

**Estudios estructurales previos a la  
restauración de la iglesia de Santo Tomás de  
Villanueva ("La Mantería") de Zaragoza**

por:

Santiago Huerta Fernández  
Gema López Manzanares

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

con la colaboración de:

José Antonio García Ares  
Ignacio Javier Gil Crespo

Instituto de Patrimonio Histórico Español

Madrid, diciembre de 2001

## Índice

1. Introducción .....	1
2. Estructura de las cúpulas menores de la Mantería .....	1
3. Análisis estructural de una cúpula análoga a la hundida .....	4
3.1 Marco teórico: Análisis Límite de estructuras de fábrica .....	5
3.2 Condición de estabilidad; seguridad .....	6
3.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad .....	7
3.4 Análisis de cúpulas de revolución .....	8
3.5 Análisis de cúpulas ovales .....	9
3.6 Análisis de una cúpula análoga a la hundida .....	10
3.7 Hipótesis sobre el hundimiento de la cúpula del evangelio .....	24
4. Conclusiones .....	26
5. Bibliografía .....	28
6. Documentación fotográfica .....	29

## **1. Introducción**

La iglesia de Santo Tomás de Villanueva, conocida como "La Mantería", se encontraba en proceso de restauración cuando la cúpula del evangelio se derrumbó en junio de 2001. El objeto del presente informe es estudiar las posibles causas del hundimiento y sugerir, en su caso, nuevos estudios y/o medidas de consolidación.

El informe se basa en la información obtenida en dos visitas de inspección el 12 de junio y el 22 de octubre de 2001. En la segunda visita, se tomaron medidas sobre dos de las cúpulas que están en pie, de la misma forma y parecidas dimensiones de la que se derrumbó. Por otra parte, nos fue suministrado también el Proyecto de la restauración en curso.

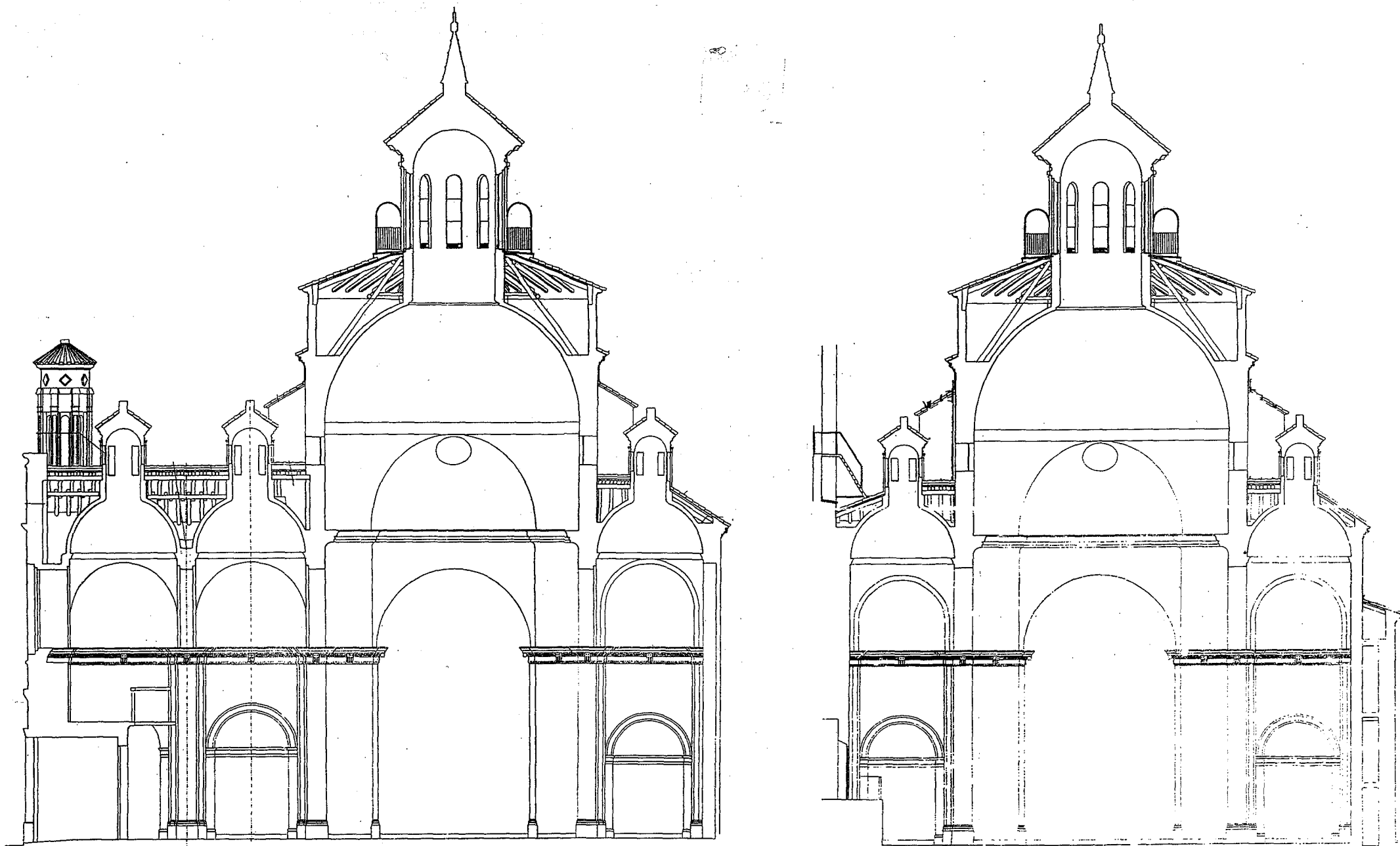
Para la realización de un informe completo habría sido necesario inspeccionar con detalle el estado y la estructura constructiva de las cúpulas existentes, la constitución y altura de los rellenos y la disposición original de las cubiertas, en particular en relación con los maderos de apoyo de las linternas. También hubiera sido imprescindible una memoria histórica que recogiera las sucesivas intervenciones que ha sufrido el monumento.

Esto no ha sido posible, y debe tenerse en cuenta que las observaciones que se hagan en este informe están limitadas por los datos en que se basan. Pretenden aportar datos y un análisis estructural a un estudio que debería ser más amplio y completo. No obstante, como se verá, ha sido posible sacar algunas conclusiones en cuanto a la forma de funcionamiento estructural de las cúpulas menores de la Mantería.

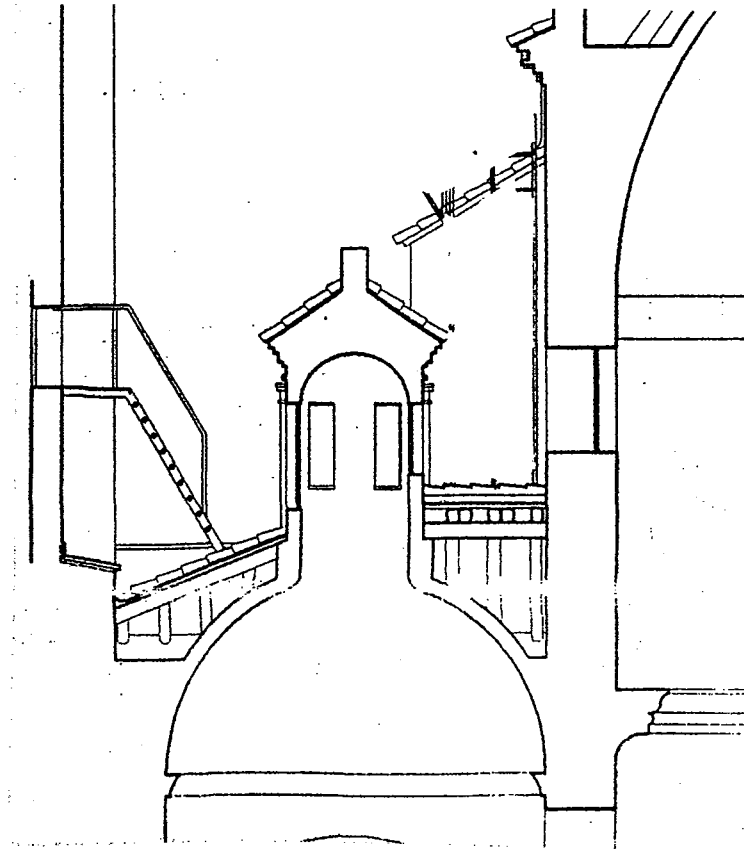
## **2. Estructura de las cúpulas menores de la Mantería**

### *Peso de la linterna*

La característica más sobresaliente de las cúpulas de la Mantería, Figura 1, es que soportan linternas de gran tamaño. Esto es particularmente cierto en el caso de las cúpulas menores, sobre la nave central y los brazos del crucero (detalle de la cúpula del evangelio en la Figura 2). Si en una cúpula «típica» el peso de la linterna está entre el 5% y el 10% del peso total (por ej. en S. Pedro de Roma 5%), en las cúpulas menores el peso de la linterna supera el 40% (peso de la cúpula 13 toneladas; peso de la linterna



**Figura 1.** Secciones longitudinal y transversal de la iglesia de la Mantería (Proyecto de restauración de las cubiertas, B. Genua)



**Figura 2.** Detalle de la cúpula del evangelio en la Figura 1 (Proyecto de restauración de las cubiertas, B. Genua)

### *Forma*

En cuanto a su forma, mientras la cúpula principal es semiesférica, las menores tienen forma de elipsoide de revolución, con el eje mayor de la elipse de la planta como eje de rotación. Las cúpulas del crucero y presbiterio son iguales entre sí (7,10 × 4,22 m); las otras dos sobre la nave son algo mayores (7,50 × 4,50 m). En ambos casos el rectángulo circunscrito tiene una proporción 3:5.

### *Espesor*

El espesor de la cúpula hundida es de unos 18 cm (medio pie de ladrillos de 18 × 36 cm), como puede apreciarse con claridad en los restos del hundimiento, Fotos 9, y 15 a 22. Los ladrillos están recibidos con lo que parece mortero de cal y están bien trabados.

### *Relleno*

En cuanto al relleno, en las cúpulas que se han podido inspeccionar por su trasdós (fragmentos de la hundida, la del evangelio, y la del presbiterio) se ha apreciado un relleno muy escaso o inexistente. No es lo habitual; normalmente, se daba al relleno al

menos un tercio de la altura y en el siguiente tercio se construían muros de estribo (véase por ejemplo, Fray Lorenzo, 1639; Huerta, 1990). Así, casi con seguridad existió un relleno que fue retirado posteriormente. Sería muy interesante conocer en qué fecha se realizó esta intervención. Como se verá después, la altura del relleno tiene una influencia enorme en la capacidad resistente de la cúpula.

#### *Pares, maderos de apeo y zunchos*

Los pares de cubierta apoyan contra la base de la linterna, el trasdós de las cúpula y los muros que rodean la cúpula. En la cúpula central se observan con claridad otros maderos inferiores que forman una estructura que ayuda a soportar la linterna. En la cúpula del presbiterio, ya intervenida, parecen haber existido maderos similares, pues hay huellas en los muros interiores, Fotos 33 y 34. Al estar los citados maderos por debajo del plano de los faldones, su función debe haber sido estructural, de apeo de parte del peso de la linterna.

En la cúpula de la epístola puede verse un madero de apeo de los citados en las Fotos 39, 40, 41 y 44. En la Foto 42 se aprecia que el madero ha sido retirado quedando el hueco correspondiente donde apoyaba. En las mismas fotos puede verse también que existe un zuncho de madera en la base de la linterna que refuerza su base y permite un buen encuentro con los maderos de apeo. Otro zuncho de madera se encuentra en la base del cupulín de la linterna, formando el dintel de las ventanas, Fotos 28, 29 y 30. En la Foto 30 se ve el encuentro entre dos maderos que hace muy probable que el zuncho sea continuo y está destinado a evitar el agrietamiento del cupulín.

En la cúpula central existe una estructura de madera destinada a soportar al menos parte del peso de la linterna, como se ve con claridad en las Fotos 46, 47 y 48.

Finalmente, en la Foto 32 donde se ve el desmontaje de la cubierta de la cúpula del presbiterio, se aprecia que los extremos de los pares apoyan contra polletes de ladrillo y argamasa.

### **3. Análisis estructural de una cúpula análoga a la hundida**

En el presente apartado se analizará una cúpula de forma y dimensiones muy similares a la que se hundió. Las dimensiones generales pueden estimarse sin gran error en base a la de la cúpula de la epístola. La linterna se ha medido en la cúpula de la epístola por el interior y se han verificado estas medidas con algunos fragmentos de la linterna extraídos de los escombros del hundimiento. Así, se puede afirmar que conocemos con bastante precisión la forma y dimensiones (espesores, etc.) de la cúpula y la linterna.

Desconocemos sin embargo la altura del relleno y su naturaleza. También desconocemos la forma en que apoyaba la cubierta original sobre la linterna y el murete perimetral, y la forma de empleo de maderos suplementarios de apoyo para la linterna. No obstante, puede afirmarse casi con certeza que existieron. En las Fotos 3 y 5 quedan dos maderos según la diagonal que deben estar empotrados en el muro pues no se han caído. Además, en el muro medianero con el colegio se aprecian los huecos que recibían esos maderos (según se nos ha dicho, uno de estos maderos llegó a perforar el muro medianero alcanzando al colegio). La existencia o no de maderos de apeo, sólo podría inferirse con seguridad por comparación con las cúpulas existentes en las que no se ha intervenido.

En lo que sigue se investigará la estabilidad de la cúpula análoga sometida al peso de la linterna, tratando de averiguar la importancia del relleno y la necesidad de los maderos de apeo, a la hora de soportar el peso de la linterna.

### **3.1 Marco teórico: Análisis Límite de estructuras de fábrica**

A la hora de analizar una estructura es preciso elegir un marco teórico adecuado. Las ecuaciones estructurales (de equilibrio, del material y de compatibilidad) son las mismas pero se particularizan de forma diferente en función del tipo de estructura y del material de que está hecha. Así, suponemos que los pórticos trabajan a flexión o que en las cerchas los esfuerzos principales son los de compresión o tracción. En ambos casos se considera el material bi-resistente (con resistencia a tracción o a compresión). Además, en los tipos citados, los más habituales hoy día, el criterio de resistencia suele prevalecer sobre los de deformación o estabilidad.

En el caso de las estructuras de fábrica la situación cambia radicalmente. No hace falta ser un experto para darse cuenta de que la construcción de los edificios antiguos es muy distinta de la de los actuales. En vez de haber pórticos y cerchas, nos encontramos con bóvedas que estriban en gruesos machones de fábrica. El material, lejos de poder suponerse homogéneo, isótropo, etc., es esencialmente heterogéneo, discontinuo, anisótropo. Desde el punto de vista estructural es preciso caracterizarlo de forma diferente.

Se considera, pues, que las estructuras de fábrica están formadas por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones (Heyman, 1995 y 1999). Es decir, imaginamos la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. En general, además,

las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia y, finalmente, 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).

El cumplimiento de las tres condiciones anteriores permite englobar el análisis de las estructuras de fábrica dentro del marco del moderno Análisis Límite y de sus Teoremas Fundamentales. En el análisis de estructuras existente reviste particular importancia el Teorema de la Seguridad, que se ocupa de los estados de equilibrio seguros.

### **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.

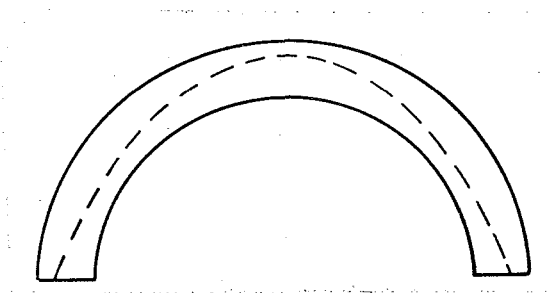
La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante de tensiones (empuje) a sus bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección. Los coeficientes de seguridad dependen del tipo y 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 estos 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 Kooharian (1953); Heyman (1995 y 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. Así, el arco de la Figura 3 está en equilibrio con una distribución de esfuerzos internos representada por la línea de empujes.



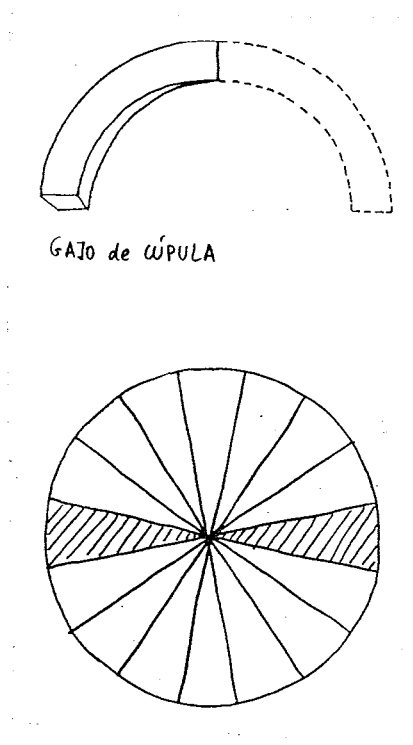
**Figura 3.** Arco de fábrica en equilibrio. La línea de empujes está contenida dentro de la fábrica

La potencia del Teorema radica en que la línea de empujes dibujada no tiene por qué ser la real: basta con que exista una línea en equilibrio con las cargas dentro del arco para poder afirmar con absoluta seguridad que el arco no se hundirá. El analista puede, pues, “elegir” la situación de equilibrio, una cierta línea de empujes. 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).

### 3.4 Análisis de cúpulas de revolución

En el caso de una cúpula, se puede aplicar para estudiar posibles estados de equilibrio la llamada "técnica de los cortes". Se imagina la cúpula dividida en gajos cortando por planos meridianos, como se ve en el la Figura 4. Cada dos gajos opuestos formarán un arco, si es posible encontrar una línea de empujes contenida dentro del arco, éste se sostendrá y por extensión la cúpula entera. Si hacemos los gajos infinitamente pequeños obtendremos una "superficie de empujes". En realidad, estamos buscando un estado de equilibrio, entre los infinitos posibles, que cumple la condición esencial de que el material debe trabajara a compresión.



**Figura 4.** Análisis de una cúpula de revolución por el método de los «cortes»

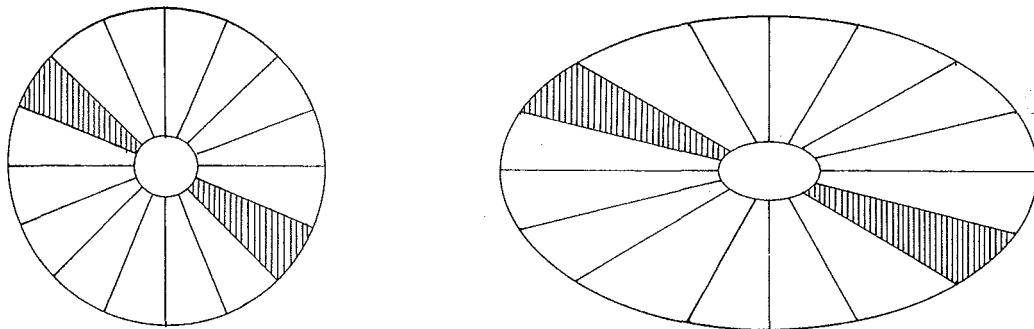
*Óculo:* Si la cúpula tiene un óculo puede aplicarse la misma técnica, pues, alrededor del óculo se forma un anillo de compresiones perfectamente circular, dado que hay simetría de revolución, Figura 5.

*Linterna:* Si la cúpula tiene una linterna, en el borde del óculo se forma un anillo de compresiones que "desvía" las cargas verticales hacia el interior de la cúpula. El procedimiento es el mismo, pero cada gajo soporta una parte del peso de la linterna.

### 3.5 Análisis de cúpulas ovales

La misma técnica anterior puede usarse para analizar cúpulas ovales. Ahora, sin embargo, es preciso analizar cada uno de los pares de gajos distintos para comprobar que es posible encontrar en cada uno de ellos una línea de empujes en el interior de la fábrica. La precisión del análisis depende del número de cortes, pero, en general no será preciso realizar una división en más de diez gajos.

*Óculo:* Si existe un óculo, el procedimiento es el mismo, pero es preciso comprobar que el anillo de compresiones superior cabe dentro del nervio de borde de la cúpula, dado que su forma no tiene por qué coincidir con la del nervio de borde, Figura 5.



**Figura 5.** Aplicación del método de los cortes a cúpulas de revolución y ovales con óculo

*Linterna:* Si hay una linterna, cada gajo soportará una parte de su peso y, de nuevo, será preciso comprobar que el anillo de compresiones cabe dentro del nervio de borde.

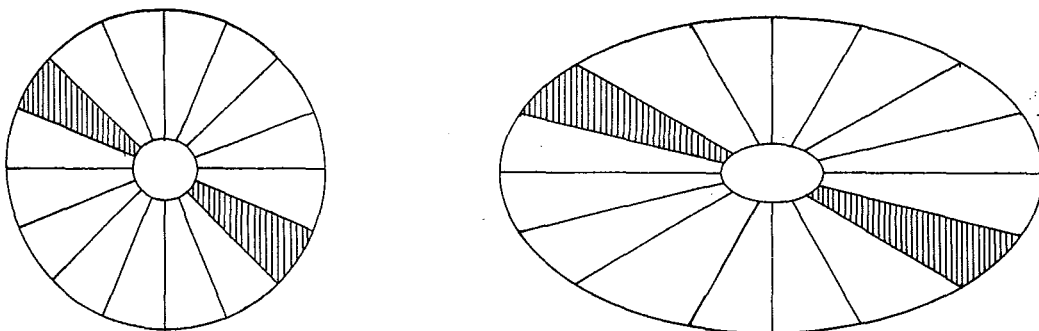
*Óculo:* Si la cúpula tiene un óculo puede aplicarse la misma técnica, pues, alrededor del óculo se forma un anillo de compresiones perfectamente circular, dado que hay simetría de revolución, Figura 5.

*Linterna:* Si la cúpula tiene una linterna, en el borde del óculo se forma un anillo de compresiones que "desvía" las cargas verticales hacia el interior de la cúpula. El procedimiento es el mismo, pero cada gajo soporta una parte del peso de la linterna.

### 3.5 Análisis de cúpulas ovales

La misma técnica anterior puede usarse para analizar cúpulas ovales. Ahora, sin embargo, es preciso analizar cada uno de los pares de gajos distintos para comprobar que es posible encontrar en cada uno de ellos una línea de empujes en el interior de la fábrica. La precisión del análisis depende del número de cortes, pero, en general no será preciso realizar una división en más de diez gajos.

*Óculo:* Si existe un óculo, el procedimiento es el mismo, pero es preciso comprobar que el anillo de compresiones superior cabe dentro del nervio de borde de la cúpula, dado que su forma no tiene por qué coincidir con la del nervio de borde, Figura 5.

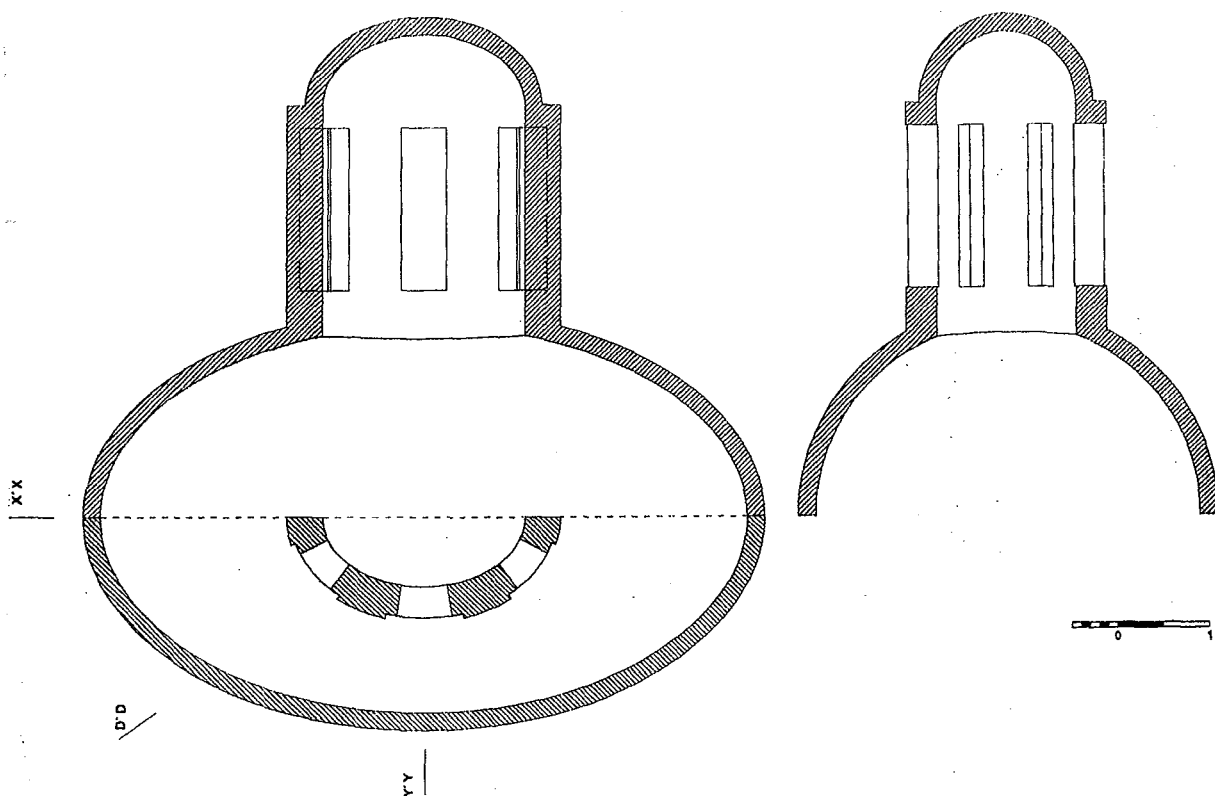


**Figura 5.** Aplicación del método de los cortes a cúpulas de revolución y ovales con óculo

*Linterna:* Si hay una linterna, cada gajo soportará una parte de su peso y, de nuevo, será preciso comprobar que el anillo de compresiones cabe dentro del nervio de borde.

### 3.6 Análisis de una cúpula análoga a la hundida

En el presente apartado se realizará un análisis de una cúpula análoga a la que se hundió, la del evangelio, con vistas a aportar datos que permitan explicar el proceso de colapso. Las medidas generales se han tomado de la cúpula de la epístola (situada simétricamente a la hundida), que estaba con andamios durante las visitas de inspección. Para estudiar la forma general de la superficie de intradós se han tomado medidas sobre una de las cúpulas de la nave, pues los andamios dificultaban la toma de medidas en la de la epístola. La forma se recoge a escala en la Figura 6.



**Figura 6.** Planta, alzados y secciones de la cúpula análoga

#### *Levantamiento*

Las medidas se tomaron con ayuda de un nivel y un distanciómetro láser. No se realizó un levantamiento de precisión, pues lo único que se trataba de verificar es que la forma general correspondía a la de un elipsoide de revolución. Las medidas se tomaron según los ejes principales de la elipse y una de las diagonales del rectángulo circunscrito. En la Figura 7 se han representado gráficamente para compararlas con la curva teórica. La aproximación es suficientemente buena, y puede concluirse que las cúpulas menores se construyeron con forma de elipsoide de revolución.

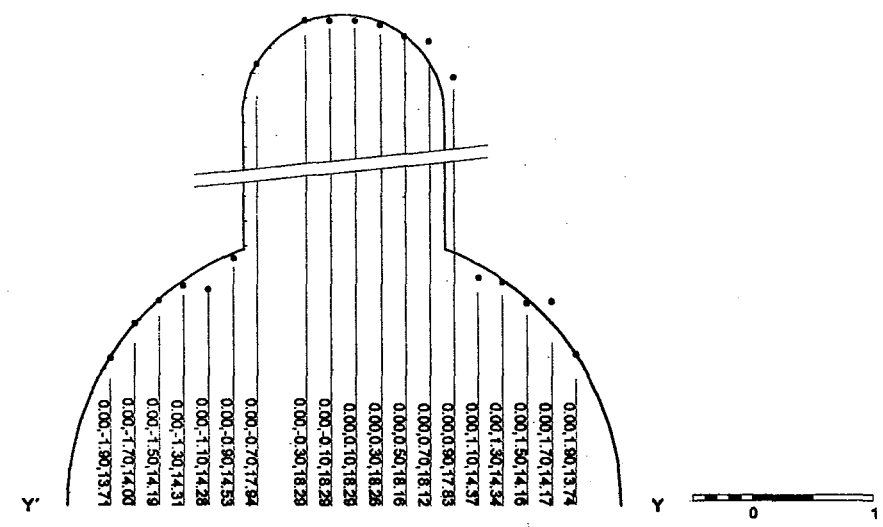
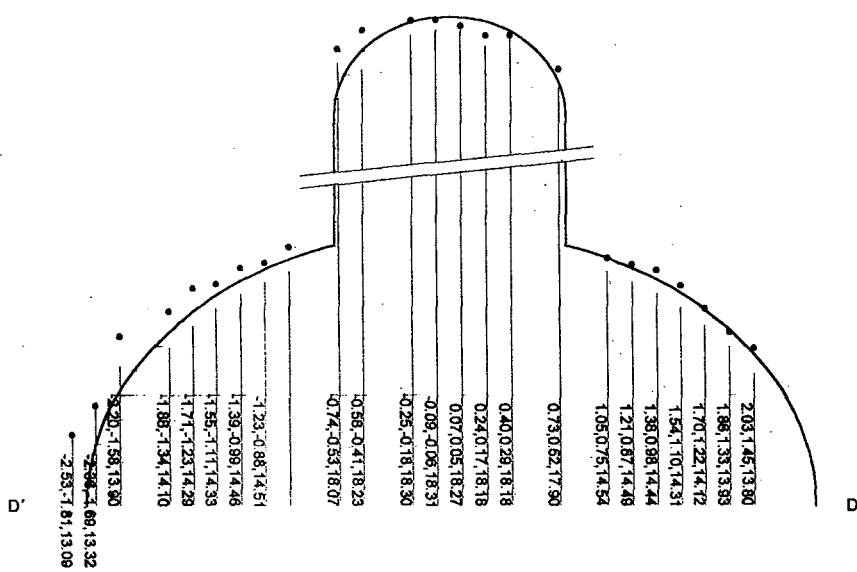
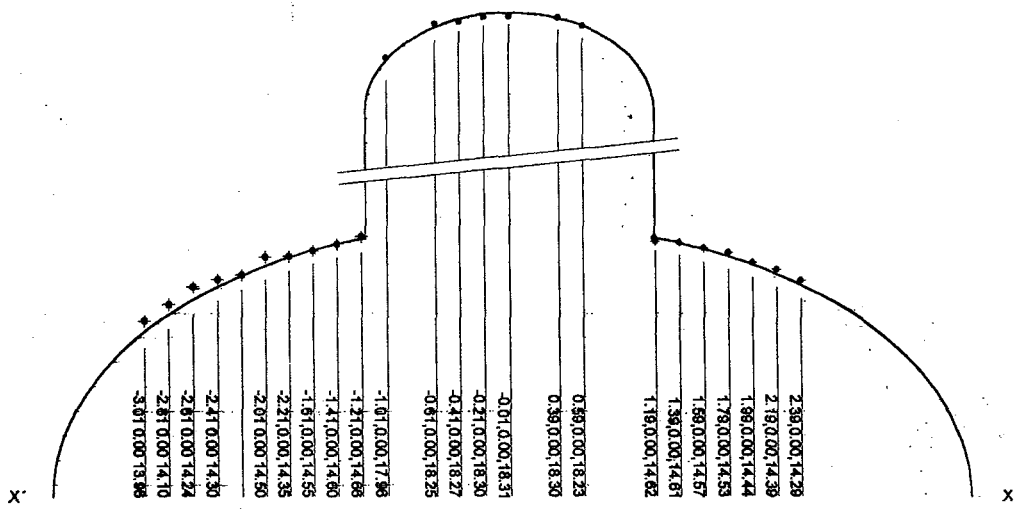


Figura 7. Levantamiento de una de las cúpulas menores de la nave. Comparación con un elipsoide de revolución.

### *Peso máximo de la linterna*

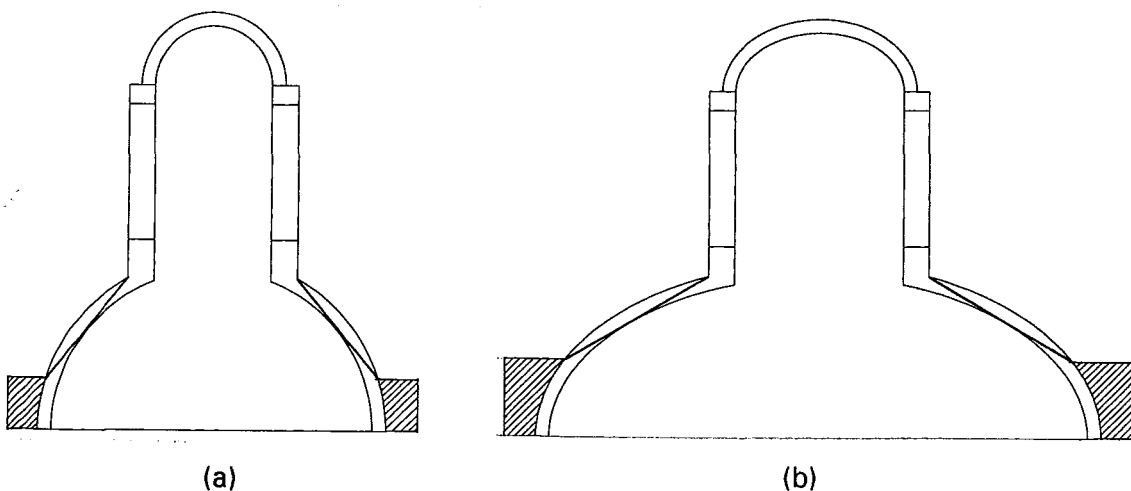
Como se ha dicho la linterna es inusualmente grande relación con la cúpula. Los constructores parecen haber sido conscientes de este hecho y por ello colocaron maderos de apeo dispuestos, al parecer, en la dirección de las diagonales, por debajo de los maderos de la cubierta.

Para poder discutir la necesidad o no de estos apeos, se ha calculado el peso máximo de linterna que podría resistir la cúpula. Se han hecho dos hipótesis:

- a) sin relleno en absoluto
- b) con un relleno de una altura de unos 40 cm a partir de la base.

Para realizar los cálculos se ha utilizado el método de los cortes, dividiendo la cúpula en 12 gajos que se equilibran dos a dos. Por simetría, sólo hay cuatro gajos distintos. Cada gajo se ha imaginado a su vez dividido en una serie de dovelas. Los pesos y distancias de sus centros de gravedad al eje vertical de la cúpula se han resumido en las Tablas 1 y 2.

Con estos datos se han dibujado las correspondientes líneas de empujes que soportan el peso máximo, esto es, que representan un estado límite de resistencia para la cúpula. Como puede verse, la existencia de un ligero relleno de 40 cm multiplica la resistencia de la cúpula por un factor superior a dos. Como puede verse en la Figura 7 (a) un relleno consistente de unos 70 cm (algo más del 1/3 recomendado por Fray Lorenzo) de altura permitiría a la cúpula resistir una linterna de cualquier peso: la cúpula transmitiría la mayor parte del peso de la linterna en la dirección más corta. En la otra dirección, Figura 7 (b), para conseguir el mismo efecto el relleno debería superar la mitad de la altura de la cúpula (lo que no es inusual).



**Figura 7.** Altura del relleno necesario para soportar cualquier linterna

**Gajo 1 (eje menor de la elipse)**

Hipótesis: Sin linterna

Dovela	1	2	3	4	5	6	7
Peso (t) $\gamma = 1,8t/m^3$	0,093	0,122	0,155	0,180	0,199	0,212	0,219
Radio (m)	0,94	1,27	1,55	1,80	1,99	2,12	2,19

Ángulo del gajo 1 = 46°

Gajo 1: Hipótesis sin relleno

Dovela	$P_{\text{máx Linterna}}$	2	3	4	5	6	7
Peso (t) $\gamma = 1,8t/m^3$	0,598	0,122	0,155	0,180	0,199	0,212	0,219
Radio (m)	0,94	1,27	1,55	1,80	1,99	2,12	2,19

Longitud del anillo del óculo (R = 0,94 m) = 5,92 m

Ángulo del gajo 1 = 46°

Gajo 1: Hipótesis con relleno

Dovela	$P_{\text{máx Linterna}}$	2	3	4	5	6	Relleno
Peso (t) $\gamma = 1,8t/m^3$	1,278	0,122	0,155	0,180	0,199	0,212	—
Radio (m)	0,94	1,27	1,55	1,80	1,99	2,12	—

Longitud del anillo del óculo (R = 0,94 m) = 5,92 m

Ángulo del gajo 1 = 46°

**Tabla 1.** Datos para el cálculo de los Gajos 1 y 2.

**Gajo 2**

Gajo 2: Hipótesis sin relleno

Dovela	$P_{\text{máx Linterna}}$	2	3	4	5	6	7
Peso (t) $\gamma = 1,8t/m^3$	0,386	0,128	0,153	0,188	0,195	0,218	0,200
Radio (m)	1,05	1,42	1,79	2,11	2,36	2,54	2,62

Longitud del anillo del óculo (R = 1,05 m) = 6,62 m

Ángulo del gajo 2 = 36°

Gajo 2: Hipótesis con relleno

Dovela	$P_{\text{máx Linterna}}$	2	3	4	5	6	Relleno
Peso (t) $\gamma = 1,8t/m^3$	0,883	0,128	0,153	0,188	0,195	0,218	—
Radio (m)	1,05	1,42	1,79	2,11	2,36	2,54	—

Longitud del anillo del óculo (R = 1,05 m) = 6,62 m

Ángulo del gajo 2 = 36°



**Gajo 3**

Gajo 3: Hipótesis sin relleno

Dovela	$P_{\text{máx}}$ Linterna	2	3	4	5	6	7
Peso (t) $\gamma = 1,8\text{t/m}^3$	0,194	0,088	0,132	0,160	0,187	0,227	0,152
Radio (m)	1,22	1,60	2,04	2,49	2,88	3,18	3,32

Longitud del anillo del óculo ( $R = 1,22 \text{ m}$ ) = 7,66 m

Ángulo del gajo 3 = 22°

Gajo 3: Hipótesis con relleno

Dovela	$P_{\text{máx}}$ Linterna	2	3	4	5	6	Relleno
Peso (t) $\gamma = 1,8\text{t/m}^3$	0,482	0,088	0,132	0,160	0,187	0,227	—
Radio (m)	1,22	1,60	2,04	2,49	2,88	3,18	—

Longitud del anillo del óculo ( $R = 1,22 \text{ m}$ ) = 7,66 m

Ángulo del gajo 3 = 22°

**Gajo 4 (eje mayor de la elipse)**

Hipótesis sin linterna

Dovela	1	2	3	4	5	6	7
Peso (t) $\gamma = 1,8\text{t/m}^3$	0,043	0,101	0,117	0,137	0,160	0,184	0,189
Radio (m)	1,27	1,72	2,23	2,68	3,08	3,41	3,61

Ángulo del gajo 4 = 18°

Gajo 4: Hipótesis sin relleno

Dovela	1	2	3	4	5	6	7
Peso (t) $\gamma = 1,8\text{t/m}^3$	0,135	0,101	0,117	0,137	0,160	0,184	0,189
Radio (m)	1,27	1,72	2,23	2,68	3,08	3,41	3,61

Longitud del anillo del óculo ( $R = 1,27 \text{ m}$ ) = 7,98 m

Ángulo del gajo 4 = 18°

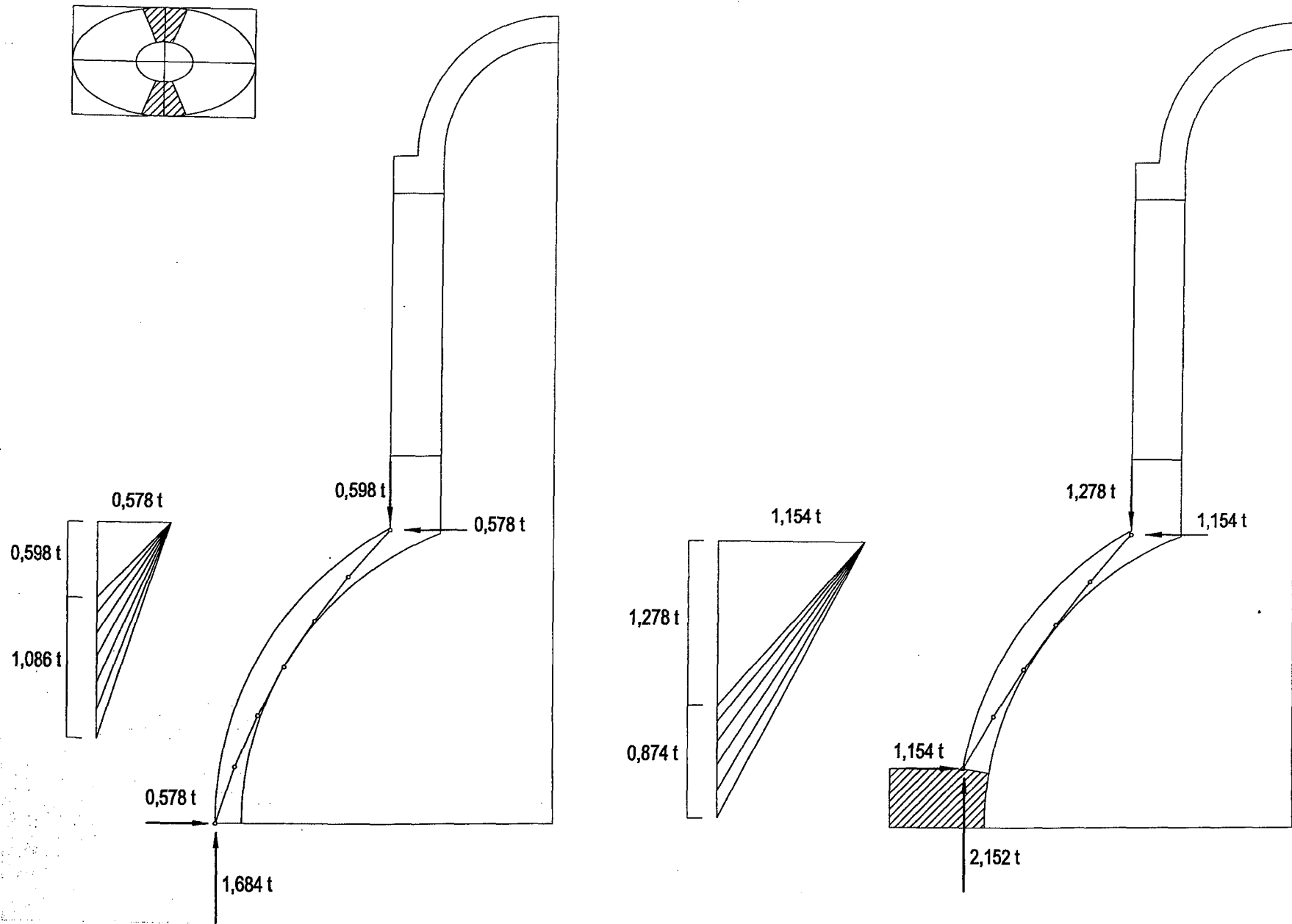
Gajo 4: Hipótesis con relleno

Dovela	$P_{\text{máx}}$ Linterna	2	3	4	5	6	Relleno
Peso (t) $\gamma = 1,8\text{t/m}^3$	0,36	0,101	0,117	0,137	0,160	0,238	—
Radio (m)	1,27	1,72	2,23	2,68	3,08	3,45	—

Longitud del anillo del óculo ( $R = 1,27 \text{ m}$ ) = 7,98 m

Ángulo del gajo 4 = 18°

**Tabla 2.** Datos para el cálculo de los Gajos 3 y 4.



**Figura 8.** Líneas de empujes límite, con y sin relleno, para el Gajo 1.

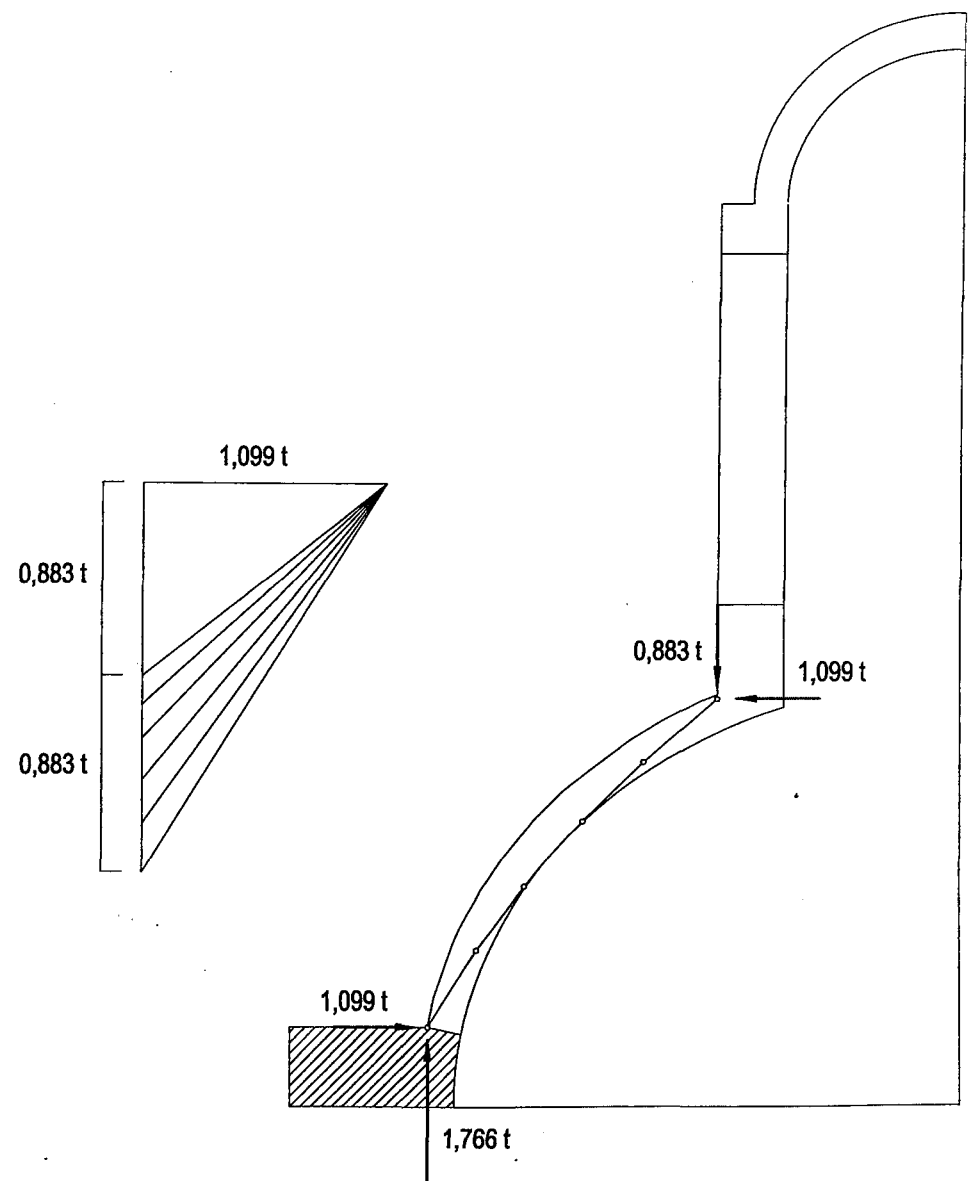
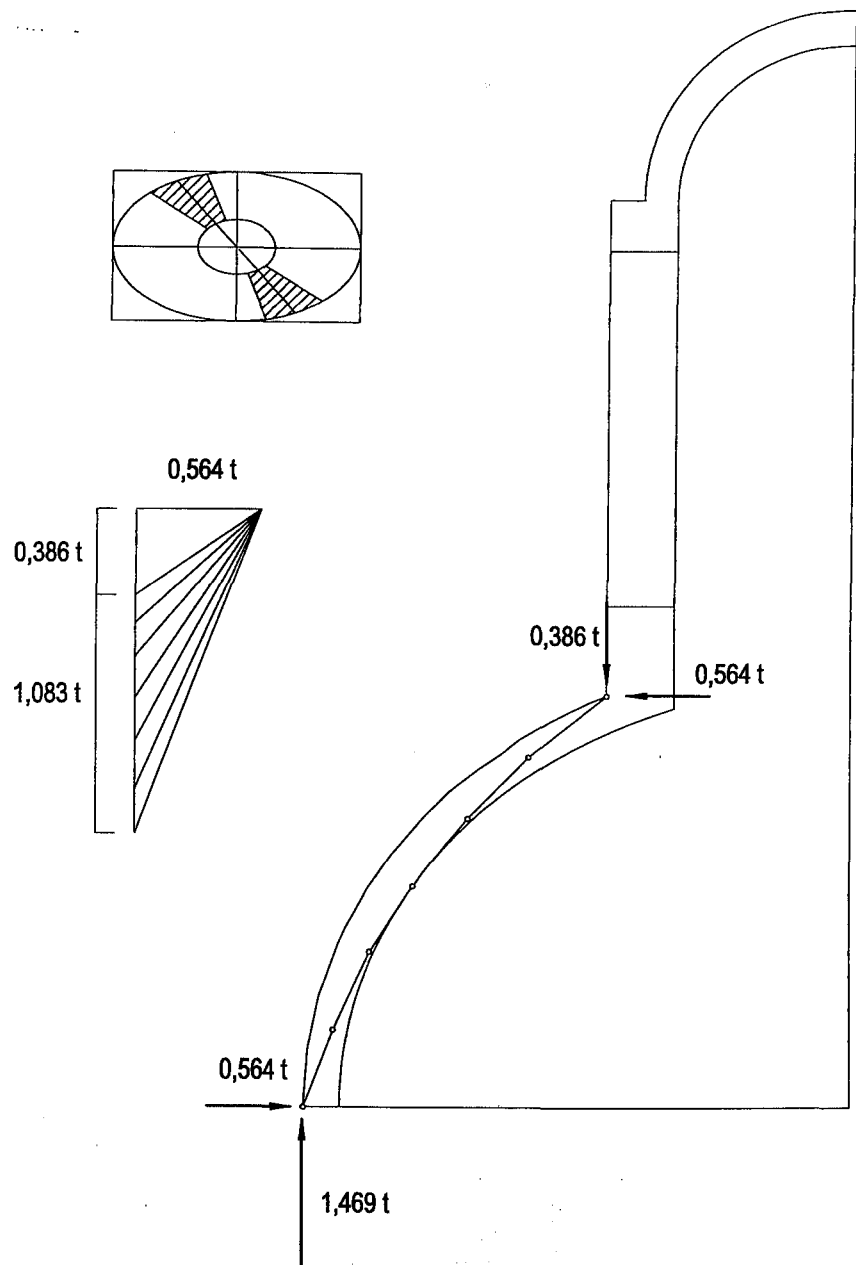


Figura 9. Líneas de empujes límite, con y sin relleno, para el Gajo 2.

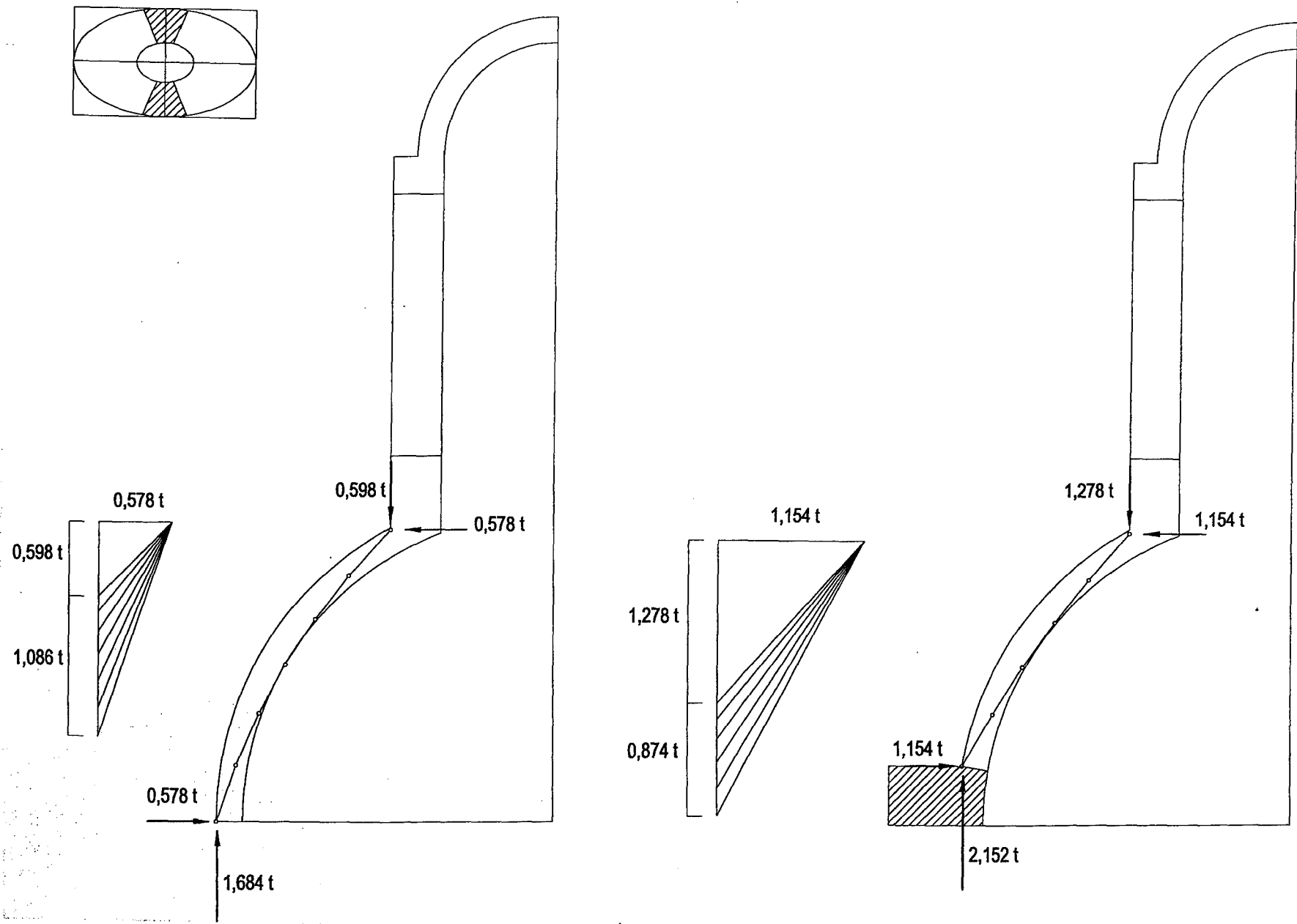


Figura 8. Líneas de empujes límite, con y sin relleno, para el Gajo 1.

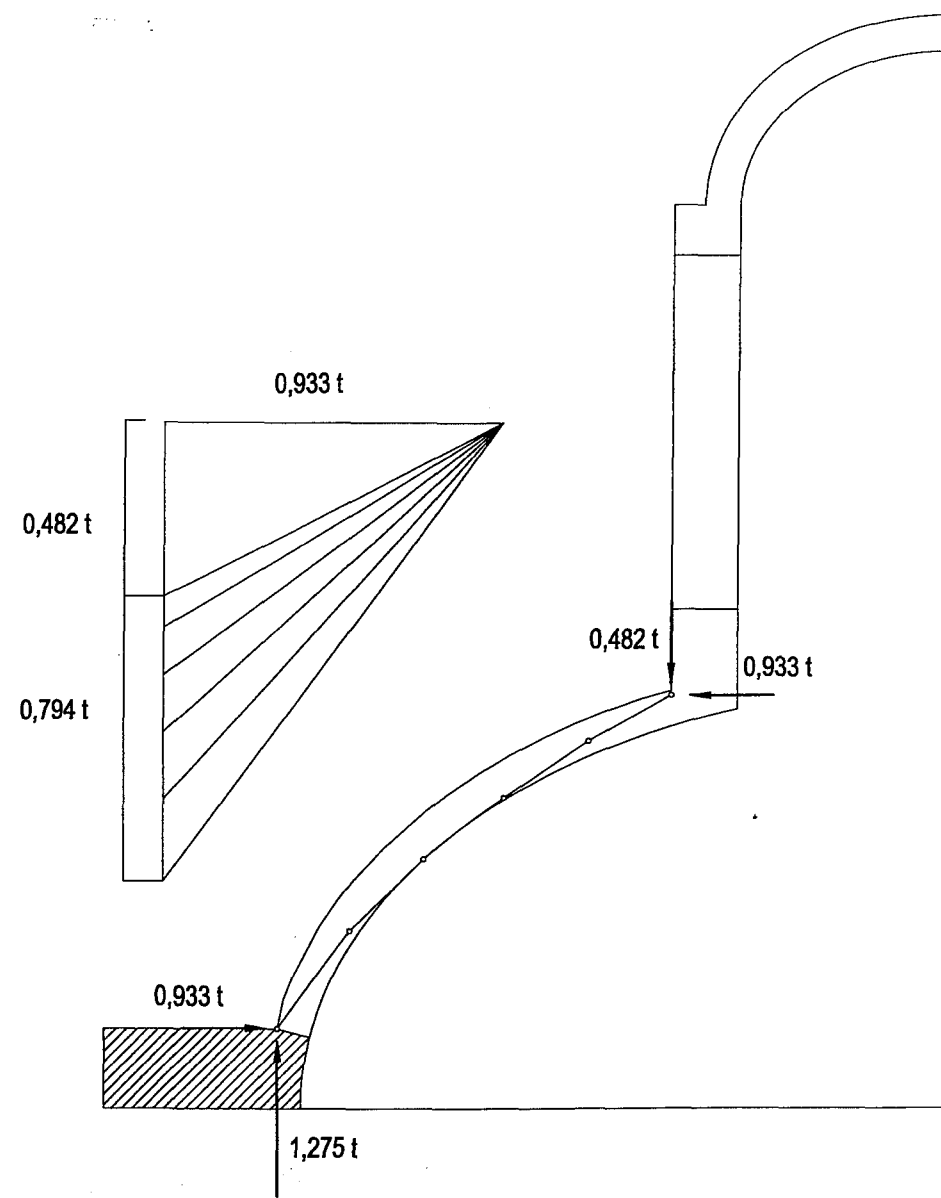
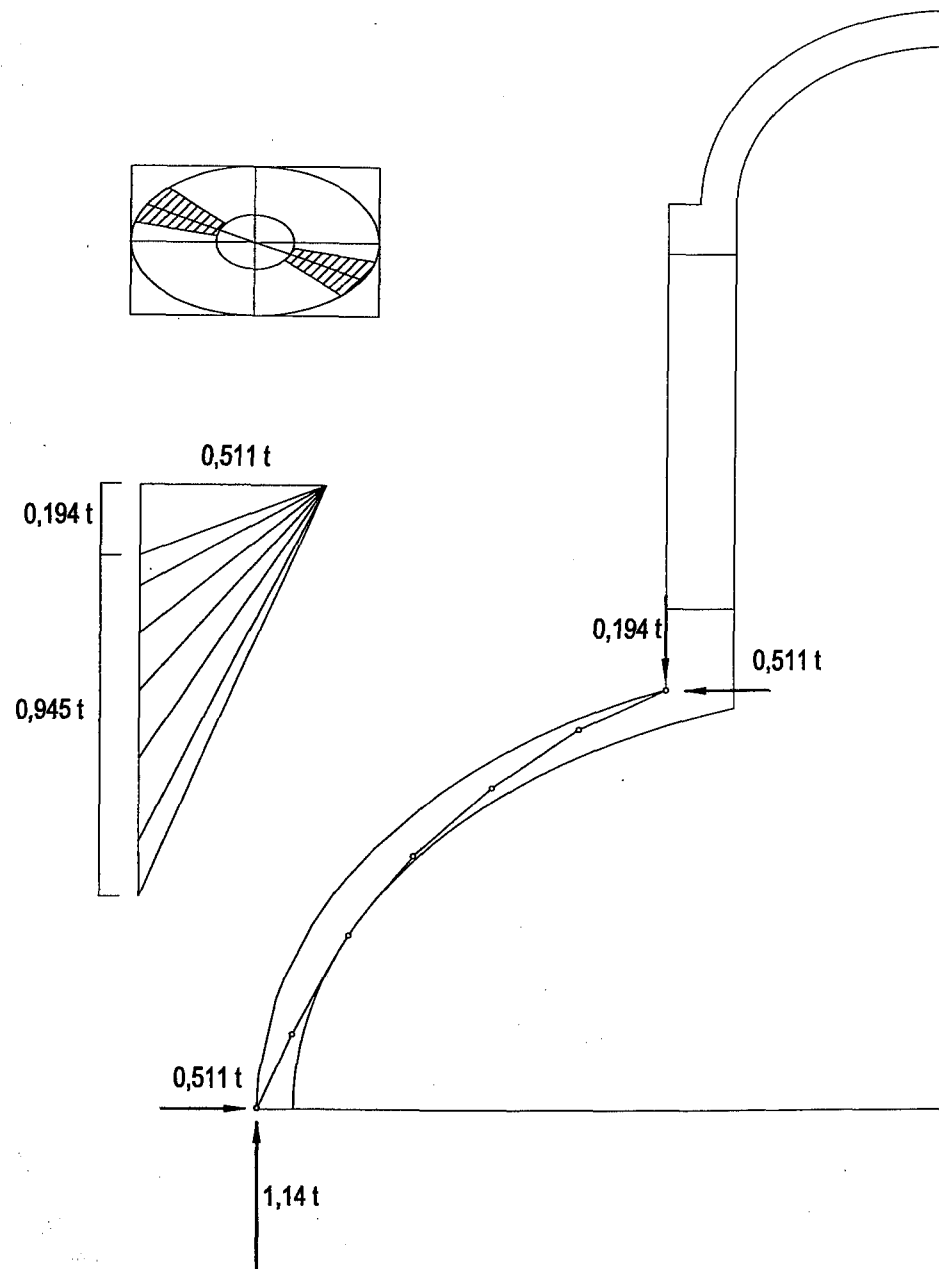


Figura 10. Líneas de empujes límite, con y sin relleno, para el Gajo 3.

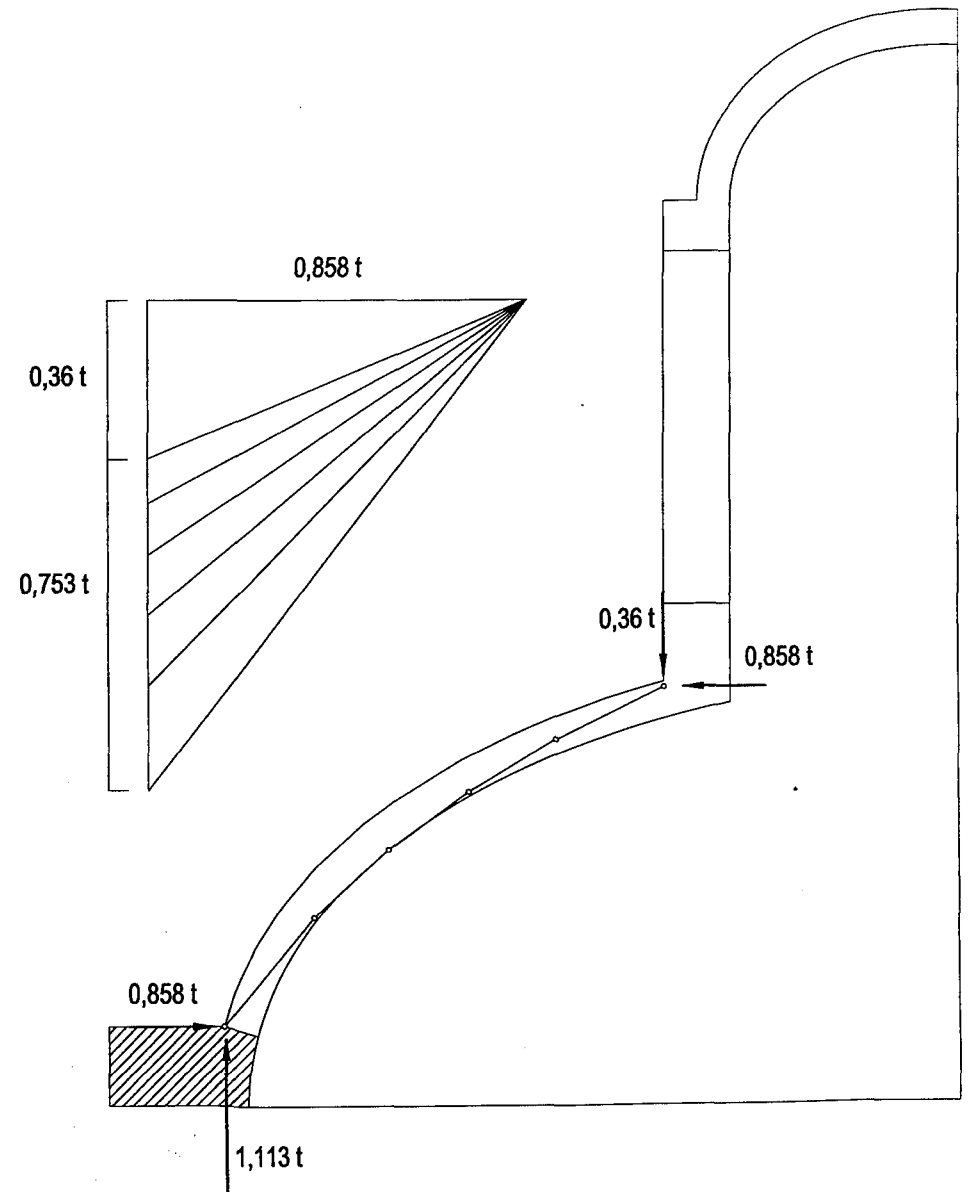
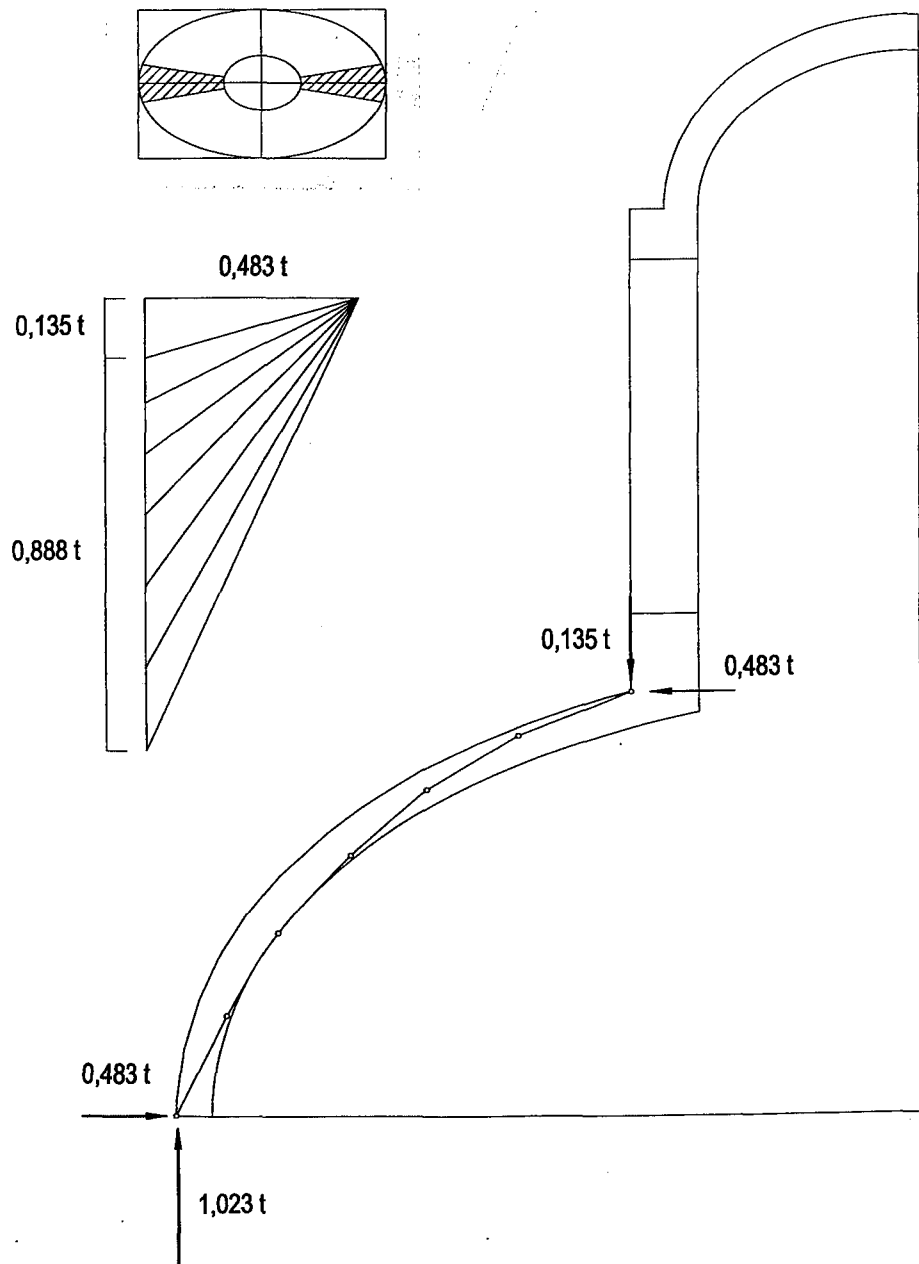
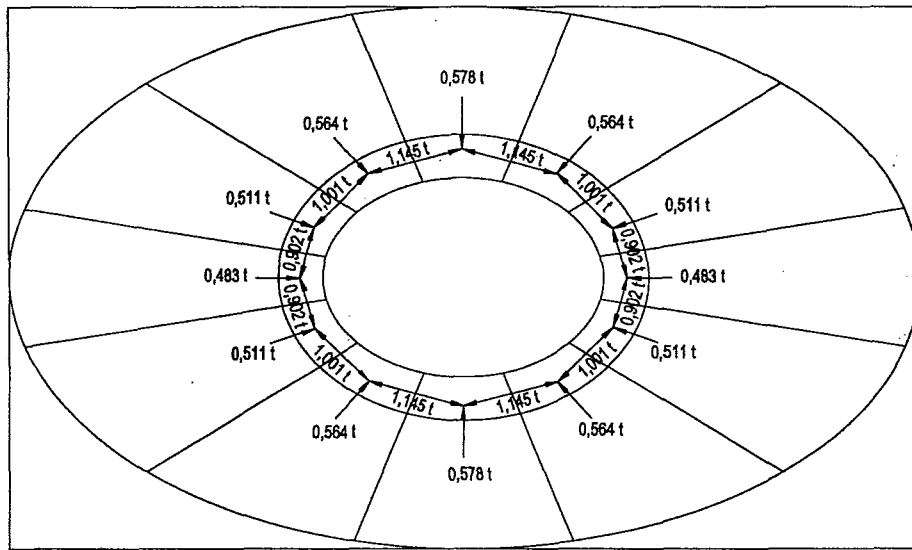
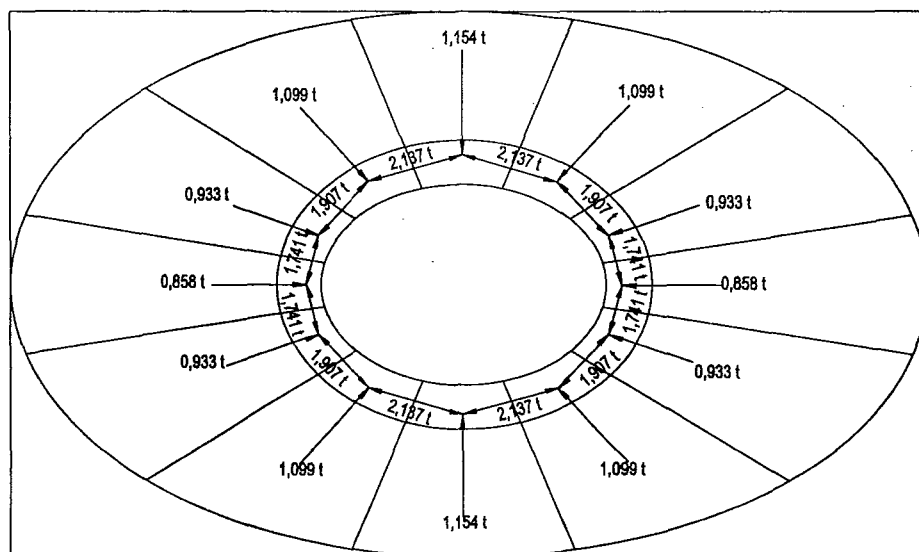


Figura 11. Líneas de empujes límite, con y sin relleno, para el Gajo 4.

En ambas hipótesis se debe verificar que el anillo de compresiones del óculo debe estar contenido en la fábrica. En la Figura 12 se puede ver que esta condición se cumple sin ningún problema. No obstante, debe observarse que la forma del anillo o línea de empujes no coincide con la del óculo y, por tanto, este precisa tener espesor en las cúpulas ovales a diferencia de las de revolución.



Hip. Sin relleno



Hip. Con relleno

Figura 12. Línea de empujes en anillo de la base de la linterna, sin relleno y con relleno.

El peso máximo de linterna que puede soportar la cúpula se obtiene sumando los valores obtenidos para cada gajo (Figuras 8-11). La contribución se resume en la siguiente tabla:

Gajo	sin relleno	con relleno
1	1,196	2,556
2	1,544	3,532
3	0,776	1,928
4	0,270	0,720
<b>Total</b>	<b>3,786</b>	<b>8,736</b>

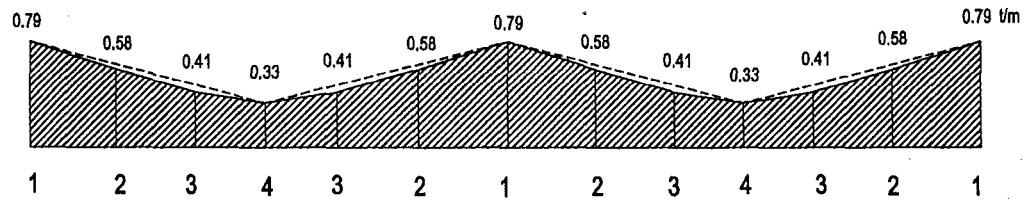
**Tabla 3.** Peso máximo, en toneladas, resistido con la cúpula sin relleno y con un relleno de 40 cm

Los valores pueden incrementarse en un 10% que es la diferencia de peso entre la cúpula real y la modelizada en gajos esféricos. Así, sin relleno, la cúpula se hundiría justo con un linterna de unas 4 toneladas y con un relleno de 40 cm el hundimiento se produciría al alcanzar un peso de 9,6 t. Nótese la influencia enorme de un relleno de poca altura (como se ha visto, un relleno de más de 70 cm permitiría resistir cualquier peso de linterna). Finalmente, la inspección de la Tabla 3 deja ver inmediatamente que la mayor parte del peso de la linterna, en torno al 70%, se transmite por los gajos 1 y 2, siguiendo el «camino más corto».

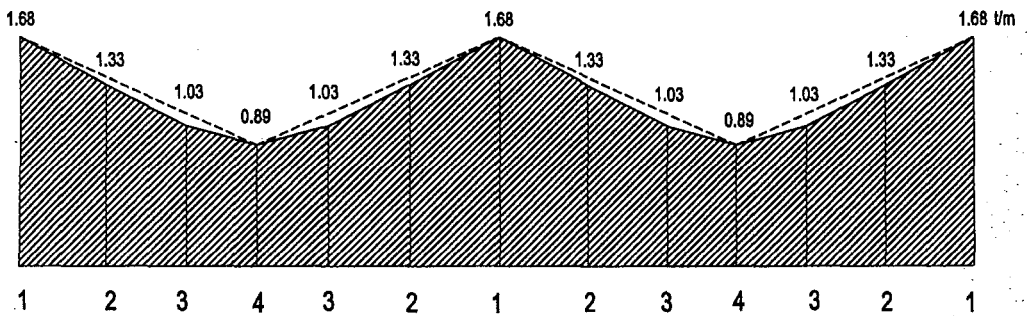
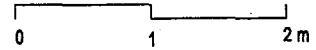
En la Figura 13 se han repartido los pesos sobre un anillo elíptico de 7 m de longitud, que coincide aproximadamente, con la línea media del óculo. Como puede verse la variación es casi lineal. La integral del área dará la carga vertical antes citada.

En base a los cálculos anteriores puede afirmarse que una cúpula sin relleno o con un relleno inferior al tercio de altura de la cúpula por el intradós precisaría de un apoyo suplementario para conseguir la seguridad suficiente. Esta es, seguramente, la función que el constructor quiso dar a los maderos de apeo diagonales.





Hip. Sin relleno



Hip. Con relleno

**Figura 13.** Pesos límite de la linterna repartidos por unidad de longitud sobre un anillo elíptico dentro del zuncho del óculo

*Existencia del relleno en la construcción original*

Todo lo anterior apunta hacia que las cúpulas menores en su estado original disponían de un relleno que alcanzaría el tercio de la altura. Como confirmación se ha estudiado la cúpula sin linterna, «en construcción». Puede verse en la Figura 14 que el espesor contiene justo la línea de empujes y que la cúpula con óculo pero sin linterna precisaría del relleno para ser estable. Repetimos que la inspección de las cúpulas no intervenidas podría aportar datos definitivos en este sentido.

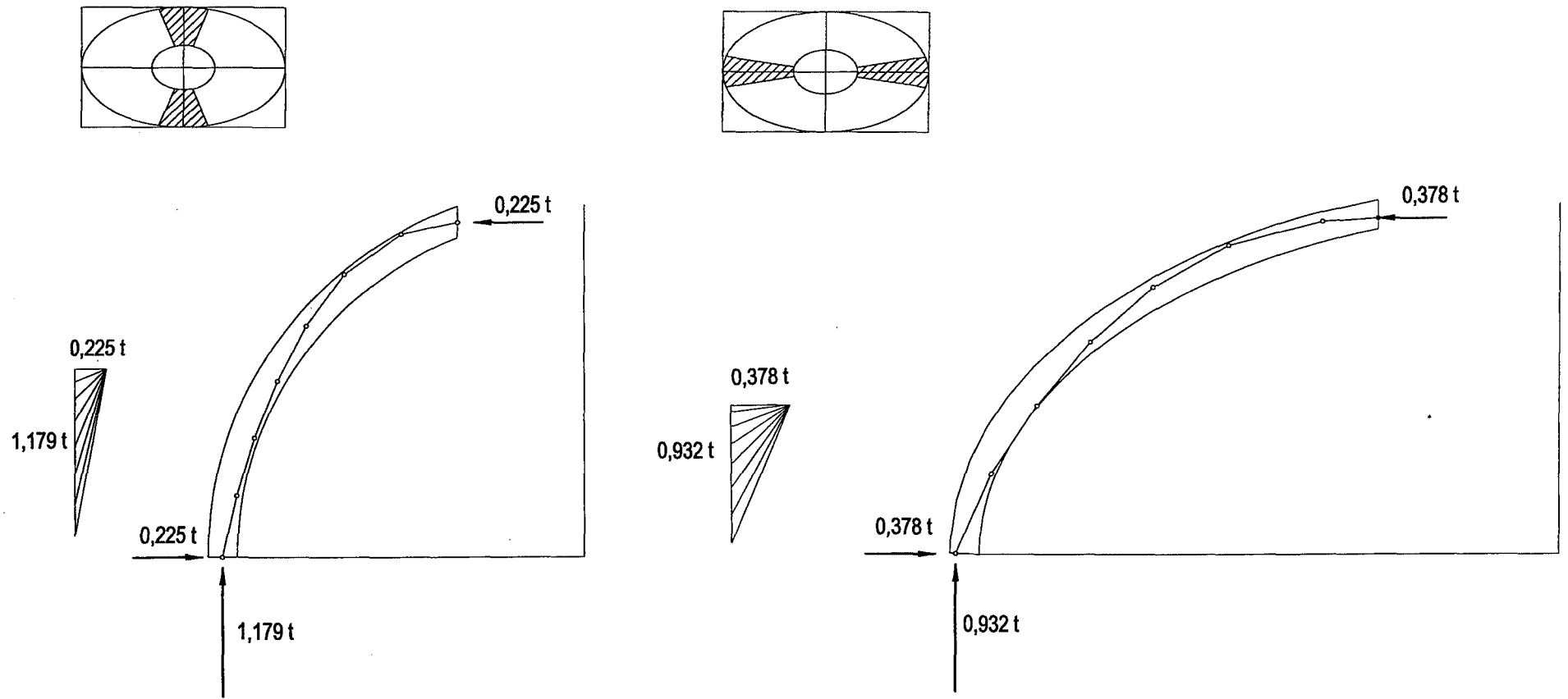
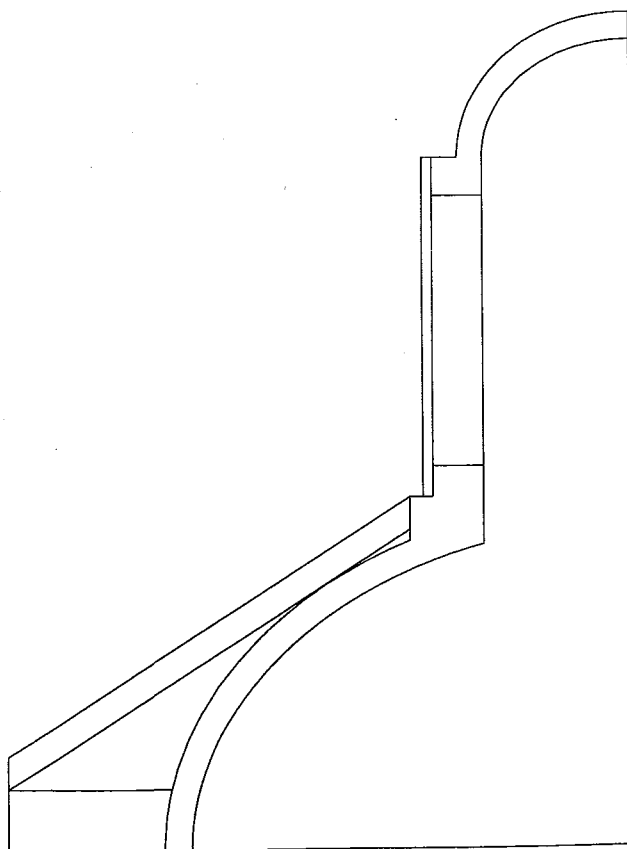


Figura 14. Estudio de la estabilidad de la cúpula sin linterna

### *Empleo de maderos de apoyo*

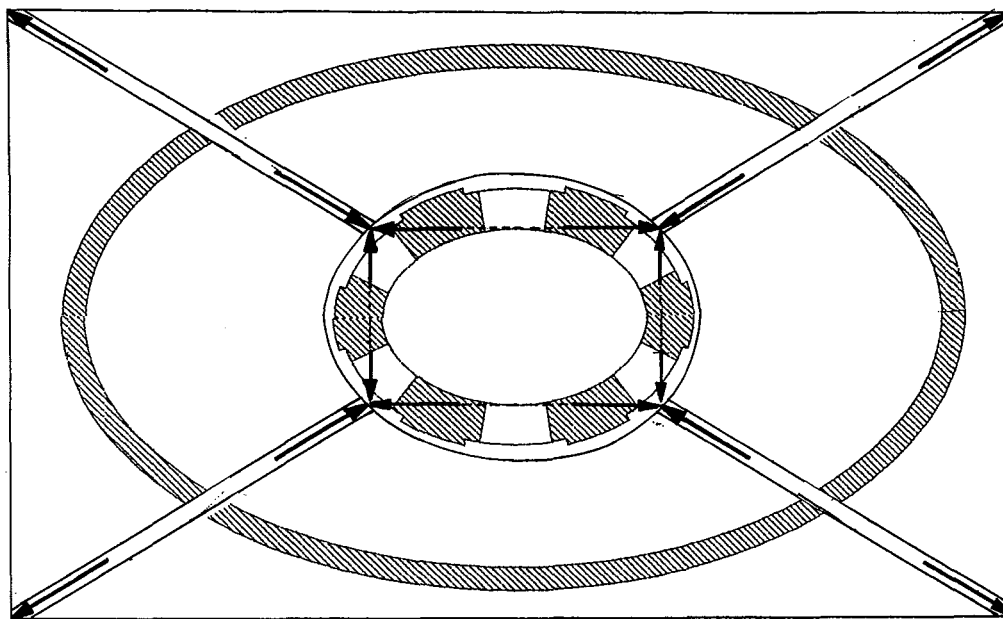
Una parte del peso de la linterna puede ser transmitida por los maderos de apoyo a los que se ha aludido anteriormente. Sólo hay evidencias parciales, pero la información de que se dispone apunta hacia un empleo sistemático de este recurso en todas las cúpulas de la Mantería.

Por hacer algunos números orientativos, podríamos suponer que el peso total de la linterna de 11 t, se reparte a partes iguales entre la cúpula y los maderos diagonales. Consideremos que sólo hay cuatro diagonales. Cada uno de ellos deberá soportar un peso de  $11/8 \text{ t} = 1,375 \text{ t}$ . Los maderos tendrán, Figura 15, una inclinación de unos  $30^\circ$ . Deberán, pues, soportar una compresión de  $1,375/(\text{sen}30) = 2,75 \text{ t}$ . La sección media de los maderos retirados viene ser de unos 18 cm, y el madero trabajaría a una tensión de  $11 \text{ kg/cm}^2$ , muy por debajo de la admisible. La esbeltez aparente de 1/18 excluye así mismo problemas de pandeo. El madero en sí mismo puede soportar la carga con comodidad.



**Figura 15.** Alzado de situación de un madero de apeo diagonal de 18 cm de diámetro

Ahora bien, el problema es como contrarrestar el empuje oblicuo de los maderos. En la Figura 16 se ha representado, proyectado en planta, el esquema de funcionamiento.



**Figura 16.** Funcionamiento estructural (representado en planta) de los maderos de apeo.

En la parte superior los empujes de los maderos se equilibran con la parte del peso de la linterna y las compresiones horizontales necesarias se auto-equilibran y están contenidas dentro del zunchado, recrecido en el exterior, de la base de la linterna.

En la parte inferior, sin embargo, es preciso resistir el empuje. Una primera posibilidad es considerar el peso del muro de las esquinas. Suponiendo, de forma conservadora, que sólo contamos con el rozamiento, sería preciso un peso de fábrica, por encima del punto de apoyo del madero, que resistiera la componente horizontal. Considerando un ángulo de rozamiento de  $30^\circ$  el peso de fábrica necesario es de unas 2,8 t, equivalente a  $1,5 \text{ m}^3$ . No parece, en base a las fotos que se disponga de este volumen de material.

Otra posibilidad es que el constructor haya dispuesto un zunchado de madera embebido en el muro, como ya existe sobre el dintel de las ventanas y en la base de la linterna. Un zunchado de este tipo debería resistir un esfuerzo de unas 2 t, muy pequeño para las escuadrías de madera que se han encontrado en la fábrica. Debería hacerse una cata para comprobar si este madero existe.

De no existir el madero de zuncho inferior se debería estudiar en detalle la geometría de la parte de coronación del muro para averiguar la manera en que se podría transmitir el empuje de los maderos de apeo.

Finalmente, los pares podrían resistir algo de peso, pero su forma de apoyo hace que sea sensato despreciar esta contribución.

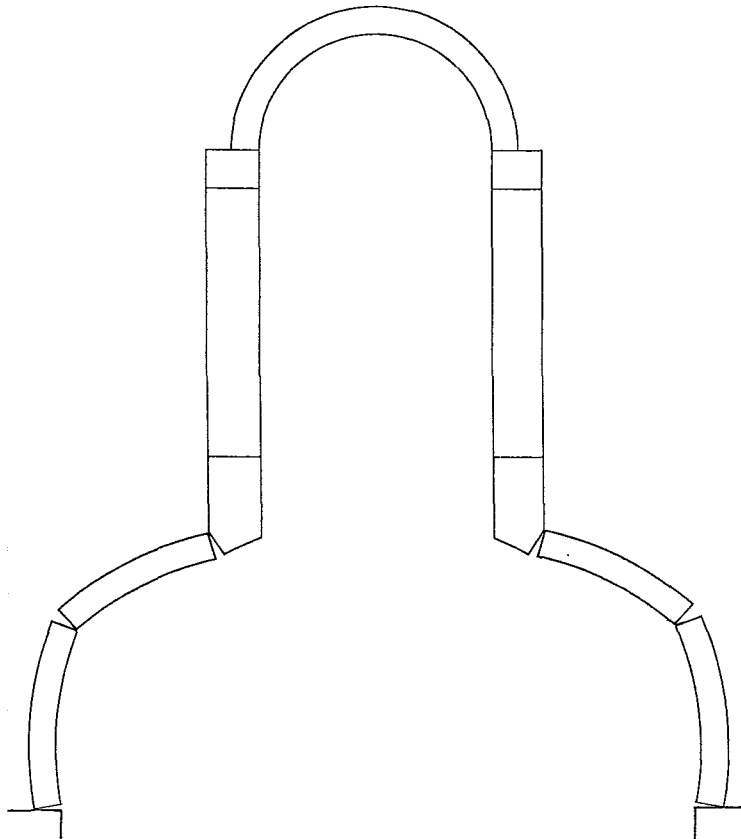
### **3.7 Hipótesis sobre el hundimiento de la cúpula del evangelio**

Los cálculos anteriores y la inspección de la ruina permite hacer algunas consideraciones sobre el hundimiento de la cúpula del evangelio. Debe recordarse de nuevo, que la exposición que a continuación se hace está limitada por la información disponible y que sólo debe entenderse como una posible explicación de lo acaecido, con vistas, principalmente, a iluminar las actuaciones posteriores.

La cúpula debió ser construida con relleno y maderos de apeo, de acuerdo con los preceptos de la buena construcción. En algún momento de su historia el relleno fue retirado casi por completo. De hecho, en las fotos puede apreciarse su ausencia casi total salvo en la zona en contacto con el muro del crucero, donde el relleno parece alcanzar un metro de altura o más, Fotos 17 a 20.

Esta intervención, si es que un estudio histórico la confirmase, habría debilitado muy notablemente la estructura de la cúpula, haciendo trabajar a los maderos de apeo por encima de los valores arriba indicados. De hecho, al parecer la cúpula estaba ya seriamente agrietada antes de iniciarse la última intervención. La posible eliminación de alguno de estos maderos, o su fallo repentino por deterioro, pudo precipitar el colapso de la cúpula.

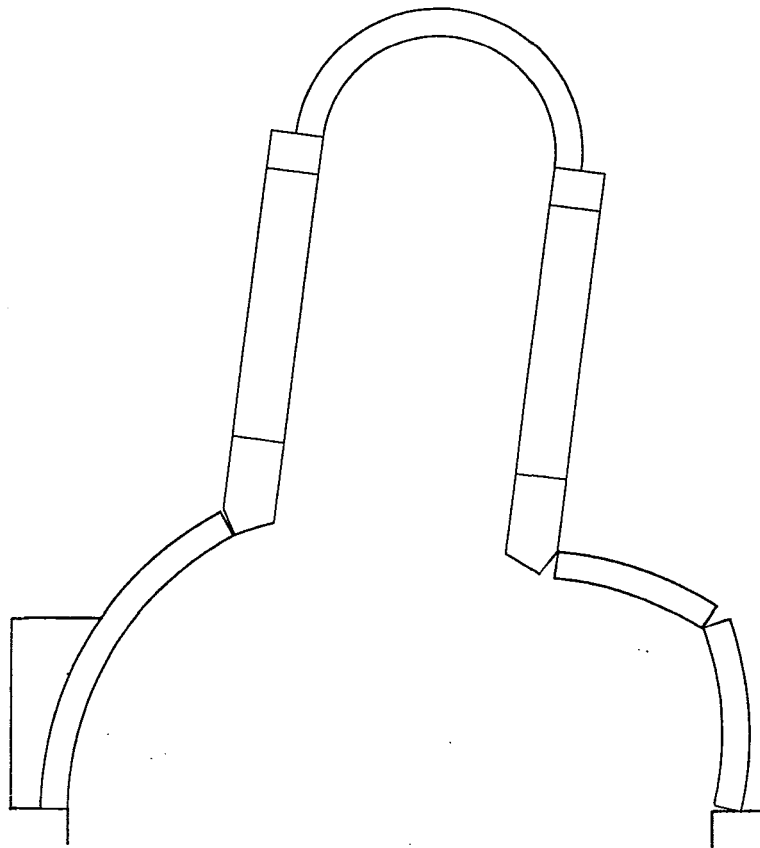
Resulta interesante estudiar los posibles mecanismos de colapso. El mecanismo básico de colapso de una cúpula de fábrica es por formación de grietas meridianas, que la dividen en arcos o gajos, del tipo de los «hipotéticos» manejados en el cálculo. En la Figura 17, se ha representado un mecanismo de colapso simétrico, teórico, por referencia a la sección más corta. El mecanismo indicado en el dibujo representa el inicio del movimiento para pequeñas deformaciones, si bien el movimiento se ha exagerado por claridad. La forma final de colapso con grandes deformaciones depende de las condiciones de contorno.



**Figura 17.** Mecanismo de colapso simétrico de la cúpula análoga. Se ha dibujado el colapso del gajo menor

En la realidad la asimetría de las condiciones de contorno conduce a mecanismos no simétricos. Este es lo que pasó en la cúpula hundida, donde una parte de la cúpula, la trasdosada por relleno, ha permanecido en pie mientras que la parte situada enfrente aparece apoyada contra el muro, evidenciando el mecanismo de colapso antes aludido con gran claridad.

Tratemos de explicar estos hechos. Como se ha visto la cúpula transmite las cargas principalmente en el sentido del eje menor. La presencia de un relleno de altura apreciable entre el trasdós de la cúpula y el muro sobre el arco toral suministraba un apoyo firme. Al otro lado, presumiblemente habría unos maderos de apeo que transmitían el peso en esa otra dirección. La eliminación, o el fallo repentino por deterioro antes aludido, dejaría la cúpula sin posibilidad de resistir el peso de la linterna y se iniciaría un fallo del tipo esquematizado en la Figura 18.



**Figura 18.** Mecanismo de colapso probable de hundimiento de la cúpula del evangelio

#### **4. Conclusiones**

1. Las cúpulas menores de la Mantería soportan unas linternas de un tamaño enorme en relación a su tamaño, para lo que es usual en este tipo de construcciones. El análisis demuestra que las cúpulas, por sí mismas, no pueden soportar el peso de estas linternas.

2. Un relleno de trasdosado, de altura suficiente y bien ejecutado, podría permitir resistir este peso sin problemas. En particular un relleno de más de 70 cm permitiría resistir cualquier peso. En la actualidad, en las cúpulas que han sido inspeccionadas (la hundida, del evangelio, y la de la epístola) este relleno ha desaparecido prácticamente por completo.

3. En ausencia de relleno, o con un relleno insuficiente o de mala calidad, debe haber otro mecanismo resistente que explique por qué las cúpulas han permanecido en pie durante siglos.

El constructor dispuso para suplementar la acción del relleno de maderos de apeo, colocados, al parecer según las diagonales. Estos maderos soportan parte del peso de la linterna, si bien el mecanismo de contrarresto de su empuje no está aclarado todavía. En nuestra opinión, es muy probable que existan zunchos embebidos en el muro. Esto tendría, además, la ventaja de reducir el empuje de la cúpula apoyada sobre muros muy esbeltos. Esta hipótesis se debería comprobar.

4. La cúpula del evangelio, por el estado de los rellenos, debía depender para su estabilidad del apoyo suministrado por un conjunto de maderos de apeo. Su eliminación, o su fallo repentino por deterioro, pudo precipitar el hundimiento de la cúpula. No obstante, la causa principal es la ausencia de relleno que debió ser eliminado en alguna intervención anterior. Se debería aclarar este aspecto con un estudio histórico.

5. Las mismas causas que han producido el hundimiento de la cúpula del evangelio podrían ocasionarlo en algunas de las cúpulas que están en pie, intervenidas o no. La muy posible eliminación casi total del relleno y la desaparición o deterioro de los maderos de apeo, podrían hacer que el equilibrio actual de estas estructuras fuera precario.

6. Se recomienda, pues, una inspección en profundidad de todas las cúpulas de la Mantería para conocer a fondo su forma de construcción, verificar su grado de seguridad y proponer las medidas de consolidación y refuerzo, si fueran necesarias.

En Madrid, a 9 de diciembre de 2001

Firmado: Santiago Huerta Fernández



## 5. Bibliografía

- Heyman, Jacques (1982). *The masonry arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- Heyman, Jacques (1995). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.
- Heyman, Jacques (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.
- Huerta Fernández, Santiago (1990). *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500- ca. 1800*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Kooharian, Anthony (1953). «Limit Analysis of Voussoir (Segmental) and Concrete Arches.» *Proceedings of the American Concrete Institute* 49: 317-28.
- Pieper, Klaus (1983). *Sicherung historischer Bauten*. Berlin: Wilhelm Ernst und Sohn.
- Rankine, W.J.M. (1858). *A Manual of Applied Mechanics*. London: Charles Griffin.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de (1939). *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid : s.i. (reimpr. facs. Madrid: Albatros, 1989)

## 6. Documentación fotográfica



1



2



3



4



5



6



7



8



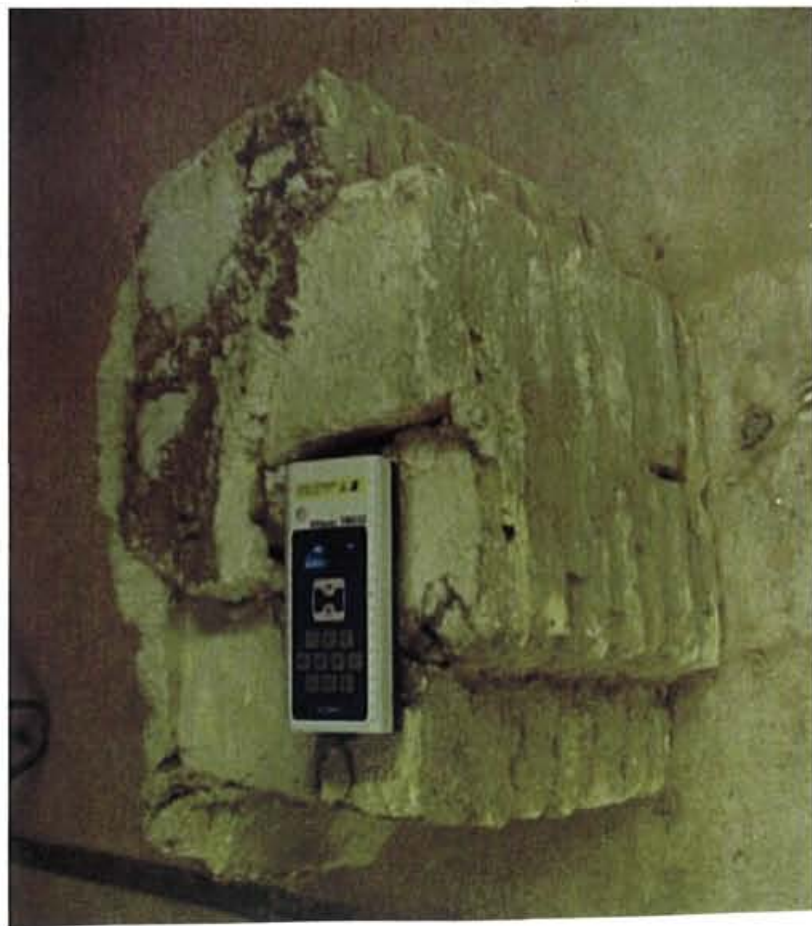
9



10



12



11





13



14



15



16



17



18



19



20



21



22



23



24



25



26



28



27





29



30



32



31



33



34



35



36



37



38



39



40



41



42



43



44

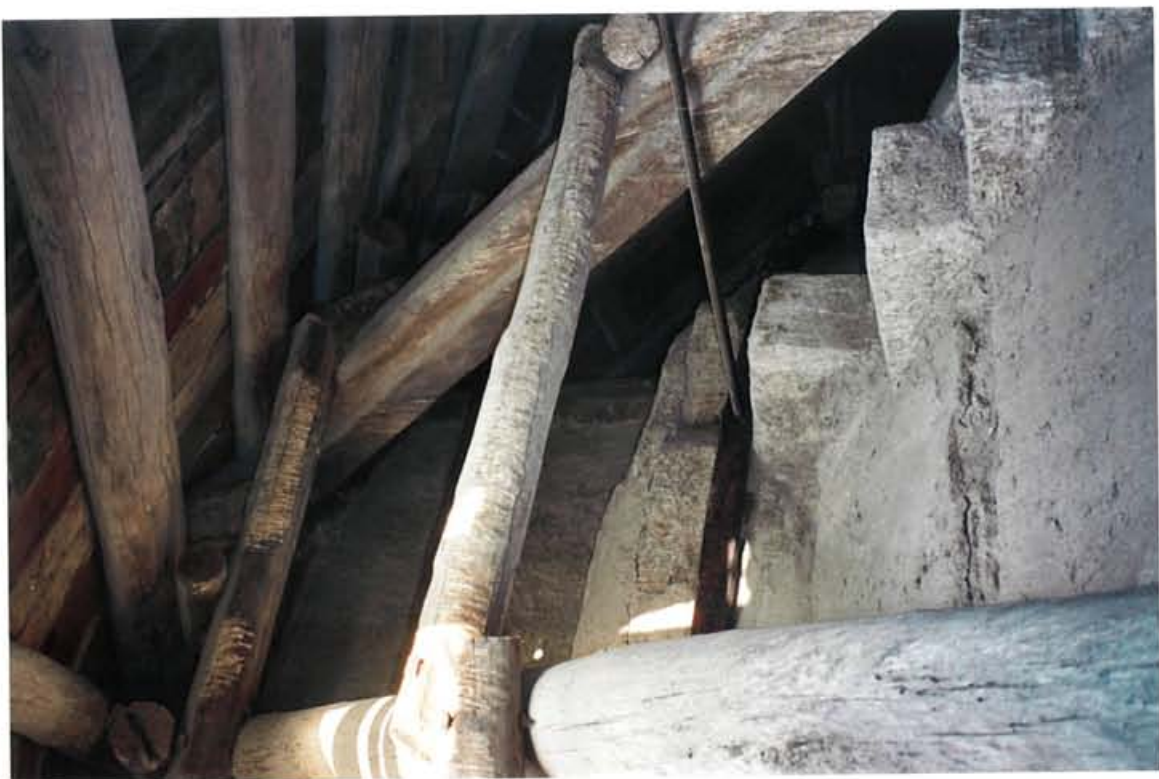




45



46



48



47