unos 10 cm, demoliendo la faja entre ambos cortes. Tras estos cortes se esperó una semana para comprobar si se producía algún movimiento. Al no producirse, se continuó con la demolición del resto de la cúpula, como puede verse en la documentación fotográfica.

8. Restauración de los rellenos y lengüetas de la nave

En las sucesivas intervenciones se ha retirado, al parecer, una parte del relleno de las bóvedas tabicadas de la nave. Por otra parte, las lengüetas aparecen deterioradas en varios lugares. Se deben restaurar las lengüetas y realizar un relleno análogo al realizado en el trasdós de las pechinas de la cúpula, al menos hasta el nivel del trasdós de los arcos formeros de la nave. De esta manera, la bóveda ganará en estabilidad.

9. Conclusiones

- 1) A la fecha de la terminación del informe, y habiéndose realizado las operaciones descritas en el apartado 6, la cúpula está efectivamente separada de las bóvedas del ábside y su estabilidad no se ha visto afectada. Esto ha quedado demostrado pues no han aparecido ningún tipo de grietas en el intradós enlucido en yeso de la cúpula, que funciona como un “testigo de yeso” de enorme sensibilidad.
- 2) Cuando se terminen las tareas de resanado y restauración de las bóvedas de la nave, éstas quedarán con una estabilidad muy superior a la que tenían, asegurando su estabilidad en el futuro.

Todo lo cual afirmo y rubrico según mi leal saber y entender en Madrid, a 14 de marzo de 2010.



Firmado:

Santiago Huerta Fernández

Profesor Titular del Departamento de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid

10. Bibliografía

Flügge, W. 1973. *Stresses in Shells*. 2nd Ed. Berlin: Springer Verlag.

Girkmann, K. 1959. *Flächentragwerke. Einführung in die Elastostatik der Scheiben, Platten, Schalen und Faltwerke*. 5a Ed. Wien: Springer Verlag.

Heyman, J. (1977). *Equilibrium of Shell Structures*. Oxford : Clarendon Press.

Heyman, J. 1983. Chronic Defects in Masonry Vaults: Sabouret's Cracks. *Monumentum*. Vol. 26: pp. 131-141 (trad. espa. en Heyman 1995, pp. 265-272).

Heyman, J. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. Editado por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Heyman, J. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera / CEHOPU.

Huerta Fernández, S. 2001a. «Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach» *Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques. Proceedings of the 3rd. International Seminar. Guimaraes 7-9, November*, P. B. Lourenço and P. Roca, eds. Guimaraes: Universidade do Minho, pp. 47-69.

Huerta Fernández, S. 2001b. La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino. En: *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, pp. 87-112.

Huerta Fernández, S. 2003. «The mechanics of timber vaults: a historical outline.» En: *Essays in the History of Mechanics*. A. Becchi, F. Foce, M. Corradi y O. Pedemonte (eds). Basel: Birkhäuser Verlag, pp. 87–133.

Huerta Fernández, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y Uso de Architectura. Primera parte*. Madrid: s.i. (Ed. Facs. Madrid: Albatros, 1989).

Zarghamee, M. S. y Heger, F. J. 1983. «Buckling of Thin Concrete Domes.» *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, Vol. 80, nº 6, pp. 487-500.

11. Documentación fotográfica

(Fotos de P. Fuentes, S. Huerta y C. Molina)



1



2

1. Vista exterior de la Peregrina antes de la intervención. Fachada sur.
2. Vista exterior de la Peregrina antes de la intervención. Fachada norte.



3



4

3. Bóvedas de la nave desde el coro.
4. Coro visto desde el crucero.



5



6

5. Bóveda de arista sobre el coro.
6. Bóvedas de la nave vistas desde el coro.



7



8



9

7. Cúpula oval del crucero
8. Bóveda de arista en el brazo norte del crucero
9. Bóveda de arista en el brazo sur del crucero



10



11

10 y 11. Trasdós de la cúpula oval del crucero vista desde la nave.



12



13

12 y 13. Trasdós de la cúpula oval del crucero



14



15

14 y 15. Trasdós de la cúpula oval del crucero. Nótese lengüeta de refuerzo



16



17



18

16, 17 y 18. Trasdós de la cúpula oval del crucero . Detalle de las lengüetas de apoyo en el muro sobre el arco toral del presbiterio.



19



20

19 y 20. Trasdós de la cúpula oval del crucero vista desde la nave. Nótese la imposta y el trasdós sin relleno de las pechinas.



21



22

20 y 21. Trasdós de la cúpula oval del crucero vista desde la nave



23



24

23. Detalle del óculo desde el trasdós.

24. Detalle del óculo desde el intradós. Nótese que la moldura inferior forma una curva alabeada.



25



26



27

25, 26 y 27. Detalles del óculo.



28



29



30



31



32

28- 32. Muro sobre el arco toral del presbiterio. Detrás el trasdós de la cúpula del crucero, la imposta y la parte superior del trasdós de las pechinas; delante trasdós de la bóveda del ábside.



33



34

33. Detalle del muro sobre el arco toral del presbiterio.

34. Muros sobre el arco toral del presbiterio y trasdós de la bóveda del ábside.



35



36

35 y 36. Trasdós de la bóveda del ábside

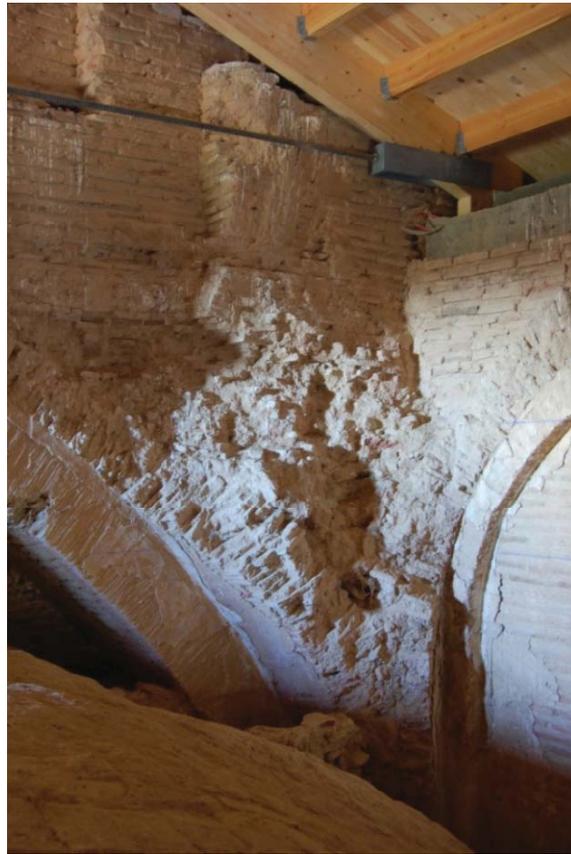


37

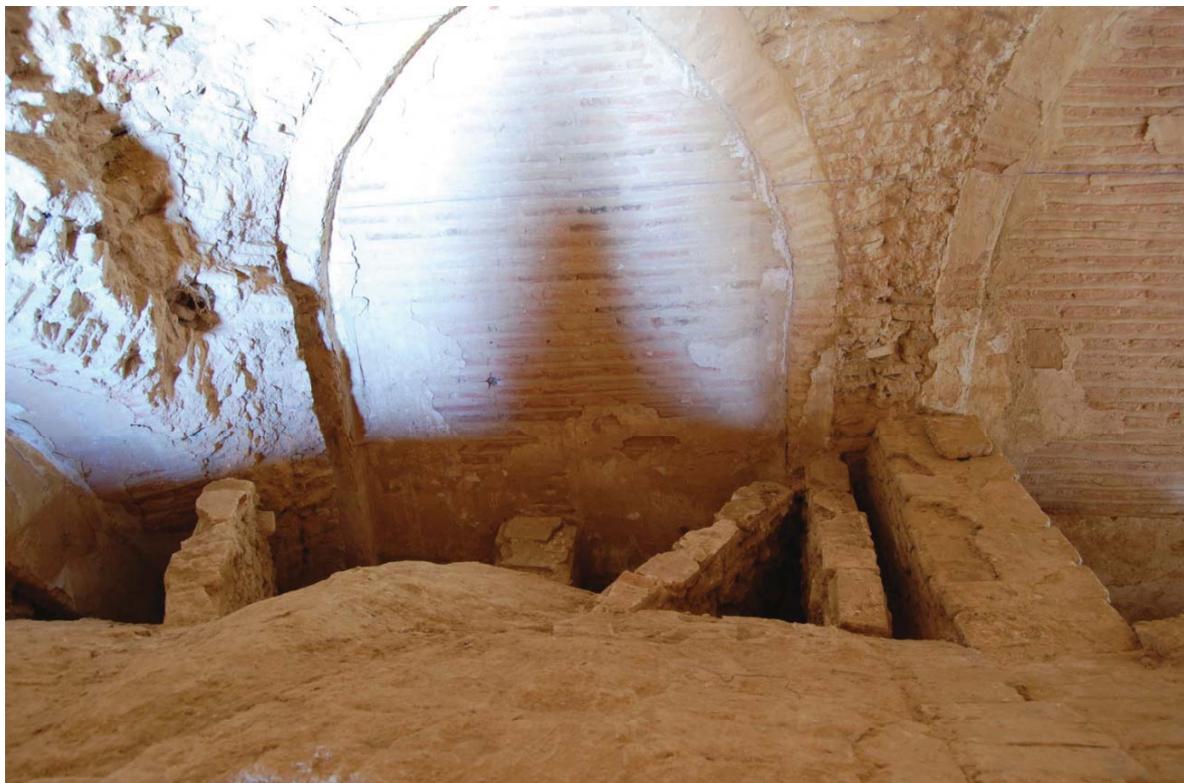


38

37 y 38. Trasdós de la bóveda del ábside y ventanas del ábside mudéjar.



39



40

39. Detalle de los arranques de la antigua bóveda del ábside.
40. Lengüetas de estribo de la bóveda del ábside.



41



42

41 y 42. Trasdós de las bóvedas de cañón con lunetos del coro



43



44

43 y 44. Trasdós de las bóvedas de la nave; al fondo la cúpula del crucero



45



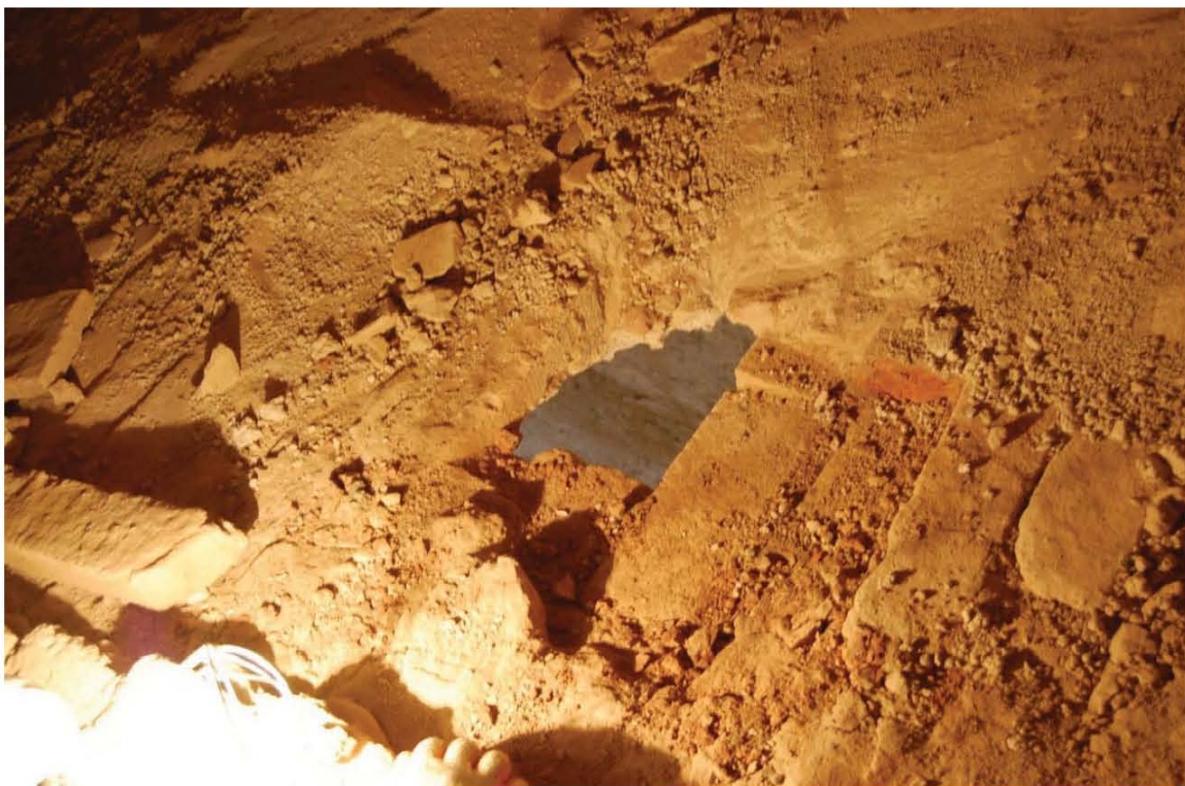
46

45. Detalle del luneto en el trasdós de una bóveda de la nave. Detalle del arranque de los arcos fajones demolidos en el siglo XVII.

46. Detalle de las lengüetas de estribo de las bóvedas de la nave y de los rellenos.



47



48

47 y 48. Daños producidos por las humedades en el arco formero sur de las bóvedas de arista sobre el coro.

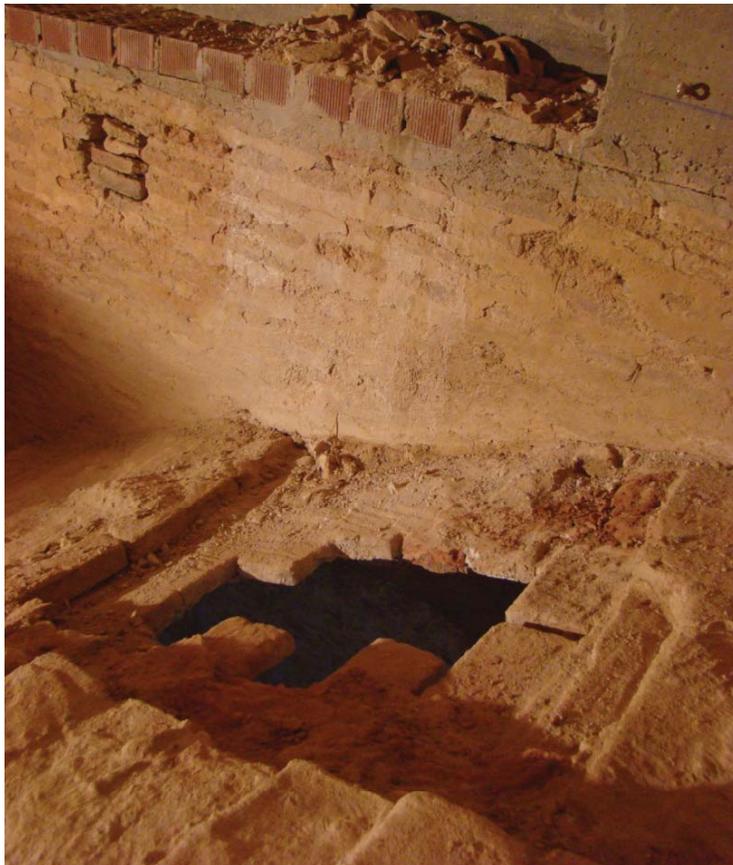


49



50

49 y 50. Daños producidos por las humedades en el arco formero sur de las bóvedas de arista sobre el coro.



51



52

51 y 52. Daños producidos por las humedades en el arco formero sur de las bóvedas de arista sobre el coro.



53



54

53. Comienzo de la construcción del sobrearco sobre el arco toral del presbiterio.
54. Arco terminado.



55



56

55 y 56. Refuerzo de las lengüetas de estribo de la cúpula del crucero.



57



58

57. Refuerzo de las lengüetas de estribo de la cúpula del crucero.
58. Construcción de las nuevas lengüetas.



59



60

59 y 60. Nuevo muro de ladrillo sobre el arco toral de la nave y relleno entre las pechinas de la cúpula y el muro.



61



62

61. Corte con radial para separar la bóveda del presbiterio de la cúpula del crucero.
62. Estado del corte tras retirar la primera hoja de ladrillo de la bóveda.



63



64

63. Retirando la segunda hoja de ladrillos.

64. Corte completo de separación entre el arco toral y la bóveda del ábside.



65



66

65 y 66. Demolición del resto de la bóveda del ábside.

Informe preliminar sobre la demolición de las bóvedas del presbiterio

Santiago Huerta
Profesor titular. Universidad Politécnica de Madrid

Introducción

La iglesia de la Peregrina, mudéjar de origen, ha sufrido numerosas intervenciones a lo largo de sus ocho siglos de historia. La más importante se produjo en el barroco. La intervención perseguía convertir el espacio interior de la nave en un espacio típico de las iglesias barrocas del siglo XVII: planta de cruz latina, nave con bóveda de cañón con lunetos, cúpula en el crucero y ábside. La estructura original de grandes arcos fajones apuntados que soportaban las vigas de la techumbre se adaptaba mal a este esquema.

La intervención consistió en demoler los arcos fajones originales y montar un nuevo sistema de bóvedas como el descrito antes. El arquitecto o maestro de obras, en vez de apoyar directamente sobre los muros existentes, construyó unos pilares, adosados sin enjarjar al muro interior, sobre el que apoyó el sistema de bóvedas tabicadas. Sobre el crucero se construyó una cúpula oval, dada su proporción rectangular. Finalmente, la zona del presbiterio presenta un tramo con bóveda de cañón y está rematado por una bóveda de horno (semiesférica) para adaptarse a la planta semicircular original.

El presbiterio estuvo cubierto por un sistema de bóvedas de ladrillo que fue demolido. Se conervan, sin embargo, los arranques (que permiten imaginar el sistema original) y las arquerías de ventanas interiores. El conjunto, de notable interés, puede verse ahora sólo desde el trasdós de las bóvedas del presbiterio.

El arquitecto encargado de la restauración de la iglesia, D. José Ramón Sola, quiere recuperar la vista del antiguo ábside mudéjar e integrarlo en la nave de la iglesia. Para ello, es preciso demoler las bóvedas tabicadas del presbiterio.

El objetivo principal de este informe es estudiar la posibilidad de realizar esta operación, sugiriendo las medidas que habría que tomar, en su caso, para garantizar la estabilidad de la cúpula del crucero que perdería el contrarresto de las actuales bóvedas del presbiterio. La cúpula debería, tras la demolición, trasladar su empuje a través de las pechinas y del arco fajón existente. Por otra parte, los arcos fajones que separan los tramos de bóvedas de la nave presentan deformaciones visibles. Forma parte del presente trabajo estudiar el estado actual de las bóvedas de la nave sugiriendo, en su caso, las medidas de refuerzo necesarias.

Informe preliminar

Este informe recoge las conclusiones principales del estudio en curso en relación con la demolición de las bóvedas del presbiterio, adyacentes a la cúpula del crucero. Los cálculos y razonamientos detallados se incluirán en el informe definitivo que se está redactando. Se recogen también en este informe preliminar las actuaciones previas a la demolición de las bóvedas del presbiterio.

Visitas y mediciones

Se han realizado hasta la fecha cuatro visitas a la iglesia, los días 22 de octubre, 4 y 24 de noviembre, y 2 de diciembre. En dos de los días la profesora Ana López ha realizado un levantamiento exhaustivo con una estación total Láser de la cúpula, pechinas y arcos torales. También se ha levantado el perfil de los arcos perpendiculares de la nave.

Estas mediciones nos han permitido conocer con detalles la geometría de la cúpula y de su sistema de apoyo. Los estudios de estabilidad de las fábricas no se pueden realizar sin una medición precisa.

La cúpula y su sistema de apoyo

La cúpula sobre el crucero es una cúpula oval tabicada de dos hojas (unos 80 mm de espesor) que apoya sobre unas pechinas construidas entre los cuatro arcos torales, con un óculo central. Las pechinas son de medio pie de ladrillo (unos 140 mm de espesor), sentado por hojas horizontales sucesivas, según el sistema conocido por “falsa bóveda”. La cúpula está separada de las pechinas por una imposta. Tanto las pechinas como la cúpula se construyeron sin cimbra.

La estructura se aprecia con claridad por el trasdós. En particular, en las dos pechinas adyacentes a la nave el relleno ha desaparecido en gran parte, dejando al descubierto la transición entre la cúpula y la pechina. Esto ha permitido observar una particularidad insólita, que se ha visto confirmada también con las mediciones. Cúpula y pechinas forman parte de una única superficie, no presentando la habitual discontinuidad en la zona de la imposta, Figura 1. La medición pone de manifiesto un resalto hacia el interior, consecuencia de los diferentes espesores, pero no hay cambio de curvatura y la forma general del sistema cúpula-pechinas es una superficie única.

Desde abajo, el observador tiende a interpretar la imposta en su sentido habitual, como fruto de la intersección de dos superficies de curvaturas distintas. Esto no es así en La Peregrina. Las tangentes a la superficie (según planos verticales) en la línea de imposta no son verticales. Este hecho tiene una consecuencia estructural muy importante. La cúpula y pechinas tienen una forma que permite una solución de equilibrio de membrana a compresión. Por tanto, son innecesarios los rellenos y “lengüetas” (muretes radiales) que habitualmente se disponen en las cúpulas de fábrica hasta 2/3 de su altura. (Esta es la recomendación de Fray Lorenzo en su tratado de 1639 y puede observarse en la práctica totalidad de las medias naranjas de fábrica de espesor uniforme.)

Así, con enorme habilidad, el maestro de la Peregrina ideó una forma que, adaptándose a la planta rectangular, permitía prescindir de unos rellenos y muretes de estribo que hubieran encarecido y complicado la obra. Por otra parte, al formar el sistema cúpula-pechinas una suerte de bóveda vaída oval peraltada, los arcos torales reciben mucha menos carga.

Esta particularidad geométrica es la que, como se verá, simplifica enormemente el problema de la demolición de las bóvedas del presbiterio.

Irregularidades

El trasdós de la cúpula presenta evidentes irregularidades, debidas a una ejecución sin cimbra realizada sin prestar excesiva atención a la variación continua de las curvaturas; esto se hace patente en la zona del óculo que forma una curva alabeada en el espacio. Quizá, podría calificarse la ejecución como “descuidada”, pero lo cierto es que desde la nave estas irregularidades son inapreciables y seguramente el constructor decidió ahorrarse el exceso de coste que hubiera supuesto la definición precisa de la superficie de la cúpula. Por otra parte, las mediciones dejan ver que el reactángulo de planta es, en realidad, un cuadrilátero; los lados correspondientes a la nave son casi paralelos, pero los del crucero no lo son. Esta es una situación habitual en la construcción histórica, donde diversas condiciones en general relacionadas con la historia del edificio, impiden replantear plantas completamente regulares. Es tarea del arquitecto o maestro de obras disimular estas imperfecciones. En el caso de la peregrina las cuatro pechinas de las esquinas, la forma quasiregular del óvalo de la imposta y, sobre todo, el óculo central que se proyecta sobre un plano horizontal formando una circunferencia, constituyen una serie de simetrías que hacen que el ojo del observador considere la forma regular.

Las irregularidades de la curvatura de la cúpula pueden tener importancia estructural. La fábrica es un material que no resiste tracciones y, si hubiera una zona con concavidad hacia abajo (curvatura gaussiana positiva con los radios de curvatura principales hacia arriba), se podría producir un desprendimiento local. El que esto no haya ocurrido en los siglos que lleva en pie la cúpula, así como la inexistencia de grietas en el intradós, hacen pensar que esto no sucede en la cúpula de la Peregrina. Por otra parte, el levantamiento de puntos permite interpolar con bastante precisión una superficie con ayuda de un programa informático. En este caso se ha utilizado el Rhinoceros. Una vez obtenida la superficie citada, el programa permite estudiar la curvatura local, dando mapas de curvaturas gaussianas. El estudio ha dado como resultado que no existen curvaturas gaussianas positivas que conduzcan a una concavidad hacia abajo. En algunas zonas, principalmente coincidiendo con las irregularidades, hay curvatura gaussiana negativa. Esto no supone ningún problema pues siempre es posible la formación de un arco de descarga. Finalmente, la inestabilidad por pandeo no se produce en cáscaras tan curvas y de pequeña dimensión. No obstante, también se ha estudiado este problema.

Peso y empujes de la cúpula

Según las mediciones la cúpula tiene un volumen total de unos $4,5 \text{ m}^3$ (para un espesor de 80 mm ó dos hojas). Considerando el peso específico del ladrillo de entre 15 y 17 kN/m^3 , su peso oscilará entre 67,5 y 76,5 kN, entre 7 y 8 toneladas.

Dado el poco espesor de la cúpula, es razonable pensar en un estado de membrana a la hora de hallar los esfuerzos principales. En el estado de membrana se considera que todos los esfuerzos internos están contenidos dentro de la superficie media, esto es, las resultantes de tensiones son tangentes a la superficie. Así, en la base de la cúpula habrá una cierta distribución de resultantes de tensiones meridianas N_φ (kN/m) cuya dirección es tangente al borde de la cúpula. El estado tensional de membrana se estudia con detalle en el informe completo, donde se ha verificado que las resultantes de tensiones N_φ y N_θ son muy bajas y

siempre de compresión. Esto se debe a que la cáscara no presenta tangente vertical en su borde. El orden de magnitud de las tensiones en una cáscara es independiente del espesor, siendo proporcional al peso específico y al radio de curvatura. Tomando un radio de curvatura máximo de unos 10 m, la tensión $\sigma = \gamma \cdot R$, será de unos $170 \text{ kN/m}^2 = 0,17 \text{ N/mm}^2$ ó $1,7 \text{ kg/cm}^2$, muy baja, como es habitual en las cáscaras de pequeño tamaño.

Dado que, como se aprecia en las secciones, la tangente no es vertical, estas resultantes de tensiones se pueden descomponer en dos componentes: una vertical y otra horizontal. La componente vertical media de V_{med} se obtiene dividiendo el peso total de la cúpula por la longitud del óvalo de base de unos 22 m, por tanto $V_{med} = 80/22 = 3,65 \text{ kN/m}$ ó $36,5 \text{ ton/m}$.

En la zona de las pechinas, las fuerzas se transmiten sin problema pues, como se ha dicho, no hay variación de curvatura. Es en la zona de los arcos donde hay un cierto empuje horizontal que debe ser contrarrestado para mantener la cúpula en equilibrio. Actualmente, son los arcos torales y las bóvedas quienes contrarrestan este empuje. La componente horizontal

Al demoler las bóvedas del presbiterio, podría parecer que la componente horizontal de la cúpula quedaría sin contrarresto en esta zona. Hay que hacer dos observaciones: 1) la cáscara es mucho más rígida que los arcos torales y la mayor parte de la carga se transmite por las pechinas; 2) existen unas lengüetas o muretes que descargan ya parte del peso de la cáscara adyacente al presbiterio al grueso muro superior; 3) aún suponiendo que la cáscara transmite toda la componente horizontal teórica, ésta será, dado la inclinación de la tangente del orden de la mitad de la V_{med} , esto es $H_{med} = 1,8 \text{ kN/m} = 180 \text{ kg/m}$. La zona que no pertenece a las pechina puede estimarse en unos 3 m de donde el arco toral debe absorber una resultante horizontal de unos 540 kg. El arco tiene un espesor de 250 mm y un ancho de unos 670 mm; pesa, por tanto, unos $2,87 \text{ kN/m}$. Este peso es suficiente para transmitir el empuje inclinado de la cáscara dentro del arco. Así, pues, parece que incluso se podría demoler la bóveda sin tomar ninguna acción.

Conclusiones

Tareas previas a la demolición de las bóvedas del presbiterio

En base a lo anterior, considero que para demoler las bóvedas del presbiterio con seguridad recomienda llevar a cabo las siguiente tareas.

1) añadir dos lengüetas o muretes más entre el trasdós de la cúpula y el muro sobre el arco toral del presbiterio tal y como se indica en los croquis. Al estar más cerca de la clave del arco, permitirían una descarga mayor del peso de la cáscara a las pechinas; resanar y rejuntar los actuales muretes.

2) reforzar el arco toral con un sobreaarco de 1 pie (250 mm) de espesor y el mismo ancho del arco toral, quedando enrasado con el muro adyacente. Rellenar las enjutas del citado sobreaarco con buena fábrica de ladrillo del mismo ancho tal y como se indica en el croquis. De esta manera, el peso del arco, que podría actuar de contrarresto se duplica, y la buena fábrica permitiría incluso que se formase una platabanda o arco recto “tumbado”. Construir, finalmente, sobre el trasdós horizontal del sobre arco un fábrica a sardinel de ½ pie de espesor, como se indica, que pueda realizar la función de arco plano si fuera preciso.

3) ejecutar un muro de ladrillo sobre el arco toral de la nave que vaya horizontal desde la clave hasta los paramentos laterales. El muro tendrá el nivel de la parte superior de la imposta de la cúpula.

4) ejecutar un relleno entre el trasdós de las pechinas (ahora al descubierto del lado de la nave) y el citado muro. El relleno se realizará con capas sucesivas de tierra y mortero de cal pobre, apisonado, de manera que adquiera una consistencia suficiente.

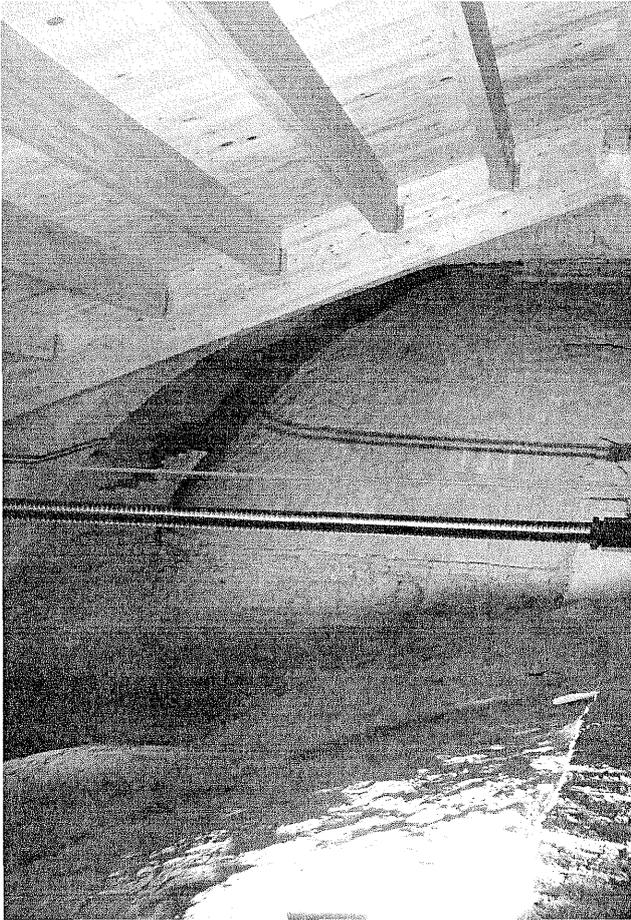
5) resanar y rejuntar los muros y lengüetas de estribo visibles de la cúpula.

Realizadas las tareas anteriores, y habiendo esperado el tiempo suficiente para el fraguado de los morteros se separará la bóveda del prebiterio del arco toral, cortando una faja de unos 100 mm de espesor. En primer lugar se hará un corte con una sierra radial adyacente al arco toral, hasta los arranques. Después, tras observar el estado del corte se realizará otro corte paralelo a unos 10 cm y se demolerá la faja entre ambos corte. El autor del informe deberá estar presente en esta operación para observar si se produjera algún indicio de movimiento. Si transcurrida una semana no ha habido evidencia alguna de movimiento, que es lo esperado, se podrá proceder a demoler la bóveda y continuar la obra, y la cúpula permanecerá segura y estable..

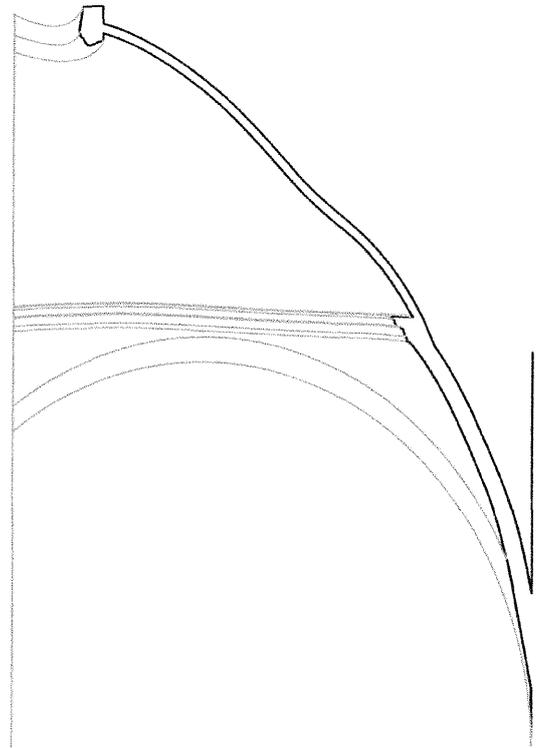
Todo lo cual afirmo y rubrico según mi leal saber y entender en Madrid, a 12 de noviembre de 2010.



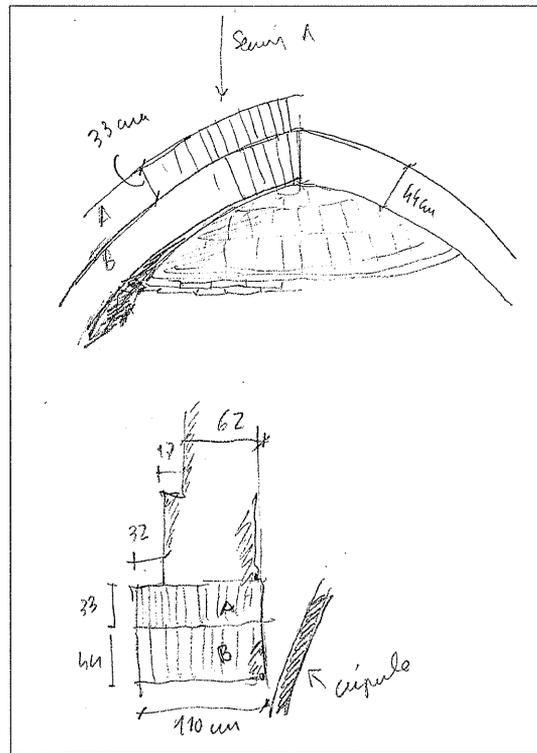
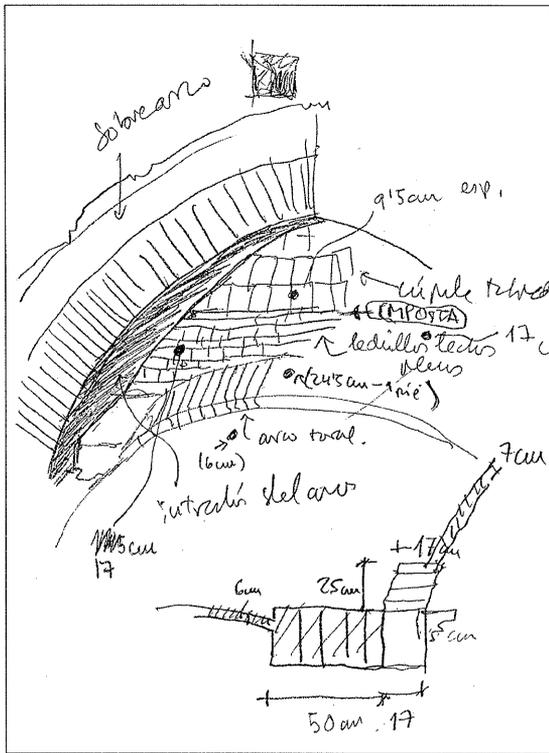
Fdo: Santiago Huerta Fernández



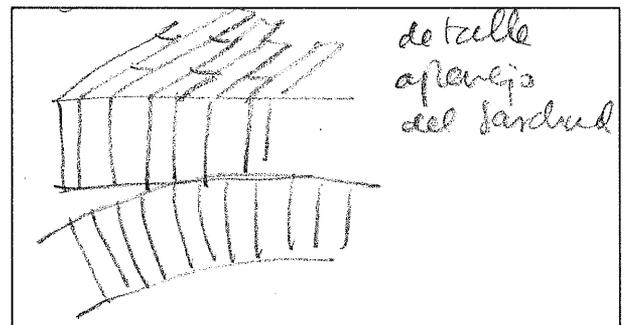
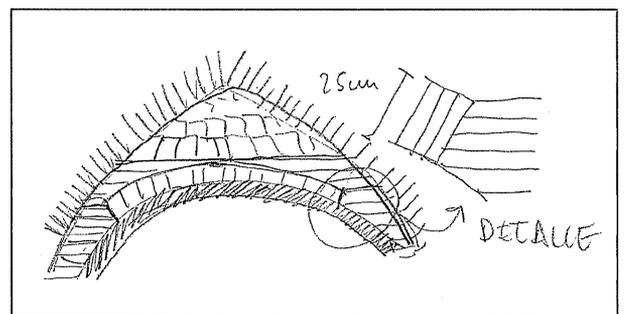
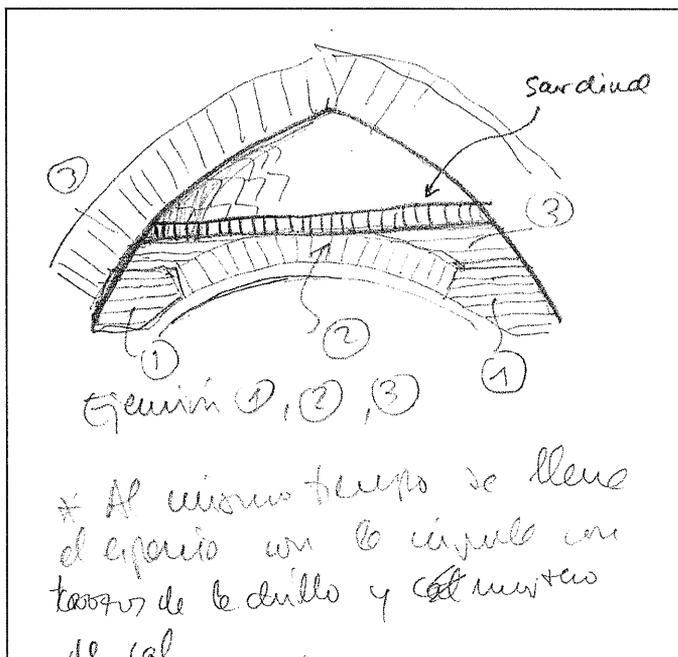
Trasdós de pechinas al descubierto



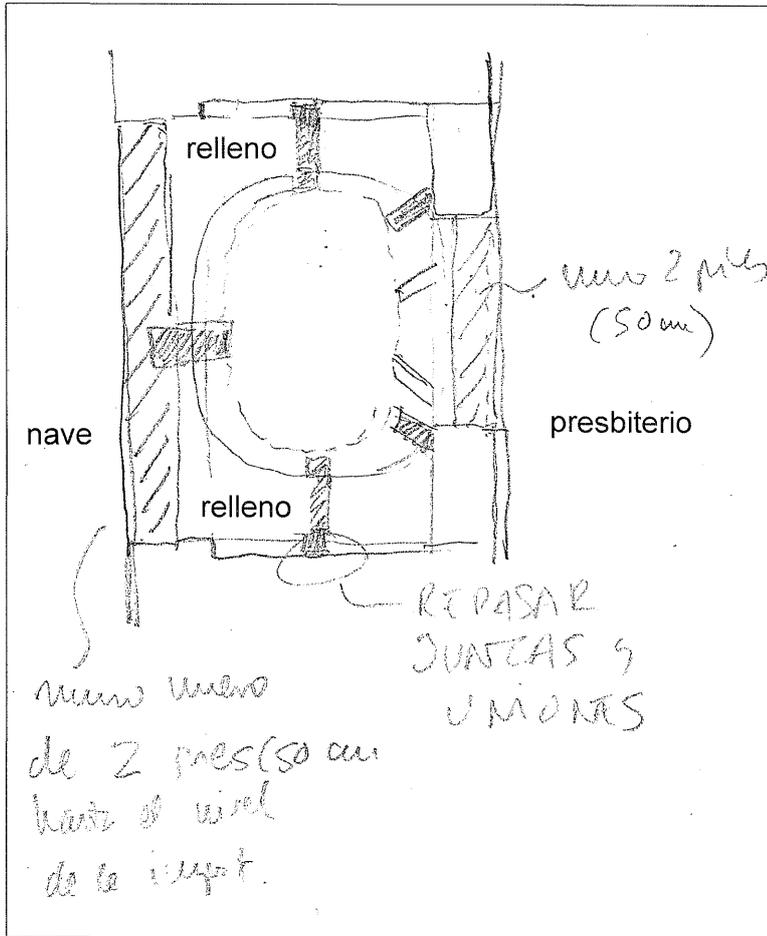
Sección diagonal que muestra la continuidad
De curvatura de cúpula y pechinas



Detalles del estado actual del trasdós de la cúpula y del arco total

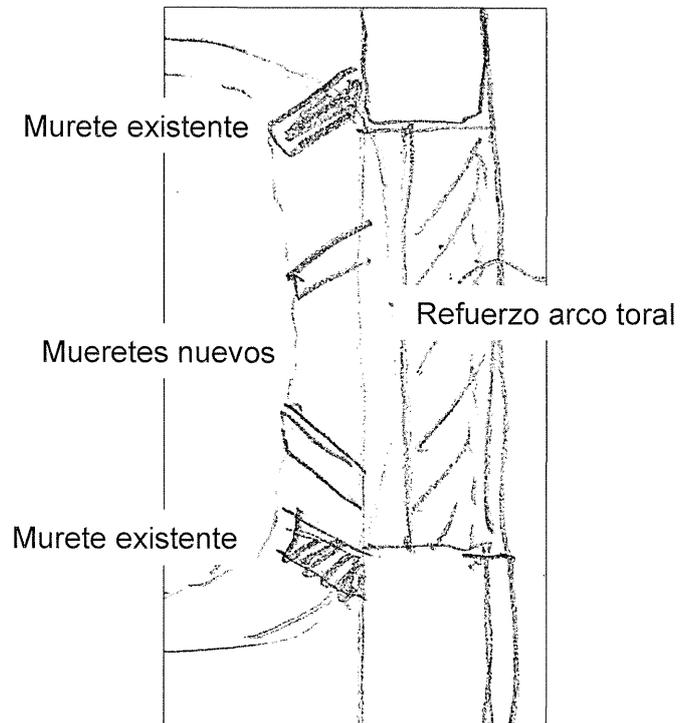
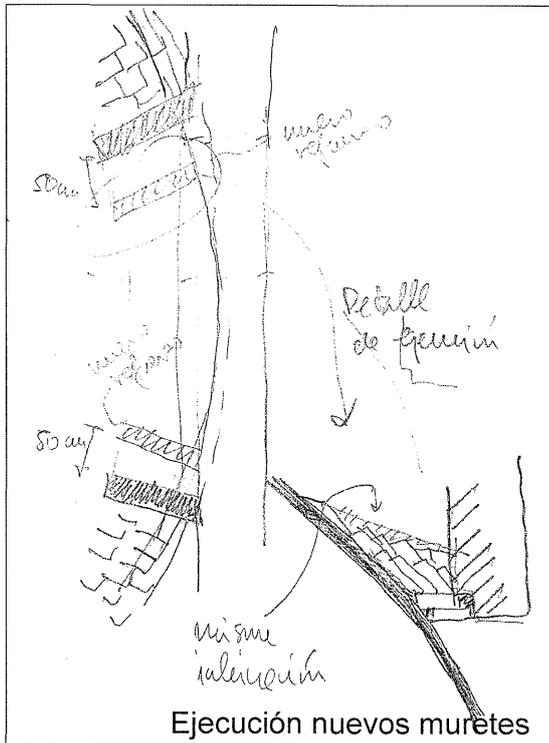


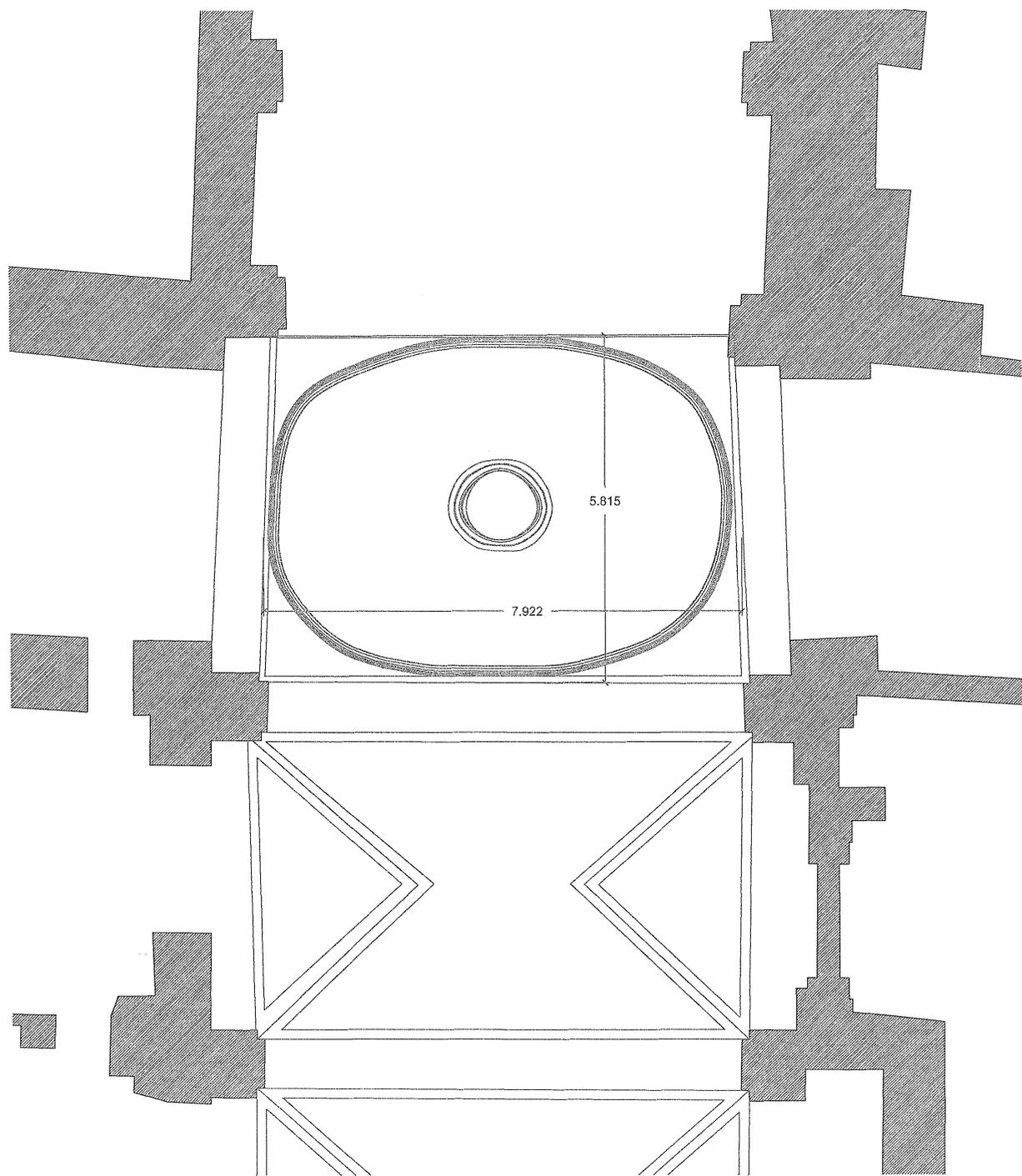
Detalles de ejecución del sobrecorno, enjutas y arco plano sobre el arco total del presbiterio



Situación en planta de los refuerzos

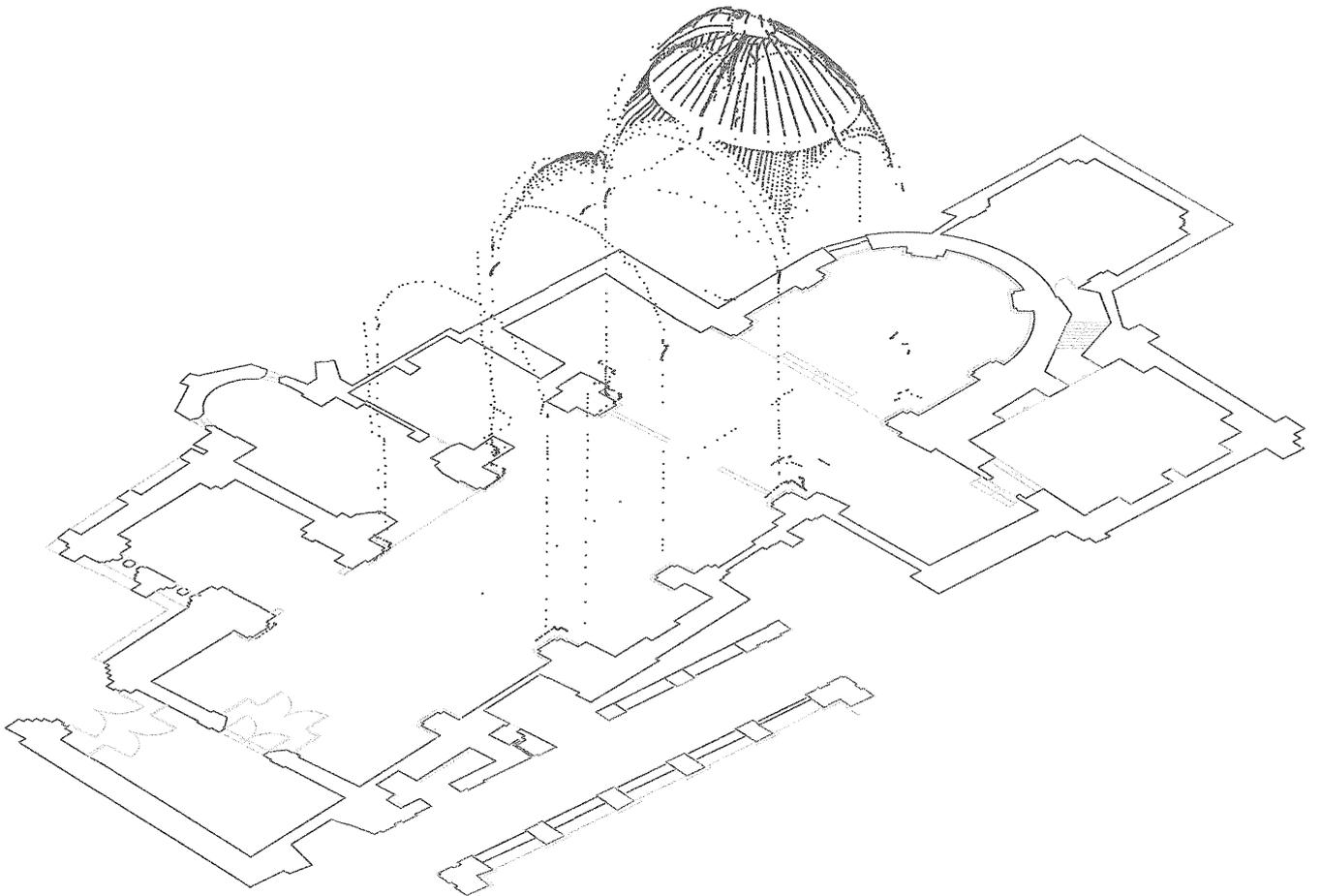
Detalle de la ejecución de lengüetas o muretes adicionales

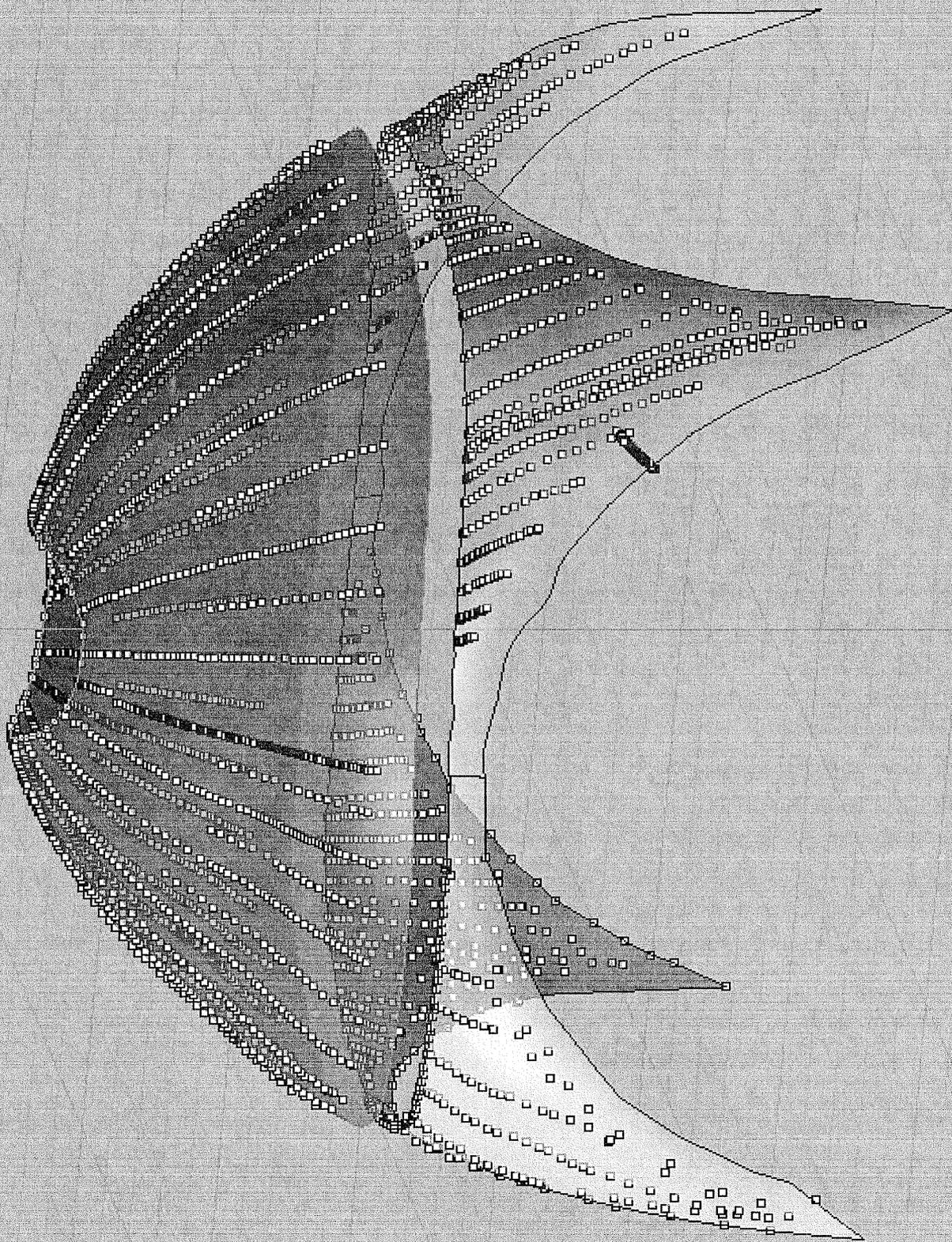




 Documentación pre-existente







CÚPULA

