



análisis estructural de la cúpula de la iglesia de la encarnación montefrío - granada

MÁSTER DE ESTRUCTURAS - UNIVERSIDAD DE GRANADA
Eva María Alonso García / Tutor.- Dr. D. Javier Suárez Medina

2013
SEPTIEMBRE

>> Índice.

CAPÍTULO I ANÁLISIS HISTÓRICO

1≡ Introducción

1.1 Presentación del Trabajo Fin de Máster	Pág.1.1
1.2 Marco Geofísico	Pág.1.3
1.3. P.G.O.U: Estructura general del Municipio	Pág.1.7
1.4. P.G.O.U: Catalogación	Pág.1.8
Índice de figuras	Pág.1.9

2≡ Antecedentes históricos

2.1 Ocupación del territorio. Periodo antes de la Reconquista	Pág.2.1
2.2 Encuadre Social-Político y Político-Religioso. Después de la Reconquista	Pág.2.2
2.2.1 Siglo XV-XVI	Pág.2.2
2.2.1.1 Situación Civil	Pág.2.2
2.2.1.2 Voluntad política y religiosa	Pág.2.4
2.2.2 Siglo XVII-XVIII	Pág.2.4
2.2.2.1 Situación Civil	Pág.2.4
2.2.2.2 Voluntad política y religiosa	Pág.2.6
Índice de figuras	Pág.2.9

3≡ Agentes de La Arquitectura en el Siglo XVIII: Su influencia en Granada

3.1 La Real Academia de San Fernando	Pág.3.1
3.2 La sociedad económica de Granada en el Siglo XVIII. La escuela de dibujo	Pág.3.1
3.3 Procedimiento a la hora de solicitar la construcción de edificios religiosos	Pág.3.2

3.4 Ventura Rodríguez	Pág.3.3
3.5 Domingo Antonio Lois Monteagudo	Pág.3.13
3.6 Francisco Aguado	Pág.3.19
Índice de figuras	Pág.3.20

4≡ Construcciones precedentes

4.1 Obras que supusieron el punto de partida de la arquitectura academicista de Granada	Pág.4.1
· La Colegiata de Santa Fe	Pág.4.1
· La Iglesia de Vélez de Benaudalla	Pág.4.3
· La Iglesia de Alomartes	Pág.4.4
Índice de figuras	Pág.4.6

5≡ La Iglesia de la Encarnación

5.1 Domingo Antonio Lois Monteagudo	Pág.5.1
5.2 La Iglesia de La Encarnación de Montefrío	Pág.5.2
5.3 Rehabilitaciones más importantes realizadas en La Iglesia de Montefrío	Pág.5.13
· Consecuencias de los terremotos	Pág.5.13
· Estado de conservación y rehabilitación actual	Pág.5.13
1. Cod Ref 9201 21/190 Obras en la Iglesia de la Encarnación. En la cubierta	Pág.5.13
2. Cod. Ref. 9208 35-3. Proyecto en el patio de la Iglesia Parroquial de la Encarnación. Montefrío	Pág.5.14
3. Expedientes de Conservación.	Pág.5.14
· Nave principal-cúpula	Pág.5.15
· Cúpula de la torre	Pág.5.16
· Cuerpo delantero de la portada	Pág.5.16
Índice de figuras	Pág.5.17

CAPÍTULO II TRAZAS DEL TEMPO

6 ≡ Trazas del Templo

6.1 Introducción	Pág.6.1
6.2 Documentación de archivo	Pág.6.1
6.2.1 Documentación gráfica	Pág.6.1
6.2.2 Documentación escrita	Pág.6.6
6.3 Levantamiento Arquitectónico	Pág.6.7
6.3.1 La tecnología	Pág.6.7
Escalas y precisiones	Pág.6.7
Determinación de las técnicas adecuadas	Pág.6.7
Equipo	Pág.6.8
Técnicas de medición	Pág.6.9
6.3.2 Metodología en la toma de datos	Pág.6.10
6.3.3 Datos obtenidos con el equipo	Pág.6.10
6.3.4 Interpretación de datos	Pág.6.21
Estudio metrológico	Pág.6.21
Representación en 2D	Pág.6.22
Reglas para las cúpulas	Pág.6.29
Índice de figuras	Pág.6.31

CAPÍTULO III ESTEREOTOMÍA

7 ≡ Estereotomía

7.1 Introducción	Pág.7.1
7.2. El material	Pág.7.1
7.2.1. Canteras y origen de los materiales	Pág.7.2
Descripción macroscópica	Pág.7.4
7.2.2. Técnicas analíticas y muestreo	Pág.7.5
· Ensayo a compresión uniaxial	Pág.7.5
· Balanza hidrostática	Pág.7.8
· Ultrasonidos	Pág.7.10
7.2.3. Otras propiedades	Pág.7.11
7.3. La técnica de la cantería. Obtención de las dovelas	Pág.7.12
7.4. Interpretación de los datos	Pág.7.17
Índice de figuras	Pág.7.21

CAPÍTULO IV PROCESO CONSTRUCTIVO

8 ≡ Proceso constructivo

8.1 Antecedentes. Sistemas constructivos	Pág.8.1
· Época Nazarí	Pág.8.1
· Época de la Reconquista. XVI-XVII	Pág.8.1
· Época XVII-XVIII	Pág.8.2
8.2. Proceso constructivo. El Cuerpo Cilíndrico	Pág.8.3
8.3 Proceso constructivo. La Cúpula	Pág.8.4
8.3.1. Uso de estructuras auxiliares en la construcción de cúpulas históricas	Pág.8.5
Uso de andamios sin necesidad de cimbras: Santa María del Fiore de Florencia	Pág.8.5
Uso de cimbras. San Pedro de Roma.	Pág.8.7
8.3.2 Hipótesis sobre el uso de sistemas auxiliares en la construcción de la cúpula semiesférica de la Iglesia de Montefrío	Pág.8.10
8.3.2.1. Hipótesis del uso de andamios sin necesidad de cimbras	Pág.8.12
8.3.2. 2.Hipótesis del uso de andamios usando cimbras	Pág.8.18
8.4. Construcción actual de una cúpula de piedra. Global Vipassana Pagoda	Pág.8.20
Índice de figuras	Pág.8.23

CAPÍTULO V ESTABILIDAD DEL TEMPLO

9 ≡ Estabilidad del templo

9.0 Introducción	Pág.9.1
9.1 Antecedentes históricos	Pág.9.1
9.1.1 Método de cálculo	Pág.9.3
9.1.2. Ensayos de Barlow	Pág.9.4
9.1.3. Funcionamiento de un arco	Pág.9.5
9.2 Teoremas fundamentales del análisis límite. Análisis a rotura	Pág.9.7
9.3. Comportamiento estructural de las Cúpulas. Asimilación a arcos	Pág.9.11
9.3. 1. Antecedentes	Pág.9.11
9.3.2. Método de los cortes	Pág.9.12
9.4 Estudio de la línea de empujes en cúpulas históricas	Pág.9.14
San Pedro de Roma XVII (42.59m)	Pág.9.14
Cúpula de Santa María del Fiore (41m)	Pág.9.16
Cúpula Gol Gumbaz (39m)	Pág.9.17
Cúpula idealizada según la regla de Fontana (1638-1714)	Pág.9.18
9.5. Estimación práctica del coeficiente geométrico de seguridad en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Método de los cortes	Pág.9.19
9.5.1. Hipótesis	Pág.9.19
9.6. Método de análisis de membrana	Pág.9.40
9.7. Estudio de la línea de empujes en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Análisis de Membrana	Pág.9.47
9.8. Conclusiones del estudio de la línea de empujes en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío	Pág.9.53
9.8.1. Estudio de la cúpula haciéndola semejante a los arcos	Pág.9.53
9.8.2. Estudio de la cúpula interpretada como membrana	Pág.9.54

9.9. Posibles líneas de investigación	Pág.9.55	≡ Anexo II. Documentos de Archivos	
Índice de figuras	Pág.9.56	Anexo II. A - Documento de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando	Pág.1
Índice de tablas	Pág.9.58	Anexo II. B - Contrato de compra de cuatro casas para en su lugar construir la iglesia de la Encarnación de Montefrío	Pág.2
≡ Anexo I. Dossier de cúpulas citadas		Anexo II. C - Contrato subasta de la piedra	Pág.3
Panteón de Agripa	Pág.2	Anexo II. D - Porte de la piedra	Pág.4
Santa Sofía	Pág.3	Anexo II. E - Subasta de la obra de herrería	Pág.5
Cúpula de La Roca	Pág.4	≡ Bibliografía	
Cúpula de Santa María de Fiore	Pág.5		
Basílica San Pedro del Vaticano	Pág.6		
Iglesia Il Gesù	Pág.7		
Iglesia de San Justo y Pastor	Pág.8		
Monasterio del Escorial	Pág.9		
Colegio del Cardenal Monforte	Pág.10		
Gol Gumbaz	Pág.11		
Catedral de San Pablo	Pág.12		
Santuario de Loyola	Pág.13		
San Francisco el Grande	Pág.14		
Iglesia de Saint Genevieve. Panteón de París	Pág.15		
Parroquia de San Joaquín, Escolapios	Pág.16		
Capitolio	Pág.17		
Nuestra Señora de la Asunción	Pág.18		
Global Vipassana Pagoda	Pág.19		

1	≡	Introducción.	1
1.1.		Presentación del Trabajo Fin de Máster.	1
	·	Objetivos.	1
	·	Objeto de estudio.	1
	·	Ámbito de estudio.	2
	·	Metodología. Convenios utilizados.	2
1.2		Marco Geofísico.	3
	·	Geografía.	3
	·	Topografía.	4
	·	Geología.	4
	·	Estructura litológica:	4
	·	Hidrografía.	6
	·	Clima.	6
	·	Comunicaciones.	6
1.3.		P.G.O.U: Estructura general del Municipio.	7
1.4.		P.G.O.U: Catalogación.	8
		INDICE DE FIGURAS.	9

» 1 Introducción.

1.1. Presentación del Trabajo Fin de Máster.

· Objetivos.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es el estudio del comportamiento estructural de la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío, Granada, así como el análisis constructivo.

Mi tutor Dr. D. Javier Suárez Medina propone hacer el estudio de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío ya que tiene tres originalidades:

1.- Administrativo. La construcción será una de las primeras en ser financiadas por la Corona. Bajo el “patronato regio” retomado por el Concordato de 1753 y por Real Cédula de 1773.

2.- Técnica empleada en la estereotomía. Se estudian tratados y modelos para el despiece de cúpulas anteriores para el entendimiento de la de Montefrío, ya que la información relativa a esta iglesia se perdió durante la guerra civil (1936-1939).

3.- Gran tamaño y proporciones levantado en piedra. Conocer su funcionamiento mecánico según la Moderna Teoría de Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, para analizar su grado de seguridad y estudiar los movimientos que ha sufrido.

Todo esto bajo la toma de datos que es posible disponer:

- Bibliografía.
- Aparatos de medición. Escáner y fotogrametría.
- Documentación Original existente de Archivos.
- Laboratorios. Estudio de las características de la piedra.

La iglesia constituye el ejemplo por excelencia del neoclásico en el Reino de Granada ya que se proyecta y ejecuta entre 1786 y 1802 en pleno auge de las ideas de la ilustración.

· Objeto de estudio.

Para entender lo que implica y significa la iglesia de la Encarnación de Montefrío, necesitamos plantearnos cuestiones relacionadas con su situación geográfica, su contexto histórico, el conjunto de agentes intervinientes en el proceso de proyección de sus trazas y la evolución del sistema constructivo utilizado en su época.



Figura 1.1. Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Fuente: Javier Felipe Jiménez¹

· Estudiamos el entorno geológico y físico para entender las características que influyen en el asentamiento del lugar y comprender el uso racional del material a utilizar en la construcción de la iglesia.

· Estudiamos la historia socio-política y religiosa de mediados del XVIII, retrotrayendo en ocasiones hasta el XIV para poder entender los hechos sucedidos durante la época de construcción de la iglesia.

¹ JIMÉNEZ, Javier Felipe (2008): Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado. www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

· Estudiamos a los protagonistas de la elaboración del proyecto y su ejecución ya que las situaciones personales vividas siempre entraran a formar parte de la vida del edificio que se construye.

· Estudiamos las construcciones coetáneas a la iglesia de la Encarnación y entendemos que esta es solo un eslabón más de la cadena evolutiva de la historia de la arquitectura.

· Finalmente hacemos la inmersión en el estudio de la iglesia teniendo una visión general de los factores que intervienen en cada una de las partes señaladas:

- .- Estudio geométrico. Trazas y despiece.
- .- Estudio del sistema constructivo.
- .- Estudio de la deformación que sufre.
- .- Estudio del comportamiento mecánico.
- .- Anexos de la documentación original encontrada.
- .- Bibliografía.

· Ámbito de estudio.

Para realizar este trabajo se ha estudiado la caracterización del material utilizado en la iglesia. Entre ellas, las características mecánicas y mineralógicas de la piedra utilizada en su construcción.

Se estudia las posibles fases de construcción de la cúpula, proponiendo una hipótesis de sistema auxiliar que se pudieron utilizar ya que, aunque algún autor propone que es autoportante, esta cúpula debió utilizar algún tipo de andamiaje para llevar a cabo su construcción.

En este aspecto se ha consultado los diferentes archivos existentes:

· El Archivo del Arzobispado de Granada situado en el Seminario Mayor donde se consultan los protocolos de 1790-1792 y 1786-1789 sin resultado satisfactorio.

· El Archivo de Protocolos de Montefrío situado en C/ San Jerónimo, 50 se ha consultado los protocolos de 1786-1789 (viviendas: pág. 33-35; 294-300; 329-330;

647-648; Cantera: pág. 693-695) y 1790 y se han localizado contratos de compra-venta de materiales, que pueden darnos idea de las fases constructivas.

Para el estudio del despiece solo disponemos del despiece interior ya que desde el exterior, la cúpula está protegida por paños de tejas y no dejan posibilidad a analizar su despiece exterior. Así que el despiece realizado se basa en los datos obtenidos por ortofotos y en hipótesis basadas en estudios bibliográficos de otras cúpulas.

Para el estudio del tipo de sistema auxiliar que se debió utilizar no se han conseguido datos en documentos originales que deberían realizarse durante la ejecución de obra por lo que se planteará una especulación teórica basada en el sistema auxiliar habitual de la época consultando bibliografía.

· Metodología. Convenios utilizados.

Dibujo.

Todos los dibujos realizados por elaboración propia van acompañados por su escala gráfica en el sistema de unidades internacional y también viene expresado en varas, la unidad de medición de la época en la que se construyó.

La metodología empleada se ha articulado alrededor de dos líneas de trabajo.

Por una parte se ha realizado un estudio del contexto histórico-cultural en la que se inserta esta obra que nos permitirá comprender y analizar la influencia de las distintas corrientes europeas.

Por otra parte se pretende realizar un análisis geométrico, constructivo y estructural de esta cúpula pétreo, mediante la aplicación del análisis plástico utilizando la metodología desarrollada por el ingeniero civil y catedrático de la Universidad de Cambridge Jaques Heyman basado en el método de los cortes. Se trata de verificar el teorema de seguridad, en el cálculo de análisis límite de fábricas, enunciado por el profesor Heyman, para el cual será necesario el cálculo gráfico de la línea de empujes que se encuentra en el interior del contorno de la sección, es decir, entre el trasdós y el intradós de la cúpula.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

1.2 Marco Geofísico.

Montefrío se ubica en la zona noroccidental de la provincia de Granada, en la denominada comarca de Los Montes Occidentales.

El núcleo urbano se asienta entre dos tajos enfrentados y dos barrancos con sus respectivos arroyuelos. Fue declarado Conjunto Histórico-Artístico Nacional en 1982.



Figura 1.2. Montefrío. Vista sureste. Fuente: Antonio Arenas Mestre²

· Geografía

Al norte limita con los términos municipales de Priego de Córdoba y Almedinilla (Córdoba) y Alcalá la Real (Jaén); por el sudeste con Illora, por el sur con Villanueva

² ARENAS, Antonio (2005): *El poniente granadino. Granada en tus manos. Nº4*. Granada: Ideal: Diputación de Granada.

http://www.gradanatural.com/ficha_paisajes.php?cod=147

Mesía y Tocón; por el suroeste con Loja, Zagra y Algarinejo, estos últimos pertenecientes a la provincia de Granada.

Su término municipal ocupa unos 254 km² y tiene una densidad de 25.37 hab/km². Sus coordenadas geográficas son 37°19' N, 04°01' O. Se encuentra situado a una altitud de 834 msnm y a 57 km de la capital de provincia, Granada en dirección NO, junto a la carretera A-335.

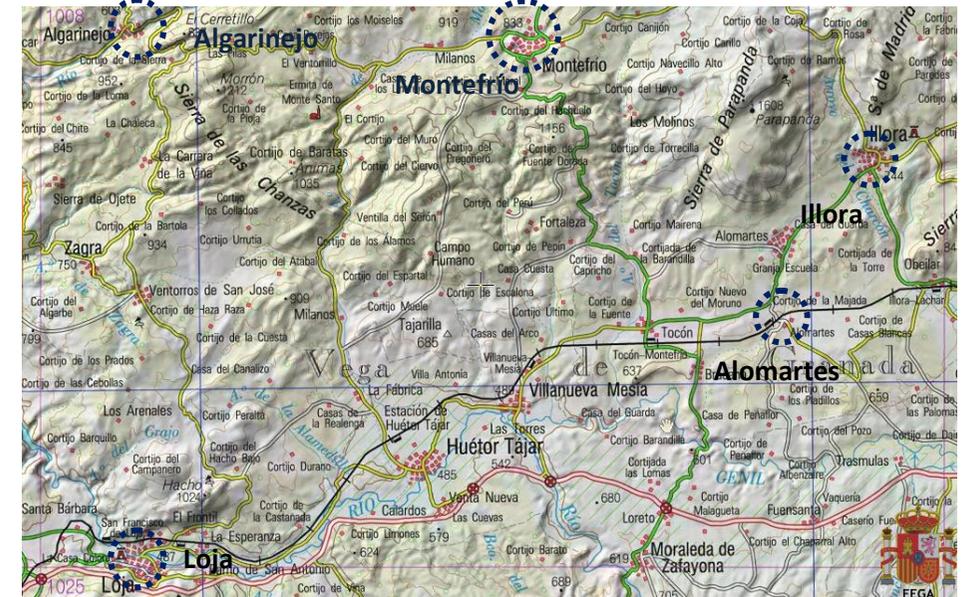


Figura 1.3. Mapa físico. Fuente: Sigpac³

Actualmente la población de Montefrío es de 6054 habitantes⁴. Esta cifra alcanzaba los 15.000 habitantes en 1971.

³ Sistema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas <http://sigpac.mapa.es/feqa/visor/>

⁴ Instituto Nacional de Estadística. http://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaAvanzada&entidad_amb=no&codProv=18&codMuni=135&codEC=0&codES=0&codNUC=0&L=0

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

· Topografía.

La topografía se caracteriza por un relieve quebrado y montañoso, dentro del sector central de las Cordilleras Béticas.

Destacan formaciones de rocas blandas, fundamentalmente margas y margocalizas, pobladas de olivares y secanos cerealistas. Algunas sierras superan los 1000 m, como la Sierra de Chanzas (1213 m) o la Sierra de Montefrío (1154 m).

· Geología.

El municipio está incluido en el Sistema Bético, dentro del dominio del subbético medio, caracterizado por materiales margosos, así como por areniscas, además de la presencia de dolomías, distintos tipos de calizas, arcillas y rocas ígneas o volcánicas.

· Estructura litológica:

Zona Neógenos y Cuaternarios

Unidad Depresiones Postorogénicas (Depresiones postorogénicas que forman un gran pasillo o corredor entre las zonas externas (Prebético y Subbético) y las internas (Bético sensu stricto) de las cordilleras Béticas.

Estructuralmente son grandes pliegues sinclinales postorogénicos, formados a finales del Mioceno y rellenos de depósitos. Geográficamente corresponden a las depresiones de Guadix y Baza, Granada, Ronda y Antequera)

Litología Sedimentos miopliocénicos.

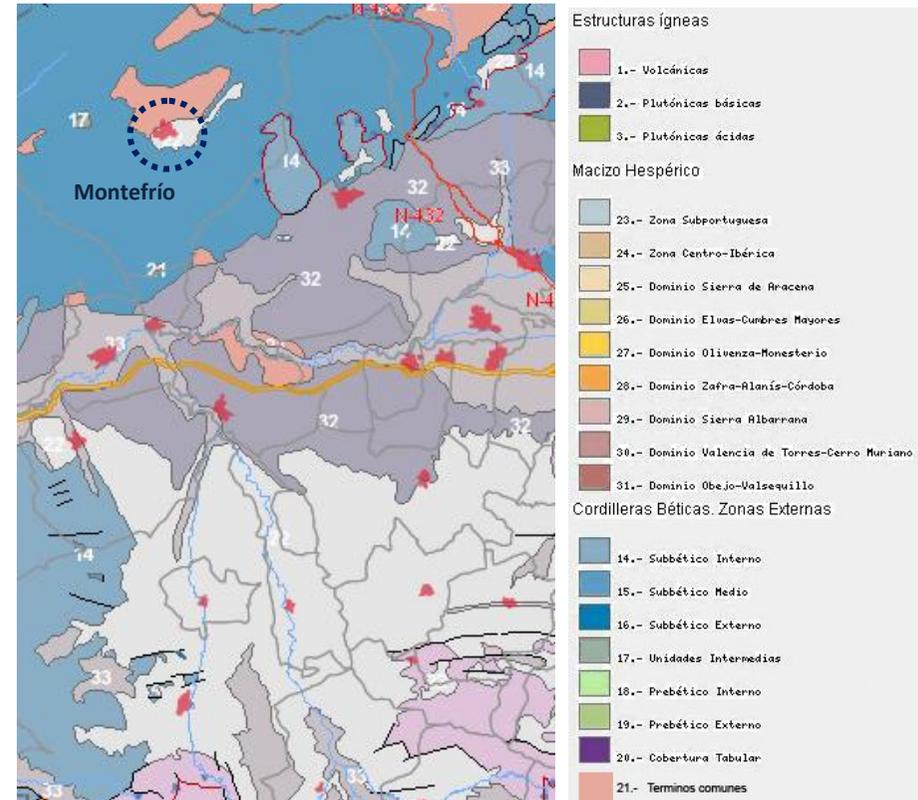
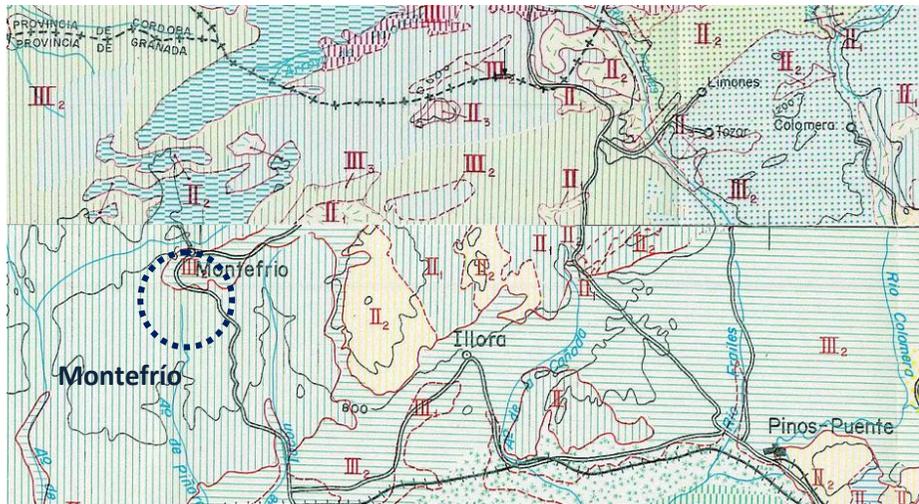


Figura 1.4. Mapa Geológico. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.⁵

⁵Consejería de medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Mapa Geológico de Andalucía. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=c1bc9cd553ff9210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=cff5d61d8470f210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es#subapartado91bc9cd553ff9210VgnVCM2000000624e50a

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.



III₂: Unidades Béticas Externas. Formas de Relieve acusadas.

Los grupos de rocas que incluyen son calizas y margocalizas, gravas silíceas, dolomías, calizas dolomíticas y eventuales niveles de margas. Su resistencia a la erosión es aceptable, pero actúa de forma selectiva, sobre todo en las zonas de contacto con otras áreas.

Su morfología es muy variada, abundando las formas abruptas con pendientes casi siempre superiores al 15%, pero, en general, con buena estabilidad natural.

Sus materiales se consideran impermeables admitiendo, en grande, una cierta permeabilidad con drenaje que oscila entre aceptable y favorable, por escorrentía.

Es posible la aparición de bolsadas de agua, pero de reducida extensión y caudal. Sus terrenos admiten cargas de magnitud elevada, no produciendo asentamientos, pero sí problemas mecánicos puntuales debidos a la alternancia litológica y a la existencia de algunos niveles margosos muy alterados y de baja resistencia portante.



Condiciones constructivas aceptables. Problemas de tipo Geomorfológico, Geotécnico y Litológico.

Figura 1.5. Mapa geotécnico. Instituto Geológico y Minero de España (1973)⁶.

⁶ Instituto Geológico y Minero de España (1973) E: 1/200.000.

http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/datos/Geotecnico_200/jpg/editado_geo_tecnico200_83.jpg

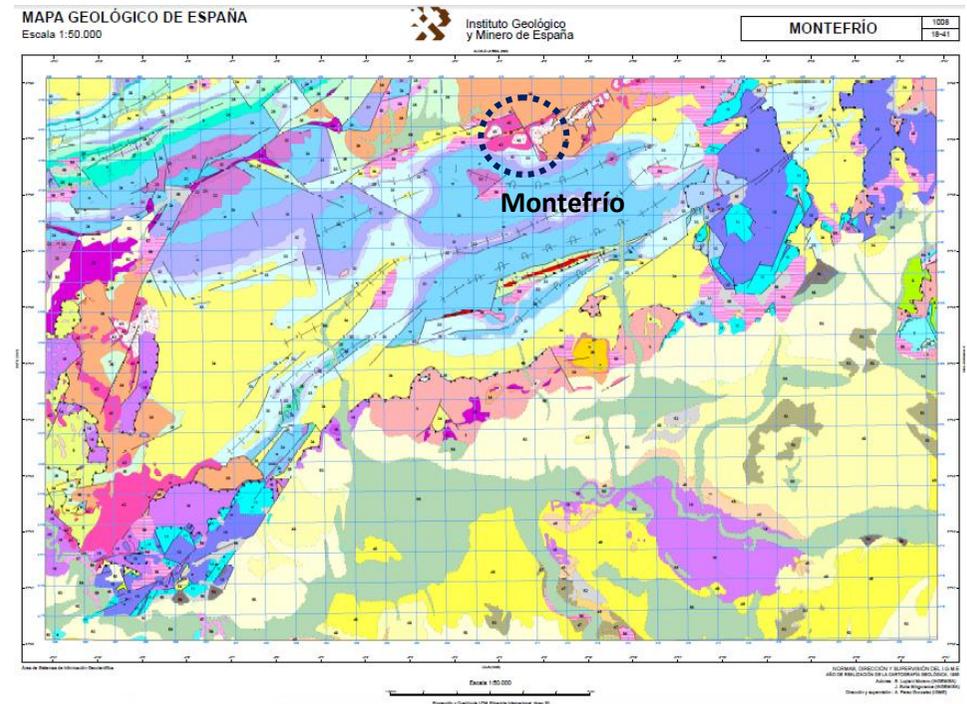


Figura 1.6. Mapa geotécnico. Instituto Geológico y Minero de España (1985)⁷.

⁷ Instituto Geológico y Minero de España, (1985) E: 1/50.000.

<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50digital.asp?hoja=1008&bis>

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

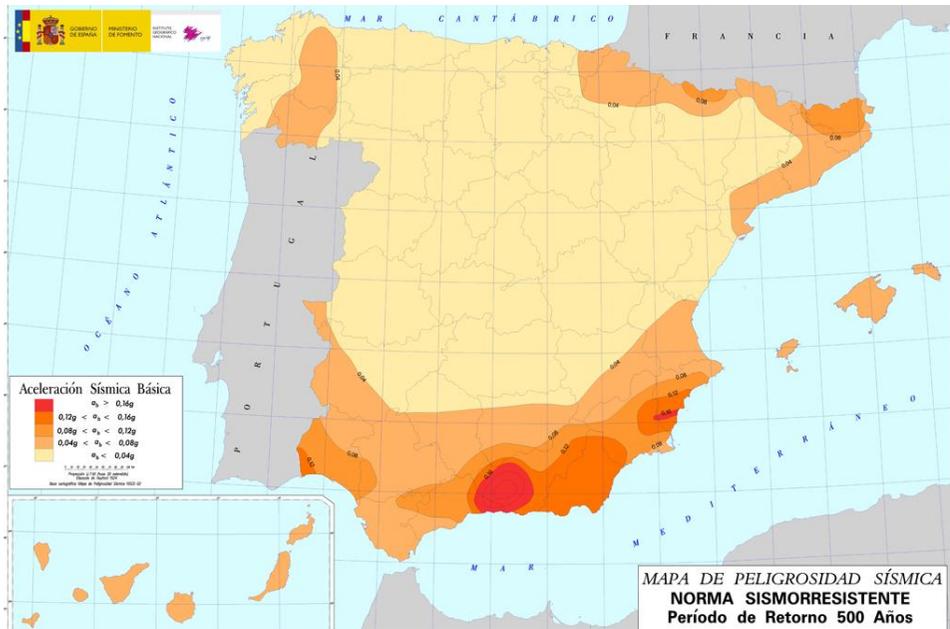


Figura 1.7. Mapa de peligrosidad sísmica de España en valores de aceleración.⁸

Según la NCSE-02 la peligrosidad sísmica del territorio nacional se define por medio del mapa de peligrosidad sísmica anterior. Dicho mapa suministra, expresada en relación al valor de la gravedad, g , la aceleración sísmica básica, a_b –un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno- y el coeficiente de contribución K , que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto.

En nuestro caso: Montefrío tiene: $a_b=0.15$ y $K=1$

⁸ Instituto Geográfico Nacional

[http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoDetalleMapasSismicos.do?mapa=peligrosidadaceleraciones_peq.jpg&titulo=Mapa%20de%20peligrosidad%20s%EDsmica%20de%20Espa%F1a%20\(en%20valores%20de%20aceleraci%F3n\)&leyenda=no&mapabig=peligrosidadaceleraciones.jpg](http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoDetalleMapasSismicos.do?mapa=peligrosidadaceleraciones_peq.jpg&titulo=Mapa%20de%20peligrosidad%20s%EDsmica%20de%20Espa%F1a%20(en%20valores%20de%20aceleraci%F3n)&leyenda=no&mapabig=peligrosidadaceleraciones.jpg)

· Hidrografía.

El término municipal está bañado por cuatro arroyos principales:

- Arroyo de Turca, que nace en la loma de Gachas y Marcos y vierte sus aguas en el término de Algarinejo.
- Arroyo de Milanos, nacido en Montesanto, discurre por tierras de Loja y desemboca en el Genil por tierras de Huétor Tájar.
- Arroyo de los pinares, que nace en el cortijo Fuente Dorada y desemboca en el Genil por tierras de Villanueva Mesía.
- Arroyo de los Molinos, que riega la vertiente occidental de la Sierra de Parapanda y se une al arroyo de Tocón para desembocar en el Genil por el término de Íllora.

· Clima.

El clima de Montefrío es de tipo mediterráneo con rasgos continentales. Inviernos lluviosos, aunque no especialmente fríos y veranos calurosos y secos. Otoños y primaveras suaves y poco lluviosas. Según un estudio de la Diputación de Granada, realizado a principios de la década de los 90, entre tres lugares bien definidos (Cortijo de Tara, Lojilla y Montefrío), se desprenden los siguientes datos:

- Pluviometría: 631,4 mm
- Temperatura Media: 15,2 °C
- Temperatura Media Mínima: 8,34 °C
- Temperatura Media Máxima: 20,44 °C

Datos que no hay que tomar al pie de la letra ya que, dentro del mismo término municipal, hay zonas con pluviometría más alta que otras. En algunas zonas si se alcanza esa media, en otras no se llega a los 500 mm al año.

· Comunicaciones.

La carretera A-335 atraviesa su término de norte a sur, desde Alcalá la Real (donde se puede enlazar con la N-432, que une Granada y Córdoba) hasta Tocón. Por el este está la NO-26 que enlaza también con la N-432 a su paso por Puerto Lope y que es el camino más corto para llegar a Granada.

Desde la A-92, por la salida de Huétor-Tájar, subiendo luego por la carretera que une ambos municipios, bordeando el arroyo de Milanos, que es la mejor opción. También

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

es posible llegar hasta Montefrío desde los pueblos vecinos de Íllora y Algarinejo, a través de carreteras locales. Sus elevaciones más importantes son: la Sierra de Parapanda con 1.604 m en el límite entre Montefrío e Íllora, y la Sierra de Chanzas con el pico del Morrón de 1.213 m entre Montefrío y Algarinejo.

1.3. P.G.O.U: Estructura general del Municipio.

A continuación se reproduce lo escrito en el Plan General de Ordenación Urbana de Montefrío:

“La ciudad de Montefrío está situada en un enclave muy característico, el terreno sobre el que se asienta se asemeja a una silla de montar, es decir, que si trazamos una línea que una las dos alturas que destacan en la ciudad –la Iglesia de la Villa y el Calvario–, dirección este-oeste obtendríamos una curvatura cóncava, y haciendo lo mismo en el punto más bajo de dicha curva, más o menos por la Iglesia de la Encarnación, y dirección norte-sur obtendríamos una curvatura inversa, y este punto (la Iglesia de la Encarnación) sería el punto más alto en esta nueva dirección, puesto que Montefrío por ambos límites (norte-sur) se halla bordeado por dos arroyos, el de Fuente Molina al norte que separa la ciudad en dos mitades y el del Puente que pasando por el paraje de La Enrea, atravesando la carretera de Tocón y bordeando los Tajos se encuentra con el anterior para desembocar en el arroyo de Milanos.

Lo que caracteriza a la ciudad de Montefrío es el gran peñón donde en la actualidad existe una Iglesia cristiana que domina toda la ciudad. Esta peña presenta un gran escarpe al este y una loma con gran pendiente y arbolada hacia el oeste. Bajo este gran escarpe de unos treinta metros de diferencia de cota en su parte más elevada, se encuentra el barrio Arrabal, el más antiguo de Montefrío. Este barrio se adapta a una de las muchas colinas que caracterizan este lugar, tiene pendientes pronunciadas en algunos puntos –los más cercanos al escarpe– y no tan pronunciadas conforme nos alejamos de él. Igual ocurre en el Calvario, el otro punto de gran altura de la ciudad, bajo él también se derraman las edificaciones en una ladera de pendientes de similares características.

Los accidentes topográficos mencionados hay que añadir los hidrológicos, la situación de los arroyos bordeando ambas colinas han supuesto claramente un factor decisivo en la forma de la ciudad.

En definitiva, las condiciones naturales del territorio han marcado y seguirán marcando el desarrollo urbano de la ciudad.

La Estructura General está formada por el conjunto de redes que articulan el territorio, tanto internamente como con otros territorios colindantes, posibilitando su uso y explotación y al conjunto de nodos (asentamientos) donde se concentran la población y las actividades.”

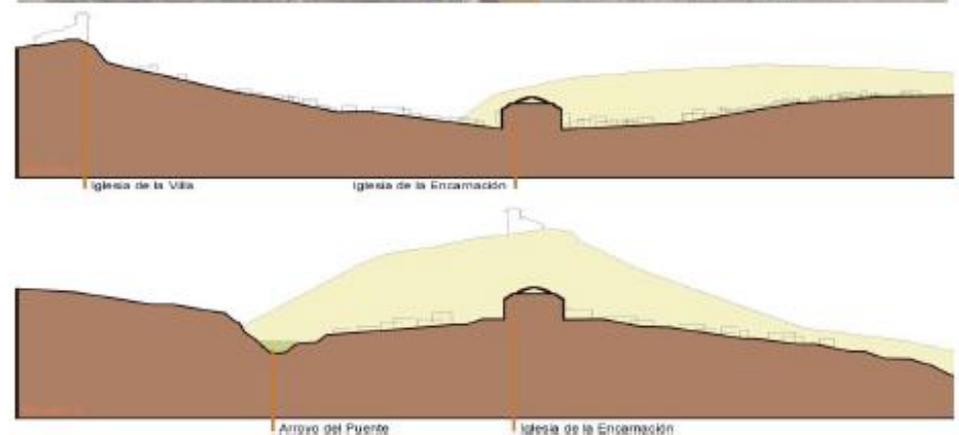


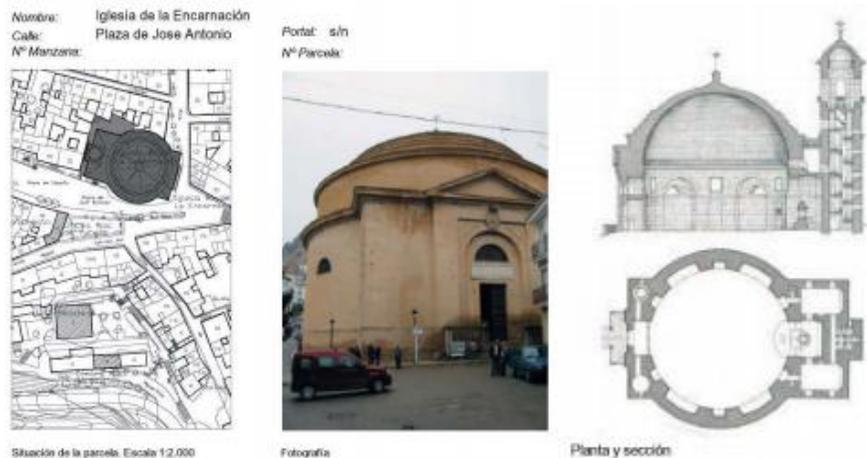
Figura 1.8. P.G.O.U. Estructura General del Municipio (2012)⁹.

⁹ GR ARQUITECTOS (2012): *Plan General de Ordenación Urbana*. Ayuntamiento de Montefrío.

1.4. P.G.O.U: Catalogación.

Valor Monumental: Según la Ley de Patrimonio Histórico Español 16/85 Artículo 15 Punto 1º “Son Monumentos aquellos bienes inmuebles que constituyen realizaciones arquitectónicas o de ingeniería, u obras de escultura colosal siempre que tengan interés histórico, artístico, científico o social” Ley de Patrimonio Histórico de Andalucía 14/2007 Artículo 26 Punto 1º “Son Monumentos los edificios y estructuras de relevante interés histórico, arqueológico, paleontológico, artístico, etnológico, industrial, científico, social o técnico, con inclusión de los muebles, instalaciones y accesorios que expresamente se señalen”. En este Nivel se protege el conjunto integral de la edificación, con especial respeto de sus características singulares y los elementos que la componen. Los tipos de intervenciones permitidas genéricamente para este nivel serán las obras de conservación, restauración y rehabilitación, y en cualquier caso en la previa autorización de la

Consejería de Cultura.



Específicamente en los edificios de Valor Monumental declarados o incoados Bien de Interés Cultural (B.I.C.), las intervenciones permitidas será aquellas que recoge el Art. 39 de la L.P.H.E y el Título III de la L.P.H.A.

Figura 1.9. Gráfico y Texto extraído del P.G.O.U. de Montefrío¹⁰.

¹⁰ GR ARQUITECTOS (2012): *Plan General de Ordenación Urbana*. Ayuntamiento de Montefrío.

Ficha de catalogación: <http://www.montefrio.org/impresos/tv2211.pdf>

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Fuente: Javier Felipe Jiménez	1
Figura 1.2. Montefrío. Vista sureste. Fuente: Antonio Arenas Mestre	3
Figura 1.3. Mapa físico. Fuente: Sigpac.....	3
Figura 1.4. Mapa Geológico. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.	4
Figura 1.5. Mapa geotécnico. Instituto Geológico y Minero de España (1973).	5
Figura 1.6. Mapa geotécnico. Instituto Geológico y Minero de España (1985).	5
Figura 1.7. Mapa de peligrosidad sísmica de España en valores de aceleración.	6
Figura 1.8. P.G.O.U. Estructura General del Municipio (2012).	7
Figura 1.9. Gráfico y Texto extraído del P.G.O.U. de Montefrío.	8

2	≡	Antecedentes históricos.....	1
2.1		Ocupación del territorio. Periodo antes de la Reconquista.	1
2.2		Encuadre Social-Político y Político-Religioso. Después de la Reconquista.	2
2.2.1		Siglo XV-XVI	2
2.2.1.2		Voluntad política y religiosa.	4
2.2.2		Siglo XVII-XVIII	4
2.2.2.1		Situación civil.	4
2.2.2.2		Voluntad política y religiosa.	6
		INDICE DE FIGURAS	9

» 2 ≡ Antecedentes históricos.

2.1 Ocupación del territorio. Periodo antes de la Reconquista.

Son las características geográficas tan singulares de Montefrío lo que hace de él un asentamiento ancestral. Desde la época romana y la árabe, este lugar era muy apreciado gracias al pasadizo natural que conforman las dos grandes rocas cortadas verticalmente¹¹.

Es esta situación particular la que hace de Montefrío un lugar estratégico para la dominación del territorio a lo largo de los tiempos, muy valorado por todas las culturas que han ejercido su poder sobre la zona.

Entre las diferentes culturas de las que se tienen referencia quedan restos arqueológicos anteriores a la construcción del castillo nazarí (Batalla del Salado, 1340)¹¹.

La dominación musulmana surgida de la Batalla del Salado hace que se construya el castillo musulmán en la parte más alta de la zona.

Su situación estratégica, sobre una roca, se hace con la intención de formar parte de un cordón defensivo donde se incluían torres vigía para defenderse de los ataques de las tropas cristianas¹².

El territorio donde se sitúa Montefrío, está formado por los macizos montañosos de la cordillera subbética. Además de pasadizo de defensa, es la entrada a la vega de Granada en la depresión del sistema bético.

¹¹ PEDREGOSA, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazarí de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana*. Granada: Revista del CEHGR-núm. 24-2012-págs. 73-103.

¹² GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

Servía como conexión entre la vega de Granada y la alta Andalucía a través del valle del arroyo de los Molinos o de Mairena.

Esta conexión hace que el tránsito comercial fuera a través de este pasadizo por eso no es de extrañar que en la zona más elevada se ubicara la fortaleza árabe para controlar dicho paso.



Figura 2.1. Límites del reino nazarita de Granada (1232). Edad Media¹³

El castillo se dividiría en dos claros recintos, el superior con la alcazaba y el inferior, el recinto del Arrabal, ocupado por la villa. La ocupación de la villa debió estar desarrollada en terrazas y paratas formando arrabales amurallados.

Montefrío se incluye así en una de las villas fronterizas del Reino de Granada, evidenciado por la cantidad de torres y nombres, que han quedado hasta nuestros días, asociados a esta construcción militar.

¹³ RUIZ, Juan Pedro (2008): Mapa del Reino Nazarita de Granada. http://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_granada

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

En la siguiente figura queda reflejada su posible distribución:

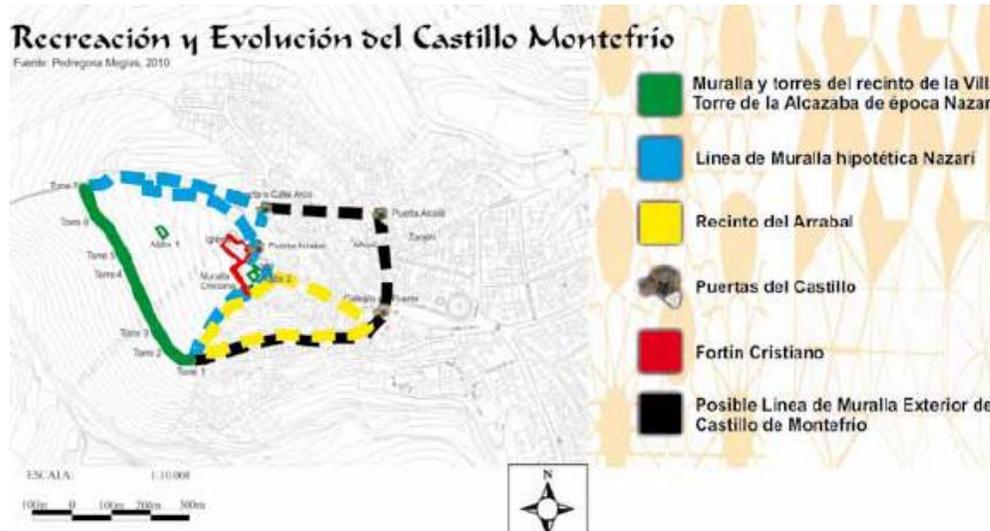


Figura 2.2. Evolución del Castillo de Montefrío¹⁴

2.2 Encuadre Social-Político y Político-Religioso. Después de la Reconquista.

Se describen a continuación los aspectos sociales, políticos y religiosos más destacables para la comprensión de la importancia de la ubicación de la nueva Iglesia de la Encarnación en Montefrío.

2.2.1 Siglo XV-XVI

2.2.1.1 Situación civil.

¹⁴ PEDREGOSA, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazarí de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana.* Granada: Revista del CEHGR-núm. 24-2012-págs. 73-103. Pag.84

Las tropas cristianas entraron en Montefrío el lunes 26 de junio de 1486¹⁵. Se consigue la reorganización de la frontera noroccidental del Reino de Granada. Controlando el pasadizo que queda entre los arroyos de Fuente Molina y de la Cruz Gorda. Una vez conquistado se inicia la expansión por la cara oriental del cerro surgiendo los barrios de Arrabal, Erillas y Solana.

El recinto militar o alcazaba y la antigua mezquita sufrirán los primeros cambios, adaptándose a las nuevas necesidades y usos de los conquistadores. Gracias a los *Libros de Repartimiento*¹⁶ se tiene información sobre la repoblación del Reino de Granada.

Se sabe que se le conceden una serie de exenciones fiscales y se realiza un reparto de casas y tierras de cultivo para fomentar la ocupación ante el vacío demográfico. Una nueva aristocracia, que con el tiempo producirá cierto recelo a la monarquía, se instala, a tenor de las facilidades que da la Corona, para mantener la población en el nuevo territorio recién conquistado.

Esta exención resultó ser una inversión, de la monarquía, encubierta por un tamiz de bonanza social¹⁷, otra inversión que hizo la monarquía fue empeñar la villa de Montefrío, para sufragar los gastos de la reconquista, al señor de Aguilar (Marqués de Priego).

El recelo entre la monarquía y la aristocracia parte justo de este empeño al dejar la gestión del sustento de la población en manos de la aristocracia a través de la jurisdicción de la Casa de Aguilar en el caso de Montefrío, que por su importancia

¹⁵ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío.* Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918.

¹⁶ PEINADO, Rafael Gerardo (1981): *Oviedo. Financiación de la Guerra y Señorialización del Reinado de Granada. Montefrío y la Casa de Aguilar.* CSIC. Base de Datos ISOC. Liño. Universidad de Oviedo, España. ISSN: 0211-2574 pág.199-220 pág. 171

¹⁷ PEINADO, Rafael Gerardo (1981): *Oviedo. Financiación de la Guerra y Señorialización del Reinado de Granada. Montefrío y la Casa de Aguilar.* CSIC. Base de Datos ISOC. Liño. Universidad de Oviedo, España. ISSN: 0211-2574 pág.199-220 pág.176

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

histórica, administrativa y económica, formaba parte de “las siete villas”¹⁴ dependientes de Granada.

Más adelante (1531)¹⁴, para volver a obtener la jurisdicción de Montefrío por el Reino de Granada, se saldó su empeño para mantener el cinturón del Reino de Granada limpio de infiltraciones señoriales¹⁴ y garantizar el abastecimiento de cereal de la ciudad de Granada.

El proceso de ocupación fue el lógico. A partir de la cumbre rocosa se va desarrollando el nuevo núcleo cristiano.

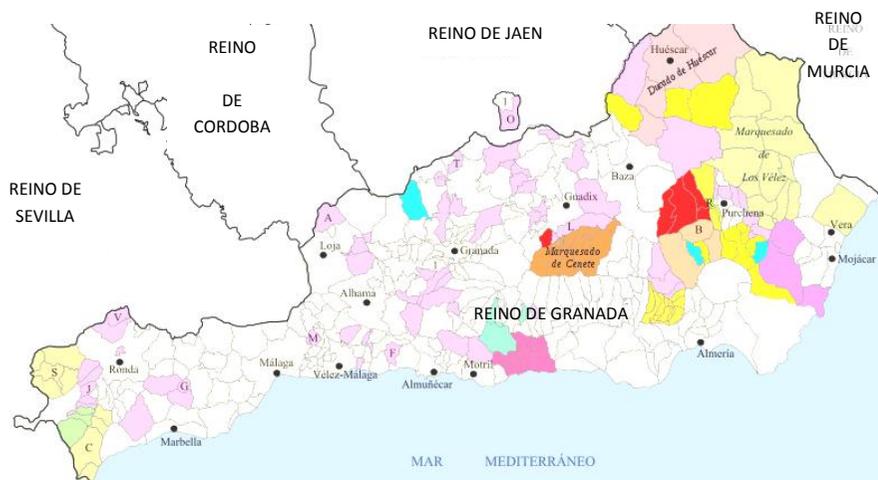


Figura 2.3. El Reino de Granada según las Respuestas Generales del Catastro de Ensenada (1750-54). Reino integrante de la Corona de Castilla, parte constituyente a su vez de España (1492-1715). Reino integrante del Reino de España (1715-1833)¹⁸

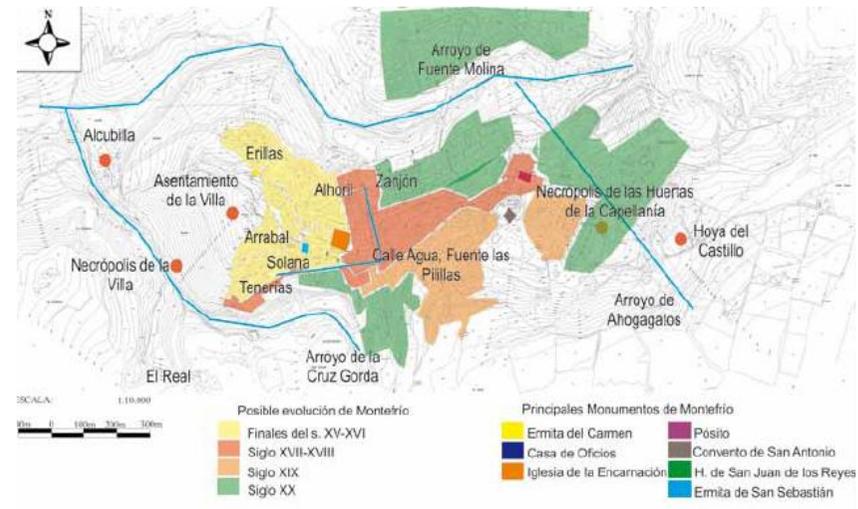
De forma progresiva se fueron levantando viviendas palaciegas dignas de los señores cercanos de los reyes al amparo, por arriba, de la muralla del castillo y, por abajo, de una segunda línea de murallas, construida por razones de seguridad dado el carácter

¹⁸ Señoríos del Reino de Granada.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Reino_de_Granada_\(Corona_de_Castilla\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Reino_de_Granada_(Corona_de_Castilla))

estratégico de este enclave en la línea fronteriza entre los reinos castellano y nazarí¹⁹.

En este mismo año, en 1531²⁰, se derribaron las murallas debido al mal estado de conservación¹⁸ lo que favoreció el crecimiento demográfico. La antigua mezquita, que estaría ubicada en la actual iglesia de Diego de Siloé, se usaba para los nuevos cultos cristianos, como se desprende de la lectura de “Las iglesias de las Siete Villas”²¹ al hacer referencia en un escrito de un albañil y carpintero refiriéndose a “obra de la media iglesia” por 1505²².



¹⁹ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

²⁰ PEDREGOSA, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazarí de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana*. Granada: Revista del CEHGR-núm. 24-2012-págs. 73-103. Pag.94

²¹ GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1989): *Las Iglesias de las siete villas*. Fundación Rodríguez-Acosta, 1989 ISBN 8440444842

²² GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

Figura 2.4. Ubicación de asentamiento, evolución y monumentos de Montefrío.²³

Esta práctica, en primer lugar, tenía un sentido simbólico, al resaltar el poder del conquistador cristiano frente al vencido musulmán; en segundo lugar, solucionar la tardanza en la construcción de los nuevos centros de culto en toda la frontera noroccidental del Reino de Granada. Será en 1540 cuando se consiga realizar el nuevo templo en la parte alta por Diego de Siloé que representa el Montefrío renacentista.

2.2.1.2 Voluntad política y religiosa.

La monarquía instaura un nuevo concepto de Estado. “Estado Moderno y mentalidad social”. Se pretende iniciar un proceso de racionalización tanto de la vida económica como social, por supuesto, a través del arte²². En este sentido, los Reyes Católicos fundaron iglesias en las villas de Illora, Montefrío, Moclín y Colomera²⁴. Nombrando a estas iglesias como Iglesia de la Virgen de la Encarnación para reafirmar el triunfo de la religión católica sobre la islámica.

La iglesia construida en Montefrío, llamada de la Villa, será el símbolo de la imposición del poder de la Iglesia triunfante, los imperativos políticos y religiosos que definen a la monarquía moderna, tras la reconquista²². La divinidad y la realeza consiguen, a través de la imagen de una nueva arquitectura, el reconocimiento de sus fieles y súbditos.

Esta imagen la consiguen reinterpretando las formas del mundo clásico, superpuesto en ocasiones a la proyectiva gótica tardomedieval, por cuestiones de prestigio

²³ PEDREGOSA, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazarí de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana*. Granada: Revista del CEHGR-núm. 24-2012-págs. 73-103. Pag.94

²⁴ PEINADO, Rafael Gerardo (1981): *Oviedo. Financiación de la Guerra y Señorialización del Reinado de Granada. Montefrío y la Casa de Aguilar*. CSIC. Base de Datos ISOC. Liño. Universidad de Oviedo, España. ISSN: 0211-2574 pág.199-220

cultural. De esta manera se generaliza un clasicismo al servicio de un arte conmemorativo que no es sino el resultado de una voluntad política²².

La relación monarquía-iglesia es muy estrecha. La monarquía pretende subordinar a la iglesia ejerciendo su control sobre ella pero a su vez la necesita debido a su autoridad sobre la masa de la población por lo que le ofrece su protección. Terminando con la expulsión de los judíos y moriscos.

2.2.2 Siglo XVII-XVIII



2.2.2.1 Situación civil.

Progresivamente se va abandonando la parte alta del asentamiento de la villa. A finales del siglo XVI se pide la construcción de una nueva iglesia en la zona llana, cuyas trazas diseñó Ambrosio de Vico, aunque no se llevó a cabo. El culto sigue celebrándose en la iglesia de Diego Siloe²⁵ hasta el siglo XVIII que se abandonaría en la antigua iglesia de Santa María de la Encarnación, tras la caída de un rayo en el año 1776²⁶ donde se trasladó temporalmente a la iglesia de San Sebastián hasta que se concluyeron las obras de la nueva iglesia de la Encarnación.

Durante este periodo se va a producir un cambio de mentalidad que influirá en práctica artística. Se pasará del catolicismo barroco, con sus formas constructivas de manera teatral para acercarse al pueblo, a un pensamiento más racional, de la mano de los sectores más cultos de la aristocracia, a semejanza de lo que estaba ocurriendo en Europa. Se quería que la evolución española se conectara con la

²⁵ EISMAN, Carmen (1989): *Diego de Siloe y la Iglesia de la “Villa” de Montefrío*. Granada: CSIC. Base de Datos ISOC. Cuadernos de Arte de la Universidad de Granada. ISSN: 0210-962X pág.39-49

²⁶ PEDREGOSA, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazarí de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana*. Granada: Revista del CEHGR-núm. 24-2012-págs. 73-103. Pag.99

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Europea sobre los modelos de unas formas clasicistas. Estas nuevas formas clasicistas será un reflejo del nuevo pensamiento “la Razón”²⁷.

Se instauran normas para acercar el conocimiento y el arte al pueblo por medio de la razón, sin dar acceso a valoraciones personales.

Se pretende así, llegar a la verdad, belleza, razón y naturaleza ya que son términos del mismo orden vistos desde ángulos diferentes. El arte debe someterse a la norma si no quiere perder su verdad objetiva, siendo riguroso y exacto, regulado y disciplinado.

Se forma así la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando²⁷ que generará un profundo cambio en las manifestaciones artísticas al basarse en los modelos ofrecidos por la antigüedad clásica.

Gracias a la emisión de reales cédulas artistas extranjeros podrían trabajar para la monarquía, impartir lecciones en la Real Academia, a la vez se encargan de detener el profundo gusto tradicional.

Se produce así la generalización de un estilo que conocemos como Neoclásico y que, como ha señalado repetidamente Fernando Chueca Goitia, se instituyó de esta manera en “el último estilo unitario de Occidente”²⁷.

Este cambio de mentalidad, el reformismo ilustrado, se refleja en la política económica.

Se emprende una regeneración económica de los enclaves rurales introduciendo nuevas medidas como: la rotura de nuevas tierras, mejora de vías de comunicación para el desarrollo del comercio interior, la realización de canales para la puesta en cultivo de tierras baldías y la instalación de fábricas para el tratamiento de los productos locales.

²⁷ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

Para llevar a cabo estas medidas era necesario impartir una educación popular y sacar así el país de su estado de postración en el que estaba.

Prueba de la política económica es la construcción de El Pósito (1780 de estilo clásico). De planta rectangular y cubierta a tres aguas, su estructura de madera se apoya en dos hileras de pilares de piedra que dividen en tres naves la gran cámara interior.

La fachada principal, en uno de los lados menores del rectángulo, es extremadamente simple, limitada a una puerta adintelada sobre la que se sitúa una cartela conmemorativa de la fecha de su ejecución y el escudo borbónico dejando constancia de la iniciativa real.

El Pósito es un almacén de grano debido al notable incremento de población que en 1786 ascendió a 5143²⁸. Creado por la Secretaría de Estado mediante un decreto de 1751 para la Superintendencia General de Pósitos²⁸.

Los pósitos realizaban funciones bancarias: por un lado, paliar los periodos de malas cosechas y por otro, eran entidades de préstamos, en especie, a los agricultores para la siembra.

Así se conseguía estabilizar los precios del pan y con los beneficios se invertían en obras públicas y mejoras educativas y sanitarias de la zona. El maestro albañil Diego Martínez de Arellano elegido por el corregidor de Granada se desplazó para tomar medidas y realizar un proyecto preliminar.

El encargo del proyecto recae en Francisco Aguado²⁸ como consecuencia de que se establece la norma en las que las obras de cierta envergadura ligadas a las instituciones dependientes del Estado borbónico, debían realizar los proyectos un arquitecto académico y aprobadas por la comisión formada por la Academia de Bellas Artes de San Fernando y era Francisco Aguado quien en ese momento dirigía las obras del nuevo templo parroquial de la Encarnación.

Una vez no era necesario su uso fue abandonado y en 1985 se destinó a usos culturales. En 1993 el arquitecto Rafael Soler presentó un nuevo proyecto para un espacio de exposiciones y salón de actos.

2.2.2.2 Voluntad política y religiosa.

Con el Concordato de 1753²⁸ se plantea la subordinación de la iglesia al poder de los reyes. El Rey podía nombrar ascensos a miembros del clero partidarios de su

²⁸ *El Concordato de 1753 fue entre Fernando VI de España (su majestad católica y Benedicto XIV (papa).*

El antecedente más inmediato está en 1737 pero no fue eficaz ya que no se cumplían los artículos que se firmaron. Retrotrayéndonos encontramos el “memorial” que en 1633 había presentado, a Roma, el rey Felipe IV en donde se reclamaba contra los abusos de la intervención papal en el interior de la Monarquía Católica.

El Concordato de 1753 es la reivindicación por parte de la Monarquía española de extender a todos sus dominios el Patronato Regio concedido por el papa en tiempos de los Reyes Católicos.

Por una bula del papa Alejandro VI, de 5 de junio de 1500, a los Reyes Católicos se les otorgó el Patronato Regio (1508-1523) que les concedía a los monarcas el control de la Inquisición, el derecho de nombrar a los obispos y proveer los beneficios eclesiásticos en el Reino de Granada, las islas Canarias y el Imperio de Las Indias. Estos privilegios también los obtuvieron reyes de Francia por 1516 y los de Portugal en 1506.

El origen está en la desintegración del Imperio Romano. La situación es: distintos reinos enfrentados bajo una misma creencia religiosa. En este caldo de cultivo, los pontífices resuelven las disputas entre reinos nombrando las líneas sucesorias de los reyes naciendo el concepto de que el poder real tiene su origen divino y que la iglesia nombraba a los reyes bajo voluntad divina. Conforme los reyes incrementan sus recursos económicos y militares, adquieren importancia y con el paso del tiempo la autoridad papal se reduce en aquellos territorios que les queda más alejados de Roma. Así que en este tiempo los reyes se convierten en los brazos ejecutores de las órdenes, instrucciones y medidas de gobierno ordinario de la Iglesia. La situación beneficia a ambas partes, la iglesia no puede atender desde la lejana Roma todas las necesidades ni evaluar de forma conveniente cada una de las decisiones, ejemplo, ante la sustitución de un determinado obispo, así los monarcas amplían su poder, y a su soberanía por imperio de la fuerza añaden, no ya la bendición de la Iglesia, sino que ellos mismos reciben la autorización eclesiástica para tomar decisiones que incumben al Papado. Este momento histórico, que no está definido para toda Europa en un mismo periodo, sino que varía según los Estados, es el conocido como del Derecho de Patronato.

política que serían tildados como jansenistas (El jansenismo fue un movimiento religioso de la iglesia católica proveniente del clero europeo comprometidos con la reforma ilustrada y opuestos a la Compañía de Jesús, que finalmente fueron expulsados del reino en 1767 acusados de instigadores contra el poder real. Tenían voto de obediencia absoluta al Papa). De esta manera el gobierno pasa a tener la función de subvencionar trabajos de consolidación de edificios y a plantear nuevas construcciones por estrictas necesidades culturales de la población y a solicitud de estas.

El cambio de la arquitectura religiosa del siglo XVIII, se debe no solo a nueva estética sino también al nuevo entendimiento de la religiosidad.

Al llegar a España las ideas jansenistas, se tiende a una religión más racional y en consonancia con su época. Esta vertiente jansenista estará al lado de la monarquía mediante el regalismo borbónico y estará en contra de la disipación moral del clero por su posesión de tierras “manos muerta”²⁹ que no revertían en el pueblo. De igual manera las ideas jansenistas³⁰ están en contra de los jesuitas.

El Papa se negó a reconocer en el Concordato de 1753 el Patronato Universal como una regalía, derechos de los soberanos sobre la iglesia, de la Corona, pero aceptó el dominio de la Corona sobre los beneficios eclesiástico, lo que suponía el reconocimiento de hecho del Patronato Universal. El papa no aceptó otras para dejar claro que el gesto de ceder una regalía se debía más a una gracia del papa con la corona más que una obligación, histórica, que tenía que cumplir.

De esta manera se alcanzó, según Mestre y Pérez García, el mayor triunfo del regalismo español.

²⁹ “Manos muertas” ni pagaban tributos por la compra de tierras ni por los beneficios que generaban las tierras que poseían. Además no las podían vender lo que llegó a darse la situación de que la iglesia poseía hasta el 40% de las tierras.

³⁰ La orientación regalista se encauzó, influido Carlos III por Tanucci y el denominado “Partido Jansenista” hacia asuntos económicos muy sustanciosos:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Hasta de la expulsión de los jesuitas los núcleos rurales estaban desatendidos, así que la intervención real para atender las reiteradas peticiones de una nueva construcción para la Iglesia de la Encarnación tendrá un papel muy importante sobre la reputación del monarca entre sus súbditos. Los nuevos templos, amparados por el monarca, venían de este modo a convertirse en el más efectivo y contundente sistema de propaganda política³¹.

A su vez a la iglesia, como institución, le convenía aceptar las ideas de racionalidad y rigorismo para que se mantuvieran sus construcciones.

Así que ahora, el Rey decidía sobre las obras de las nuevas iglesias obligando al cumplimiento de unas normas que salvaguardan el nuevo pensamiento de la razón.

Es mediante la Real Cédula de 21 de octubre de 1773 y Circular de 25 de noviembre de 1777³², que se obliga al arzobispo y obispos del Reino de Granada a someter a la

1.- El Expediente sobre amortización eclesiástica inspirado en el texto de Campomanes (Pedro Rodríguez Campomanes-Ministro de Hacienda en 1760 en el primer gobierno reformista de Carlos III) "Tratado de las Regalías de Amortización" (1765)

2.- La reforma del excusado (teóricamente el diezmo del mayor contribuyente de cada parroquia), que consiguió ascender el pago general acordado con el clero por este concepto de 250 000 a 900 000 ducados, en vista de la posibilidad de que el estado se pusiera a cobrarlo efectivamente

3.- Distintas disposiciones que afectaban al clero regular: Prohibición de cuestaciones - limosnas- a excepción de los franciscanos, mercedarios y trinitarios; prohibición de ocupaciones temporales a los monjes, 1767; ajuste del número de religiosos de cada convento a sus ingresos, 1770.

³¹ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

³² TORRES PÉREZ, José María (1996): *Un Proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. CSIC. Base de Datos ISOC. Academia. ISSN: 0567-560X pág.333-357 (pág. 335)

aprobación del Consejo de Castilla³³ los proyectos y justificación de las obras de arquitectura, escultura y retablos para las iglesias de sus diócesis. Y la circular comunicaba a todos los caballeros, obispos y preladados que estaban obligados a consultar cualquier obra con la Academia de San Fernando.

La financiación³⁴ de estas obras protegidas por la corona era por los arbitrios (tasas, diezmos) que el rey cobraba a las iglesias y conventos entre otros que el Consejo de la Cámara³⁵ les imponía (amortización de Camponanes³⁰), y que eran destinado para la rehabilitación o construcción de nuevas iglesias.

El 14 de diciembre de 1788 muere Carlos III. Le sucede Carlos IV

En el reinado de Carlos IV se produjo el intento más extremado de política regalista, primero con la embajada en Roma (1797) y después con el decreto de Urquijo (Redactado en 1799 aprovechando las circunstancias producidas por la vacante en la sede vaticana ya que murió el papa Pio VI. Fue revocado en 1800 y retirado tras la proclamación del nuevo Papa Pio VII). Urquijo fue obligado a abandonar la corte por los rumores – intriga urdida por Godoy, el nuncio Filippo Casoni y el propio Papa Pio VII- de que, con sus actuaciones, ponía en peligro a la monarquía.

Mientras tanto en Europa, el 21 de enero de 1793 Luis XVI moría en la guillotina.

³⁴ MONTES, Carlos (2003): *Ventura Rodríguez y la capilla de San Pedro de Alcántara*. CSIC. Base de Datos ISOC. EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica. Universidad de Valladolid. ISSN: 1133-6137 nº7-8 págs.11-23

³⁵ *Todos los expedientes y solicitudes de obras deben necesariamente ser tramitados a través del arzobispo y el presidente de la Chancillería hacia la cámara de Castilla quien a su vez enviaba los proyectos a la Academia de Bellas Artes de San Fernando antes de otorgar la correspondiente autorización que pudiera dar inicio a los trabajos. La cámara ejercía un control directo sobre los correspondientes decimales de fábricas de iglesias ya que a estas correspondía emplear la cuarta decimal de los diezmos en las obras de reparación o construcción de sus edificios.*

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

El 22 de julio de 1795 España y Francia firman la Paz de Basilea por el que Francia se retira de Cataluña, Navarra y País Vasco a cambio de la isla de Santo Domingo y ciertas ventajas económicas.

En 1808 se produce el motín de Aranjuez en respuesta al tratado de Fontainebleau firmado el 27 de octubre de 1807 por el que España dejaba paso a la tropa francesa hacia Portugal pasando por tierras españolas.

Finalmente en 1814 termina la guerra de la Independencia (1808-18014).

Así, se acaba de describir el periodo histórico en el que se construyó la Iglesia de la Encarnación (1786-1802). Toda obra es fruto de la situación histórica-artística-social y religiosa del momento en que se concibe y canalizada por quien sintetiza la época que vive. El quién la concibe se desarrollará más adelante. Veremos quién o qué influyó en el personaje que la proyectará y la vida que le tocó vivir.

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Límites del reino nazarita de Granada (1232). Edad Media	1
Figura 2.2. Evolución del Castillo de Montefrío	2
Figura 2.3. El Reino de Granada según las Respuestas Generales del Catastro de Ensenada (1750-54). <i>Reino integrante de la Corona de Castilla, parte constituyente a su vez de España (1492-1715). Reino integrante del Reino de España (1715-1833)</i>	3
Figura 2.4. Ubicación de asentamiento, evolución y monumentos de Montefrío	4

3	≡	Agentes de la arquitectura en el XVIII: Su influencia en Granada.	1
3.1		La Real Academia de San Fernando.	1
3.2		La sociedad económica de Granada en el siglo XVIII. La escuela de dibujo.	2
3.3		Procedimiento a la hora de solicitar la construcción de edificios religiosos ³⁰ ...	2
3.4		Ventura Rodríguez. (1717-1785)	3
		· Primer periodo. Realiza proyectos cortesanos que llevan aún el fuerte peso barroco.....	3
		· Segundo periodo. Periodo herreriano. Depura elementos superfluos.....	7
		· Tercer periodo.	8
3.5		Domingo Antonio Lois Monteagudo. (1723-1786).....	13
3.6		Francisco Aguado.	19
		INDICE DE FIGURAS.....	20

» 3 ≡ Agentes de la arquitectura en el XVIII: Su influencia en Granada.

3.1 La Real Academia de San Fernando.

La Real Academia de Nobles Artes de San Fernando se funda en 1752 con el fin último de ser propaganda política. Las nuevas construcciones religiosas, que a partir de ahora eran responsabilidad de la monarquía, se convertían en imagen monárquica y acercamiento a la población de su nuevo pensamiento y la mejor manera era a través de la religión que siempre había sido quien controlaba la gran masa del pueblo.

Antes de existir la Real Academia estaba la Junta Preparatoria que fue el inicio del giro para el arte español del siglo XVIII. Esta Junta Preparatoria se constituyó en 1744 promovido por el Primer Escultor del Rey Felipe V, Juan Domingo Olivieri.

El rey Fernando VI, que había permanecido al margen de la creación, nombró en 1747 a su escultor personal, que estudió en Italia, “maestro director extraordinario de escultura en la Academia” y se aprobaron los primeros estatutos.

Así se crea, en 1752 de forma oficial, la Real Academia de las Tres Nobles Artes de San Fernando con el propósito de reglar el conocimiento del arte, que hasta entonces, se adquiría con el trabajo en el taller.

La Real Academia basaba sus principios en el modelo de las Academias francesas, implantando el clasicismo que había demostrado que solo en la antigüedad clásica podían encontrarse los más perfectos modelos de funcionamiento político, moral y artístico.

Desde 1757 se impartió estudios y se expidió el título de arquitecto. En 1847 estos estudios pasaron al Estudio Especial de Arquitectura hasta evolucionar a la actual ETSAM.

“Arte, moral y política entran a formar parte de una misma concepción del progreso por el que aboga el pensamiento ilustrado; pero para que esta conciliación sea efectiva, es imprescindible dotar a los organismos del poder de una sólida estructura legal y burocrática que garantice su eficacia”²⁹.

Tras unas visitas realizadas en 1771 por el obispo almeriense a las iglesias de su jurisdicción se comenzó a construir una gran cantidad de edificaciones religiosas debido al ruinoso estado de las iglesias y a la falta de espacio por haber crecido la población.

Al enterarse la Cámara, a partir de 1773, se ordenó, por Real Cédula, que a estas obras y de forma extensiva a todas las del Reino de Granada, debían someterse al control de la Academia de Bellas Artes de San Fernando a no ser que fueran pequeñas reparaciones o intervenciones sin importancia.

Los proyectos se revisaban por arquitectos académicos que decidían si eran adecuados o no según las reglas del clasicismo que se pretendía difundir.

En un primer momento la responsabilidad sobre los proyectos recaía en Ventura Rodríguez, pero a su muerte se creó la Comisión de Arquitectura en 1786 en el seno de la Academia. De esta manera se ejercía un control más riguroso sobre obras de interés público como puentes, canales, caminos, cárceles, hospicios, posadas, nuevas poblaciones y, por supuesto, edificios religiosos.

En Granada, las primeras obras academicistas dentro de la arquitectura religiosa son la Colegiata de Santa Fe y la Iglesia de Vélez de Benaudalla ambas son obras proyectadas por Ventura Rodríguez y dirigidas por Domingo Antonio Lois de Monteagudo²⁹.

²⁹ TORRES, José María (1996): *Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X nº 82 pág. 333-357

3.2 La sociedad económica de Granada en el siglo XVIII. La escuela de dibujo.

En resumen, la política del siglo XVIII se caracteriza por la intención de integrar el pensamiento europeo del despotismo ilustrado y por pretender sacar de la decadencia económica, cultural y social generada por la política del siglo anterior.

Para solucionar el tema económico, se solicita para Granada en 1773 la creación de una Sociedad que exigiría la aprobación de unos estatutos y la licencia para celebrar juntas que fomentaran la industria popular y así hacer prosperar el Reino y por consiguiente la Nación.

A los miembros de esta sociedad se les exigía que fueran *“instruidos, acomodados, celosos y amantes de la prosperidad pública y de la concordia, y capaces de inspirar con su ejemplo iguales sentimientos”*³⁰.

A estos miembros también se les exigía contribuir anualmente con dos doblones para la edición de impresos relativos a la sociedad y para la dotación de premios.

Para solucionar el tema artístico se solicita en 1783, para la Escuela de Dibujo de Granada, el ascenso al grado de Academia Real y el nombramiento de sus primeros directores de pintura, escultura y arquitectura.

Fernando Marín Chaves, Jaime Folch y Domingo Thomas serían respectivamente los encargados de la dirección de estas disciplinas.

³⁰ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

3.3 Procedimiento a la hora de solicitar la construcción de edificios religiosos³⁰.

Para hacer cumplir estas normas se ejercía un control a través de la Chancillería de Granada. Es Ventura Rodríguez el encargado de aprobar los proyectos.

1. La solicitud de obras la presentaba los representantes de la localidad, donde fuera preciso realizar una intervención de cierta envergadura o una iglesia de nueva planta, al arzobispo de Granada.
2. El arzobispo, por medio de la Chancillería, comunicaba a la Cámara de las necesidades planteadas y la urgencia de estas.
3. Previa aprobación de la Cámara se enviaba al lugar un maestro de obras o un arquitecto para que: buscara el sitio más adecuado para un nuevo emplazamiento; efectuara las primeras mediciones del lugar; estimara el número de vecinos, salarios habituales, disponibilidad de materiales locales y aprovechamiento de los procedentes de la demolición del viejo templo en su caso y cualquier dato que pudiera resultar de interés a la hora de remitir el informe con adjuntos dibujos a Madrid.
4. La Cámara enviaba el expediente a Ventura Rodríguez, quien realizaba las correspondientes modificaciones o, con más frecuencia, ofrecía nuevas trazas.

Los informes, diseños y dirección de obras llevadas a cabo en el arzobispado granadino recayeron sobre Domingo Antonio Lois Monteagudo, Francisco Aguado, Domingo Thomas, Francisco Quintillán y el granadino Juan de Castellanos, maestro de obras de la catedral de Granada³¹.

³¹ TORRES PÉREZ, José María (1996): *Un Proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. CSIC. Base de Datos ISOC. Academia. ISSN: 0567-560X pág.333-357 (pág. 335)

3.4 Ventura Rodríguez. (1717-1785)

Hay diversos autores que clasifican sus obras como barroco clasicista dieciochesco y otros que las clasifican como producto de una mentalidad rupturista que se sumaba a las corrientes de la arquitectura ilustrada europea, otros las califican de “eclectico monumentales” y algunos se resisten a considerarlas neoclásicas³².

La influencia de estilos sobre la arquitectura de Ventura Rodríguez puede vislumbrarse a través de la biblioteca que le dejó en herencia a su sobrino Manuel Martín Rodríguez en 1787. El clasicismo del Barroco romano está representado en su biblioteca con varios libros sobre la arquitectura antigua y moderna de Roma.

Su acercamiento a la antigüedad se debe a los descubrimientos arqueológicos de su época. Por último el giro neoclásico es motivado por el descubrimiento de ciudades antiguas como Herculano o Palmira³³.

Su actividad como arquitecto se puede dividir en tres etapas³¹:

• Primer periodo. Realiza proyectos cortesanos que llevan aún el fuerte peso barroco.

A la corte borbónica llegan a trabajar arquitectos italianos y franceses. Trabajaba Sachetti, arquitecto de mérito enviado a la corte por la Academia romana de San

Lucas, discípulo de Filippo Juvarra (o Juvara proyectó para Felipe V el Palacio Real de Madrid y de Aranjuez que será ejecutado por Sacchetti).

En las obras del palacio real madrileño Sachetti fue ayudado, como delineante³⁴, por Ventura Rodríguez, que ya trabajaba para la corte desde los catorce años³⁵.

De esta manera se empapa de la Escuela Romana y en 1745 fue nombrado académico de mérito de la Academia de San Lucas de Roma, aunque no llegó a estudiar en Roma³⁶.

En este primer periodo se incluye la Iglesia de San Marcos (1549) y Capilla Real del Palacio Real de Madrid (1750). También en Madrid proyectará la iglesia de San Bernardo (1753).

La iglesia de San Marcos será el primer gran proyecto de Ventura Rodríguez. Propone una planta con espacio centralizado derivada de algunas propuestas de Juvarra para sus proyectos de Turín.

³² GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

³³ BLANCO, Juan Luis (1995-96): *La cultura de Ventura Rodríguez y la biblioteca de su sobrino Manuel Martín Rodríguez*. CSIC. Base de Datos ISOC. Anuario del Departamento de Historia y Teoría del Arte. ISSN: 1130-5517 nº7-8 págs.181-222.

³⁴ MONTES, Carlos (2003): *Ventura Rodríguez y la capilla de San Pedro de Alcántara*. CSIC. Base de Datos ISOC. EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica. Universidad de Valladolid. ISSN: 1133-6137 nº7-8 págs.11-23

³⁵ CERVERA, Luis (1982): *Ventura Rodríguez, maestro mayor de obras de Madrid y de sus fuentes y viajes de agua*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1982. Número 54 pág.33-78

³⁶ CÁNOCAS DEL CASTILLO, Soledad (1989): *Artistas españoles en la Academia de San Luca de Roma. 1740-1808*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1989. Nº 68 págs. 153-210 pág.162

En la iglesia de San Marcos proyecta un espacio centralizado con carácter longitudinal. Todavía tiene gran carga ornamental propia de la escuela italiana.

Durante este periodo 1750-1759 se estuvo ejecutando la Capilla Real de Madrid según el proyecto de Ventura que fue el elegido por el rey Fernando VI en contra del presentado por Sacchetti, maestro de Ventura.

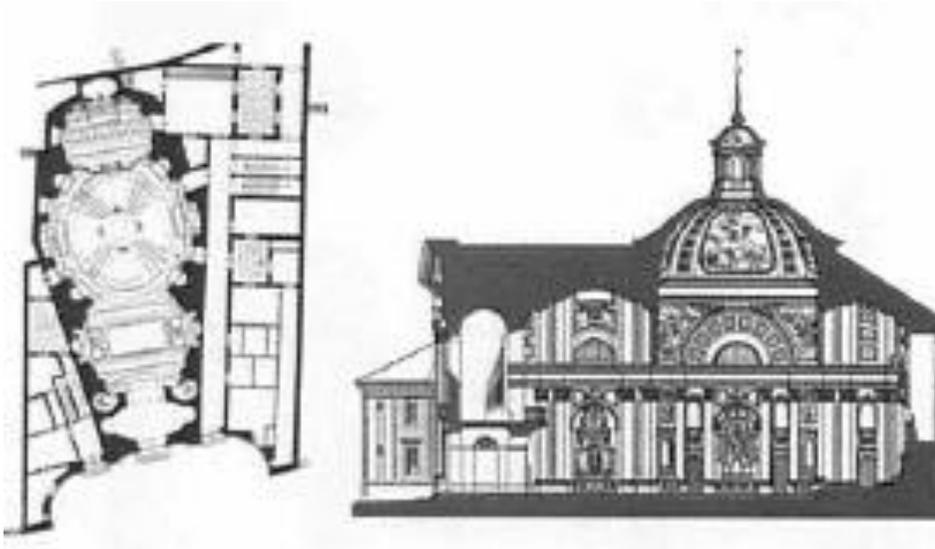


Figura 3.1. Iglesia de San Marcos, Madrid (1549)³⁷.

Esta capilla servirá de inspiración para la Iglesia de San Gabriel de Badajoz (1768)³⁸.

³⁷ MONTES, Carlos (2003): *Ventura Rodríguez y la capilla de San Pedro de Alcántara*. CSIC. Base de Datos ISOC. EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica. Universidad de Valladolid. ISSN: 1133-6137 nº7-8 págs.11-23

En 1750 recibe el encargo de remodelar y terminar la basílica del Pilar de Zaragoza³⁸. Con su diseño de la Capilla de la Virgen, un templete de planta cuadrilobulada a base de sectores circulares y bóveda elipsoidal.

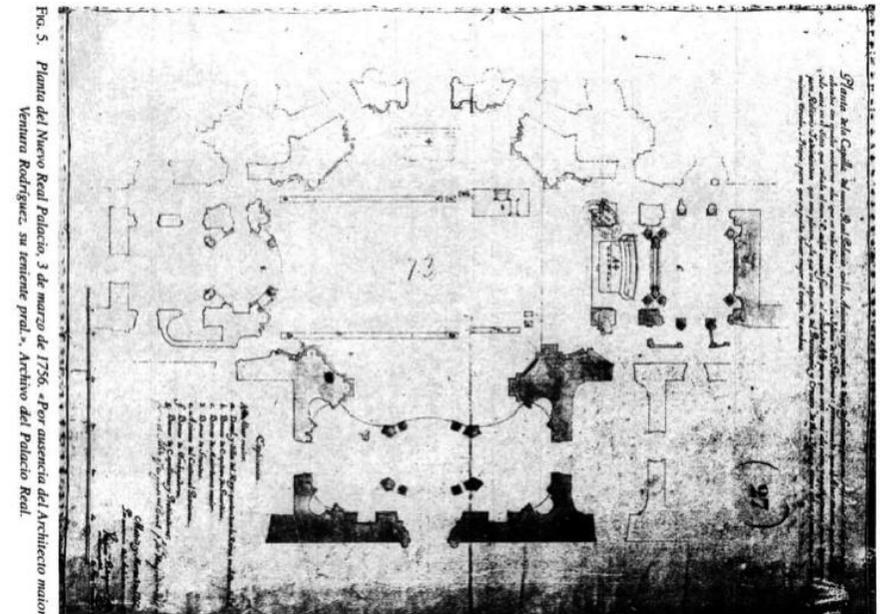


Figura 3.2. Capilla Real del Palacio Real de Madrid (1756)³⁹

³⁸ Por la que recibe críticas y Ventura contesta a ésta mediante un texto de 1751, donde expone como fuente de autoridad las obras de Bernini, Borromini, Rainaldi y Fontana, explicando la procedencia de su inspiración.

³⁹ CRUZ, María y KURTZ, William (1994-1995): *La iglesia de San Gabriel-La Concepción de Badajoz, supuesta de Ventura Rodríguez*. Universidad de Extremadura. Norba-Arte. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0213-2214 nº 14-15 pág. 195-218(pág.199)

Es precisamente en esta capilla donde se produce la transición del estilo barroco al neoclásico, manifestándose este último en la decoración interior del templo.

En los bocetos y escritos se desprende soluciones simbólicas, además de estéticas. La proporción dupla considerado como sistema perfecto.

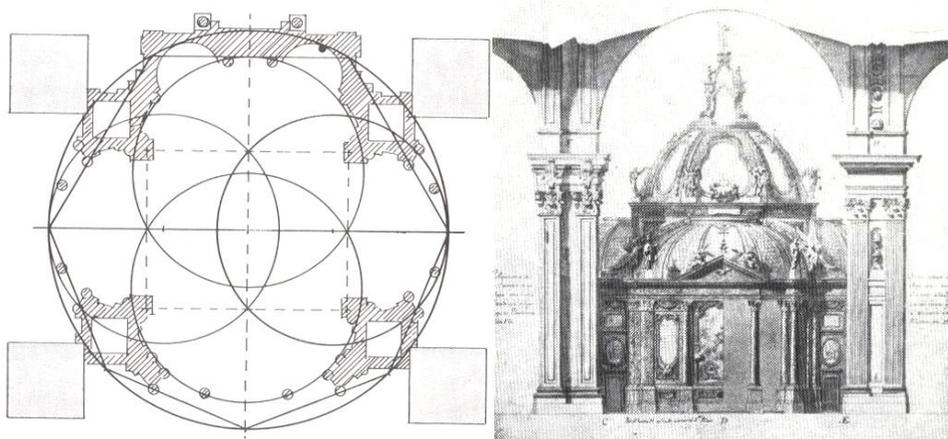


Figura 3.3. Dibujo de la “Figura Mentis” de Giordano Bruno y heptágono sobre la planta de la Santa Capilla de la Virgen del Pilar de Zaragoza⁴⁰. Alzado de la Capilla⁴¹ 1750.

En 1752 fue nombrado director de los estudios de arquitectura de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

⁴⁰ ESTEBAN, Juan Francisco (1987): *Ventura Rodríguez al servicio de una idea. La Santa Capilla de la Virgen del Pilar de Zaragoza*. Artígrama. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0213-1498 pág. 157-206

⁴¹ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

Y es en 1752 cuando proyecta la iglesia del Monasterio de Silos. Plantea una planta centralizada pero en una versión más moderna y contenida propio del clasicismo francés.

En cuanto al alzado juega con curvas al modo de Juvarrá.

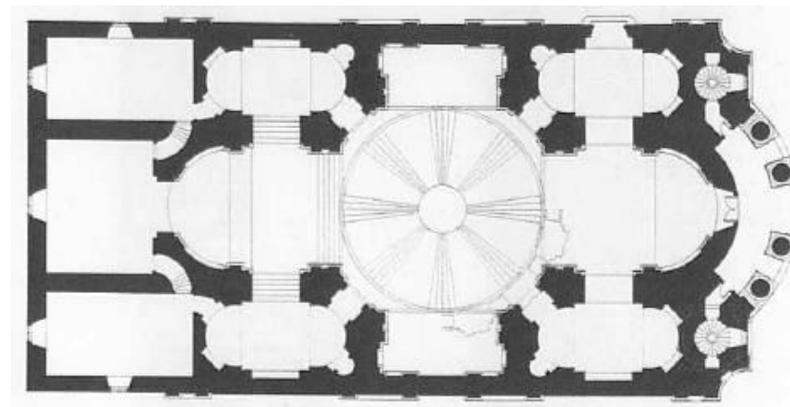


Figura 3.4. Iglesia del monasterio de Santo Domingo de Silos, Burgos (1752) (Benedictinos)⁴².

Entre 1755 y 1767 Ventura está decorando el interior de la Iglesia del Real Monasterio de la Encarnación, en Madrid con claras reminiscencias de los modelos del barroco romano, su fuente de inspiración predilecta.

⁴² MONTES, Carlos (2003): *Ventura Rodríguez y la capilla de San Pedro de Alcántara*. CSIC. Base de Datos ISOC. EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica. Universidad de Valladolid. ISSN: 1133-6137 nº7-8 págs.11-23

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA

En 1753, proyecta la iglesia de San Bernardo que no se llegó a realizar, probablemente por ser un proyecto ambicioso e inapropiado.



Figura 3.5. Iglesia de San Bernardo, Madrid. (1753) (Cisterciense).

En 1755 traza la capilla de San Pedro Alcántara (Ávila)⁴³. Supone un punto de inflexión⁴⁴ en la trayectoria profesional del arquitecto. Sufrió diferentes

⁴³ MONTES, Carlos (2003): *Ventura Rodríguez y la capilla de San Pedro de Alcántara*. CSIC. Base de Datos ISOC. EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica. Universidad de Valladolid. ISSN: 1133-6137 nº7-8 págs.11-23

⁴⁴ Carlos Sambricio, cita una carta de Ventura Rodríguez del 14 de febrero de 1759 donde hace crítica a la arquitectura italiana por el excesivo interés en el ornato y señala que su interés se

contratiempos de índole económico hasta que el Fray franciscano Eleta fue nombrado confesor del rey Carlos III en 1761.

En ese momento se solicita a la corte, por deseo de Eleta en 1771, que la nueva Capilla sea acogida bajo Real Patronazgo, concediéndose por Real Cédula emitida por Carlos III en Aranjuez el 18 de abril de 1771.

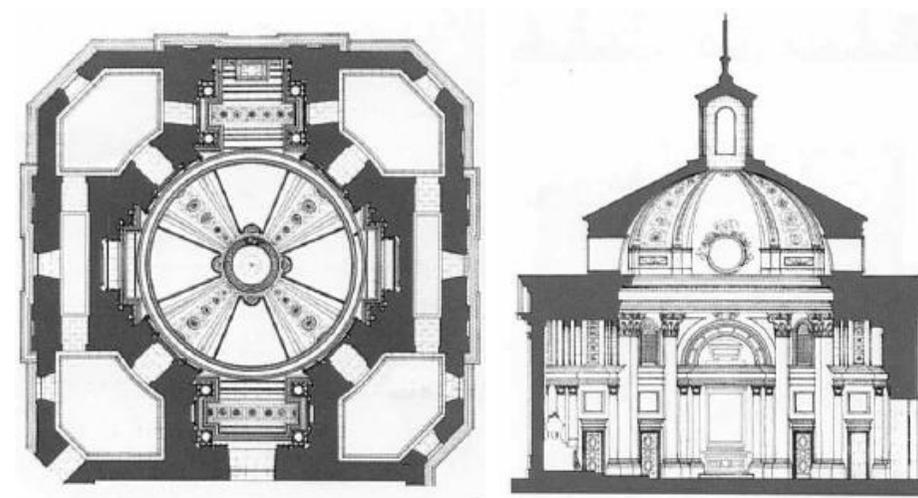


Figura 3.6. San Pedro Alcántara (1755)

Es el espacio de planta central más rico en ornamentos de todas las obras de Ventura Rodríguez. Utiliza recursos compositivos del tardobarroco cercano a las obras de Bernini y de Fontana.

La solución planteada será retomada para sus siguientes proyectos como fue el Convento de los Agustinos Filipinos de Valladolid (1759), el Sagrario de la catedral de

dirige hacia los atributos perennes del arte como la sencillez de construcción, el orden, la simetría, la proporción, o la funcionalidad. Esto contrasta con el escrito de 1751.

Jaén (1761), la capilla del Colegio Mayor San Ildefonso en Alcalá (1762), la capilla para el palacio del Marqués de Astorga en Madrid (1772) y el impresionante diseño para la iglesia de Covadonga (1780).

• **Segundo periodo. Periodo herreriano. Depura elementos superfluos.**

Es en 1760, con la llegada de Carlos III quien nombra para trabajar en palacio a Francisco Sabatini, quien había trabajado para él durante su etapa como rey de Nápoles y Sicilia, como arquitecto real absoluto a proseguir las obras del palacio real, cesando a Sachetti y a Ventura Rodríguez.

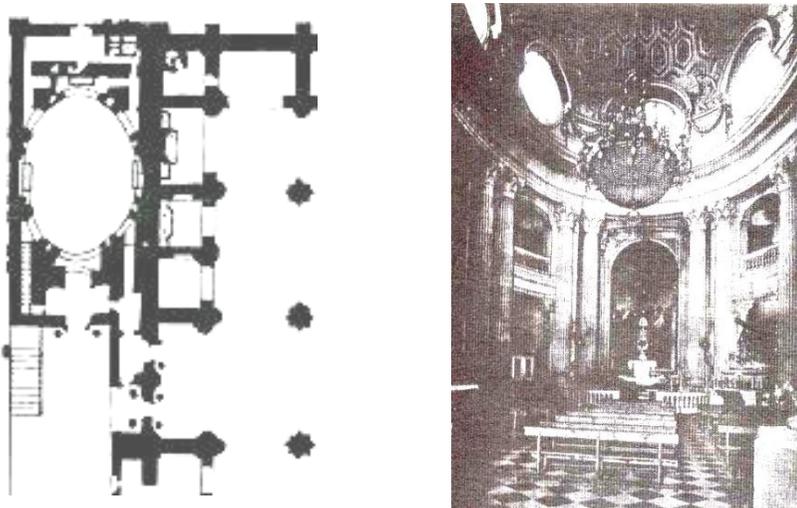


Figura 3.7. Sagrario de la Catedral de Jaén (1761)⁴⁵.

Hacia 1760 influye mucho en él la obra de Juan de Herrera. El Sagrario de la Catedral de Jaén (1761-1764). Palacio de Almanzora (Almería).

Al morir Sachetti, en 1764, se nombra (5-12-1764 Arquitecto Municipal de Madrid) a Ventura Rodríguez como maestro mayor de obras y de sus fuentes y viajes de agua

⁴⁵ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

por el concejo madrileño, Consejo de Castilla, es decir, todos los proyectos que tenían que ser enviados a la Contaduría General de Arbitrios y Propios del Reino pasaban por la jurisdicción de Ventura Rodríguez.

Entre sus trabajos estaban: salvaguardar la buena imagen urbanística de Madrid y las tareas propias del Consejo por el que revisaba los proyectos de nueva ejecución.

En 1768 proyecta la Iglesia de San Gabriel, para la cual revisa los bocetos que proyecto para la Capilla Real.

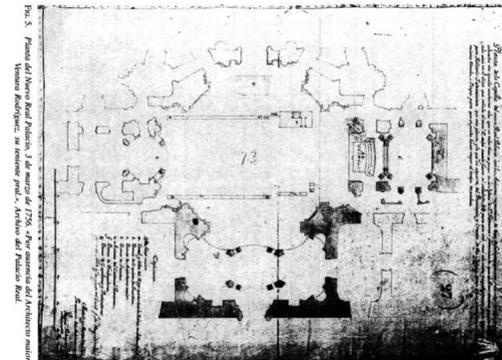


Figura 3.8. Capilla Real del Palacio Real de Madrid (1756)

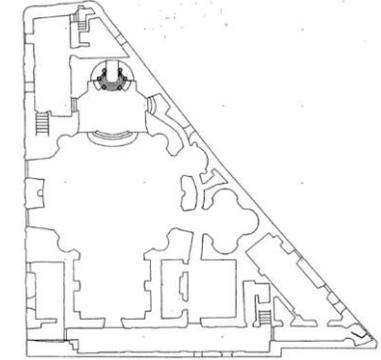


Figura 3.9. Iglesia de San Gabriel. Badajoz. (-1768- Según Llaguno y Ceán) posible boceto desechado de la Capilla Real de Madrid⁴⁶

⁴⁶ CRUZ, María y KURTZ, William (1994-1995): *La iglesia de San Gabriel-La Concepción de Badajoz, supuesta de Ventura Rodríguez*. Universidad de Extremadura. Norba-Arte. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0213-2214 nº 14-15 pág. 195-218(pág.199)

• Tercer periodo.

Indaga en las posibilidades formales de unos edificios que se conciben como combinación de formas geométricas simples. En este periodo se incluyen sus proyectos de iglesias rurales en las que desarrolla una amplia gama de elecciones que se ven reflejadas especialmente en sus plantas.

Al incendiarse el antiguo Santuario de Nuestra Señora de Covadonga en 1777 desaparece la imagen tradicional del lugar.

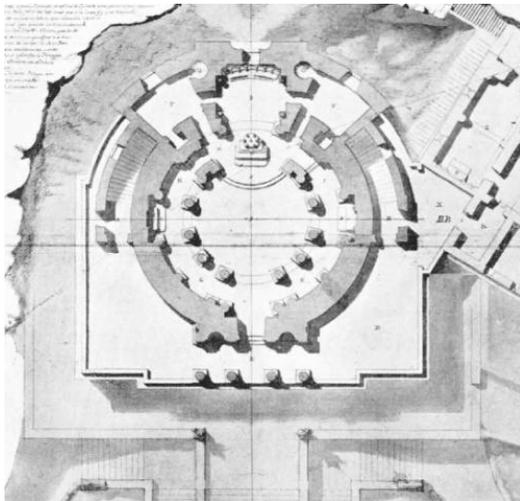


Figura 3.10. La frustrada intervención de Ventura Rodríguez en la iglesia de Covadonga después de sufrir el incendio de 1777⁴⁷.

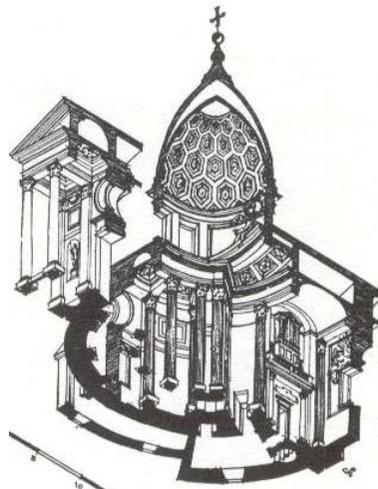


Figura 3.11. Proyección Isométrica de la iglesia dibujada por F. Chueca³⁸

Ventura Rodríguez recibió del Consejo de Castilla el encargo de elaborar un informe sobre las condiciones en que se encontraban los templos de la diócesis de Almería y la archidiócesis de Granada y al inspeccionar los proyectos para nuevas construcciones Rodríguez delegó en Manuel Machuca y Vargas la revisión de las Iglesias de Almería⁴⁸.

Personalmente intervino en los siguientes proyectos:

-Vélez de Benaudalla (1776). Se le dedicará un apartado.

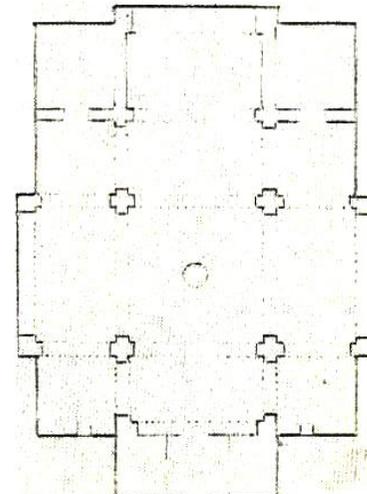


Figura 3.12. Imagen de la Iglesia de Vélez de Benaudalla (1776)⁶².



Era un templo de madera suspendido en el aire “por milagro divino”. La propuesta de Ventura Rodríguez fue un edificio revolucionario de inspiración clasicista pero opuesta a la concepción del cabildo que procuró que su proyecto no saliera adelante.

- Alhabia de Taha (1777),

- Nívar (1778),

⁴⁷ MADRID, Vidal de la (2009): *El arquitecto Ventura Rodríguez y Covadonga: la accidentada historia de un proyecto frustrado*. Universidad Oviedo. Liño. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0211-2574 nº 15 pág. 199-220

⁴⁸ TORRES, José María (1996): *Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X nº 82 pág. 333-357

- La Iglesia de San Felipe Neri de Málaga (1778),
- Algarinejo (1779),
- Cájjar, Gádor e Iznalloz (1780).

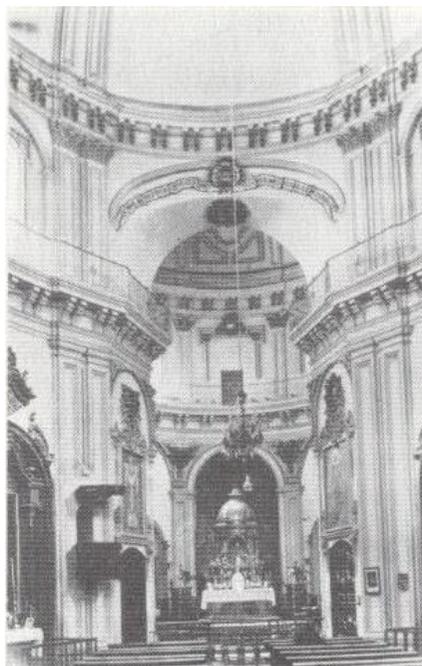
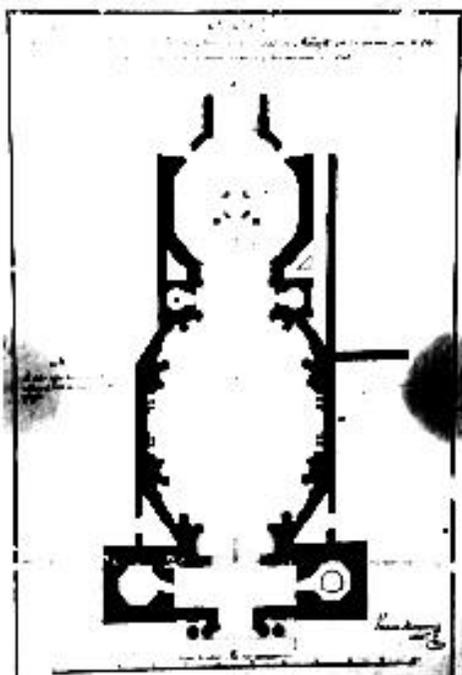


Figura 3.13. Planta Iglesia de San Felipe Neri, Málaga (1778).⁴⁹

⁴⁹ CAMACHO, Rosario (2005): *A propósito de Ventura Rodríguez y la iglesia de San Felipe Neri de Málaga*. Universidad de Málaga. Atrio. Revista de Historia del Arte. ISSN: 0214-8293 pág. 105-112

La iglesia de Algarinejo.

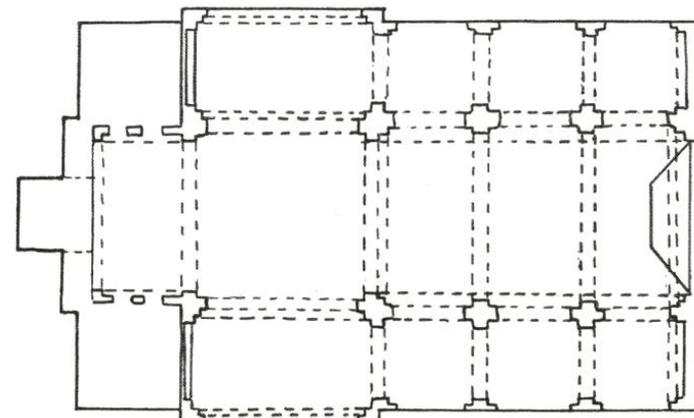


Figura 3.14. Iglesia de Algarinejo (1779)⁵⁰.

⁵⁰ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA

La iglesia de Cájar, proyectada por Ventura Rodríguez y dirigida en obra por Francisco Aguado, presenta una cruz griega en la que se prescinde de los espacios adosados, que inscribían la cruz en un cuadrado en las de Vélez de Benaudalla, Alomartes y Olula del Río.

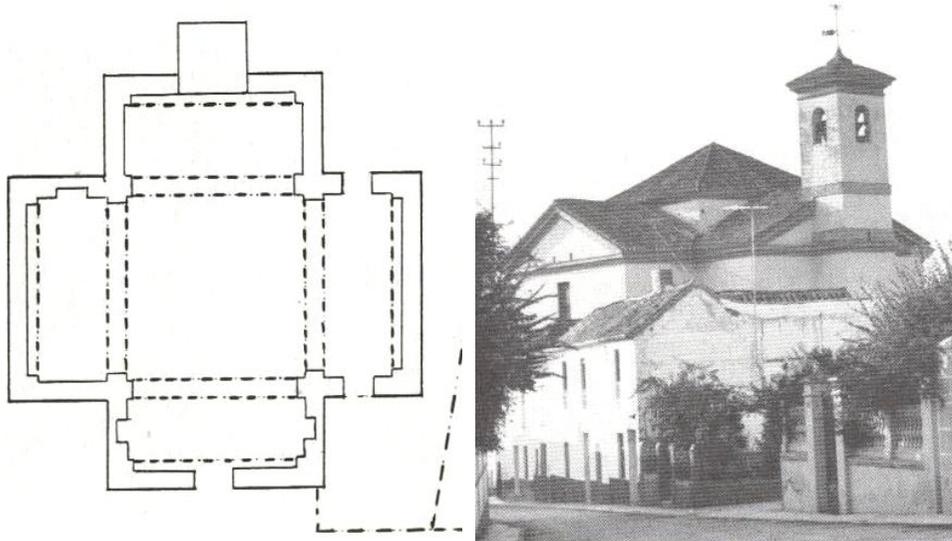


Figura 3.15. Iglesia de Cájar (1780)⁴⁷.

La iglesia de Olula del Río (1780, Almería). La iglesia de Olula del Río (1780, Almería), que presenta planta de cruz griega con paramentos curvos en los brazos, tiene un doble parentesco con Lois de Monteagudo: por su relación con la de Alomartes y por las connotaciones que presenta en el proyecto del mismo arquitecto para una iglesia en el Pardo⁵¹.

⁵¹ TORRES, José María (1996): Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada). Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 333-357

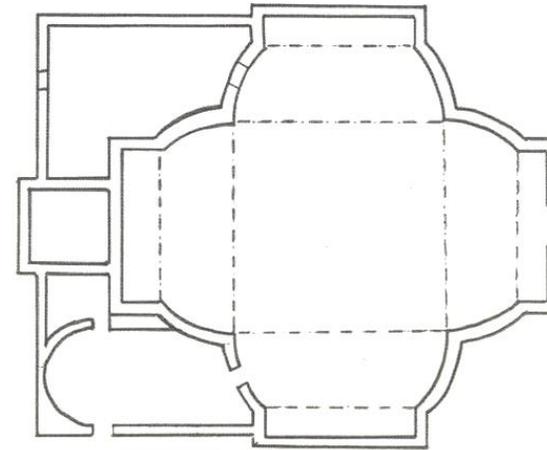


Figura 28. Iglesia de Olula del Río (1780)⁵²

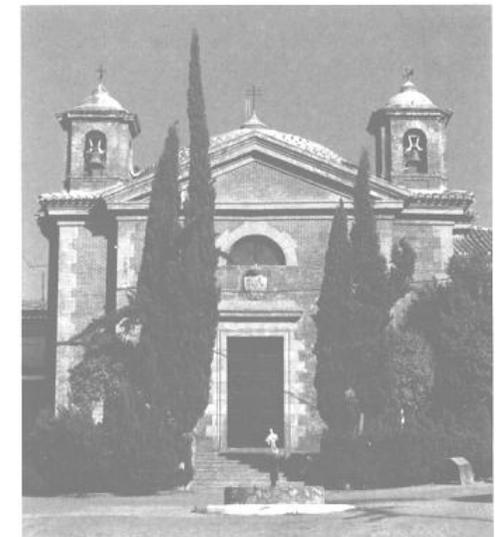
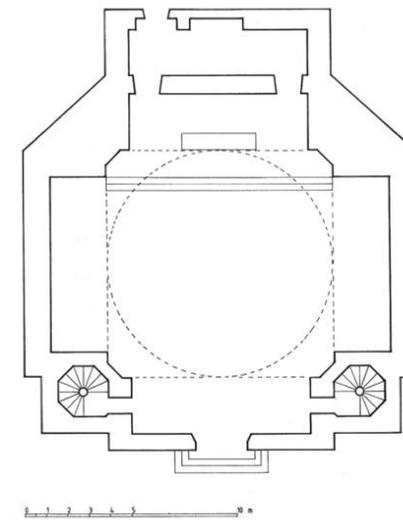


Figura 3.16. Iglesia de Alomartes (1780)⁵³

⁵² REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

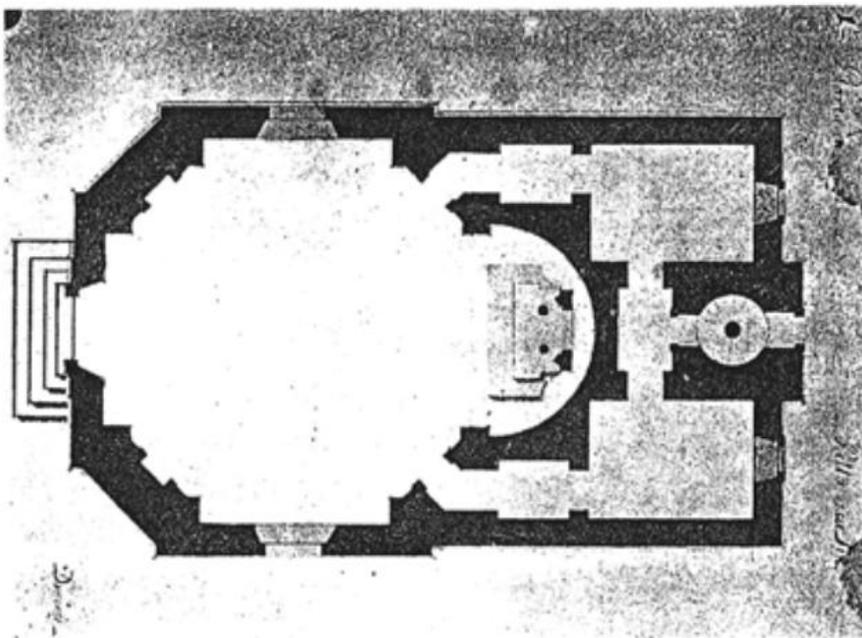


Figura 3.17. Proyecto para iglesia en el Pardo de Lois de Monteagudo⁵⁴.

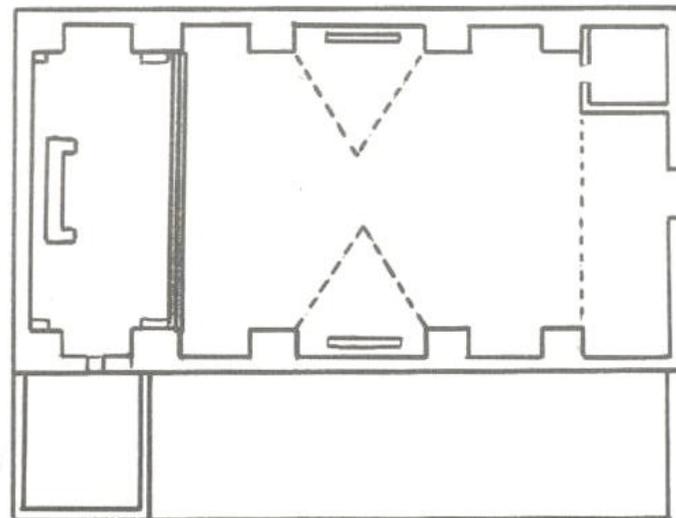


Figura 3.18. Planta iglesia de Alcutar de los Bérchules (1782)⁴³.

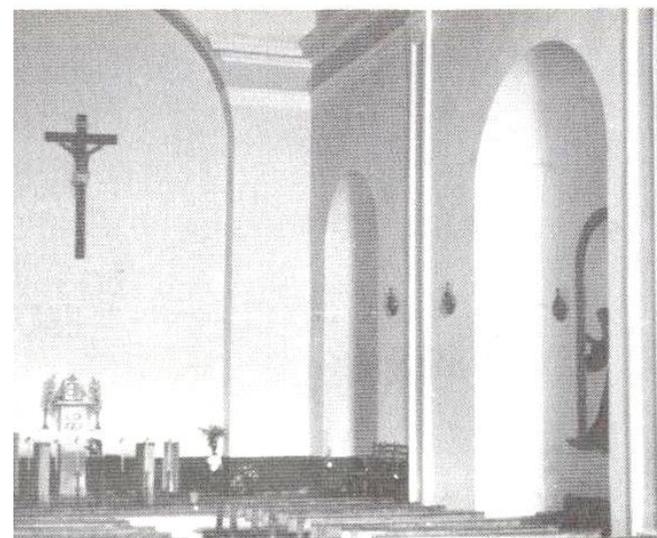


Figura 3.19. Iglesia de Picena (1782)⁴³

⁵³ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

⁵⁴ TORRES, José María (1996): Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada). Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 333-357

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA

Benahadux, Molzívar y Talará (1783).

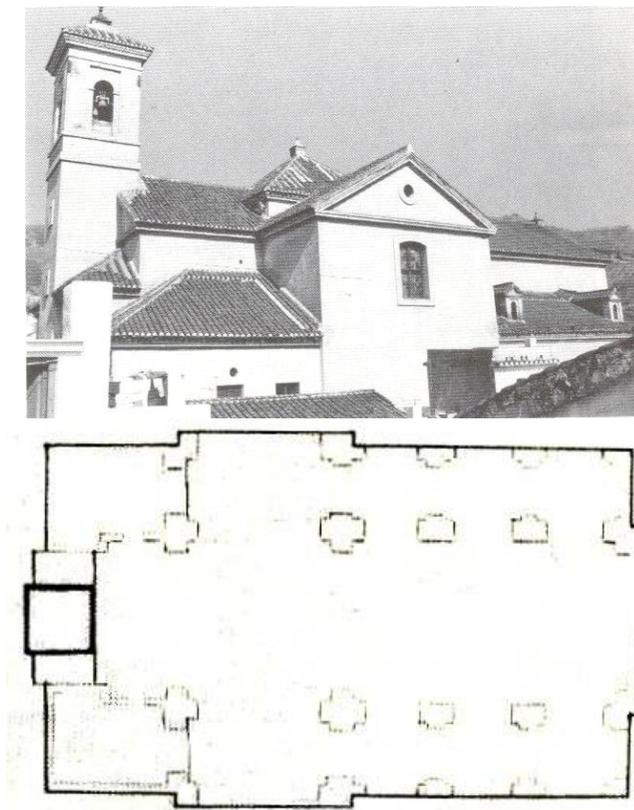


Figura 3.20. Iglesia de Molzivar (1783)⁵⁵.

Los informes, diseños y dirección de obras los realizan Domingo Antonio Lois de Monteagudo, Francisco Aguado, Domingo Thomas, Francisco Quintillán y el granadino Juan de Castellanos, maestro de obras de la catedral de Granada.

⁵⁵ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

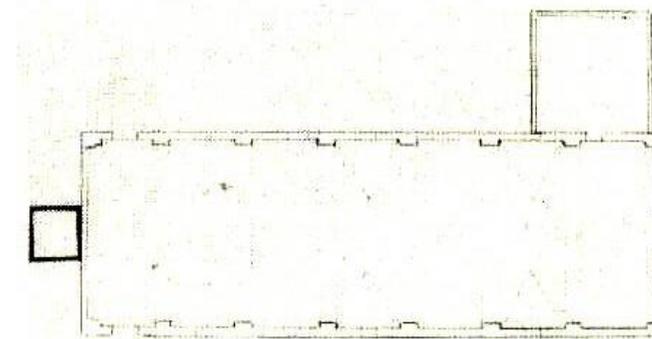


Figura 3.21. Iglesia de Talará (1783)⁵⁶.

La Iglesia de la Encarnación (1785) en Santa Fe y la Iglesia Colegiata Mayor de Santa María de la Encarnación de Loja, fueron proyectos acabados por su alumno Domingo Lois de Monteagudo; todos los citados corresponden a la actual provincia de Granada.

⁵⁶ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

3.5 Domingo Antonio Lois Monteagudo. (1723-1786)

Arquitecto neoclásico gallego nacido en Alem, Santa María de Loureiro, Orense que vio limitado su ámbito de labor por el absorbente magisterio de Ventura Rodríguez.

Lois Monteagudo, siguió la vocación artística heredada por las dos ramas de su linaje. Se traslada a Madrid con 21 años de edad en 1744 cuando se está ultimando las gestiones para inaugurar la Junta Preparatoria.

Así que, cuando llevaba 8 años de aprendizaje con Ventura Rodríguez, se matriculó como uno de los primeros alumnos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando decretada por Fernando VI el 12 de abril de 1752.

Allí estudió durante 5 años bajo la tutela de Ventura Rodríguez también tuvo de profesores a Juan Bautista Sachetti, Francisco Carlier y Santiago Boravia, José Hermosilla, Alejandro González Velázquez y Diego de Villanueva.

En su etapa en la RABASF estudia los órdenes clásicos mediante limpios, esmerados y exactos dibujos. El rey dispuso crear premios⁵⁷ para incentivar a los alumnos, y Monteagudo obtiene un primer premio en el concurso, el tema fue: proyectar una capilla majestuosa con cúpula, de la Real Academia del año 1753 y un segundo premio en 1754, cuyo tema fue el proyecto de un Palacio Real con capilla.

En 1754 contaba con 31 años de edad y llevaba 10 años estudiando arquitectura compaginando estudios con el trabajo como delineante en las obras del Real Palacio que llevaba Ventura Rodríguez.

Continúa formándose, por lo que cuando la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando convoca 5 plazas para artistas (3 era para arquitectos), en 1758, para ser pensionado en Roma se presenta.

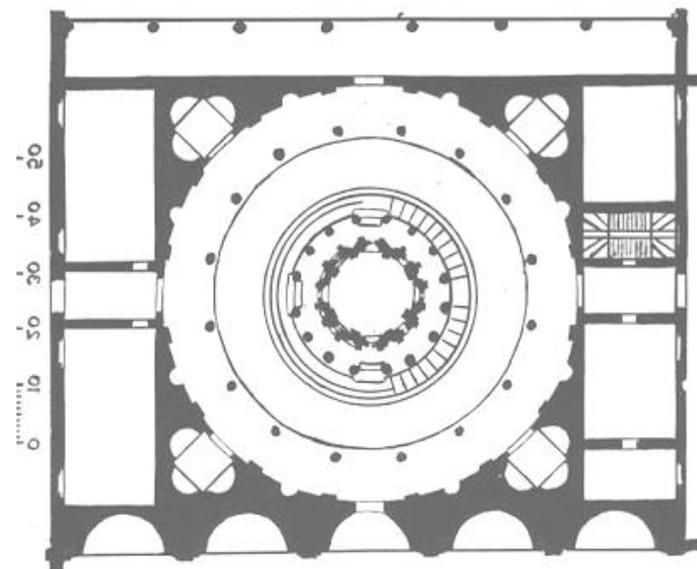
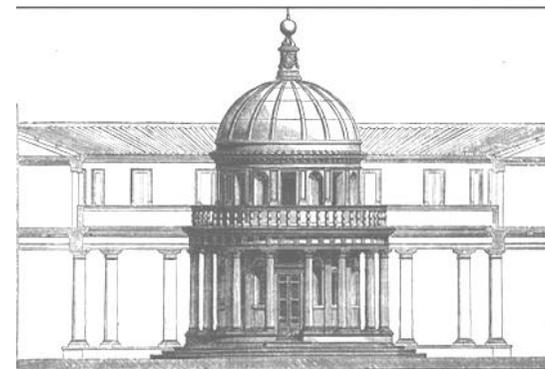


Figura 3.22. Tempietto de Bramante.

⁵⁷ CERVERA, Luis (1982): *Ventura Rodríguez, maestro mayor de obras de Madrid y de sus fuentes y viajes de agua*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1982. Número 54 pág.33-78

Tras una oposición donde desarrollaron el proyecto de una Casa de Campo con jardines durante 40 días, consiguió el tercer puesto como pensionado en Roma⁵⁸, la segunda plaza fue para Andrés Fernández y Juan de Villanueva (Museo del Prado, 1785) este último con 19 años de edad consiguió la primera plaza.

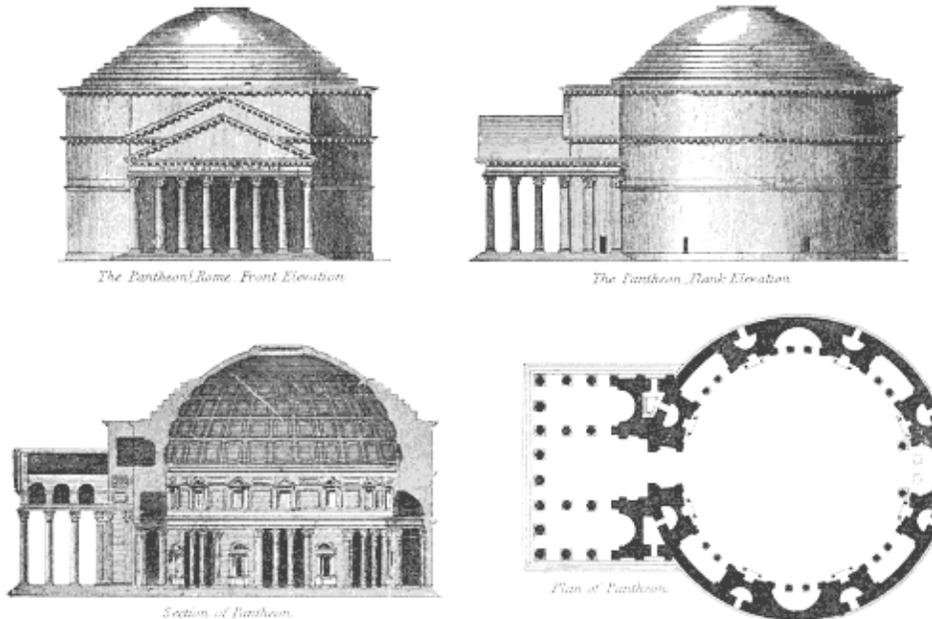


Figura 3.23. Panteón de Roma.

En Roma estuvo durante 6 años (1758-1765) y se dedicó entre otros trabajos a tomar medidas y levantar en dibujo exacto edificios como el tempietto de Bramante y la Rotonda (Panteón). En la toma de medidas del Panteón encontró discordancias con

⁵⁸ CÁNOCAS DEL CASTILLO, Soledad (1989): *Artistas españoles en la Academia de San Luca de Roma. 1740-1808*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1989. Nº 68 pág.

los datos existentes de libros franceses, que se guardaban en la Biblioteca de la Casa Corsini, así que decidió hacer un levantamiento exhaustivo.

A su vuelta a Madrid, en 1765, presentó a la comisión de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando el título de miembro de mérito de la Accademia Nazionale di San Luca, que usaba con preferencia, no sin celos y recelos de la nuestra de San Fernando⁵⁹, junto con un memorial de los trabajos realizados en su estancia en Roma para que le otorgaran el título del grado de Académico de número de la Academia española.

Se lo concedieron pero al año siguiente después de presentar otro trabajo aparte ya que a juicio de la Academia española el trabajo que presentó de Roma no era digno del grado que solicitaba, el historiador Luis Cervera deja entrever que posiblemente Ventura Rodríguez influiría grandemente en esta favorable decisión de la Junta.

En 1758 estaba ruinoso la fachada de la Azabachería de la Catedral de Santiago. Al terminar el primer cuerpo de estilo barroco y tras distintas desavenencias entorno al diseño de la fachada el cabildo mandó las trazas en 1764 a la Real Academia de Bellas Artes de Madrid.

Es Ventura Rodríguez quien diseña una nueva fachada que la manda de vuelta a Santiago en 1765 y mandará a Lois de Monteagudo para que lleve la dirección de obra.

Aunque el verdadero espíritu academicista se desarrolla en la Capilla de la Comunión⁶⁰ dentro del edificio catedralicio. Aquí también realizó unas trazas para una Iglesia y Colegio de la Compañía de San Jerónimo en Santiago de Compostela.

⁵⁹ CERVERA, Luis (1982): *Ventura Rodríguez, maestro mayor de obras de Madrid y de sus fuentes y viajes de agua*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1982. Número 54 pág.33-78

⁶⁰ VIGO, Alfredo (1989): *Domingo Lois Monteagudo y la Capilla de la Comunión de la Catedral Compostelana (1764-1783)*. Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 2010-9573 pág. 450-466.

Proyectará también una casa para el Marqués de Vianca, en Bóveda (Lugo) pero al final no se ejecutó.

Mientras tanto su compañero Juan de Villanueva presentaba a la Real Academia un tratado para delineación de los órdenes clásicos y otros trabajos como la disertación sobre las proporciones⁶¹.

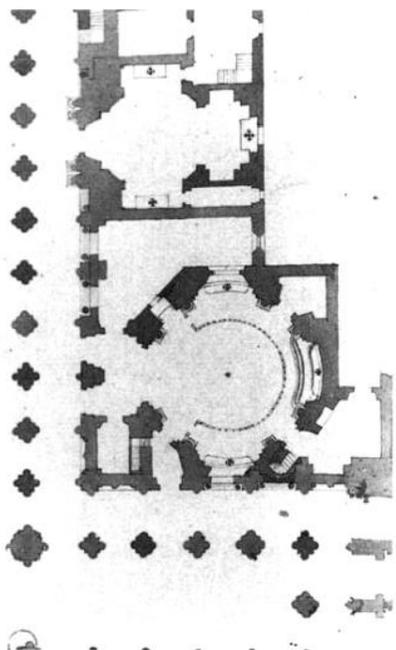


Figura 3.24. Capilla de la Comunión. Planta por Miguel Ferro Caaveiro.⁵⁷



Figura 3.25 Capilla de la Comunión de la Catedral de Santiago.⁵⁷

⁶¹ CERVERA, Luis (1982): *Ventura Rodríguez, maestro mayor de obras de Madrid y de sus fuentes y viajes de agua*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1982. Número 54 pág.33-78

De vuelta a Madrid, en 1770, opositó a una plaza vacante como director de Perspectiva en la Real Academia que no consiguió.

El 8 de marzo de 1772, presenta un memorial ante la Real Academia manifestando los grandes desórdenes con que se practica la Arquitectura en Madrid y en todo el Reyno.

El historiador Luis Cervera supone que fue motivado por el rígido centralismo que se estaba impulsando desde la cámara de Castilla para reglamentar la arquitectura en todos los reinos bajo las precisas instrucciones de don Ventura Rodríguez.

Así entre 1772-1786 dirige obras proyectadas por Ventura Rodríguez, en el reino de Granada, aplicando la orden de la Real Cédula de 21 de octubre de 1773 y Circular de 25 de noviembre de 1777⁶², que se obliga al arzobispo y obispos del Reino de Granada a someter a la aprobación del Consejo de Castilla los proyectos y justificación de las obras de arquitectura, escultura y retablos para las iglesias de sus diócesis. Y la circular comunicaba a todos los caballeros, obispos y prelados que estaban obligados a consultar cualquier obra con la Academia de San Fernando.

Después de esto, Monteagudo se traslada a la ciudad de Santa Fe, Granada, por deseo de su maestro de Ventura Rodríguez quien tenía un gran aprecio por Monteagudo.

La fábrica del templo estaba en ruinas y el proyecto, para una nueva, lo hizo don Ventura, quién, en cumplimiento de su obligación lo presentó el pertinente informe y las trazas para una iglesia Colegial, a la Cámara de Castilla. Estos documentos fueron aprobados por el supremo organismo y se pudo realizar un bello templo neoclásico.

⁶² TORRES PÉREZ, José María (1996): *Un Proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. CSIC. Base de Datos ISOC. Academia. ISSN: 0567-560X pág.333-357 (pág. 335)

En 1773 se derriba la iglesia ruïnosa y se comienza la nueva iglesia, según una referencia del historiador, viajero español y secretario Antonio Ponz (1725-1792).

En 1775 dirige las obras de la iglesia parroquial de Loja (Granada), siguiendo las esmeradas trazas de don Ventura, por encontrarse cerca de Loja ya que estaba con la dirección de obra de Santa Fe.

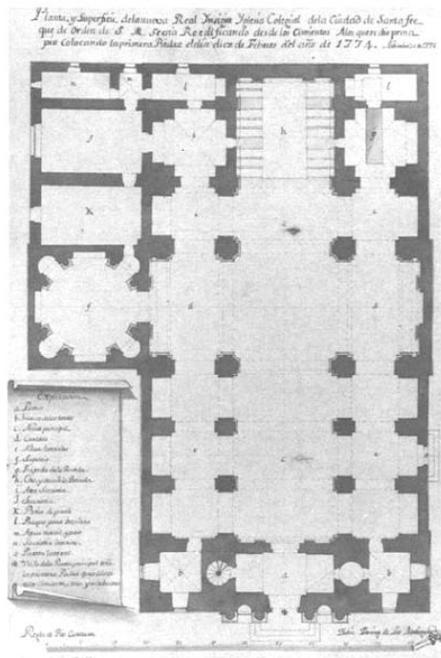


Figura 3.26. Iglesia de Santa Fe⁶³



Colegiata de Santa Fe⁶⁴.

También, en 1775, Ventura Rodríguez solicitó planos del terreno y coste de materiales para redactar el proyecto de la iglesia parroquial de Vélez de Benaudalla

⁶³ GUILLEN, Esperanza (1989): *La fortuna de un arquitecto pensionado en Roma: Domingo Lois Monteagudo*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 179-205

⁶⁴ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

(Granada), datos que se supone fueron suministrados por Lois Monteagudo, que residía en Santa Fe, y por Manuel Machuca y Vargas.

El Consejo de la Cámara de Castilla aprobó el hermoso proyecto de Ventura Rodríguez el día 23 de septiembre de 1777.

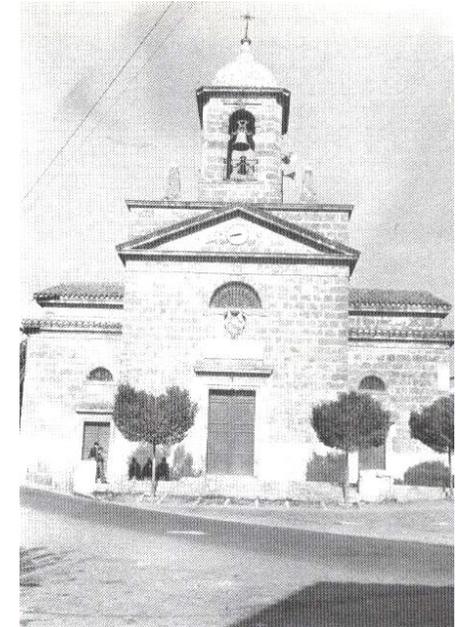
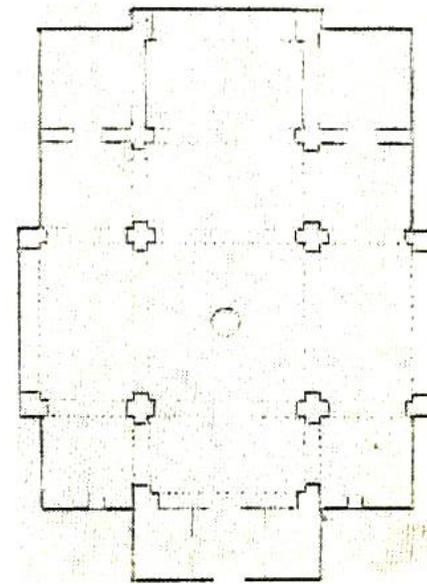


Figura 3.27. Imagen de la Iglesia de Vélez de Benaudalla (1776)⁶².

En el mismo día se disponía, por una cédula real expedida en San Ildefonso, que la obra debería ser dirigida “con arreglo” al “diseño” de Ventura Rodríguez por el arquitecto Lois Monteagudo, “sin perjuicio de la que le estaba encargada” en Santa Fe, “haciendo sus alternativas visitas” a Vélez de Benaudalla “en las ocasiones que la obra pidiese” su asistencia.

Las obras dieron comienzo en el año 1776 y se finalizaron en el de 1784.

El diseño de la iglesia de Alomartes se le atribuye a Domingo Monteagudo ya que en

1779 se remite a la Cámara del Consejo de Castilla el expediente para la construcción de la iglesia con los planos dibujados por Monteagudo.

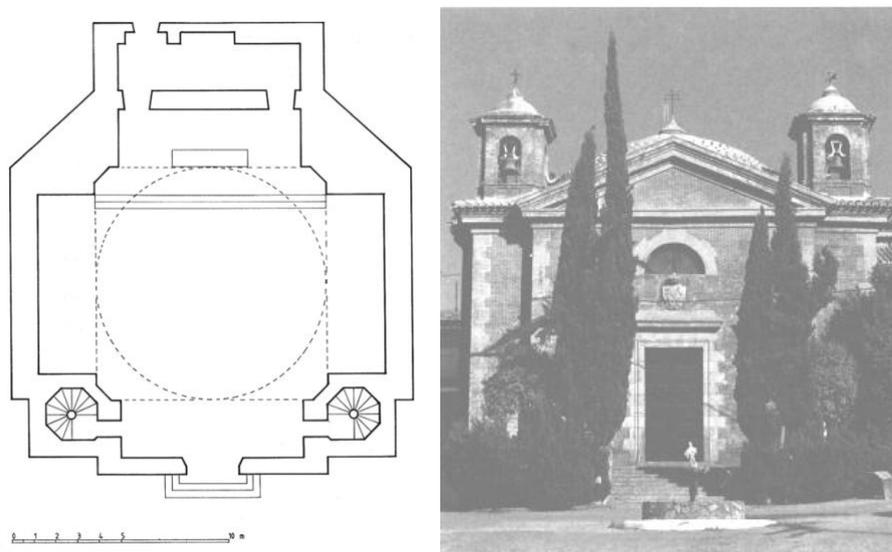


Figura 3.28. Iglesia de Alomartes (1780)⁶⁵

Proyecta en 1784, una capilla en el Real Sitio de El Pardo cuyas trazas están en el Archivo de obras del Palacio Real de Madrid que finalmente no llegó a realizarse.

Otros proyectos que se le atribuyen son una casa señorial en Montefrío, actualmente la Casa Consistorial.

Ventura Rodríguez desea que Domingo Lois Monteagudo dirija la capilla del

⁶⁵ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

Sagrario en la Catedral de Jaén, ya que estaba muy descontento por la dirección de las obras de la capilla del Sagrario, en la catedral de Jaén, proyectadas por él y recomendó a Lois Monteagudo para que se hiciera cargo de ellas mediante una carta fechada en Madrid, el día 20 de noviembre de 1781.

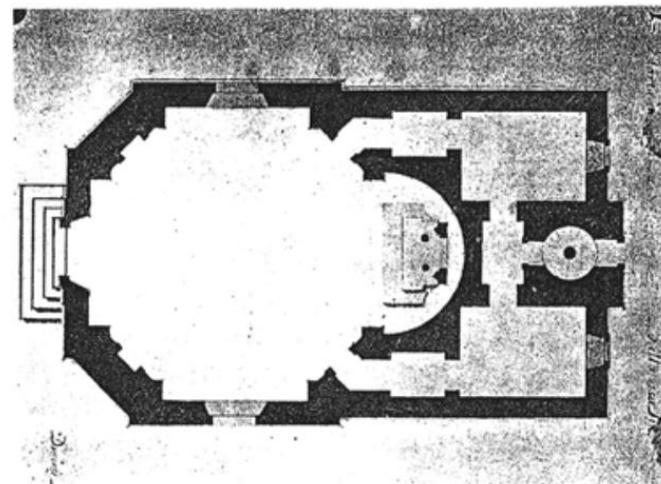


Figura 3.29. Proyecto para iglesia en el Pardo de Lois de Monteagudo⁶⁶.

El cabildo de la catedral de Jaén, el 6 de diciembre de 1781 contestaba a Ventura Rodríguez con buenas palabras no encomendó la obra a su discípulo Lois Monteagudo.

⁶⁶ TORRES, José María (1996): Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada). Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 333-357

Finalmente, mientras dirigía Lois Monteagudo la construcción de las iglesias de Santa Fe y de Loja le encargaron el proyecto para la iglesia parroquial de la Encarnación de Montefrío.

Montefrío linda con los de Santa Fe y de Loja, por lo que era conocido entre sus vecinos.

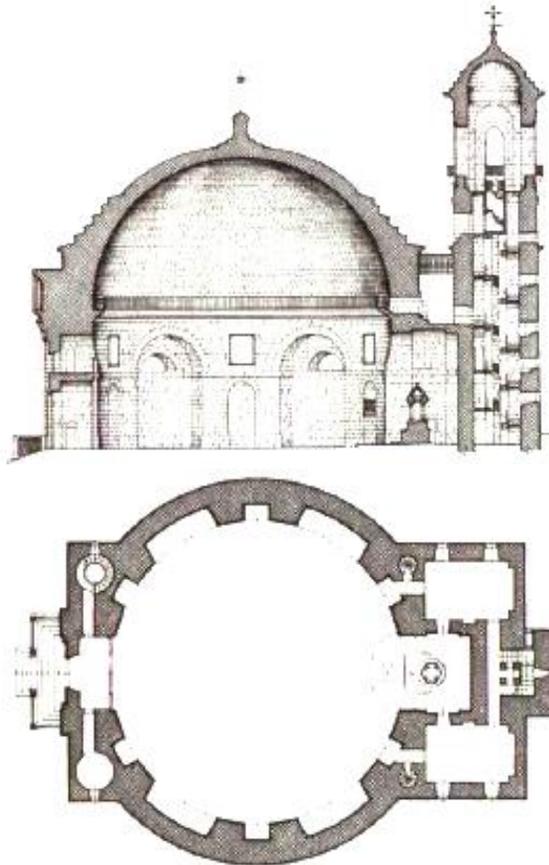


Figura 3.30. Iglesia de la Encarnación de Montefrío. CERVERA, Luis (1985)

La fábrica de esta iglesia se compone de un cuerpo cilíndrico al que aparece adosado, en lo que forma su parte posterior, otro de planta cuadrada de menor altura. La rotonda circular se cubre con una cúpula gigante apoyada en seis grandes arcos.

Carece de órdenes arquitectónicos y su torre es análoga a las proyectadas por don Ventura Rodríguez para las iglesias de Santa Fe y de Loja.

Parece ser, porque así lo consignó Llaguno⁶⁷, (1724-1799 escritor y político español), quien sin duda conoció a Lois Monteagudo, que esta fue la única obra realizada “de su invención”⁶⁸.

Tenemos noticias de que la construcción de la iglesia parroquial comenzó el día 11 de noviembre de 1786 por la inscripción grabada en su portada donde consta:

“EL REINO NRO SOR D CARLOS III MANDO CONSTRVIR ESTE TEMPLO CON LOS SOBRANTES/DE QVARTA DECIMAL DEL ARZOBISPADO DE GRANADA AL QVE SE DIO PRINCIPIO DEL DIA 11 DE NOVIEMBRE/ DE 1786 COBERNANDO LA YGLEIA N.M.S.P. PIO VI SIENDO ARZOBISPO EL YLLMO SOR D./ ANTONIO JORJE Y GALBÁN Y PRESIDENTE DEL YLLMO SOR D. JVAN MARIÑO DE LA BARRERA/ JVEZ DE FABRICAS Y SE CONCLVIO EN 12 DE AGOSTO DE 1802 EN EL PONTIFICADO DE/ N.S.P. PIO VII REINANDO N.C. MONARCA CARLOS IIII SIENDO ARZOBISPO EL EXMO E ILLMO SOR DON JVAN MANVEL MOS/COSO I PERALTA CAPITAN EN PRESIDENTE EL EXMO SOR DON RAFAEL VASCO BAXO LA DIRECCION DE LA RL JUNTA DE DIEZMOS”.

En el mismo año, el 14 de diciembre de 1785, fallecía Lois Monteagudo en Santa Fe y fue enterrado en la parroquia de los Santos Mártires Justo y Pastor de Granada.

⁶⁷ LLAGUNO Y AMIROLA, Eugenio (1829): *Noticias de los Arquitectos y Arquitectura de España desde su Restauración*. De Orden de S. M., Madrid en la imprenta Real. Año de 1829. TOMO IV pág. 288.

http://books.google.es/books?id=nLcGAAAQAAJ&printsec=frontcover&dq=Noticias+de+Arquitectos+y+de+Arquitectura+de+Espa%C3%B1a+desde+su+restauraci%C3%B3n+tomo+IV&hl=es&sa=X&ei=idBNUs_aJpHNsgbe-oCgBg&ved=0CDQ6AEwAA#v=onepage&q=Noticias%20de%20Arquitectos%20y%20de%20Arquitectura%20de%20Espa%C3%B1a%20desde%20su%20restauraci%C3%B3n%20tomo%20IV&f=false

⁶⁸ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su “Libro de Barrios adornos”*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA

Sabemos que no vio el inicio de las obras de la iglesia por documentos de compra-venta, encontrados en el Archivo de Protocolos de Montefrío, con fechas de: 6 de Marzo de 1786; 16 de Enero de 1787; 27 de Febrero de 1787 y 5 de Agosto de 1788 en los que se adquirieron 4 casas situadas en la plaza de la villa para la construcción de la nueva iglesia. Además también se ha encontrado en este mismo Archivo que existen dos contratos de la subasta de piedra para la construcción de la iglesia uno con fecha el 29 de Agosto de 1788 y otro con fecha de 18 de Octubre de 1788.

3.6 Francisco Aguado⁶⁹.

La obra por lo tanto la dirigió el arquitecto madrileño Francisco Aguado, del cual Llaguno no se ocupa. Junto con Juan de Castellanos y Juan Antonio Munas.

Estudió en Madrid, en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando en 1767 con 19 años, aunque su padre lo inicia en el mundo de la arquitectura con doce años.

Es en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando donde estudia con la tutela de Ventura Rodríguez y Diego Villanueva. Obteniendo el título en 1776.

Una vez obtenido el título, se dirige a Granada donde dirige las correspondientes obras del Consejo de Castilla como trabajo propio de un arquitecto de su calibre. Empieza llevando la dirección del Convento de la Comendadoras que proyecta Sabatini lo que le confiere un prestigio para hacer informes de obras secundarias.

Así, en 1781 dirige la Iglesia de Alomartes, entre 1783-1786 las de Cajar y Algarinejo. Y por último, después de la muerte de Domingo Lois, la Iglesia de la Encarnación de Montefrío entre 1786-1802.

También dirigió la Iglesia de Murtas según el proyecto de Domingo Thomas y la iglesia de Arenas del Rey (1784), destruida por los terremotos del siglo XIX. En 1794 trazó la iglesia de Salar. En 1806 presenta un proyecto para la iglesia de Chauchina y en 1816 las trazas de la Iglesia de Dalias que al final no se realizó.

⁶⁹ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Iglesia de San Marcos, Madrid (1549).....	4	Figura 3.22. Tempietto de Bramante.....	13
Figura 3.2. Capilla Real del Palacio Real de Madrid (1756).....	4	Figura 3.23. Panteón de Roma.....	14
Figura 3.3. Dibujo de la “Figura Mentis” de Giordano Bruno y heptágono sobre la planta de la Santa Capilla de la Virgen del Pilar de Zaragoza. Alzado de la Capilla 1750.	5	Figura 3.24. Capilla de la Comunión. Planta por Miguel Ferro Caaveiro. ⁵⁷	15
Figura 3.4. Iglesia del monasterio de Santo Domingo de Silos, Burgos (1752).....	5	Figura 3.25. Capilla de la Comunión de la Catedral de Santiago. ⁵⁷	15
Figura 3.5. Iglesia de San Bernardo, Madrid. (1753) (Cisterciense).....	6	Figura 3.26. Iglesia de Santa Fe.....	16
Figura 3.6. San Pedro Alcántara (1755).....	6	Figura 3.27. Imagen de la Iglesia de Vélez de Benaudalla (1776) ⁶²	16
Figura 3.7. Sagrario de la Catedral de Jaén (1761).	7	Figura 3.28. Iglesia de Alomartes (1780).....	17
Figura 3.8. Capilla Real del Palacio Real de Madrid (1756).....	7	Figura 3.29. Proyecto para iglesia en el Pardo de Lois de Monteagudo.	17
Figura 3.9. Iglesia de San Gabriel. Badajoz. (-1768- Según Llaguno y Ceán) posible boceto desechado de la Capilla Real de Madrid.....	7	Figura 3.30. Iglesia de la Encarnación de Montefrío. CERVERA, Luis (1985).....	18
Figura 3.10. La frustrada intervención de Ventura Rodríguez en la iglesia de Covadonga después de sufrir el incendio de 1777.....	8		
Figura 3.11. Proyección Isométrica de la iglesia dibujada por F. Chueca ³⁸	8		
Figura 3.12. Imagen de la Iglesia de Vélez de Benaudalla (1776) ⁶²	8		
Figura 3.13. Planta Iglesia de San Felipe Neri, Málaga (1778).....	9		
Figura 3.14. Iglesia de Algarinejo (1779).	9		
Figura 3.15. Iglesia de Cajar (1780) ⁴⁷	10		
Figura 3.16. Iglesia de Alomartes (1780).....	10		
Figura 3.17. Proyecto para iglesia en el Pardo de Lois de Monteagudo.....	11		
Figura 3.18. Planta iglesia de Alcutar de los Bérchules (1782) ⁴³	11		
Figura 3.19. Iglesia de Picena (1782) ⁴³	11		
Figura 3.20. Iglesia de Molvizar (1783).....	12		
Figura 3.21. Iglesia de Talará (1783).....	12		

4	≡	Construcciones precedentes.....	1
4.1		Obras que supusieron el punto de partida de la arquitectura religiosa academicista de Granada.	1
		· La Colegiata de Santa Fe. (1773-1785)	1
		· La Iglesia de Vélez de Benaudalla. (1777-1784).....	3
		· La Iglesia de Alomartes. (1779-1782).....	4
		INDICE DE FIGURAS.....	6

» 4 ≡ Construcciones precedentes.

4.1 Obras que supusieron el punto de partida de la arquitectura religiosa academicista de Granada.

Estamos ante el programa reformista. La escala de las intervenciones arquitectónicas, promovidas por el Consejo, se plantea como un plan integrador, un modelo de centralización desde el punto de vista institucional (gestión y ejecución) y desde el punto de vista de una nueva cultura llegando a los lugares más inaccesibles⁴⁸.

Así, se desarrollan los programas de Santa Fe, Montefrío y Loja por su tremenda potencia visual.

Para los ilustrados Santa Fe representa un modelo urbanístico interesante por la racionalización de una nueva idea de ciudad por la estructura regular de sus calles con una plaza donde confluyen las dos principales y donde se sitúa el gran edificio de la Colegiata.

Loja, de tradición histórica, por su propia configuración urbana no favorecía el levantamiento de un edificio de nueva planta así que se aprovecha la iglesia inconclusa.

En Montefrío se producirá la intervención más radical en el centro del entramado urbano. Será necesario demoler viviendas para levantar el edificio más potente en el Reino de Granada. Más que por razones de utilidad, se levanta como propaganda política para destacar la importancia de las reformas y la nueva imagen de la monarquía borbónica.

Iglesia parroquial de Arenas del Rey, próxima a Alhama, en cuyas trazas que intervino Manuel Martín Rodríguez, que fue destruida por los terremotos de 1884.

⁴⁸ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

Arquitectónicamente las propuestas que suponen un punto de inflexión en el proceso proyectual de la arquitectura religiosa son las de Santa Fe, Vélez de Benaudalla y Alomartes.

•La Colegiata de Santa Fe. (1773-1785)

Ventura Rodríguez proyecta la actual Iglesia Mayor Parroquial de la Encarnación (antigua colegiata), por Real Cédula de 12 de Noviembre de 1772 y Real Orden de 21 de Abril de 1773, sobre la antigua que construyeron los Reyes Católicos según Gómez Moreno⁴⁹. Es la primera intervención del Consejo de Castilla en el Reino de Granada. La Corona tiene interés en esta ciudad que es referente simbólico de la monarquía moderna al ser el último asentamiento militar antes de la unificación de los reinos españoles. Es ejemplo de un severo y magnífico dórico.

En 1764 se constata el estado ruinoso de la antigua iglesia que presenta un pobre alzado de ladrillo y tierra.

Se mantienen los cimientos que eran buenos de piedra pero se levantan nuevos muros ya que no tenían resistencia suficiente.

La financiación fue mediante los llamados sobrantes de cuarta decimal ya que desde 1618 esa iglesia había contribuido a la masa decimal con más de 23000 reales anuales habiendo sólo conseguido que en 1751 se librasen 30000 para reparar los tejados, solado y otras necesidades y en 1756 otros 40000 pero parte se emplearon en las iglesias anejas de Chauchina, Purchil y Belicena.

Domingo Lois de Monteagudo se ocupó de su ejecución hasta que tuvo el encargo de la iglesia de Montefrío.

Es de planta de cruz latina inscrita, cerrada por bóveda de cañón y cúpulas rebajadas. El crucero se cubre con una gran cúpula que será rebajada también. A la izquierda se abre la capilla del Sagrario, de planta cuadrada al exterior y circular en el interior

⁴⁹ GÓMEZ, Jesús Juan (1985): *El Neoclásico y la Iglesia de Santa Fe*. Departamento de Actividades Culturales de Caja Rural. Granada. Depósito Legal GR. 725-1985.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

cuyas ocho columnas dóricas soportan una gran cúpula de media naranja con linterna.

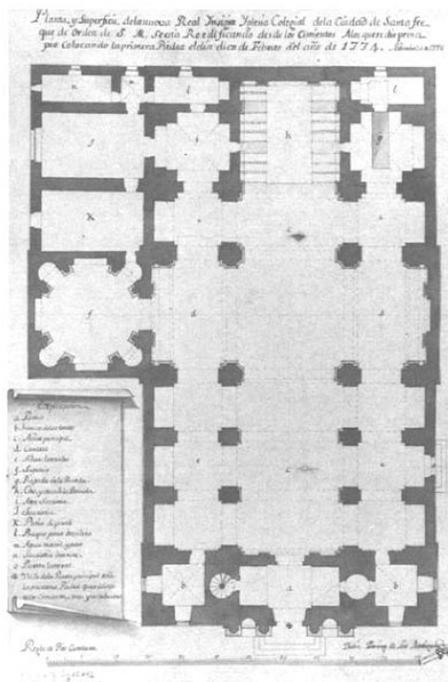


Figura 4.1. Imagen de la iglesia de Santa Fe⁵⁰



Figura 4.2. Colegiata de Santa Fe⁵¹.

La fachada se proyecta empleando el orden dórico romano, no usual en Ventura Rodríguez que lo usa en la fachada de la Azabachería de Santiago de Compostela.

⁵⁰ GUILLEN, Esperanza (1989): *La fortuna de un arquitecto pensionado en Roma: Domingo Lois Monteagudo*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 179-205

⁵¹ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

Se usa piedra de Santa Pudía y Alfacar pero al constatar, Lois Monteagudo, que no son lo suficientemente resistentes se contrata la piedra de Sierra Elvira, haciendo siempre uso de los recursos locales en el Reyno de Granada⁵².

En 1785 se consagra el nuevo templo habiendo pasado múltiples retrasos y contratiempos por el presupuesto inicial que terminó incrementándose con respecto al inicial lo que provocó retrasos en otras iglesias coetáneas de los pueblos cercanos ya que de la cuarta decimal correspondiente a cada una se tuvo que reajustar para poder concluir las obras de Santa Fe que consumieron más de lo estimado.

Cuenta con la inscripción borbónica en la piedra:

“EL SR. D. CARLOS III REEDIFICÓ ESTA SANTA IGLESIA DE SANTA FE AÑO DE 1774 SIENDO PONTÍFICE CLEMENTE 14 ARZOBISPO DE GRANADA D. PEDRO DE BARRUETA, PRIOR DE ESTA IGLESIA D. PEDRO TERRENO, PRESIDENTE DE GRANADA D. MANUEL DOZ Y INTENDENTES DE LA OBRA D. FRANCISCO DE LA BLANCA, D. JUAN DE DIOS GONZALES, Y ARQUITECTO D. DOMINGO LOIS, SE PUSO EN DIEZ DE FEBRERO DE 1774”⁵³

La Colegiata de Santa Fe, finalmente concluida, sufrió los efectos de los terremotos de comienzos del XIX que afectaron a los cuerpos superiores de sus torres.

⁵² GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

⁵³ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

• **La Iglesia de Vélez de Benaudalla⁵⁴. (1777-1784)**

Es de planta de cruz inscrita en un cuadrado, del mismo modo que su precedente en Santa Fe. El interior existe un espacio central cuadrado cerrado por cúpula y los brazos los cierran bóvedas de medio cañón. Utiliza soportes de orden dórico en el interior. Utiliza frontones para las fachadas y muros desnudos al exterior dando evidencia del carácter de su espacio interior. En el eje de simetría se coloca la única torre. Según Reese *“se caracteriza por ser uno de sus más poderosos precedentes en el campo de las masas contrastadas”*.

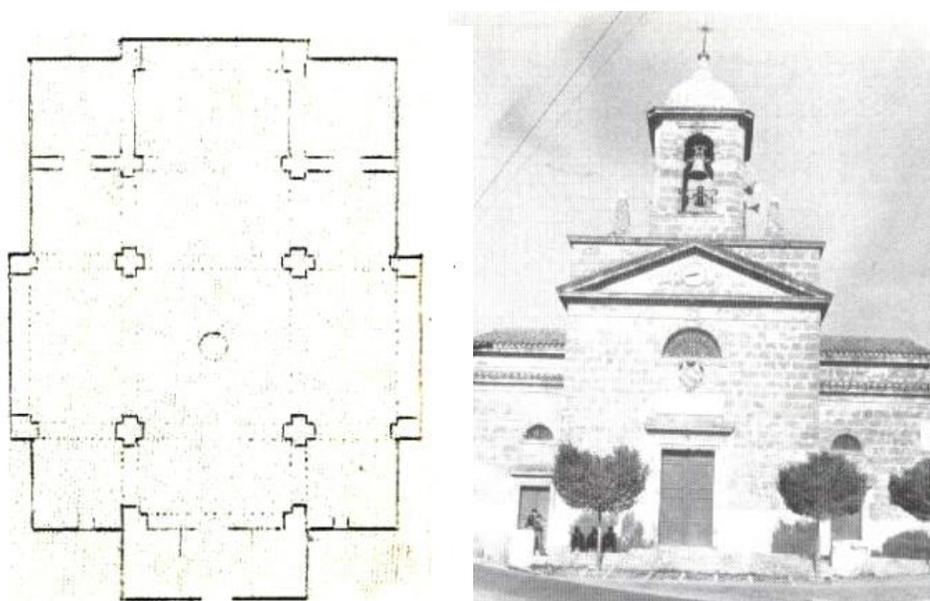


Figura 4.3. Imagen de la Iglesia de Vélez de Benaudalla⁵¹.

⁵⁴ TORRES, José María (1996): *Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 333-357

Esta iglesia pondrá el punto de inflexión en la concepción de las siguientes construcciones de Ventura Rodríguez. Por su sentido reductor y simplificador se acerca a la idea de “la Razón” que se pretende dar en este periodo histórico.

Los trabajos que se realizan en zonas rurales obedecen a los programas de reforma mercantilista y jansenista que pretendían conseguir siempre y cuando los pequeños granjeros y artesanos permanecieran en sus pueblos trabajando la tierra y produciendo manufacturas porque en definitiva era la clave de la regeneración económica española⁵⁵.

Se puede decir que la obra de Ventura Rodríguez prestó servicio directamente a aquellos programas.

Según Madoz, la iglesia se financió con el producto de tasas (diezmos) eclesiásticos cedidos por el rey para este propósito, nombrando otra comisión subvencionada a través de la Cámara de Castilla.

Se solicitó a la Cámara construir la iglesia. Para ello se recaudó dinero de diferentes arcas. Dinero de las rentas anuales de Vélez 5 400 reales (de las cuales 1400 reales no cuenta porque eran destinados a otras tasas y gastos), dinero que se le había prestado a jurisdicción de Orgiva, cuyas rentas anuales eran alrededor de 60300 reales. El proyecto que presentó el cabildo estaba presupuestado en 49000 reales así que se otorgó pero bajo la supervisión de Ventura Rodríguez. Finalmente el proyecto presentado sufrió variaciones después de la supervisión incrementado el presupuesto en 256800 reales. Aun así se ejecutó estando de director de obra Domingo Lois de Monteagudo⁵⁶.

⁵⁵ Reese, Thomas Ford (1975): *Ventura Rodríguez en Vélez de Benaudalla y Larrabezúa*. Cuaderno de Arte de la Universidad de Granada XII. Granada (1975), 23-30

⁵⁶ Reese, Thomas Ford (1975): *Ventura Rodríguez en Vélez de Benaudalla y Larrabezúa*. Cuaderno de Arte de la Universidad de Granada XII. Granada (1975), 23-30

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO, GRANADA.

También queda constancia de ser una iglesia bajo el patronato regio ya que queda recogido en la inscripción en un bloque de piedra situado sobre la entrada de la iglesia⁵⁷:

“SE EMPEZÓ LA OBRA DE ESTA YGLERIA EN EL AÑO 1778, REINANDO EL SEÑOR D. CARLOS OOO Y DE SU REAL ORDEN GOVERNANDO LA SYLLA PONTIFICATO ESTE SANTISIMO PADRE PIO vi. SIENDO ARZOBISPO DE GRANADA ILUSTRATISIMO SEÑOR D. ANTONIO JORGE Y GAIBAN Y PRESIDENTE DE SU REAL CANCELERIA EL ILUSTRISIMO SEÑOR D. GERONIMO DE VELARDE Y SOLO (...?) DE EL SEÑOR DON FERNANDO ANTONIO MADRIGAL, PADIA BENEFICIADO DELLA. SE CONCLUIO EN EL ANYO DE 1784”.

• **La Iglesia de Alomartes⁵⁴. (1779-1782)**

Es el caso de la iglesia de Alomartes, que sigue con el proceso de reducción. Utilizando formas simples, alcanza la belleza en las proporciones, la simetría, la precisión geométrica y el sentido unificador. Se valora la supresión o reducción de elementos decorativos así como el empleo de órdenes clásicos.

Los materiales que utiliza son: Para el exterior, ladrillo visto en las fachadas. Piedra en jambas, dintel, cornisa y gradas de la puerta, y tramos aislados de la cornisa de los frontones. Para el interior enlucido y encalado para los muros.

Posee un espacio central cuadrangular, cubierta por bóveda vaída, de donde salen cuatro brazos con bóvedas de medio cañón. De esta forma quedan cuatro fachadas adelantadas. La sacristía queda detrás estrecha y alargada.

Se prescinde de cualquier ornamento usado en otras épocas, a lo sumo una banda que recorre la unión entre muros y bóvedas al igual que en la Colegiata de Santa Fe. Todos estos detalles junto con el enlucido blanco generan una iluminación uniforme potenciando el valor espacial.

En el exterior sigue el uso del frontón en la fachada principal. Se usan dos torres colocadas de forma simétrica con estructura ochavada y cubiertas por cúpulas semiesféricas que arrancan de la plataforma que bordea el edificio y envuelve el frontón.

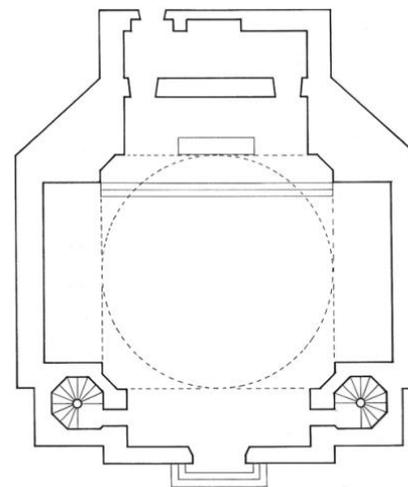


Figura 4.4. Iglesia de Alomartes⁵⁸.

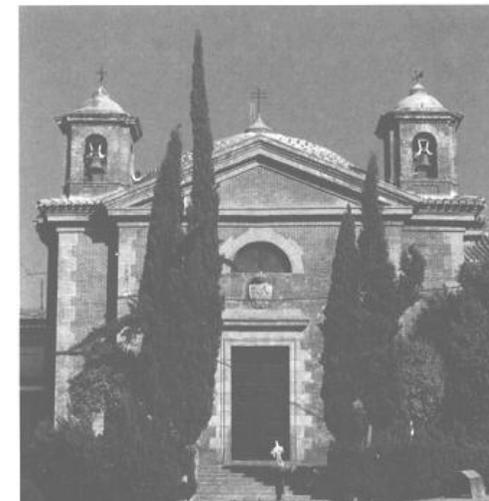


Figura 4.5. Iglesia de Alomartes⁵⁹.

La cubierta de la bóveda de la nave central emplea unas tejas troncopiramidales que siguen el modelo de las de Santa Fe. Rematada con cruz de hierro.

Es Francisco Aguado quien dirige la construcción de la iglesia de Alomartes. Francisco Quintillán, sobrino de Lois de Monteagudo, trabajaba como aparejador.

⁵⁸ REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

⁵⁹ TORRES, José María (1996): Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada). Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 333-357

⁵⁷ Reese, Thomas Ford (1975): *Ventura Rodríguez en Vélez de Benaudalla y Larrabezúa*. Cuaderno de Arte de la Universidad de Granada XII. Granada (1975), 23-30

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Para la financiación se contaba:

- 1.- Con la reducción que Ventura Rodríguez hiciese del proyecto de Lois de Monteagudo.
 - 2.- La aportación de 300 ducados ofrecida por los vecinos.
 - 3.- 2000 reales, más el terreno para la nueva construcción y 40 ducados anuales para el sostenimiento del ministro que concedía el marqués del Salar.
 - 4.- La aportación de 24000 reales de la Fábrica de la iglesia de Illora.
 - 5.- Con la ayuda de 8000 a 1000 reales, que se solicitaban al rey, de los diezmos que disfrutaba del Real Soto de Roma (posesiones reales en el término de Alomartes). La solicitud fue atendida y se concedió 18000 reales.
 - 6.- Suplir lo que faltase con el fondo de la cuarta decimal.
- Prueba de la financiación de la corona a estas iglesias nos ha quedado el escudo borbónico que preside la entrada. Obras financiadas por patronato regio⁶⁰.



Figura 4.7. Escudo real de la fachada de la iglesia de Vélez de Benaudalla.



Figura 4.6. Escudo real de la fachada de la iglesia de Alomartes.

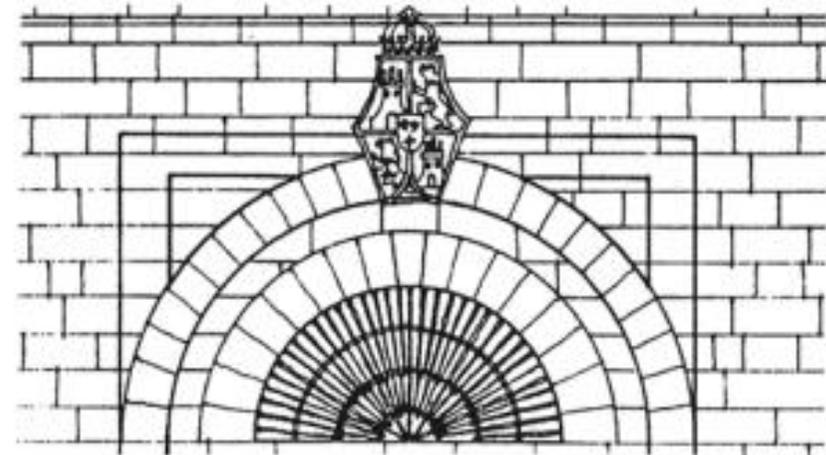


Figura 4.8. Escudo real de la fachada de la iglesia de Montefrío.

⁶⁰ TORRES, José María (1996): Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada). Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 333-357

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Imagen de la iglesia de Santa Fe 2

Figura 4.2. Colegiata de Santa Fe 2

Figura 4.3. Imagen de la Iglesia de Vélez de Benaudalla⁵¹ 3

Figura 4.4. Iglesia de Alomartes 4

Figura 4.5. Iglesia de Alomartes 4

Figura 4.6. Escudo real de la fachada de la iglesia de Alomartes 5

Figura 4.7. Escudo real de la fachada de la iglesia de Vélez de Benaudalla 5

Figura 4.8. Escudo real de la fachada de la iglesia de Montefrío 5

5	La iglesia de la Encarnación.	1
5.1	Domingo Antonio Lois Monteagudo. (1723-1786).....	1
5.2	La Iglesia de la Encarnación de Montefrío.	2
5.3	Rehabilitaciones realizadas en la Iglesia de la Encarnación de Montefrío más importantes.....	13
	· Consecuencias de los terremotos.....	13
	· Estado de conservación y rehabilitación actual.	13
	1. Cod Ref 9201 21/190 Obras en la Iglesia de la Encarnación. En la cubierta.	13
	2.Cod. Ref. 9208 35-3. Proyecto en el patio de la Iglesia Parroquial de la Encarnación. Montefrío.....	14
	3. Expedientes de Conservación. s/n Fichas Diagnóstico: Iglesia Encarnación Montefrío. Sig. 14767 3/6.	14
	Nave principal-cúpula.....	15
	Cúpula de la torre.....	16
	Cuerpo delantero de la portada.....	16
	INDICE DE FIGURAS.....	17

» 5 ▢ La iglesia de la Encarnación.

5.1 Domingo Antonio Lois Monteagudo. (1723-1786)

Cualquier obra de arquitectura es reflejo del momento histórico, las circunstancias personales y el carácter del arquitecto que la proyecta.

Domingo Antonio Lois de Monteagudo fue arquitecto de vocación lo que su carácter le imprime a esta iglesia una esmerada dedicación que se ve reflejado en el trabajo impecable de cantería que en ella se aprecia.

Además se trata del primer proyecto propio del arquitecto, todos los anteriores estaban tutelados por Ventura Rodríguez. Esto lo sabemos por los escritos del cabildo de la Iglesia de Santa Fe en los que reclamaba la permanencia de Domingo Lois de Monteagudo en la dirección de obra ya que se encontraba ausente justo en el periodo de proyecto de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío.

Los compañeros de su entorno se caracterizan por ser una generación brillante que apuestan por el cambio de mentalidad influenciado por las corrientes que se producían en Europa.

Los arquitectos coetáneos a Monteagudo son los primeros en formarse en un ambiente académico al modo de las academias francesas⁵⁵. Gracias a su posibilidad de contactar con otras academias europeas (se sabe que fue pensionado en la

⁵⁵ Anterior a las Academias surgidas en el periodo de la ilustración, la arquitectura era un oficio más y su estudio se hacía por herencia generacional. Hasta ahora, en España, el conocimiento pasaba de padres a hijos o de maestros a aprendices en talleres formando gremios. Bajo el control de los gremios se desarrolla la tecnología de la época, principalmente en la construcción de las catedrales. La figura del arquitecto como creador solitario del espacio arquitectónico y de la construcción no existe. Los maestros y obreros guardan el conocimiento constructivo formando asociaciones que terminarían conociéndose como masonería (masón=albañil).

Academia de Roma) tuvo la oportunidad de estudiar in situ la arquitectura clásica que influyó de forma clave para el proyecto de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío.

El contexto político-religioso en el que se desarrolla el proyecto de Domingo Lois de Monteagudo se puede resumir:

1 Movimiento religioso de la iglesia católica proveniente del clero europeo comprometido con la reforma ilustrada y opuestos a la Compañía de Jesús. La mentalidad jansenista está junto a la monarquía mediante el regalismo borbónico y contraria al clero que poseía la mayor parte de tierras sin tributar con la consiguiente imposibilidad de revertir en la sociedad parte de los beneficios eclesiásticos.

Una parte de estos diezmos (la cuarta decimal) será destinado a la construcción de la iglesia de Encarnación al igual que pasó con sus antecesoras como la de Santa Fe, Vélez de Benaudalla y Alomartes pertenecientes al reino de Granada y que Domingo Lois de Monteagudo dirigió.

2.- Los jesuitas, que entre otros votos tienen la absoluta obediencia al Papa por encima del rey, son expulsados acusados de instigadores de rebeliones populares contra el poder real.

La Iglesia de la Encarnación no pertenece a una congregación concreta ya que es una iglesia parroquial lo que significa que su sacerdote diocesano trabaja directamente con el obispo, mientras que los sacerdotes religiosos pertenecientes a congregaciones tienen un representante que es el que está con contacto con el obispo. Los jesuitas, Compañía de Jesús, es una organización secular, semejante al Opus Dei, que no se incluía en ninguno de los dos grupos comentados.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

3.- Las Sociedades Económicas de Amigos del País⁵⁶. Desde 1763 Rodríguez Campomanes sociedades para el fomento de la industria, la agricultura y la educación artesana, que culminarían con el “Discurso sobre el fomento de la industria popular” con el que por Real Cédula de 18 de noviembre de 1774 se buscaba la colaboración del clero para la creación de asociaciones de este tipo. Los esfuerzos se dirigen a crear prosperidad en cada región, estudiando los problemas y medios con los que cuenta para un futuro mejor. Se trata de un medio para reconstruir la nación.

Prueba de la política económica es la construcción de El Pósito, un almacén de grano debido al notable incremento de población de estilo clásico construido en 1780. Creado por la Secretaría de Estado mediante un decreto de 1751 para la Superintendencia General de Pósitos⁵⁷.

Esto da idea de la riqueza del lugar que podía permitirse, gracias a los tributos que el territorio debería pagar, la construcción de una iglesia tan espectacular como la iglesia de la Encarnación de Montefrío.

En 1786 proyecta la Iglesia de la Encarnación en Montefrío. Mientras lleva las iglesias de Santa Fe y Loja proyecta la de Montefrío. Los tres términos lindan entre ellos así Domingo Antonio Lois Monteagudo era conocido en Montefrío por su trabajo en las localidades vecinas.

La iglesia se compone de un cuerpo cilíndrico al que aparece adosado, en la parte posterior otro de planta cuadrada de menor altura. El cuerpo cilíndrico se cubre con una cúpula gigante apoyada en seis arcos. Carece de órdenes arquitectónicos y la torre es semejante a las que proyecta Ventura Rodríguez en Santa Fe y Loja.

⁵⁶ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

⁵⁷ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

Parece ser, porque así lo consignó Llaguno⁵⁸, quien sin duda conoció a Lois Monteagudo, que esta fue la única obra realizada “de su invención”⁵⁹.

La construcción empezó en 1786, el mismo año que fallecía Lois Monteagudo. Así que la dirigió el arquitecto madrileño Francisco Aguado.

5.2 La Iglesia de la Encarnación de Montefrío.

Al final de la vida del arquitecto Domingo Antonio Lois Monteagudo proyecta un edificio de nueva planta en uno de los principales núcleos urbanos de la provincia. La iglesia parroquial de la Encarnación es un magnífico exponente del neoclásico granadino, sin duda el más original por su configuración espacial dominada por una gran rotonda que constituye su única nave. Esta morfología aparece en el neoclásico por obedecer a los planteamientos intelectuales de los diseñadores academicistas, los cuales desde Madrid imponían unos modelos desconectados de la tradición constructiva y artística de las distintas localidades.

Montefrío contaba con el templo parroquial renacentista de Diego de Siloé construido en la parte más elevada de la ciudad sobre la antigua alcazaba musulmana y por el otro extremo contaba con el convento barroco franciscano de San Antonio.

⁵⁸ LLAGUNO Y AMIROLA, Eugenio (1829): *Noticias de los Arquitectos y Arquitectura de España desde su Restauración*. De Orden de S. M., Madrid en la imprenta Real. Año de 1829. TOMO IV pág. 288.

http://books.google.es/books?id=nLcGAAAAQAAJ&printsec=frontcover&dq=Noticias+de+Arquitectos+y+de+Arquitectura+de+Espa%C3%B1a+desde+su+restauraci%C3%B3n+tomo+IV&hl=es&sa=X&ei=idBNUs_aJpHNsgbe-oCgBg&ved=0CDQQ6AEwAA#v=onepage&q=Noticias%20de%20Arquitectos%20y%20de%20Arquitectura%20de%20Espa%C3%B1a%20desde%20su%20restauraci%C3%B3n%20tomo%20IV&f=false

⁵⁹ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su “Libro de Barrios adornos”*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Iglesia de San Antonio⁶⁰ (1737-1763 de estilo barroco): Dirigida por el arquitecto de la orden franciscana M. Nieto. Hace uso del lenguaje artístico, persuasivo, teatral y formal al servicio de la contrarreforma católica. Se termina en 1763 justo cuando se inicia el cambio de pensamiento ilustrado, con la vuelta a un proceso de racionalización de la teoría y la práctica arquitectónica.

La iglesia es de planta rectangular con capillas laterales conectadas entre sí por arcos de medio punto. Constituye una cruz latina inscrita.

Tres capillas a cada lado, situadas entre los contrafuertes, se abren a la nave central, muy desarrollada en altura, mediante arcos de medio punto con las claves decoradas. Se cubre con bóveda de medio cañón y aparece ornamentada. En el crucero y sobre pechinas en las que descansa un tambor, se levanta la cúpula como símbolo religioso supremo que caracteriza de modo singular las iglesias barrocas. Es, posiblemente, el elemento arquitectónico que más insistentemente aparece en el arte contrarreformista; como expresión de la bóveda celeste y de la divinidad, se identifica de un modo claro con el triunfo de la Iglesia.



Figura 5.1. Inserción de las tres iglesias. Renacentista, Barroca y Neoclásica.

Elaboración propia.

Es durante el reinado de Carlos III, con la idea de la época de promoción real mediante construcciones religiosas (hay que tener presente que desde fechas de la

⁶⁰ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

Reconquista cristiana, en el Reino de Granada, la autoridad de los reyes sobre las propiedades religiosas fue confirmada, en 1500, por una bula del Papa Alejandro VI en la que se especificaba la correspondencia a la Corona de parte de los diezmos con la precisa carga de edificar, ampliar y reparar templos y que será Carlos III quien recupera los derechos del Patronato Regio)⁶¹, cuando se levanta el nuevo templo, dentro de la política de control Real de los procesos constructivos diocesanos, en el centro de la trama urbana justo en la línea de unión de la Iglesia de Diego de Siloe y la Iglesia de San Antonio siendo preciso demoler viviendas preexistentes.

Se tiene referencia de una petición de los vecinos al arzobispo para construir un nuevo templo en la zona llana, en el año 1645, debido a la fuerte pendiente de acceso a la iglesia de la Villa. Referencia a través de José Manuel Gómez-Moreno Calera, localizado en el archivo eclesiástico de Granada⁶².

Con anterioridad de había previsto un solar a comienzos del XVII (1602), e incluso llevado a cabo la subasta de materiales. De hecho, el encargo de las trazas había recaído en Ambrosio de Vico, pero no se llevó a cabo⁶². Aún en el último tercio del siglo siguiente se seguía solicitando por parte del pueblo. Para esta primera propuesta se sabe gracias a la tesis de Gómez-Moreno⁶² que se trataría de un proyecto de edificio sólido de cantería “dos mil barras de sillares y esquinas y tiçones”, cifra bastante elevada que nos da idea de sus proporciones. Habría de tener crucero y capillas hornacinas pues “las piezas de los pilares de las columnas y pies derechos de el crucero y capillas ornacinas an de tener de largo tres pies y medio...”, sería pues una estructura claramente contrarreformista de nave con capillas, crucero y capilla mayor. Curiosamente se mencionan las piedras o sillares de las bóvedas y arcos de las capillas hornacinas pero no las que habrían de cubrir la nave, crucero y capilla mayor, quizá se procediera a hacer un templo híbrido, con techumbres de

⁶¹ PEDREGOSA, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazari de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana*. Granada: Revista del CEHGR·núm. 24-2012·págs. 73-103. Pag.100

⁶² GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1987): *La transición del Renacimiento al Barroco en la arquitectura religiosa granadina (1560-1650)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433806262 <http://hdl.handle.net/10481/6043>

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

madera, como las de Albolote, el Carmen de Alhama o los Agustinos de Motril, o, más probablemente, con bóvedas de ladrillo. La piedra se traería de las canteras del Arrastradero y del Peñón de la Higuera, de donde posteriormente se las traerían para la Iglesia proyectada de Domingo Lois Monteagudo que finalmente es la que ha llegado a nuestros días.

La elección⁶³ de Domingo Antonio Lois Monteagudo no era accidental ya que este llevaba las obras de las iglesias de Vélez de Benaudalla, Santa Fe y terminación de la de Loja, según directrices de Ventura Rodríguez, donde demostraba su buen oficio y perfecta asimilación de los programas dictados por su maestro.

Los trabajos de idea de proyecto de la iglesia de Domingo Antonio Lois Monteagudo se iniciaron entre 1781-1782, aunque el inicio de las obras se demoró hasta 1786 por lo que el arquitecto no vio colocar la primera piedra, según un recibo encontrado en el Archivo Eclesiástico de Granada. En este recibo se identifica a Lois como figura que reconoce el lugar para ubicar la construcción, donde será preciso comprar y demoler algunos edificios, y a Mateo del Arco y Juan Domingo Álvarez como albañiles.

Además queda recogido en un documento del Archivo de la Academia de San Fernando con fecha de 1785 que fue Domingo Antonio Lois Monteagudo el proyectista y que se presenta ante la administración para que lo estudie y lo

considere como apto⁶⁴. En este mismo año se produjo, el 5 de mayo de 1785, un fuerte terremoto que dañó el edificio del convento de los Agustinos.

El informe que se emite por parte de la Academia de Bellas Artes de San Fernando y por parte del Consejo fue el siguiente: *propone la ejecución de la iglesia tal y como la representa el arquitecto y en caso de no haber fondos disponibles, deberá ser el propio Lois “que conoce el terreno y vecindario de Montefrío” quien realice las correcciones pertinentes.*⁶⁵

El presupuesto inicial fue de 925.000 reales (952.596 reales quedando con la firmeza, capacidad y buen aspecto que pide el Arte)⁶⁶, y cuando se llevaba ejecutado 1.712.000 reales aún seguirá faltando un millón para concluir la obra ya que se demoró por doce años⁶⁶. Costó 2.300.000 reales según Madoz en su diccionario y lo reitera Gómez-Moreno⁶⁷.

Se tienen noticias de varios toques de atención por parte del Cabildo Colegial y de la Chancillería para acelerar las obras de Santa Fe que estaba sufriendo retrasos en su ejecución, lo que da una idea de lo abstraído y emocionado que debió estar Domingo Antonio Lois Monteagudo con la proyección de la nueva iglesia de Montefrío. Será el proyecto donde su imaginación no tendrá límites solo tenía que regirse por el uso del edificio y el número de habitantes. Retomará datos de su formación italiana haciendo una interpretación del Panteón que es la esencia de la arquitectura clásica.

⁶³ LLAGUNO Y AMIROLA, Eugenio (1829): *Noticias de los Arquitectos y Arquitectura de España desde su Restauración*. De Orden de S. M., Madrid en la imprenta Real. Año de 1829. TOMO IV pág. 288.

http://books.google.es/books?id=nLcGAAAAQAAJ&printsec=frontcover&dq=Noticias+de+Arquitectos+y+de+Arquitectura+de+Espa%C3%B1a+desde+su+restauraci%C3%B3n+tomo+IV&hl=es&sa=X&ei=idBNUs_aJpHNsgbe-oCgBg&ved=0CDQQ6AEwAA#v=onepage&q=Noticias%20de%20Arquitectos%20y%20de%20Arquitectura%20de%20Espa%C3%B1a%20desde%20su%20restauraci%C3%B3n%20tomo%20IV&f=false

⁶⁴ GUILLEN, Esperanza (1989): *La fortuna de un arquitecto pensionado en Roma: Domingo Lois Monteagudo*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 179-205

⁶⁵ GUILLEN, Esperanza (1989): *La fortuna de un arquitecto pensionado en Roma: Domingo Lois Monteagudo*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 179-205

⁶⁶ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

⁶⁷ GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1987): *La transición del Renacimiento al Barroco en la arquitectura religiosa granadina (1560-1650)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433806262 <http://hdl.handle.net/10481/6043>

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

El rotundo templo de la Encarnación de Montefrío confirma las tremendas aptitudes de un arquitecto limitado por su vinculación a Ventura Rodríguez y por el propio funcionamiento administrativo de las instituciones.

Murió el 14 de diciembre de 1785 sin terminar la obra de la iglesia de Santa Fe y sin conocer el inicio de la iglesia de Montefrío que dirigirá el arquitecto Francisco Aguado, que se encontraba dirigiendo la iglesia de Algarinejo⁶⁸, junto a Francisco Quintillán y Lois como aparejador.

La fecha de finalización de las obras queda escrita en la inscripción que hay en su fachada principal, el 12 de Agosto de 1802, sobre su correspondiente cartel con el escudo real borbónico como sello de la promoción regia del edificio.

“EL REINO NRO SOR D CARLOS III MANDO CONSTRVIR ESTE TEMPLO CON LOS SOBANTES/DE QVARTA DECIMAL DEL ARZOBISPADO DE GRANADA AL QVE SE DIO PRINCIPIO DEL DIA 11 DE NOVIEMBRE/ DE 1786 COBERNANDO LA YGLESIA N.M.S.P. PIO VI SIENDO ARZOBISPO EL YLLMO SOR D./ ANTONIO JORJE Y GALBÁN Y PRESIDENTE DEL YLLMO SOR D. JVAN MARIÑO DE LA BARRERA/ JVEZ DE FABRICAS Y SE CONCLVIO EN 12 DE AGOSTO DE 1802 EN EL PONTIFICADO DE/ N.S.P. PIO VII REINANDO N.C. MONARCA CARLOS IIII SIENDO ARZOBISPO EL EXMO E ILLMO SOR DON JVAN MANVEL MOS/COSO I PERALTA CAPITAN EN PRESIDENTE EL EXMO SOR DON RAFAEL VASCO BAXO LA DIRECCION DE LA R^L JUN^{TA} DE DIEZMOS”.

Según el Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España realizado por Pascual Madoz se recogen las siguientes medidas: (siendo 1 pie = 0.30480 metros)

“La planta del templo es un rectángulo de 82 pies (24.994m) por 162 pies (49.378m) de longitud, interrumpido por un área circular de 926 pies de

⁶⁸ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

diámetro, cuyo círculo constituye la iglesia de 98 pies (29.870m) de diámetro, sin contar el espesor del muro”⁶⁹.

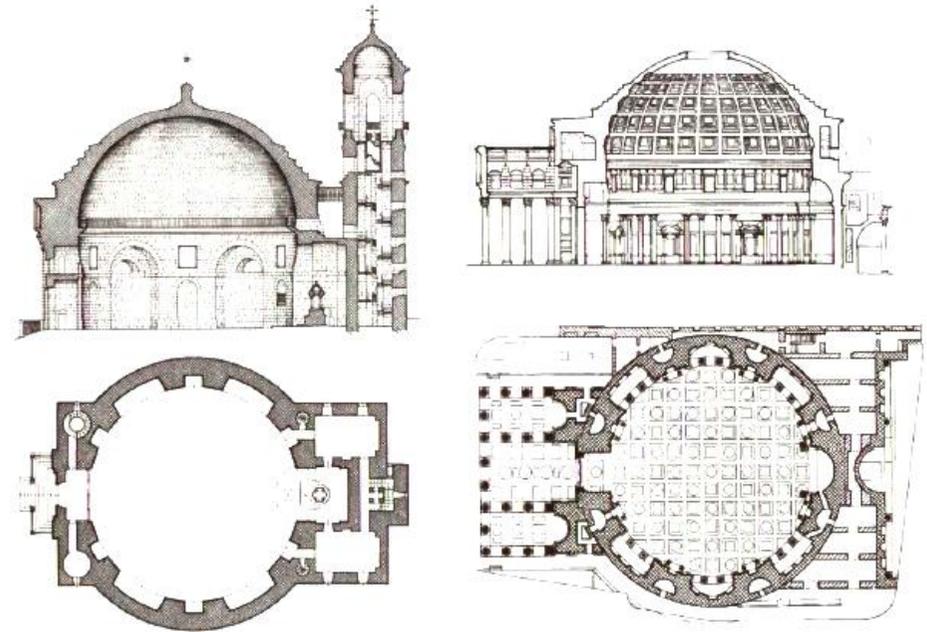


Figura 5.2. Comparativa entre la Iglesia de Montefrío y el Panteón de Agripa⁷⁰

Si lo comparamos con el Panteón de Agripa en Roma, no solo repite el espacio sino también sus proporciones. El Panteón fue construido por el emperador Adriano entre 118-128 en el mismo solar que ocupara el de Agripa erigido el 27a.c. Tiene una cúpula hemisférica de cuarenta y tres metros sobre una base cilíndrica lo que hizo del Panteón una proeza de la ingeniería y expresión culminante de la tecnología arquitectónica romana. La altura que presenta el Panteón hasta el arranque de la

⁶⁹ MADOZ, Pascual (1846-1850): *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar. Vols. 10-11. Madrid. 1846-1850. Establecimiento tipográfico de P. Madoz y L. Sagasti. Número de control: BVA20030146035.* <http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/consulta/registro.cmd?id=6353#infoejemplares>

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

cúpula es justo la mitad de diámetro, es decir, si se prolongase la curvatura de la cúpula hacia abajo para completar una esfera, esta tocaría el suelo en su parte inferior. Las diferencias entre estos edificios responden a las necesidades culturales y religiosas, puesto que la iglesia se impone la necesidad de una capilla mayor, sacristía y torre.

Aunque las dimensiones de la iglesia de Montefrío son menores, pues su diámetro es algo inferior a los treinta metros, la relación de sus proporciones es la misma que la del edificio romano, al ser igual la medida de la altura interior desde el suelo a la del diámetro de la cúpula.⁷⁰

El sistema constructivo similar aunque muy diferente por los materiales utilizados, en la Encarnación de Montefrío los vanos semicirculares y las grandes capillas hornacinas abiertas en el tambor actúan como los arcos de descarga del Panteón, que canalizan hacia el suelo la tensión generada por el peso de la cúpula⁷⁰.

La documentación gráfica que se tiene procede del levantamiento que se hizo directamente a partir de la fábrica realizada para el libro de Luis Cervera Vera que se reproduce a continuación

“por no conocer planos de la Iglesia parroquial de la Encarnación de Montefrío (Granada). Magnífico proyecto de Lois Monteagudo, los hemos levantado de su fábrica, con el mayor detalle posible, para el mejor conocimiento de ella. Por el contrario, los planos y diseños originales que se conservan del arquitecto gallego los reproducimos para facilitar su estudio”⁷¹.

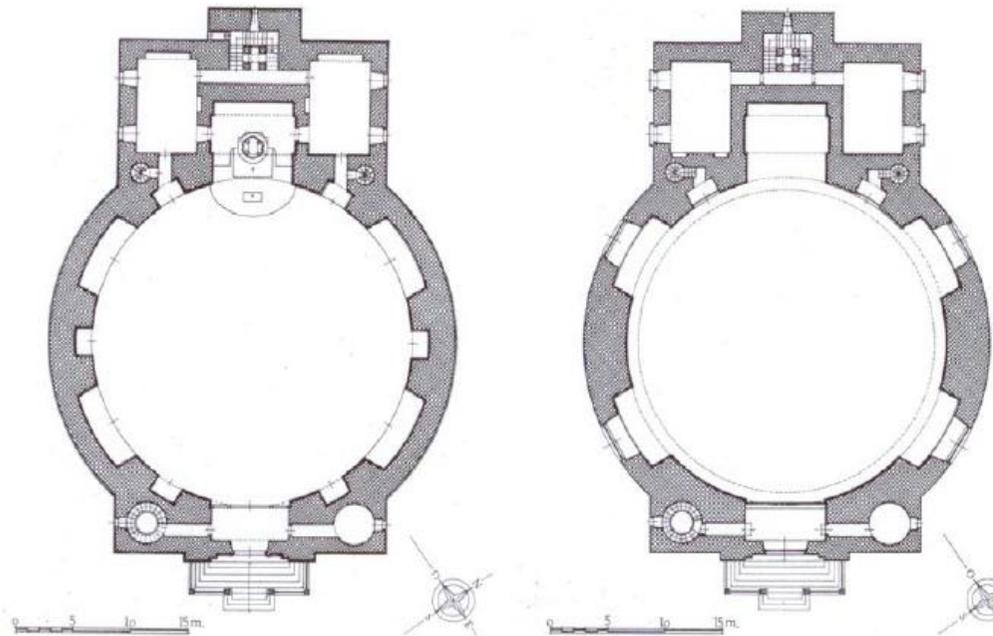


Figura 5.3. Planta de la iglesia. Cortes de la planta a distinto nivel. (CERVERA, Luis (1985))

La iglesia está construida con sillares de piedra, que como puede verse a simple vista van unidos entre sí mediante una capa de argamasa con lascas de piedra para una perfecta nivelación de los mismos.

⁷⁰ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

⁷¹ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barrios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4 pág.11

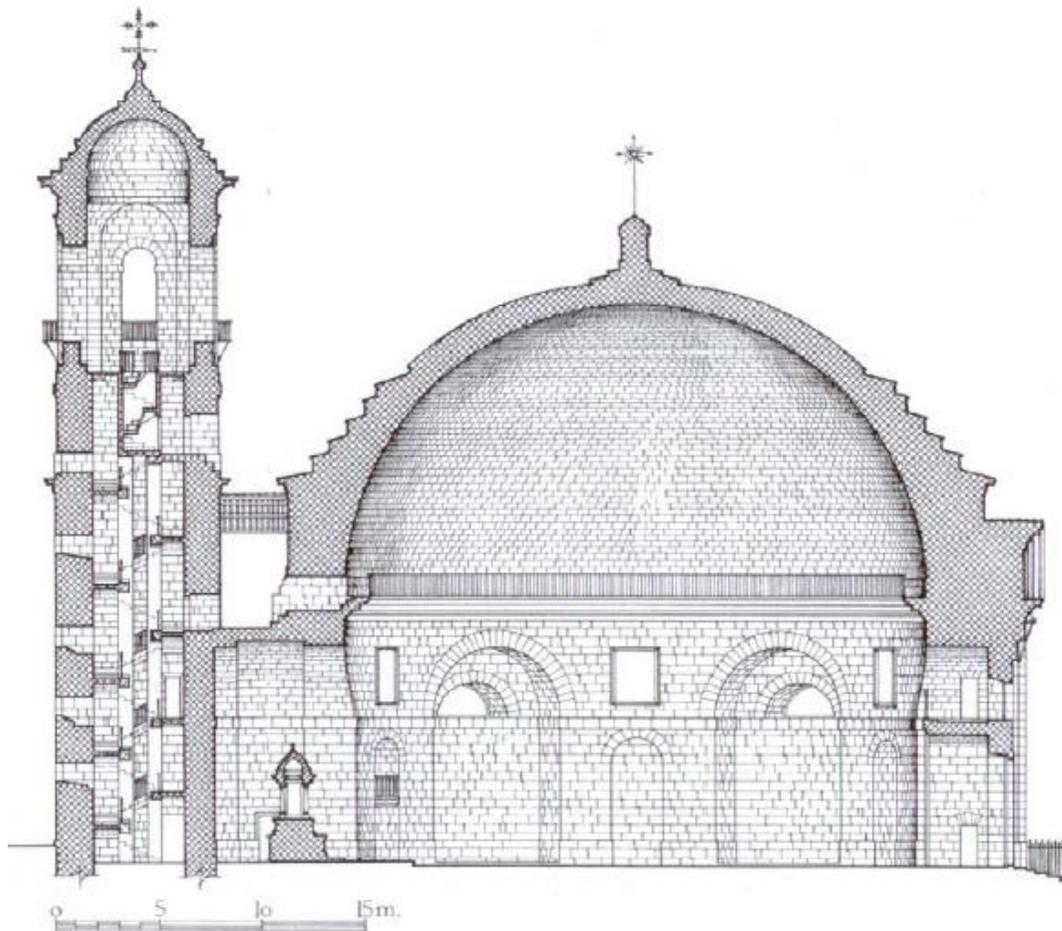


Figura 5.4. Corte Longitudinal⁷².

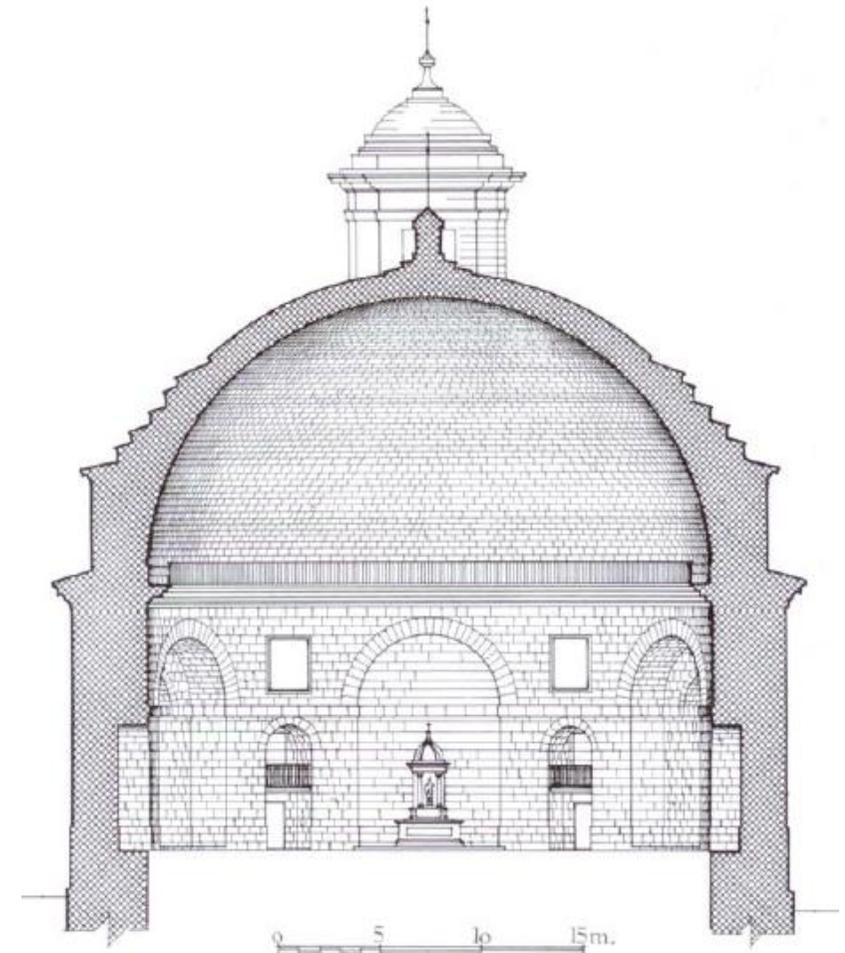


Figura 5.5. Corte Transversal⁷³

⁷² CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

⁷³ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

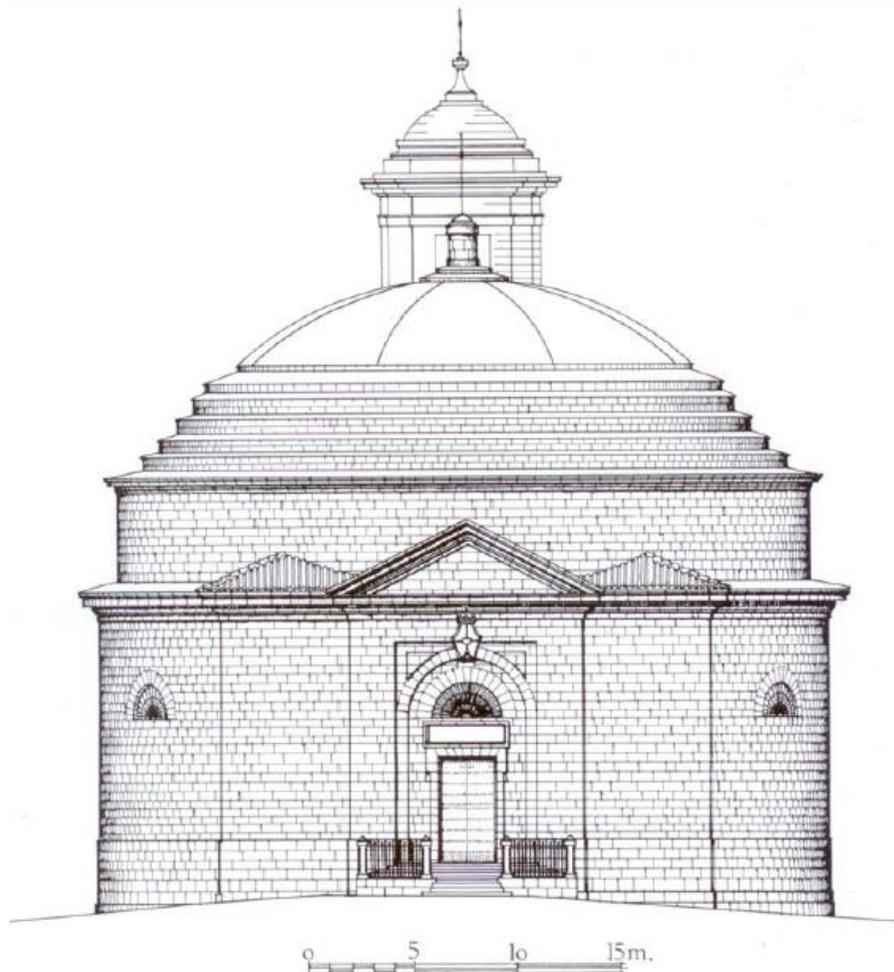


Figura 5.6. Alzado Principal al S-E⁷⁴

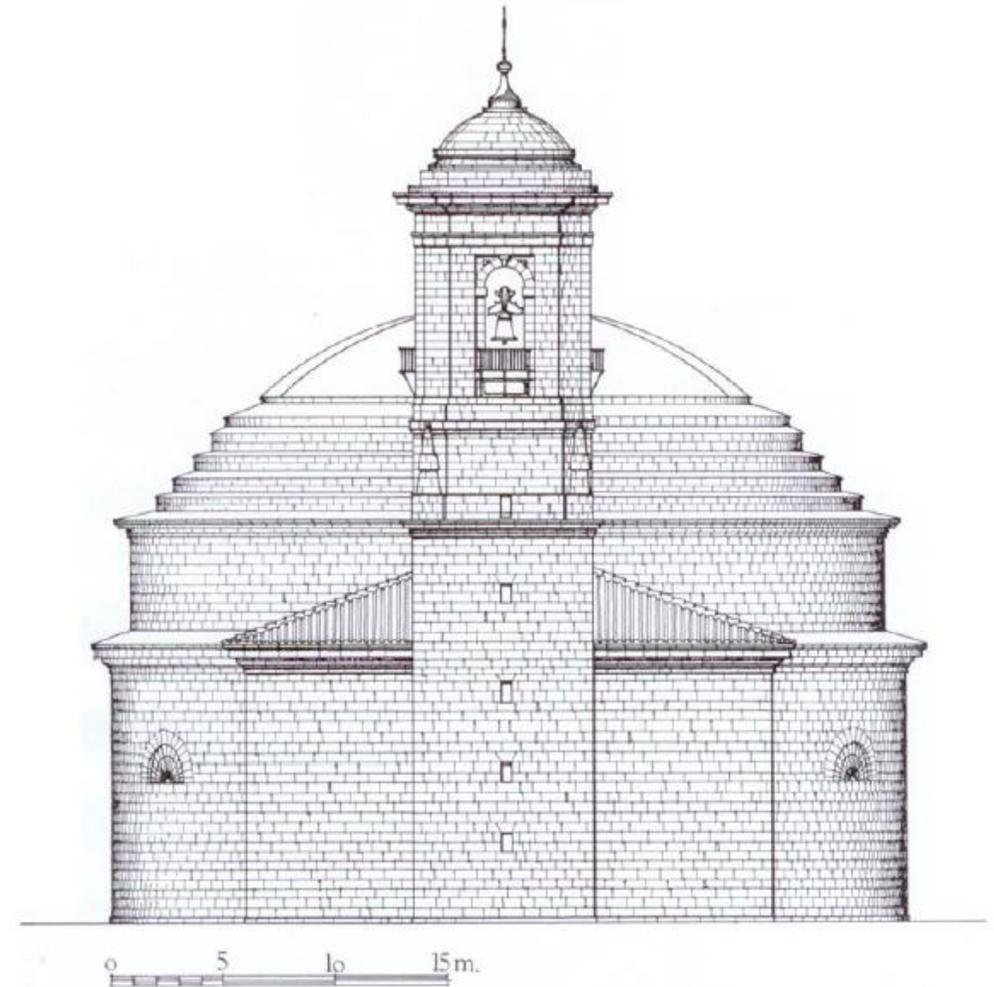


Figura 5.7. Alzado Posterior al N-O⁷⁵.

⁷⁴ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

⁷⁵ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

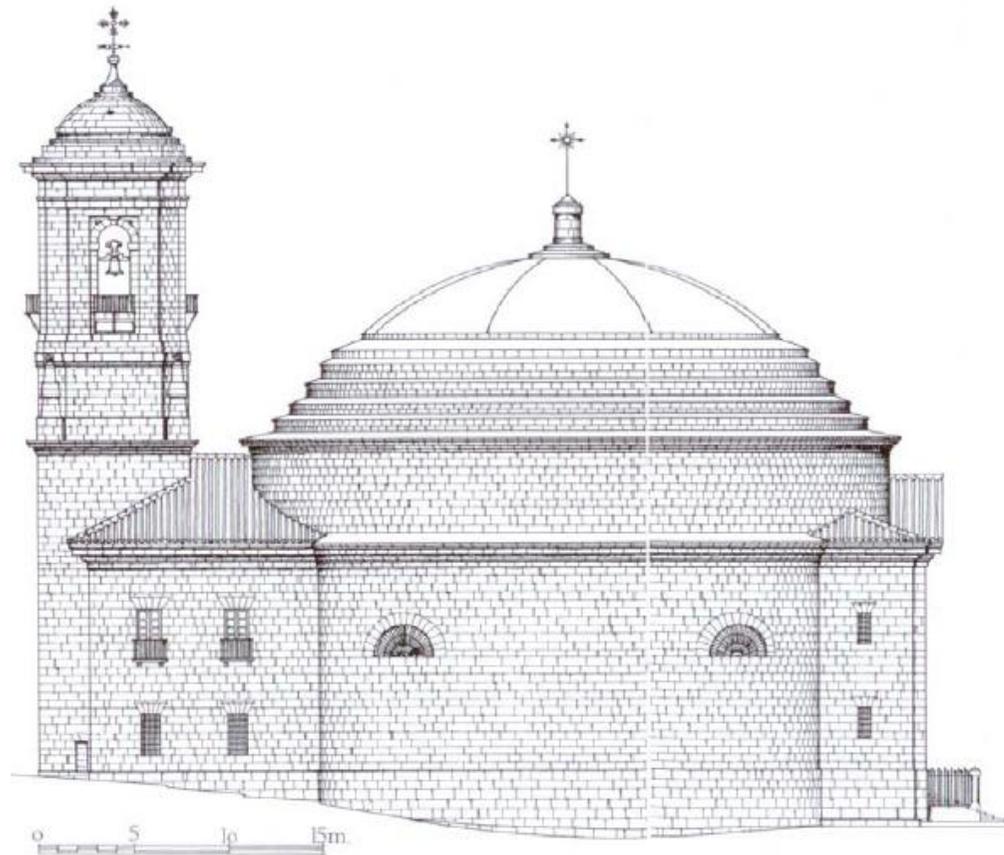


Figura 5.8. Alzado Lateral al S-O. ⁷⁶

El edificio es símbolo del pensamiento ilustrado que el Consejo de Castilla pretende difundir. Aquí se consigue la esencia de los ideales de la arquitectura clasicista. Domingo Antonio Lois Monteagudo condensa, toda su formación y el trabajo realizado a lo largo de su vida como arquitecto, su visión de cuál debe ser el camino a

⁷⁶ CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barrios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4

seguir por la arquitectura de su época, recurriendo al más prestigioso edificio de la Antigüedad: el Panteón de Roma.

Con esta obra se va más allá de una mera copia del Panteón ya que investiga las posibilidades que ofrece su sólida y rotunda geometría⁷⁷ prescindiendo de cualquier referencia a los órdenes clásicos y suprimiendo cualquier decoración superflua.

El impacto que produce la contemplación de esta iglesia, radica en la regularidad de su planta y pureza y limpieza del diseño.

Su forma está dominada por un círculo perfecto al cual se adosa, a modo de cabecera, un pequeño rectángulo que acoge la capilla mayor y a sus lados dos pequeñas habitaciones como sacristía y accesoria, con la torre sobresaliendo detrás de la capilla mayor.

En el lado opuesto, se articula otro pequeño rectángulo para la portada y otros dos pequeños cuadrados con escalera para acceder al coro. En este edificio se impone la rigurosidad tectónica, la claridad espacial –contrastando con la oscuridad lumínica- y la estereotomía de la piedra.

Desde el exterior se puede apreciar la limpia forma cilíndrica, alterada por los vanos, y por dos líneas de cornisas: una que unifica el cilindro con los tramos rectos de los módulos de entrada y capilla y de donde arranca la cubierta de los módulos rectangulares; y otra más arriba donde comienza el escalonamiento de la cúpula. Se llega a una solución constructiva de gran pureza de líneas.

La portada, y recordando a soluciones semejantes en iglesias anteriores, se ve rematada por el frontón triangular, prescindiendo del pórtico columnado y cualquier posible referencia a los órdenes presentes en el Panteón de Agripa, y encuadrada por dos sólidos contra fuertes. En el espesor del espacio de la portada se ubican los accesos al coro que se encuentra encima del zaguán.

⁷⁷ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Sobre la puerta se encuentra el escudo real borbónico así como la gran cartela conmemorativa con la fecha de inicio y final de obra, el nombre el rey Carlos III que mandó su construcción y autoridades eclesiásticas de la época.



Figura 5.9. Cartela sobre el dintel⁷⁸.

“EL REI NRO[nuestro] SOR[señor] D. CARLOS III MANDO CONSTRVIR ESTE TEMPLO CON LOS SOBRANTES DE QUARTA DECIMAL DEL ARZOBISPADO DE GRANADA AL QVE SE DIO PRINCIPIO EL DIA II DE NOVEME DE 1786. GOBERNANDO LA YGLEIA N.M.S.P. [nuestro muy santa padre] PIO VI, SIENDO ARZOBISPO EL YLLMO SOR [señor] D. ANTONIO JORJE Y GALBAN Y PRESIDENTE DEL YLLMO SOR D. JUAN MARIÑO DE LA BARRERA JUEZ DE FABRICAS Y SE CONCLVIO EN 12 DE AGOSTO DE 1802 EN EL PONTIFICADO DE N.S.P. PIO VII. REINANDO N.G. [nuestro gran] MONARCA D. CARLOS III SIENDO ARZOBISPO EL EXCMO E ILLMO DON JVAN MANVEL MOSCOSO I PERALTA I CAPITAN E[?] EN PRESIDTE EL EXMO SOR DON RAFAEL EL VASCO BAXO LA DIRECCION DE LA REAL JUNTA DE DIEZMOS”

La entrada es una orgullosa portada constituida por un arco de medio punto, que se encaja en un paralelogramo ensamblado por la cornisa que le otorga la continuidad que unifica el conjunto.

En su interior, se integran en los muros, una serie de capillas.

Tiene una torre integrada en el módulo de la capilla mayor, pero es pequeña en altura en proporción al templo si se compara con otras iglesias de la época en Granada. Está rematada por una pequeña cúpula.



Figura 5.10. Fachada Principal al S-E⁷⁹.

La iluminación desde del exterior son los cuatro huecos termales sobre las hornacinas que a modo de capillas existen en la parte interior del muro.

La cúpula, de cerca de treinta metros de diámetro interior⁸⁰, queda limpia de elementos decorativos prescindiéndose incluso de linterna. Solo existe una pasarela

⁷⁸ JIMENEZ, Javier Felipe (2008): Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado. <http://www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf>.

⁷⁹ JIMENEZ, Javier Felipe (2008): Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado. <http://www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf>.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

que en 1880 se dotó de baranda que la hace segura para que se pueda circular sin peligro.

La piedra tanto en fachada como en el interior se expone limpia como mandaban los códigos de la buena práctica arquitectónica que suplicaban: *“respetasen la hermosura de las piedras que sacan de las canteras, las que son derechas no echándolas a perder con ridículas formas, en la que se pierde la mitad de ellas, dando en ellas un público testimonio del desorden de nuestras cabezas”*⁷⁹.

La piedra utilizada procede de la misma localidad, de las canteras del “sitio de san Cristóbal”⁷⁹ (en este lugar Madoz, 1806-1870, destaca una fuente de agua⁸¹ de donde se abastece la localidad en el barrio de san Cristóbal y la zona de la Tranca) y fueron los encargados de su extracción (según las medidas dadas por el aparejador y de su transporte en carros hasta la obra, Cristóbal Portellano, Juan y Joaquín Peinado, Francisco Matías López y Francisco de Abaro vecinos de Montefrío.

Las obras salieron a pública subasta por los diferentes conceptos, herrería, cal, teja..., por el procedimiento de hipotecar bienes raíces para asegurar la entrega de los materiales. Es curioso constatar como una de estas obligaciones se especifica que las tejas empleadas en Montefrío deberán seguir el mismo molde de las utilizadas en Algarinejo.

Entre los objetivos que mueven a la reforma borbónica a la realización de nuevos templos se encuentra, además de la necesidad de dotar a los pueblos de espacios dignos para el culto religioso, la reactivación económica de las zonas en las que se erigen, mediante la contratación de obreros de la localidad y el empleo de materiales del lugar.

Se proyecta un tabernáculo y cuatro altares diseños de Francisco Aguado. Los altares ocupan los huecos abiertos en los muros a tal efecto. Estos huecos se coronan por frontones semicirculares sobre columnas toscanas, entre las que se colocarían una imagen.



Figura 5.11. Vista Posterior al N-O⁸².

El coste de este edificio fue, alrededor de dos millones el más elevado de cuantos se levantan en todo el Reino de Granada, excediendo los tres millones de reales⁸³.

⁸⁰ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

⁸¹ Esta información de Madoz será la que he utilizado para decantarme definitivamente por un lugar en concreto de la extracción de la piedra. Ver apartado de estereotomía.

⁸² JIMENEZ, Javier Felipe (2008): *Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado*.
<http://www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf>.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

La financiación salió de los sobrantes de la cuarta decimal⁸⁴.

Esperanza Guillén hace la siguiente reflexión: Platón hablaba de la existencia de dos tipos de belleza sensible: la belleza relativa, que era la de las cosas que pueden ser puestas en relación con otras de la misma especie o género, y una belleza absoluta, que es la de aquellas cosas que no admiten comparaciones.

En el primer caso podríamos poner como ejemplo la belleza de un hombre cuyas proporciones y relaciones formales pueden ser comparadas con las de otro. La belleza absoluta la reservaba Platón para las formas geométricas simples, pues, evidentemente, un círculo es perfecto en sí y no admite comparaciones con otros círculos, ya que también, en sí, son perfectos.

La cultura del clasicismo, en todas sus secuencias que se extienden desde la Antigüedad grecorromana hasta el Renacimiento y el academicismo ilustrado del XVIII puede traducirse, de algún modo, como una aspiración a encontrar esa belleza ideal que, cuantificable en fórmulas matemáticas, se expresa en la geometría pura⁸⁵.

La iglesia de la Encarnación de Montefrío impresiona precisamente por la belleza que emana de su perfección geométrica. Es la limpieza de sus volúmenes, la precisión de sus formas que se destacan poderosamente del caserío circundante la que aísla al monumento de su entorno y lo convierte en uno de los más brillantes exponentes de la arquitectura española de nuestra siempre insuficiente y contradictoria Ilustración.

⁸³ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

⁸⁴ MADDOZ, Pascual (1845-1850): *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar. Vols. 10-11*. Madrid. 1846-1850. Establecimiento tipográfico de P. Madoz y L. Sagasti. Número de control: BVA20030146035 <http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/consulta/registro.cmd?id=6353#infoejemplares>.

⁸⁵ GUILLEN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

Su dignidad y monumentalidad transmiten al pueblo coetáneo y al futuro un sistema de valores, el propio del reformismo ilustrado, basado en la confianza en el uso racional de las facultades del hombre para reconducir su destino. Este optimismo se vería pronto traicionado por la propia Historia⁸¹.



Figura 5.12. Vista en perspectiva elevada.⁸⁶

⁸⁶ [http://granadapedia.wikanda.es/wiki/Iglesia_de_la_Encarnaci%C3%B3n_\(Montefr%C3%ADo\)](http://granadapedia.wikanda.es/wiki/Iglesia_de_la_Encarnaci%C3%B3n_(Montefr%C3%ADo))

5.3 Rehabilitaciones realizadas en la Iglesia de la Encarnación de Montefrío más importantes.

· Consecuencias de los terremotos.

· Terremoto⁸⁷ del 13 de enero de 1804 (Motril, Granada) y del 25 de Agosto de 1804 (Dalias, Almería).

Los fuertes temblores de tierra que afectaron a la zona más occidental de la provincia de Almería, derribando la mayor parte de los edificios de localidades como Berja, Dalias o Celín. Son ejemplos de las dificultades de remodelación de la zona que al encontrarse tan alejada de Madrid⁹⁸.

· Terremoto del 27 de octubre de 1806 (Santa Fe, Granada).

A consecuencia de los movimientos sísmicos en Santa Fe se desmontaron los cuerpos superiores de sus dos torres.

· Estado de conservación y rehabilitación actual.

La Iglesia de la Encarnación fue declarada monumento histórico-artístico el 3 de Junio de 1983⁸⁸.

Protección Legal B.I.C. DEC. RD 1446/1983 (B.O.E. 3-Junio-1983)

Según la documentación encontrada en el Archivo Histórico de la Provincia de Granada, se han realizado una serie de intervenciones de reparaciones según se recogen a continuación:

1. Cod Ref 9201 21/190 Obras en la Iglesia de la Encarnación. En la cubierta.

El 11 de diciembre de 1985 se recibe una carta de la Junta de Andalucía desde la Consejería de Cultura Delegación Provincial de Granada. En dicha carta se reclama que se le remita el proyecto de las citadas obras “obras en la cubierta” a la comisión de Patrimonio Histórico-Artístico, para su estudio y posterior información a la Dirección General de Bellas Artes.

Estando de Párroco Don José Cabello Hinojosa.

Respuesta del Ayuntamiento a 10 de diciembre de 1985: Se trata de “obra menor” que no tiene licencia del Ayuntamiento.

El 18 de diciembre de 1985 se persona D. Francisco Álvarez Puerto, Arquitecto, presentado por D. Rogelio Macías Molinos, Vicario de Economía del Arzobispado de Granada, que redacta el informe adjunto que el Ayuntamiento remite a la Delegación.

“Se están realizando trabajos en las cubiertas laterales Norte y Sur sobre unos salones adosados al edificio principal que en su día fueron vivienda rectoral. La superficie es de 120m².

No se ha tocado muros, rastras ni ningún elemento resistente. Solo se van a sustituir tres vigas de madera podridas por rollizos creosotados que quedarán, formando pendiente, incorporados a la cubierta y sobre la bóveda de piedra del salón Norte”.

Se reciben aún varios toques de atención porque se necesita la presentación de un proyecto (no informe) en un asunto que remite la Delegación el 26 de diciembre de 1985.

Así que se le envía un telegrama el 27 de diciembre de 1985 al Ayuntamiento diciendo que se suspenden las obras en el plazo de 48 horas.

El 3 de septiembre de 1987 se le manda al Ayuntamiento para informar sobre el estado del expediente. El 18 de febrero de 1988 otra vez se pide informe del expediente. El 24 de Junio de 1988 se comunica que se ha procedido al archivo del expediente.

⁸⁷ Terremotos históricos del sur de España.

<http://www.ugr.es/~iag/divulgacion/boletines/b1.html>

⁸⁸ GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1989): *Las Iglesias de las siete villas*. Fundación Rodríguez-Acosta, 1989 ISBN 8440444842

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.**2. Cod. Ref. 9208 35-3. Proyecto en el patio de la Iglesia Parroquial de la Encarnación. Montefrío.**

Para la construcción de un servicio-aseo en el patio interior.

El 21 de marzo de 1986 se pide informe para que se de licencia a la Consejería de Cultura. El informe del técnico Municipal dice que se paralicen las obras puesto que son de 28m² donde una parte es para hacer el baño, el cura está cometiendo una infracción y pide dar cuenta a la Consejería de Cultura.

El 1 de abril de 1986 es calificado de “garigolo”, construcción de bloques de hormigón y cubierta a un agua con tejado de uralita.

El 5 de Junio de 1986 le dan plazo de alegaciones.

El 3 de julio de 1986 se informa de que se ha ejecutado la total demolición.

3. Expedientes de Conservación. s/n Fichas Diagnóstico: Iglesia Encarnación Montefrío. Sig. 14767 3/6.

Contrato del 2 de octubre de 1998 para la elaboración de las fichas diagnóstico de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío.

“Iglesia de la Encarnación. Iglesia Católica. Arzobispado de Granada.

Párroco: José Joaquín Fernández Guillén

C/ Veredas del Convento, 23. Montefrío.”

Después de una breve introducción histórica se redacta una descripción del estado general en que se encuentra la iglesia:

“Patología: Las principales patologías se encuentran en las cubiertas de todo el edificio, con numerosas y generalizados pasos de humedad al interior. Existen deterioros por descomposición de la piedra en algunas zonas de la parte baja de los muros.”

“Levantamientos planimétricos: No existe levantamientos completos ni exhaustivos del edificio. Es necesario su realización previamente a la actuación sobre el mismo”.

“Estado de conservación:

· Cimentación: *No se observan signos externos que indiquen posibles patologías en cimentación. Valoración: 0 pts.*

· Estructura: *Muros de fábrica de sillares de piedra en todo el edificio. Techos de bóveda semiesférica en la nave, escalera del coro y torre y semicilíndrica o de arista en otras dependencias. Forjados intermedios de madera en torre. Los muros de sillaría son sólidos y estables. No se observan indicios de pérdidas de estabilidad. Requieren reparación el acceso a la parte superior de la torre y el forjado existente en el campanario. Valoración: 300.000 pts. Prioridad: B*

· Cantería y fábrica: *Deteriorado en diversos elementos por descomposición de la piedra, sobre todo en las cornisas y parte inferior de los muros. Pérdida del llagueado en diversos puntos, sobre todo en zonas altas y cornisas. La escalinata de acceso al templo está muy deteriorada. La fábrica y cantería requieren consolidación y/o restitución o aporte de material en las zonas afectadas, además de relagueado en las zonas afectadas por las humedades de capilaridad o por el agua de lluvia. Limpieza interior y exterior de la totalidad de los muros de piedra, así como el intradós de las bóvedas. Es necesaria la reparación y limpieza de la edificación medianera demolida en fachada trasera. Valoración: 16.000.000 pts. Prioridad: A/B/C*

· Cerramiento: *El cerramiento lo compone la propia fábrica. Humedades generalizadas en zonas bajas de los muros, señales de humedad provenientes de las cubiertas en diversos puntos. Los muros requieren tratamiento contra la humedad, de ascensión capilar en las zonas más afectadas. Valoración: 2.800.000 pts. Prioridad: B*

· Cubierta: *La cubierta del edificio es de teja común, a excepción de la torre, que se cubre con una capa de mortero (y chapa de cinc) sobre la cúpula de coronación. Existen humedades generalizadas en el interior del edificio y partes altas de los muros provenientes de la cubierta. Es necesario el levantamiento e impermeabilización de la totalidad de la cubierta, tanto en la torre como en el resto del edificio. Valoración: 15.000.000 pts. Prioridad: A*

· Solería: *Baldosas de mármol cuadradas (colocadas a cartabón en la nave) en las principales dependencias del edificio. Parece original. Baldosas de piedra o mármol de menor tamaño en otras dependencias. En el coro y dependencias anejas el pavimento es de la misma piedra estructural, al igual que en la escalera y acceso a la torre. La solería está, en general, algo deteriorada por el uso, pero al ser de buena calidad es preferible mantenerla. Requiere reparaciones puntuales. Valoración: 300.000 pts. Prioridad: C*

· Enfoscados: *No existe en el edificio revestimientos de enfoscados. Los escasos revestimientos existentes de yeso se pueden mantener.*

· Azulejería: *No existe.*

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

· *Mármoles: Existen algunos elementos de mármol, como el baldaquino del presbiterio o algún altar de las hornacinas perimetrales que requieren diversas reparaciones. En el resto de los altares y el púlpito se hará una limpieza superficial.*

· *Acabados y pinturas: Repasos de pintura interior en las escasas dependencias que tienen este tratamiento. Valoración: 200.000 pts. Prioridad: C*

· *Ornamentos: Los ornamentos de mármol que requieren algún tratamiento se incluyen en aquel apartado.*

· *Carpintería de armar: No existe en el edificio, a excepción de pequeñas formaciones de pendientes de rollizos que se incluyen en el capítulo de cubiertas.*

· *Carpintería de taller: Reparación de las carpinterías exteriores deterioradas y tratamiento superficial de la totalidad de las mismas. Reparación y tratamiento de carpintería interior y exterior de la torre y puertas exteriores. Reparación y restitución de la parte que falta en la balustrada del coro. Valor: 1.500.000 pts. Prioridad: B*

· *Cerrajería: Reparación de carpintería exterior no estanca o deteriorada. Reposición de telas metálicas para evitar el acceso de palomas. Valor: 1.000.000 pts. Prioridad: A*

· *Vidrieras: Reparación de vidrieras emplomadas de ventanales semicirculares perimetrales. Repaso del resto de las vidrieras. Valor: 500.000 pts. Prioridad: B*

· *Electricidad: Instalaciones recientemente renovada. Se considera correcta aunque requerirá alguna pequeña reparación inherente a la obra. Valor: 100.000 pts. Prioridad: C*

· *Fontanería/ Saneamiento: No es necesario. Valor: 0 pts*

· *Pararrayos: Instalación de pararrayos. Valor: 500.000 pts. Prioridad: A*

· *Varios: Existe un problema importante por la cantidad de palomas que paran en la cubierta y huecos del edificio, que hay que resolver con las protecciones adecuadas.*

Levantamiento planimétrico completo del edificio. Estudio arqueológico y estudios complementarios a la restauración. Valor: 2.200.000 pts. Prioridad: A

· *No hay obras anteriormente ejecutadas.*

Valor total de obras (Ejecución Material de las Obras): 40.900.000 pts.

Arquitecto: Antonio Luis Espinar Moreno. Fecha de la visita 13-11-1998"

- En el Ayuntamiento de Montefrío⁸⁹, se encuentra copia del proyecto de rehabilitación de la cubierta de la Iglesia de la Encarnación del año 2002, con número de expediente nº 543/2003 incoado a instancias del Arzobispado de Granada en

⁸⁹ ⁸⁹ JIMENEZ, Javier Felipe (2008): Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado.

<http://www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf>.

solicitud de licencia para la realización de dichas obras de rehabilitación, que fue concedida a la vista de todos los informes preceptivos, emitidos en sentido favorable.

La obra fue realizada a finales de 2003 inicios de 2004, conforme al "Proyecto de Rehabilitación de las cubiertas" elaborada por el arquitecto Luis Alberto Martínez Cañas, supervisado por la oficina correspondiente a la Secretaría General Técnica de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía en fecha de 19 de julio de 2002, cumpliendo todas las intervenciones propuestas con las autorizadas por el Delegado Provincial de dicha consejería. La dirección de obra estuvo a cargo del Arquitecto Técnico local Francisco Torres.

En el proyecto se realiza un estudio muy meticuloso, detallado y preciso de todas las patologías y del estado de conservación de todo el edificio en su conjunto y se proponen las medidas necesarias para corregir estas deficiencias y rehabilitar lo deteriorado así como para prevenir su reaparición y que el paso del tiempo se deje sentir lo mínimo posible en el edificio, proponiendo para ello el necesario mantenimiento y las revisiones sucesivas que así lo garanticen.

Las tareas llevadas a cabo, conforme a lo establecido en este proyecto, redactado al efecto consistieron en lo siguiente:

Nave principal-cúpula.

- Levantamiento de toda la teja cerámica con limpieza de acopio de material.
- Picado de mortero de agarre hasta dejar al descubierto la piedra, tablazón o relleno.
- limpieza del soporte de piedra en el casquete y limpieza de los rellenos en los tejadillos de las coronas.
- Limpieza de la tablazón con sustitución de elementos dañados incluso estructurales (vigas, pares, durmientes, etc) y tratamiento antixilófago.
- Rastrelado del casquete esférico en anillos concéntricos mediante listones de madera tomados con mortero bastardo de cal y cemento blanco.
- Rastrelado claveteado a tablazón.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

- Capa de regulación en casquete con mortero de cal y cemento blanco hasta enrasar con los rastreles.
- Capa de regulación de yeso ligeramente armado con maya de fibra de vidrio hasta enrasar con rastreles.
- Capa de regulación de los rellenos de los tejadillos de las coronas.
- Impermeabilización mediante fieltro ligeramente bituminoso impermeable al agua, pero permeable al vapor.
- Nuevo rastrelado en tercio inferior de casquete y en faldones inclinados.
- Recolocación de teja.
- Limpieza de la piedra en paramentos, cornisa superior y pináculo.
- Limpieza de la cornisa inferior, eliminación de anidamientos, reparación de juntas y consolidación puntual de elementos de piedra degradados mediante resinas poliméricas. Imprimación con repelentes antiaves.
- Sellado de juntas con mortero de cal coloreado.
- Tratamiento antiherbicida.
- Hidrófugado.
- Colocación de anclaje definitivo en pináculo mediante arandelas fijadas al mismo mediante bridad, con disposición radial de ganchos, mínimo 3, para supervisión y mantenimiento de la cubierta.
- Colocación de gancho de anclaje a torre mediante pletina fijada a la piedra con tacos de expansión y tornillos de alta resistencia. Colocación de alambre trenzado conectado con el pináculo y anclado a los paramentos verticales de las coronas.
- Limpieza de remante metálico sobre pináculo y tratamiento anticorrosión.

Cúpula de la torre.

- Limpieza de cornisas, exterior de cúpula y pináculo.
- Consolidación puntual de elementos de piedra degradados.
- Sellado de juntas con mortero de cal coloreado.
- Limpieza general interior de zona de campanario.
- Tratamiento antiherbicida e hidrófugado sobre exteriores.
- Colocación de red de hilo de polipropileno en huecos e imprimación en elementos exteriores de repelentes químicos antipalomas. Aunque la

imprimación no ha dado resultado para evitar que las aves no vuelvan a instalar sus nidos.

- Instalación de sistemas de pararrayos sobre mástil de acero galvanizado anclado al pináculo mediante dobla arandela tomada con bridas.
- Colocación de anclaje definitivo en pináculo mediante arandela tomada a su base y colocación de alambre trenzado con anclaje a hueco de salida para revisión y mantenimiento de cubierta.

Cuerpo delantero de la portada.

- Limpieza de fachada de cantería.
- Consolidaciones puntuales de elementos de piedra degradados. Relleno y reposición de taladros existentes en el cuerpo lateral izquierdo de la portada. El deterioro que sufre la escalinata de entrada, que por otro lado le imprime su carácter centenario, sería una posible actuación aunque no es considerada como necesaria.
- Tratamiento antiherbicida e hidrófugado.

INDICE DE FIGURAS

Figura 5.1. Inserción de las tres iglesias. Renacentista, Barroca y Neoclásica. 3

Figura 5.2. Comparativa entre la Iglesia de Montefrío y el Panteón de Agripa⁷⁰ 5

Figura 5.3. Planta de la iglesia. Cortes de la planta a distinto nivel. (CERVERA, Luis (1985)) 6

Figura 5.4. Corte Longitudinal 7

Figura 5.5. Corte Transversal 7

Figura 5.6. Alzado Principal al S-E 8

Figura 5.7. Alzado Posterior al N-O 8

Figura 5.8. Alzado Lateral al S-O 9

Figura 5.9. Cartela sobre el dintel 10

Figura 5.10. Fachada Principal al S-E 10

Figura 5.11. Vista Posterior al N-O 11

Figura 5.12. Vista Lateral al S-O 12

6 ≡ La traza del templo.	1
6.1 Introducción.	1
6.2 Documentación de archivo.	1
6.2.1 Documentación gráfica.	1
6.2.2 Documentación escrita.	6
6.3 Levantamiento Arquitectónico.	7
6.3.1 La tecnología.	7
Escalas y precisiones.	7
Determinación de las técnicas adecuadas.	7
Equipo.	8
Técnicas de medición.	9
6.3.2 Metodología en la toma de datos.	10
6.3.3 Datos obtenidos con el equipo.	10
6.3.4 Interpretación de datos.	21
Estudio metrológico.	21
Representación en 2D.	22
Reglas para las cúpulas.	29
INDICE DE FIGURAS.	31

>> 6 ≡ La traza del templo.

6.1 Introducción.

A la hora de estudiar el comportamiento estructural de la cúpula de la iglesia, se toma conciencia de la importancia de una buena documentación gráfica lo más fiel posible a la realidad para partir de unos datos con los que trabajar. Esta conciencia viene recogida a lo largo del siglo XX en cartas de restauración y conservación del patrimonio.

- Dentro del ámbito de la conservación existen la Carta de Venecia de 1964 y la Carta de Roma de 1972 (Carta del Restauo)⁵⁵ en los que se da importancia a la toma de datos (dibujos y fotografías) para el bien entendimiento del edificio.

- Posteriormente está la Asamblea General del ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) de 1996 reunida en Sofía, de donde se obtuvo el documento “Principios de la Creación de Archivos Documentales de Monumentos, Conjuntos Arquitectónicos y Sitios Históricos y Artísticos”⁵⁶ en él se plantea, como proceso de conservación esencial, la recopilación de información métrica y fotográfica del edificio en un determinado momento.

- Más tarde, en 1999, llegó la Carta del Levantamiento Arquitectónico⁵⁷ donde se atribuyó al levantamiento un carácter analítico, realizado con medidas necesarias para la comprensión del edificio en su entorno urbano y territorial, la comprensión en su dimensión y medida, la comprensión de su contexto histórico, y la comprensión de las características estructurales-constructivas y

⁵⁵ Carta del Restauo. Anexo B – *Instrucciones para la dirección de las restauraciones arquitectónicas*, Roma 1972. http://ipce.mcu.es/pdfs/1972_Carta_Restauo_Roma.pdf.

⁵⁶ *Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*. <http://www.icomos.org/chartes/archives-e.pdf>. Traducida en la página web del Comité Español del ICOMOS. http://www.esicomos.org/nueva_carpeta/info_DOC_ARCHIVOS.htm.

⁵⁷ Entre los cuales se encontraba el profesor Almagro. http://www.archdsp.unifi.it/upload/sub/dipartimento/personale/merlo-a/dispense/Carta_del_rilievo.pdf.

formales-funcionales. Es en 2000 cuando se aprueba la versión española “Declaración sobre el levantamiento arquitectónico”⁵⁸.

En la actualidad, el levantamiento métrico utiliza técnicas avanzadas lo que ha generado que se creen congresos promovidos por la CIPA (Comité Internacional de la Photogrammétrie Architecturale). Estos levantamientos se realizan por equipos multidisciplinares formados por técnicos especializados en la ingeniería y uso de los aparatos de medición y por profesionales de la restauración arquitectónica, hasta el punto de formar grupos especializados en el levantamiento del patrimonio gracias a iniciativas como RecorDIM⁵⁹ y EPOCH (se trata de un GPS de alta precisión).

6.2 Documentación de archivo.

6.2.1 Documentación gráfica.

La primera consulta fue directamente con el párroco de la iglesia. Nos comentó que el Archivo de la Iglesia sufrió un incendio durante la guerra civil y se perdió toda la información que existía. Se continuó investigando la documentación gráfica, más antigua existente del edificio, consultando los archivos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando (Domingo Lois Monteagudo era arquitecto académico, además este proyecto de la iglesia de la Encarnación de Montefrío debía pasar la aprobación del Consejo de Castilla por lo que debió ser revisado por Ventura Rodríguez) pero en el archivo no se conserva el proyecto ya

⁵⁸ ALMAGRO, Antonio (2004): *Levantamiento Arquitectónico*. Universidad de Granada: digital.csic.es/bitstream/10261/19802/1/Levantamiento.pdf

⁵⁹ LETELLIER, Robin; SCHMID, Werner; LEBLANC, François (2007): *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places*. The Getty Conservation Institute. http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/guiding_principles.pdf

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

que nos dicen que se remitió a la propia iglesia. Solo nos enviaron el informe⁶⁰ donde se constata que el proyecto de la iglesia fue hecho por Monteagudo y sobre el cual no se tuvo que hacer ninguna rectificación ya que declara que se hará tal y como se ha proyectado por el arquitecto Domingo Lois de Monteagudo. También se consultó el Archivo Histórico Nacional sin obtener resultado satisfactorio.

Así que solo existe la toma de datos recogida en bibliografía. Esta documentación gráfica existente es la realizada por el Arquitecto e Historiador de la Arquitectura Española D. Luis Cervera Vera (Madrid 1914-1999) que en 1985 realizó a partir de los sillares existentes y que forma parte de su libro “El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su “Libro de Barios adornos”.

También se ha encontrado planos del proyecto de la rehabilitación de las cubiertas de la iglesia ejecutado en el 2002, realizados por el Arquitecto D. Luis Alberto Martínez Cañas. En el Ayuntamiento de Montefrío, se encuentra una copia de este proyecto, con número de expediente nº 543/2003. Dichos planos se apoyan en la planimetría levantada por Luis Cervera Vera que es la única que se tiene a falta de los originales perdidos durante el incendio.

También hay una Monografía de Investigación: Trabajo de Proyecto Fin de Carrera de la E.T.S.I.E. de la Universidad de Granada realizado por Anabel Córdoba Cruz sobre la Iglesia de la Encarnación de Montefrío y dirigido por D. Mariano Martín García.

En esta monografía se recogen los planos de la sección constructiva del tablero cerámico que proyectó el arquitecto D. Luis Alberto Martínez Cañas. Gracias a esta documentación se sabe el espesor que tiene el tablero de cubrición cerámico que protege la piedra de cúpula de la acción del agua y por tanto se puede deducir el espesor de la cúpula de piedra.

A continuación se recoge la sección constructiva de la rehabilitación realizada en las cubiertas de la iglesia de Montefrío.

Leyenda de la sección constructiva:

1. Soporte de piedra arenisca. Cúpula.
2. Rastrel pino 30x40 ortogonal a la línea de máxima pendiente cada 1.50m.
3. Capa de regularización mortero bastardo cal/cemento blanco (1:1:7) sobre roza abierta manualmente 30x60mm.
4. Filtro bituminoso impermeable al agua y permeable al vapor cogido a rastreles mediante clavos de acero inoxidable (Espesor: 0.7mm; Peso: 0.5kg/m²; Armadura de polipropileno de 105 gr/m²).
5. Rastreles pino 15x30mm a 45º sobre la línea de máxima pendiente claveteado al rastrelado anterior.
6. Rastrel pino 30x40mm ortogonal a la línea de máxima pendiente cada 43cm para agarre de teja en el tercio inferior de la cúpula tomado con mortero bastardo de cal y cemento blanco (1:1:7)⁶¹ sobre roza abierta manualmente 30x60mm.
7. Rastrel pino 20x30 claveteado para fijación de ganchos de sujeción de tejas.
8. Roza 60x100mm paramento para recibido de canales y solape del impermeabilizante.
9. Capa de regularización de mortero bastardo sobre relleno existente.
10. Tratamiento superficial: Limpieza/Sellado de juntas/Antiherbicida e Hidrofugado.
11. Yeso negro armado con malla de fibra de vidrio.
12. Rastrel pino 30x40mm ortogonal a la línea de máxima pendiente cada 1.50m tomado con clavos de acero inoxidable a tablazón existente.
13. Rastrel pino 20x30mm siguiendo línea de máxima pendiente.
- 13'. Rastrel pino 15x30 ortogonal a la línea de máxima pendiente claveteado al anterior para agarre de rastreles de mortero.
14. Ganchos de servicio. Acero galvanizado. Grosor 16mm diámetro 60.
15. Cable de alambre trenzado galvanizado.
16. Conducción puesta a tierra pararrayos.

⁶⁰ Ver Anexo II

⁶¹ (1:1:7) Cemento: Cal aérea: Arena. En la proporción utilizada se obtiene un tipo de mortero M-5 con resistencia a la compresión de 5 N/mm²

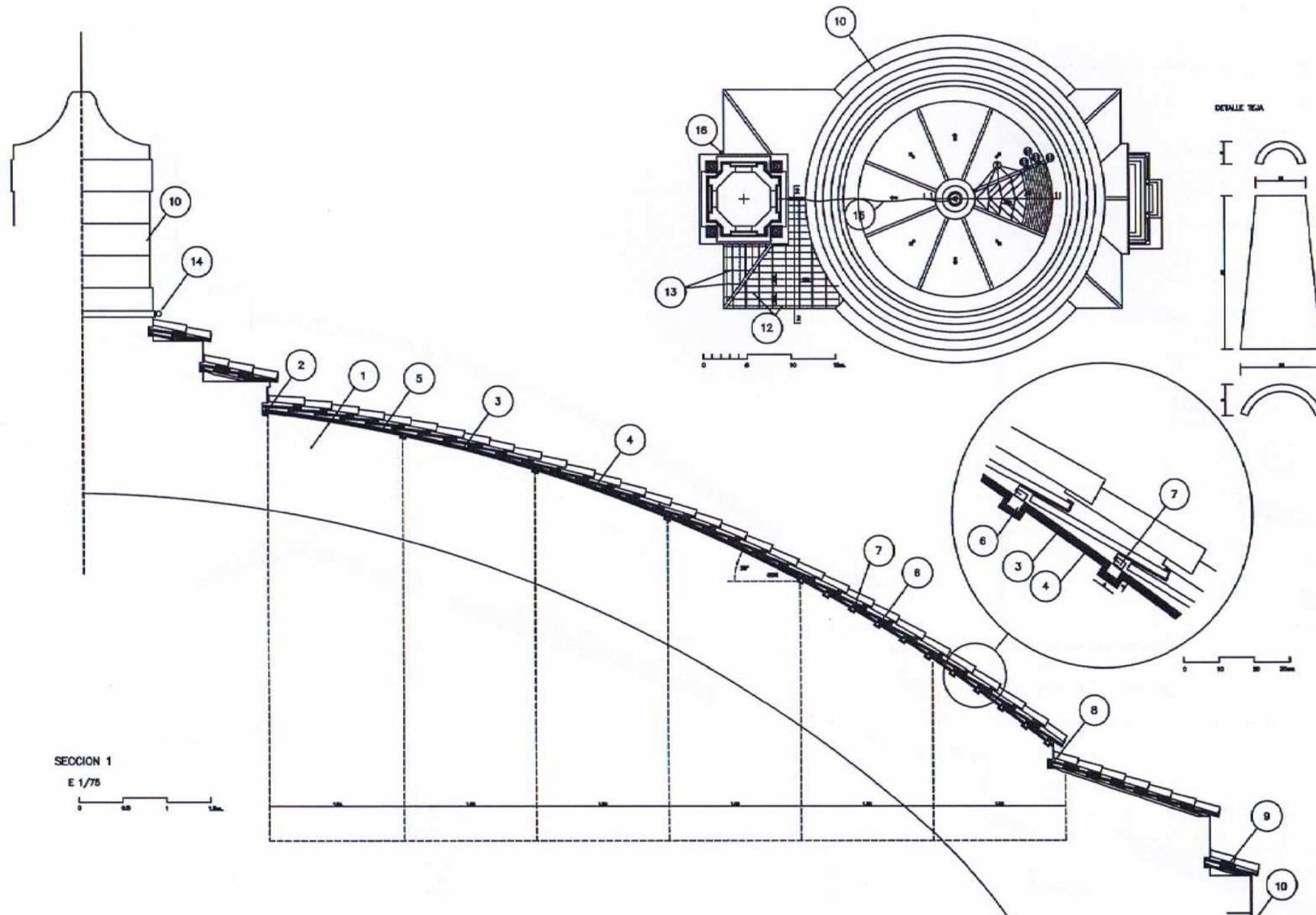


Figura 6.1. Sección constructiva del tablero cerámico de cubrición según planos del proyecto de rehabilitación de cubiertas de la iglesia de Montefrío en 2003, recogido en el trabajo monográfico del proyecto fin de carrera de Anabel Córdoba. (CORDOBA, Anabel (2013))

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO, GRANADA.

En este trabajo monográfico de fin de carrera de la E.T.S.I.E. se hace un levantamiento de la cúpula y un estudio fotogramétrico. Se aportan los resultados

de la toma de medidas realizada por estación total y manualmente según comenta la autora de este trabajo.

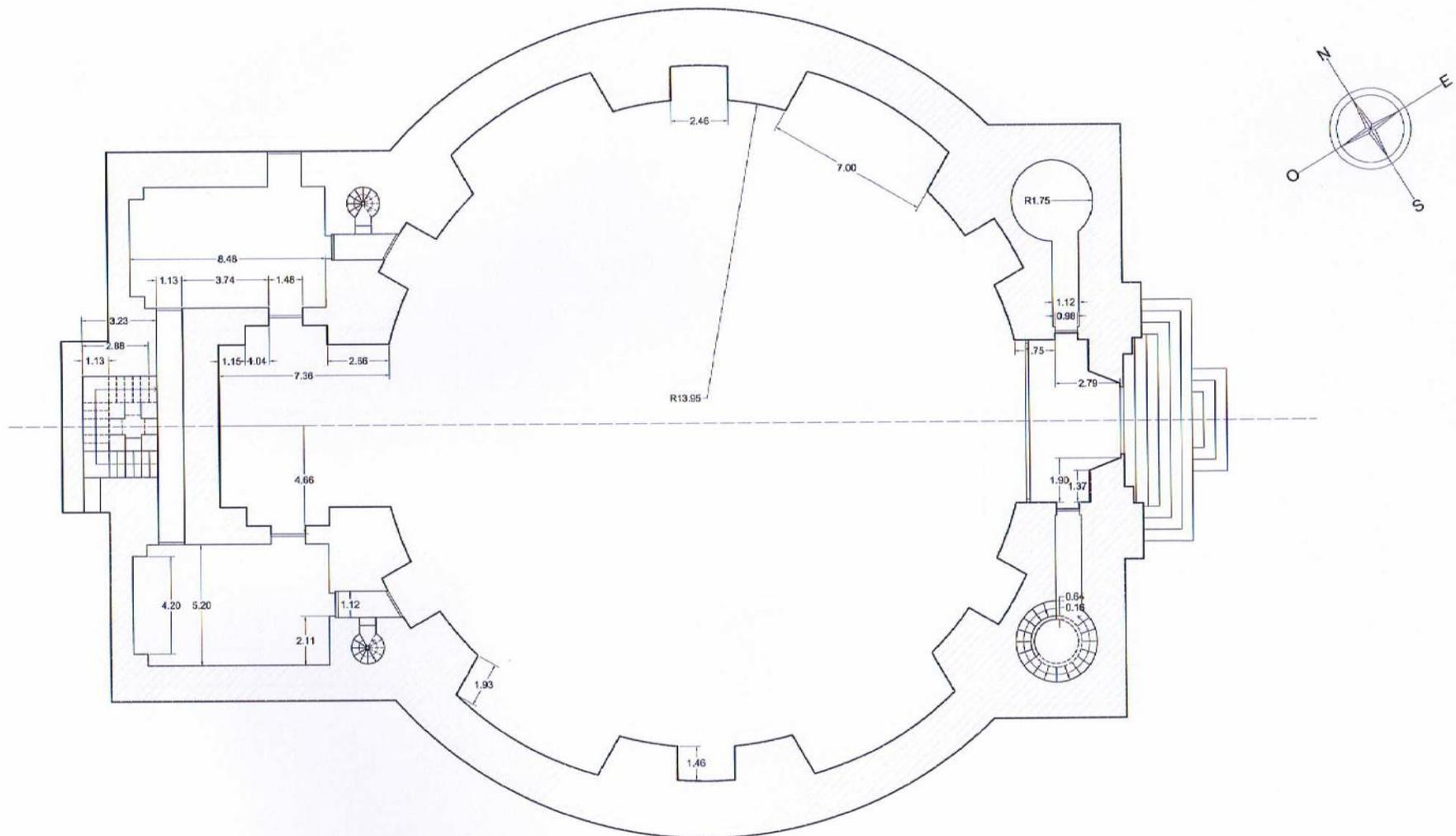


Figura 6.2. Planta acotada con medidas tomadas manualmente en el trabajo monográfico de proyecto fin de carrera de Anabel Córdoba. E.T.S.I.E. Universidad de Granada. (CORDOBA, Anabel (2013))

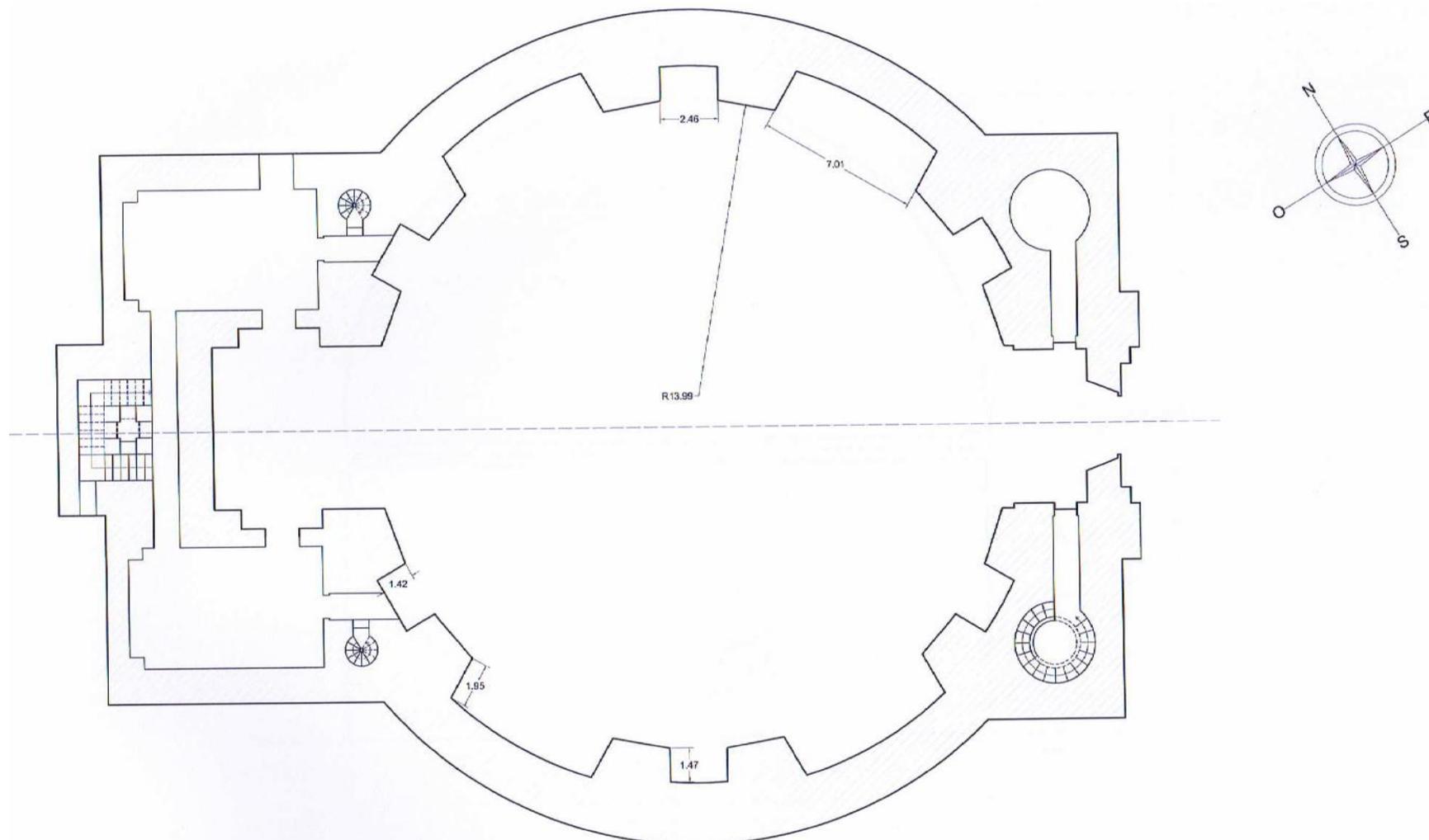


Figura 6.3. Planta acotada con medidas tomadas a partir de la estación topográfica en el trabajo monográfico de proyecto fin de carrera de Anabel Córdoba. E.T.S.I.E. Universidad de Granada. (CORDOBA, Anabel (2013))

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Finalmente se aporta una sección con los datos que ha recogido la estación topográfica.

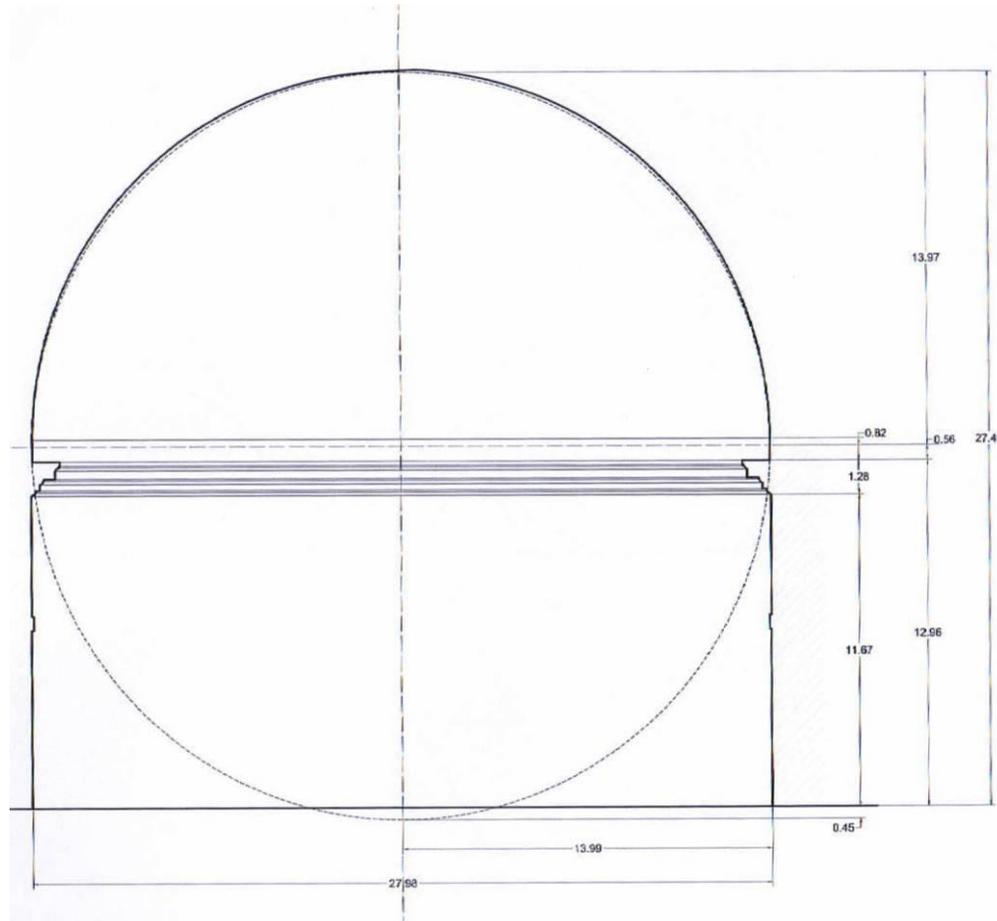


Figura 6.4. Sección acotada con medidas tomadas a partir de la estación topográfica para el trabajo de monografía de investigación, Trabajo fin de Carrera de la iglesia de la Encarnación de Montefrío realizado por Anabel Córdoba Cruz. (CORDOBA, Anabel (2013))

En este trabajo la autora concluye, con respecto a los datos métricos obtenidos, que la cúpula no arranque sobre la cornisa que forma el balcón sobre el interior del

templo, sino que se encuentra peraltada y que la esfera completamente esférica no es tangente al pavimento del templo como si sucede en el Panteón de Roma.

6.2.2 Documentación escrita.

La investigación se continuó visitando los Archivos de Protocolos de Montefrío situado en la Calle San Jerónimo, 50 de Granada y el Archivo del Arzobispado de Granada situado en el Seminario Mayor Diocesano de Granada situado en Paseo de Cartuja, 49.

De la consulta de estos Archivos se confirma que se necesitaron demoler hasta 4 viviendas, que fueron compradas para la construcción de la “nueva Iglesia” (con fechas: 6 marzo 1786; 16 enero 1787; 27 febrero 1787; 5 agosto 1788). También se ha encontrado el contrato de subasta de la piedra de cantera utilizada con fecha del 18 de Octubre de 1788 y el contrato de los portes con fecha del 29 de Octubre de 1788⁶².

También se ha consultado la siguiente documentación existente en el Archivo del Seminario Mayor, sin resultado satisfactorio:

- 1437-F (Fábrica de Montefrío)
- 357F/2 y 358F/1 (Libro Mayor gastos 1802-1803)
- Protocolo 1790-1792 (Armario 3, estante 5, nº 22)
- Protocolo 1786-1789 (Armario 4, estante 5, nº 57)
- Libros 29-B; 43-B; 68-B; 84-B

⁶² Ver Anejo de Documentación.

6.3 Levantamiento Arquitectónico⁶³.

Debido a la nula información gráfica original y que las actuaciones realizadas a lo largo de la vida del edificio toman como datos gráficos los que nos aporta D. Luis Cervera Vera en su libro, se tomo la determinación de hacer un levantamiento exacto.

6.3.1 La tecnología.

Escalas y precisiones.

Según aconseja el profesor Almagro en conservación del patrimonio se trabaja con tres niveles de documentación.

El primero de reconocimiento para labores de inventario con una toma de datos sencilla mediante fotos y croquis.

El segundo nivel sería para documentación preliminar y debe incluir, aparte de la información fotográfica, planos generales del edificio a escala no menor de 1/200 con detalles de elementos o zonas singulares a escala 1/100 o 1/50 con errores de 3-5cms. Se incluyen sistemas de fotogrametría sencillos, con cámaras normales y sistemas de rectificación en fachadas planas o con cámaras semimétricas. En este segundo nivel es útil para realizar trabajos de investigación y estudios arquitectónicos así como la redacción de anteproyectos.

El tercer nivel sería para obtener documentación de detalle. En este último nivel habría que añadir detalles a escalas 1/50 o 1/20 con errores de 1-3cm. Este nivel se usa para proyectos de intervención, análisis estructurales, de deformaciones o de lesiones y patologías adecuando las escalas a las características del edificio y el trabajo a realizar.

Para el trabajo que vamos a realizar, lo aconsejable será por tanto usar una escala 1/200 como recomienda el profesor Almagro. En este trabajo se estudiará la aplicación de análisis límite para fábricas del profesor Heyman, así que el estudio no estará relacionado con trabajos de conservación o actuaciones de rehabilitación así que por lo general se ha usado la escala 1/300 pero también se ha anotado una escala gráfica expresada en varas, la medida oficial en el momento de la construcción de la iglesia

La precisión para este trabajo se consigue con el buen calibrado del instrumento de medición que en nuestro caso se trata de un escáner modelo Leica ScanStation 2 donde se ha calibrado con un margen de error de 2.5cm.

Determinación de las técnicas adecuadas.

Se han utilizado dos técnicas para la obtención de datos de la Iglesia:

- Técnica de medición del edificio mediante escáner.
- Técnica fotogramétrica.

Ambas técnicas combinadas nos aportan la información necesaria para realizar los estudios que queremos desarrollar en este trabajo con un nivel de precisión tres en la escala propuesta por el profesor Almagro. De esta manera obtenemos la geometría interior y exterior de la iglesia además de aportarnos datos sobre el proceso constructivo y sobre las actuaciones que ha podido sufrir a lo largo de su vida.

La técnica usada en nuestro caso es indirecta, que quiere decir que se han tomado datos cubriendo la totalidad del espacio interior mediante un escáner de láser y con fotogrametría. Se ha utilizado esta técnica ya que permite un ahorro de tiempo, personal y presupuesto "in situ" y aporta cuidada información para interpretar en el post-proceso aquellos datos seleccionando los más adecuados.

⁶³ ALMAGRO, Antonio (2004): *Levantamiento Arquitectónico*. Universidad de Granada: digital.csic.es/bitstream/10261/19802/1/Levantamiento.pdf

Equipo.



Figura 6.5. Modelo utilizado para la medición.

El escáner usado, modelo Leica ScanStation 2, es de láser pulsado de alta velocidad, con compensación de doble eje, con precisión, alcance y campo de visión a nivel topográfico. El interfaz de usuario es a través de portátil o tablet PC.

El alcance es de 300m y con una precisión de medición de posición 6mm, distancia 4mm y ángulo (horizontal/vertical) de $60\mu\text{rad}/60\mu\text{rad}$. La velocidad de escaneo es de hasta 50.000 puntos/seg. La clase de láser es 3R (IEC-60825-1) verde visible.

El propósito de un escáner 3D es el de crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto. Estos puntos se pueden usar entonces para extrapolar la forma del objeto (un proceso llamado reconstrucción).

Si la información de color se incluye en cada uno de los puntos, entonces los colores en la superficie del objeto se pueden determinar también.

El modelo obtenido por un escáner 3D describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado. Se define un sistema esférico de coordenadas y se considera que el origen es el escáner, cada punto analizado se asocia con una coordenada ϕ y θ y con una distancia, que corresponde al componente r .

Estas coordenadas esféricas describen completamente la posición tridimensional de cada punto en el modelo, en un sistema de coordenadas local relativo al escáner.

Para la mayoría de las situaciones, un solo escaneo no producirá un modelo completo del objeto. Generalmente se requieren múltiples tomas desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del objeto.

Estos escaneos tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante, un proceso que se llama generalmente alienación, y que transforma las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo. El proceso completo que va de las tomas individuales a un modelo completo unificado define el flujo de captura de modelo 3D.

La tecnología que usa el aparato es a través de radiaciones electromagnéticas o ultrasonidos denominada tecnología de tiempo de vuelo.

La estación de rayo láser 3D de tiempo de vuelo determina la distancia a la escena cronometrando el tiempo del viaje de ida y vuelta de un pulso de luz. Un diodo láser emite un pulso de luz y se cronometra el tiempo que pasa hasta que la luz reflejada es vista por un detector. Como la velocidad de la luz C es conocida, el tiempo del viaje de ida y vuelta determina la distancia del viaje de la luz, que es dos veces la distancia entre la estación de lectura de rayo láser y la superficie.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Si T es el tiempo del viaje completo, entonces la distancia es igual a $(C \cdot T)/2$. Claramente la certeza de la estación de lectura de rayo láser de tiempo de vuelo 3D depende de la precisión con la que se puede medir el tiempo T , donde 3.3 picosegundos aproximadamente es el tiempo requerido para que la luz viaje 1 milímetro. Los láseres utilizados han sido del tipo invisibles.

A parte se ha utilizado la tecnología de la ortofoto, que consigue rectificar la imagen de una forma plana.

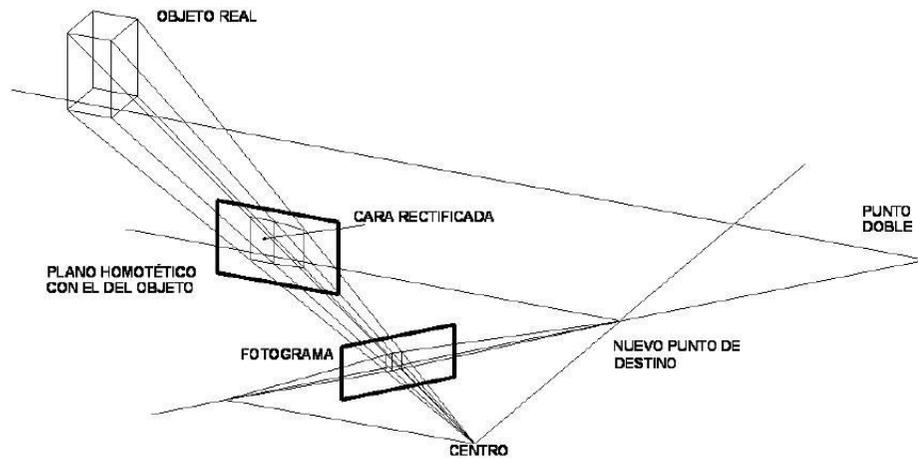


Figura 6.6. Rectificación digital de imágenes fotográficas. Según el profesor Almagro.

Imágenes digitales de una superficie plana o sensiblemente plana pueden rectificarse fácilmente con sólo conocerse las coordenadas planas de cuatro puntos, de modo semejante a como veíamos se podía obtener un dibujo rectificado a partir de la medición digital de puntos de una fotografía con una tableta digitalizadora y el programa AutoCad.

Las imágenes rectificadas pueden imprimirse con una impresora raster o servir de base para obtener dibujos vectoriales digitalizando en la propia pantalla mediante un programa de CAD superpuesto. Este sistema es válido y ventajoso para el levantamiento de fachadas

Técnicas de medición.

En la visita realizada al interior del templo se observa la magnitud de su rotundo espacio generado por la fusión de dos piezas geométricas simples como es el cilindro coronado con una semiesfera. Es el espacio más sencillo y ancestral que puede existir y a la vez el más representativo de la espiritualidad. Usado desde la antigüedad y por todas las culturas.

Se ha utilizado un escáner laser porque con esta tecnología se puede estudiar con alta precisión tanto las deformaciones sufridas en el proceso habitual de construcción y de entrada en carga como las patologías en el campo de las estructuras.

Es una ventaja contar con estos sistemas en el ámbito de la documentación y mantenimiento de edificaciones, monumentos y elementos históricos.

La recopilación de información, de los monumentos, ha de ser procesada para su representación y posterior archivo de estos edificios en un momento determinado de su vida.

Es por esto que se hace un levantamiento de su volumetría en 3D con el programa de CAD con toda la información precisa para el estudio estructural. Esta información quedará archivada en formato digital para posteriores trabajos de conservación.

6.3.2 Metodología en la toma de datos.

Estos datos son los aportados de la medición in situ y será a partir de ahí de donde se levantará el edificio a las escalas correspondientes para su estudio. Este modelo se ha generado con una precisión de 2.5cm.

De la nube de puntos de obtienen datos para la ejecución de los dibujos. Se pueden cortar y proyectar para de ahí obtener la planimetría exportando los datos al programa de CAD.

Los puntos de toma de datos fueron los siguientes:

1. Interior de la Iglesia. Se colocó el escáner en el centro del interior del edificio y se tomaron datos de situación de puntos además de toma de ortofotos.
2. Desde la terraza del edificio. A una altura de cuatro plantas sobre el suelo (13m) se tomaron datos mediante escáner de la cúpula desde el exterior.
3. En frente de la portada de la Iglesia se escaneó el alzado principal.
4. Desde la parte alta de la calle a nivel de suelo se escaneó la parte trasera del edificio, la parte de la torre.

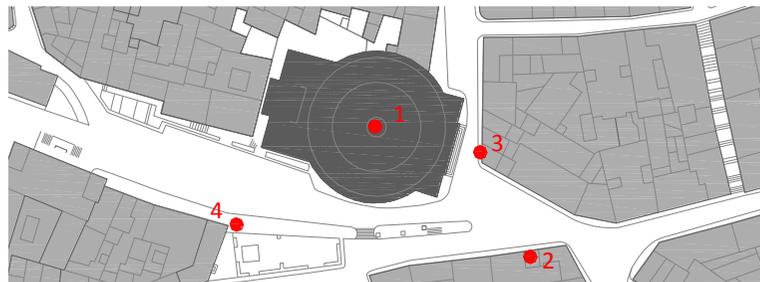


Figura 6.7. Emplazamiento de la toma de datos. Elaboración propia.

6.3.3 Datos obtenidos con el equipo.

Resultado de la toma de datos obtenida por el escáner y las ortofotos.

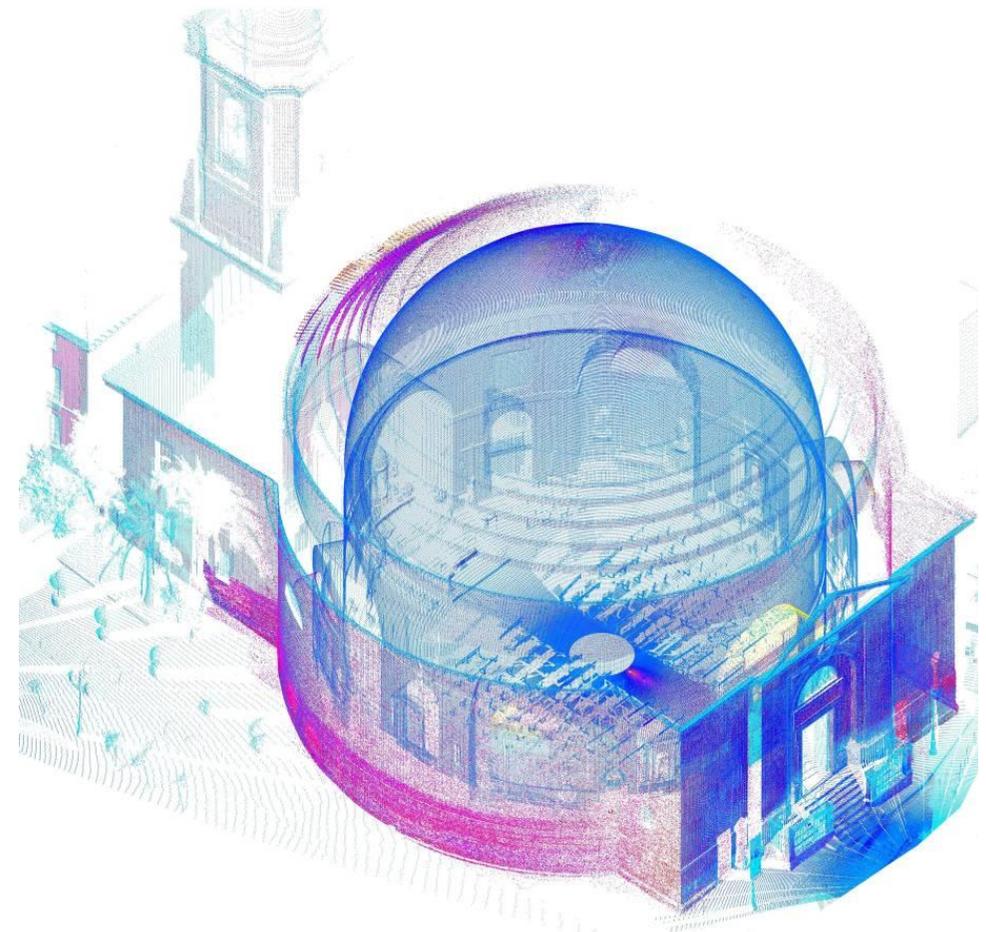


Figura 6.8. Vista en perspectiva del modelo de nube de puntos.



Figura 6.9. Alzado principal. Nube de puntos generados por el escáner.



Figura 6.10. Alzado Principal. Ortofoto.



Figura 6.11. Alzado Lateral. Nube de puntos generados por el escáner.



Figura 6.12. Alzado Lateral. Ortofoto.

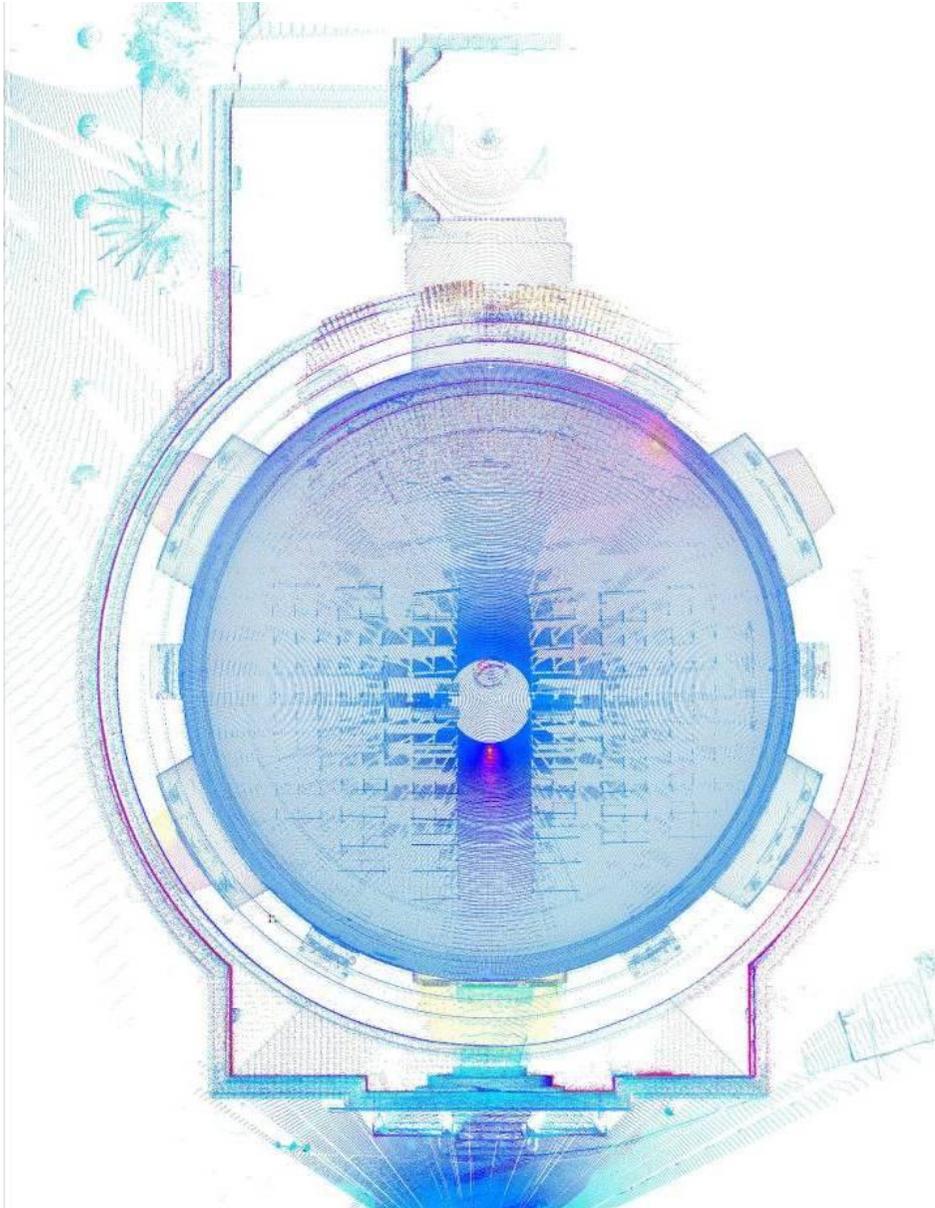


Figura 6.13. Planta. Nube de puntos generados por el escáner.



Figura 6.14. Planta. Ortofoto.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Secciones transversales de donde se ha estudiado el despiece interior.

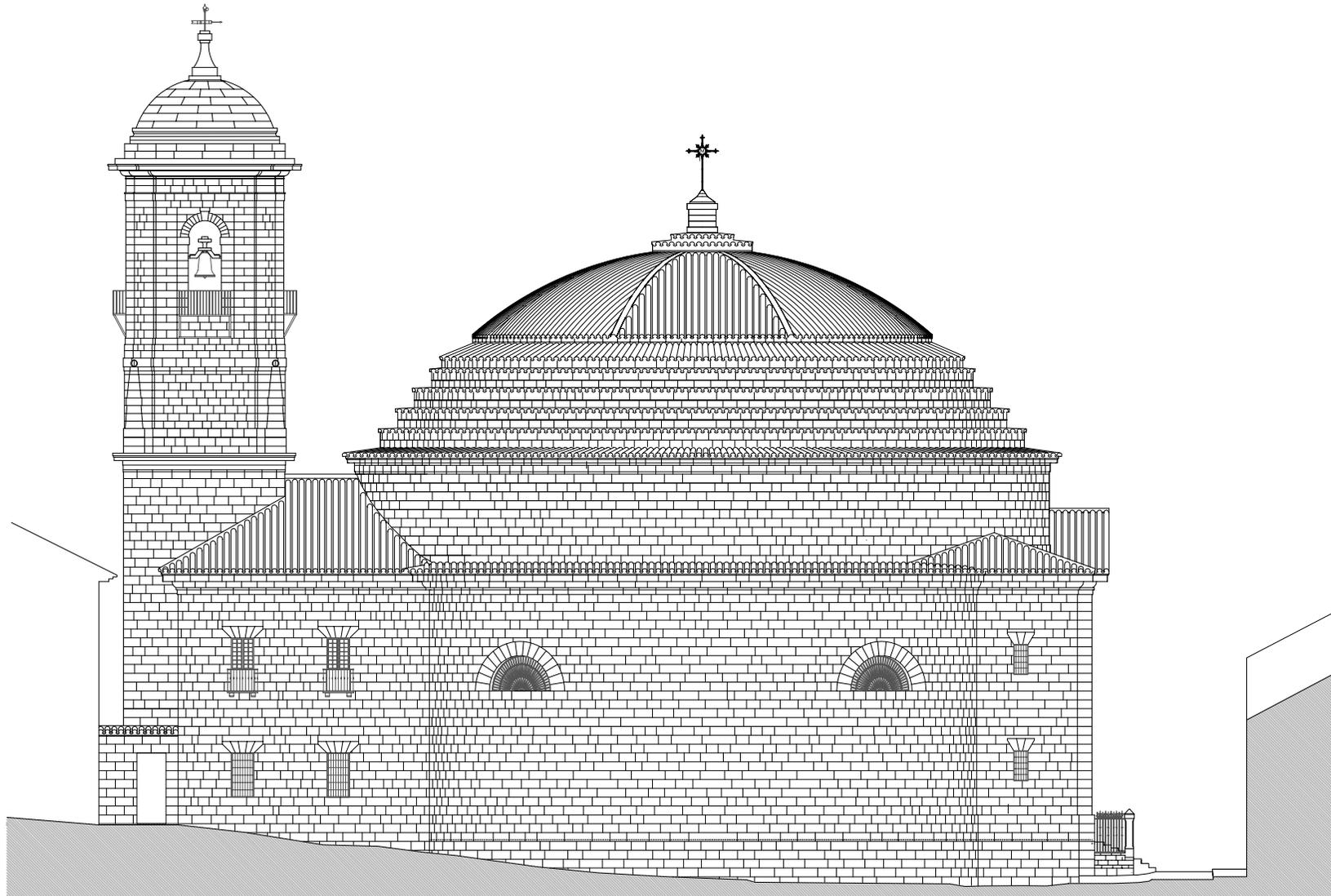


Figura 6.15. Sección Longitudinal. Ortofoto.



Figura 6.16. Sección Trasversal. Ortofoto.

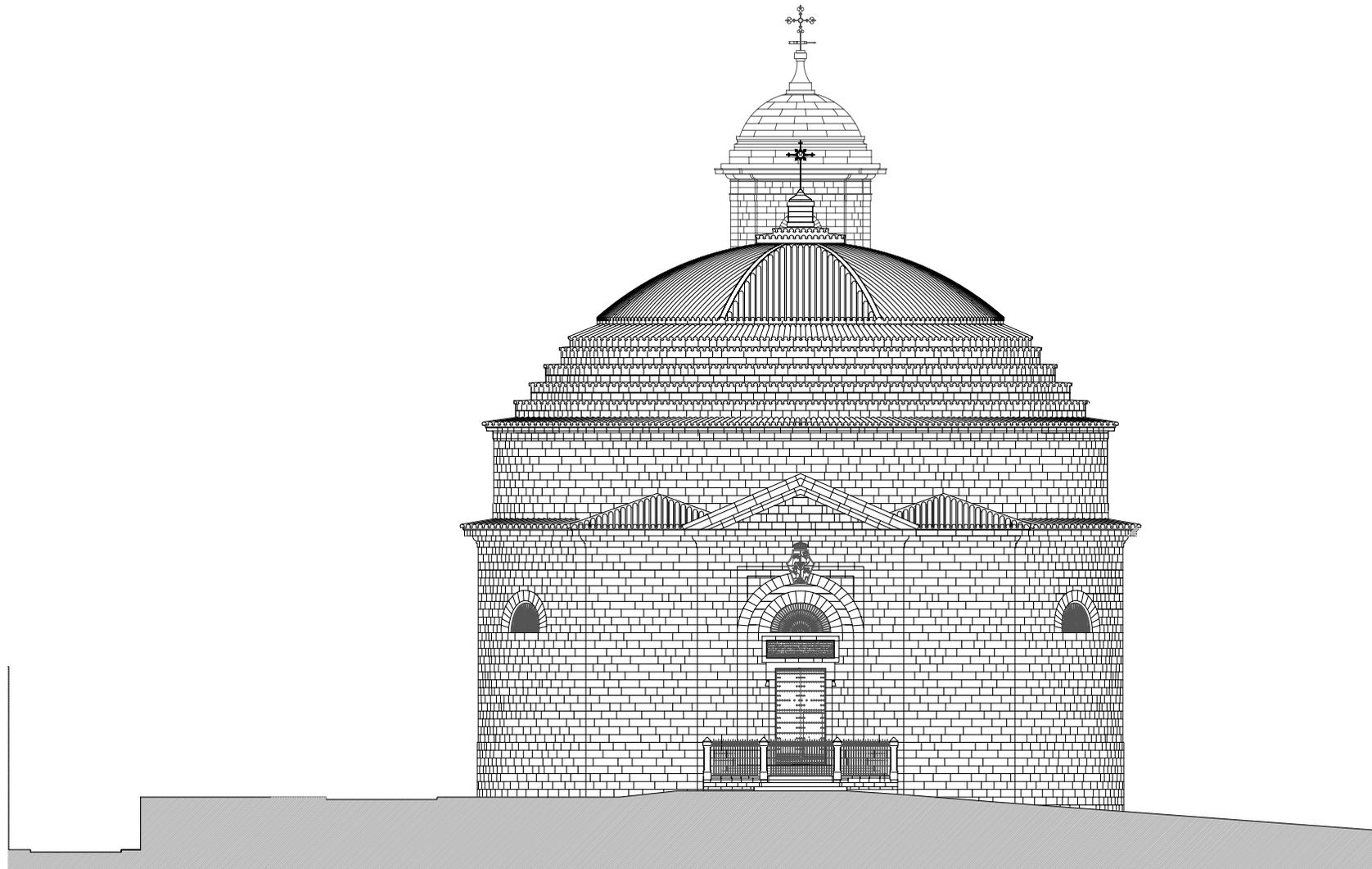
ANÁLISES ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.



Escala gráfica en varas
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
0.8556m [3pies]

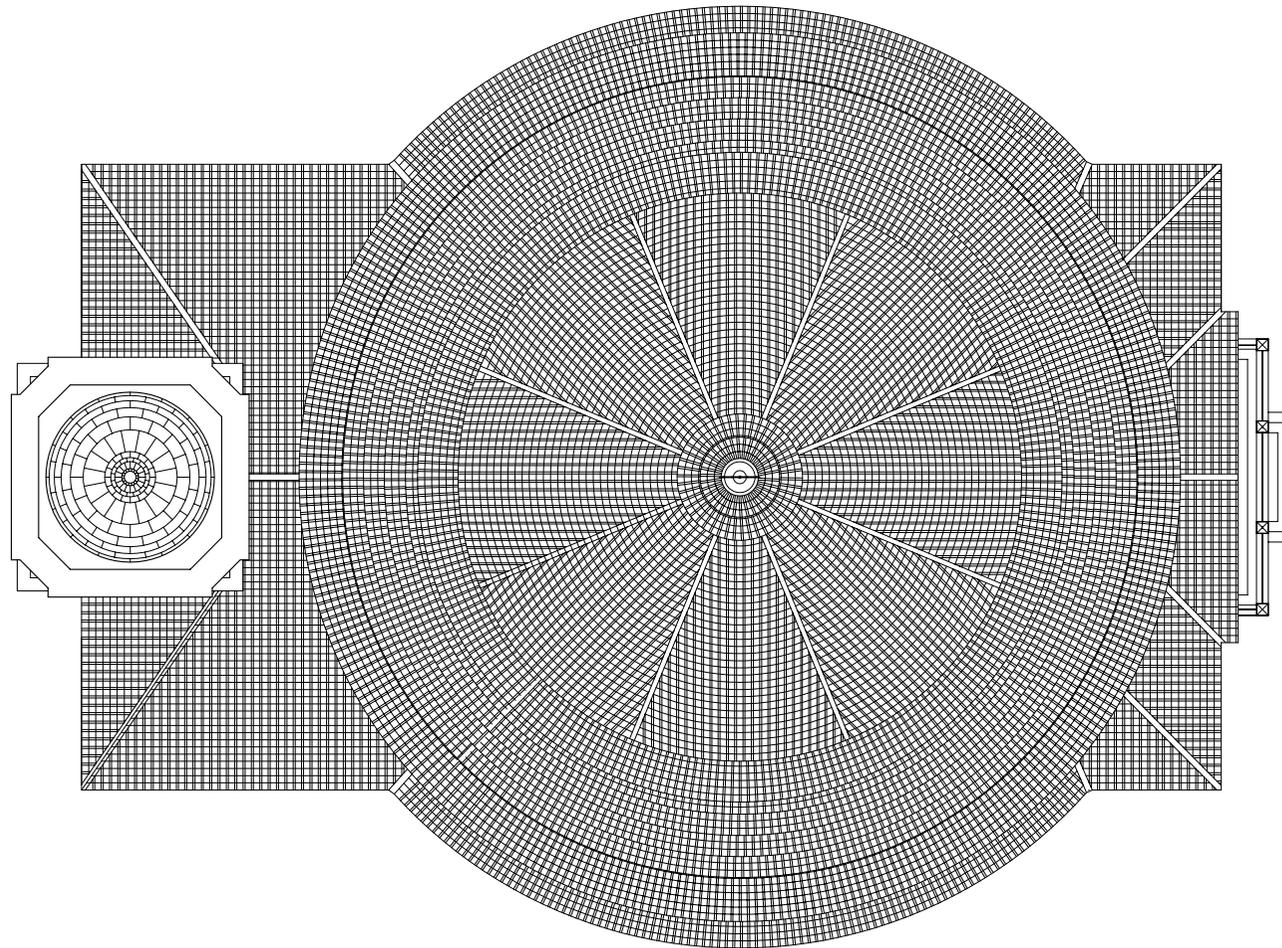
ALZADO LATERAL IZQUIERDO / E.- 1/300

ANÁLISE ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO, GRANADA.



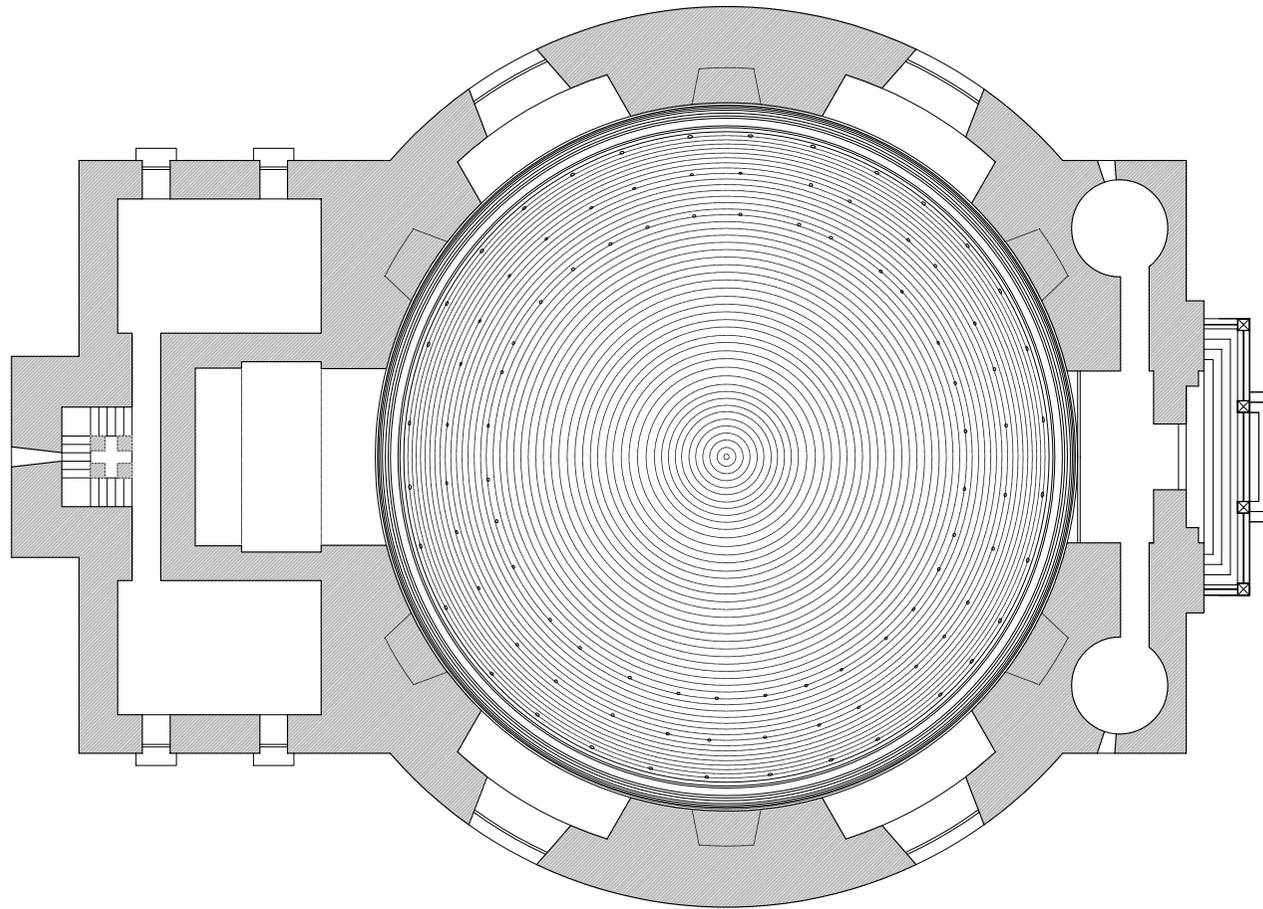
Escala gráfica en varas
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
0.8556m [3pies]

ALZADO FRONTAL / E.- 1/300



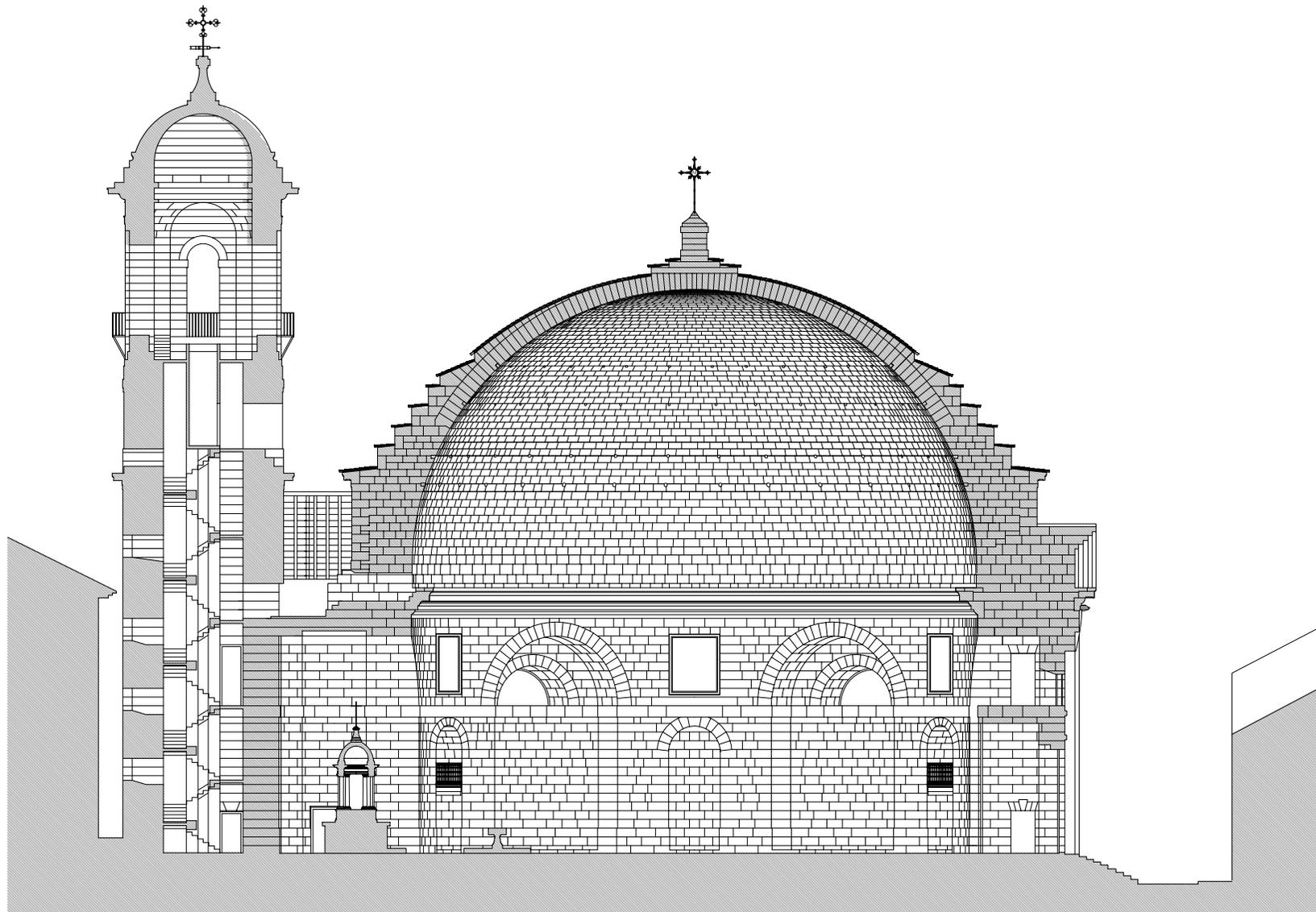
Escala gráfica en varas
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
0.8556m [3pies]

PLANTA CUBIERTA / E.- 1/300



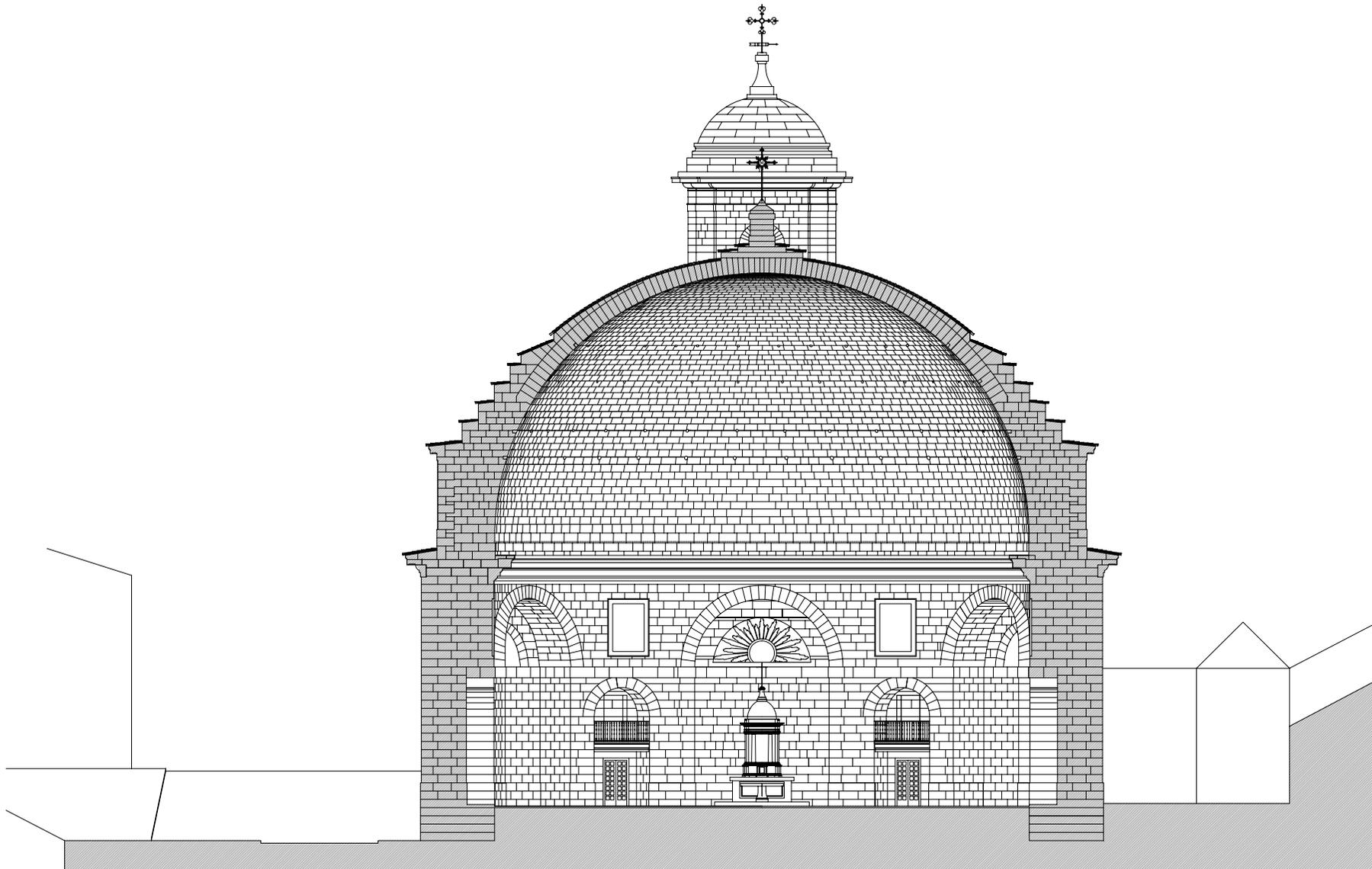
Escala gráfica en varas
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
0.8556m [3pies]

PLANTA BAJA / E.- 1/300



Escala gráfica en varas
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
0.8556m [3pies]

SECCIÓN LONGITUDINAL / E.- 1/300



Escala gráfica en varas
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
0.8556m [3pies]

SECCIÓN TRANSVERSAL / E.- 1/300

6.3.4 Interpretación de datos.

Estudio metrológico⁶⁴.

Desde la antigüedad hasta que se implantó el sistema métrico decimal se usaban unidades de medida del orden de magnitud de distintas partes del cuerpo. Son los sistemas antropométricos y perviven en el Sistema Imperial británico.

Este sistema no era homogéneo en todas las localidades sino que las medidas del pie variaba entre 27.5 y 33.5cm.

El sistema fue adoptado del sistema romano. La medida más usual es el pie donde un pie son cuatro palmos y tres pies hacen una vara.

Aunque Felipe II, dictó una Pragmática en 1568 donde se decía que la vara castellana se imponía como medida común de los reynos, en las zonas rurales siguieron utilizando las propias del lugar.

Fue en 1852 cuando se estableció el Sistema Métrico Decimal en España.

Las cotas que acompañan los planos se expresan en pies y sus fracciones, tanto detalles como medidas generales. Se tiene documentación de El Escorial con estas unidades de medida. En otros casos los patrones se grababan en las fábricas para facilitar a los operarios la toma de medidas.

⁶⁴ GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica*. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid. Pág. 69.

http://webspersoais.usc.es/export/sites/default/persoais/rosana.guerra/descargas/GUERRA_2012_Tesis_Parte1.pdf

Unidad	Pies	Varas	Metros	Milímetros
Legua	20 000	6 666.66	5 572.7	
Estadal	11	3 2/3	3.06	
Estado, braza o toesa	6	2	1.67	
Vara	3	1	0.835905	
Codo o media	1 1/2	1/2	41.79	
Pie o tercia	1	1/3	0.2786	
Palmo mayor	3/4	1/4	0.2089	
Geme o sexta	1/2	1/6	0.1393	
Coto y octava	3/8	1/8	0.1044	
Palmo menor o doceava	1/4	1/12	0.0696	
Pulgada	1/12	1/36	0.0232	
Dedo	1/16	1/48	0.0174	
Grano=1/4 de pulgada				4.35
Línea=1/2 de pulgada				1.934
Punto=1/12 líneas				0.161

Figura 6.17. Unidades de longitud castellanas del siglo XVI.⁶⁵

El pie es la unidad de medida a la que se recurre para la construcción de la iglesia de la Encarnación de Montefrío (diccionario de Madoz) como lo demuestran los contratos de subasta de piedra encontrados en el Archivo de Protocolos se usa la “bara cúbica”.

⁶⁵ GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica*. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid. Pág. 70.

http://webspersoais.usc.es/export/sites/default/persoais/rosana.guerra/descargas/GUERRA_2012_Tesis_Parte1.pdf

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Representación en 2D.

En el proceso del levantamiento con el programa de CAD se han respetado ambos sistemas métricos, anotando entre paréntesis la equivalencia.

En estos modelos 2D se estudia las proporciones de la cúpula teniendo como referencia las proporciones conocidas a través de los tratados de la época.

Gracias a Leon Battista Alberti (1404-1472 Sacerdote; Secretario Personal de tres papas: Eugenio IV, Nicolás V, Pío II; humanista; arquitecto; matemático y poeta italiano) y su preocupación por buscar reglas que orientasen a los artistas escribió su tratado “De Re Aedificatoria” donde recopiló el saber transmitido de generación en generación a través del oficio.

Fue el primero, si se excluye a Vitruvio (siglo I a.c.). Este ejercerá gran influencia en la segunda mitad del siglo XVI. Luego vendrán los tratados de Serlio, Vignola y Palladio. La versión italiana se tradujo al castellano.

En España la construcción se realizaba en piedra y los primeros tratados de cantería aparecen a mediados del siglo XVI. Alonso de Valdovira (ca, 1591) presenta el primer tratado especializado: “Libro de traças de cortes de piedras”.

Los tratados eran cuadernos manuscritos que recogían distintas soluciones con dibujos y explicaciones.

A continuación se recoge el listado de tratados de los siglos XV, XVI y XVII⁶⁶

Fecha	Autor	Título
1465 ca.	Antonio Averlino Il Filarete	Trattato d’architettura

⁶⁶ GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica*. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid. Pág. 69.

http://webspersoais.usc.es/export/sites/default/persoais/rosana.guerra/descargas/GUERRA_2012_Tesis_Parte1.pdf

1482 ca.	Fancesco di Giorgio Martini	Trattato di architettura, ingegneria e arte militare
1485	Leon Battista Alberti	De Re Aedificatoria (presentada al papa en 1452)
1486	Matthäus Roriczer	Puchlein von der fialen Gerechtigkeit (Libreto de los pináculos correctos)
1490 ca.	Matthäus Roriczer	Geometria Deutsch (Geometría en alemán)
---	Maestro WG	(bóvedas nervadas)
1521	Vitruvio: trad. Cesare Cesariano	Diez libros de arquitectura
1526	Diego de Sagredo	Medidas del romano
1537	Sebastiano Serlio	4º Libro: Los cinco órdenes
1537-1556	Anónimo: Pedro de Albiz?	De arquitectura
1540	Sebastiano Serlio	3º Libro: De las antigüedades de Roma
1545	Sebastiano Serlio	1º y 2º Libros: De la geometría; De la perspectiva
1547	Sebastiano Serlio	5º Libro: De los templos
1550 ca.	Rodrigo Gil de Hontañón	Manuscrito (en Simón García 1681)
1551	Sebastiano Serlio	Libro extraordinario: Puertas
1552	Sebastiano Serlio: trad. Francisco de Villalpando	Tercero y Cuarto Libros de arquitectura
1554-1560	Vitruvio: trad. Lázaro de Velasco	Los X libros de arquitectura
1556	Vitruvio: trad. Daniele Barbaro	Los diez libros de arquitectura
1560 ca.	Hernán Ruiz II	Libro de arquitectura
1560 ca.	Vitruvio: trad. Hernán Ruiz II	Primer libro (incl. en su manuscrito)
1561	Philibert De L’Orme	Nouvelles inventions pour bien bastir er a petit frais
1562	Giacomo Barozzi da Vignola	Regola delle cinque ordini dell’architettura
1567	Philibert de L’Orme	Le premier tome de l’architecture
1570	Palladio	I quattro libri dell’architettura
1575	Sebastiano Serlio	7º Libro: De las situaciones

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

		(el 6º s/habitaciones manuscrito hasta 1966)
1578	Palladio: trad. Juan del Ribero Rada	Los cuatro libros de arquitectura
1582	Vitruvio: trad. Miguel de Urrea	De arquitectura
1582	Alberti: trad. Francisco Lozano	Los diez libros de architectura
1585-1587	Joan de Arphe y Villafañe	De varia conmensuración para la escultura y architectura
1591 ca.	Alonso de Vandelvira	Libro de traças y cortes de cantería
1593	Vignola: trad. Patricio Cajés	Regla de los cinco órdenes de arquitectura
1598	Cristóbal de Rojas	Teoría y práctica de la fortificación...
1600 ca.	Alonso de Guardia	(trazas de monea manuscritas en otro libro)
1600 ca.	Ginés Martínez de Aranda	Cerramientos y trazas de monea
1605	Pseudo Juanelo Turriano	Los veintiún libros de ingenios y máquinas
1615	Vicenzo Scamozzi	L'Idée dell'Architettura Universale
1625	Palladio: trad. Francisco de Praves	Libro de la architectura (órdenes)
1625	Palladio: trad. Francisco de Praves	Libro tercero de la architectura (camino, calzadas y puentes)
1639	Fray Lorenzo de San Nicolás	Arte y uso de la architectura I
1640	Desargues	Brouillon Project d'exemples...coupe de pierres...
1642	Mathurin Jousse	Le secret d'architecture
1643	Bosse	La pratique du trait...Desargues...coupe de pierres
1643	Derand	L'architecture des voûtes...coupe des voûtes
1653	Joseph Gelabert	Verdaderas traces del art de picapedrer
1661	Juan de Torija	Breve tratado de todo género de bóvedas
1665	Fray Lorenzo de San Nicolás	Arte y uso de la architectura II
1673	Vitruvio: trad. Claude Perrault	Los diez libros de architectura
1673	Nicolas-François Blondel	Résolution del quatre...problemas

		d'architecture
1674	Milliet-Dechales (o Deschales)	De lapidum sectione (en latín) en Cursus...
1675	Nicolas-François Blondel	Cours d'architecture... Academie Royale
1678	Caramuel y Lobkowitz	Arquitectura civil recta y oblicua
1681	Simón García	Compendio de Architectura y simetría de los templos...
1688-1690	Phillippe de La Hire	La Coupe des Pierres (método general para bóveda de arista)
Fecha	Autor	Título
1707	Tosca	Compendio matemático...Tomo V
1708	Juan de Portor y Castro	Cuaderno de Architectura
1728	De la Rue	Traté de la coupe de pierres
1737	Guarino Guarini	Architettura civile (escrito después de 1678)
1737-1739	Frézier	La théorie et la pratique de la coupe de pierres...
1750 ca.	Andrés Julián de Mazarrasa	Tratado de arquitectura
1767	Plo y Camín	El arquitecto práctico civil, militar y agrimensor
1771-1777	Jacques-François Blondel	Cours d'architecture civile (completado por Pierre Patte)
1783	Benito Bails	Elementos de matemática (Tomo IX-Parte I: De la Arquitectura Civil)
1792	Simonin	Traité Elémentaire de la coupe de pierres ou l'art du trait
1795	Monge	Leçons de géometrie descriptive
1797	Simonin: trad. Martínez de la Torre; Asensio	Los cuatro libros de arquitectura
1799	Palladio: trad. Ortiz y Sanz	Los cuatro libros de architectura
1799	Monge	Géometrie Descriptive

Figura 6.18. Listado de tratados de cantería. (GUERRA, Rosa Ana (2012))

De la aplicación de los conocimientos que estaban en manos de nuestros protagonistas, se han sacado las siguientes conclusiones:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Que el pie utilizado para la construcción de Montefrío corresponde con el pie de Lugo, Domingo Lois Monteagudo era gallego.

Uds. Iglesia	Ud.		Submúltiplos						
	pie	Múltipl. vara	cuarta*	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8	1/16**
Centímetros	28.52	85.57	21.39	14.26	9.51	7.13	4.75	3.57	1.78

*cuarta = ¼ de vara = ¾ de pie

**1/16 pie = 1 dedo

1/12 pie = 1 pulgada

1/8 pie = 2 dedos

Por lo que sabemos de los datos aportados por Madoz (Pamplona 1806-Génova 1870) que recoge, en su Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España, una dimensión de 98 pies, debió aplicar la dimensión del pie de la provincia de Lugo ya que un pie en Lugo⁶⁷ correspondía con 28.50cm y si aplicamos este pie a las dimensiones tomadas en la actualidad a la Iglesia de Montefrío resultaría una dimensión de 27.95m / 98pies = 28.523cm

Como interpretación de los datos obtenidos del escáner se ha acotado en unidades del SMD y su equivalencia en pies tomando como fracción 1/8 de pie (2 dedos) que coincide con 3.57cm ya que la precisión a la que el escáner ha tomado datos ha sido cada 2.5cm así la medida en pies difiere como mucho en 1cm de la medida en SMD. Así que la medida que predomina en la iglesia es la media vara de 42.785cm para el canto de las piezas.

⁶⁷ GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica*. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid. Pág. 69.
http://webspersoais.usc.es/export/sites/default/persoais/rosana.guerra/descargas/GUERRA_2012_Tesis_Parte1.pdf

De la información que se ha podido recoger con el escáner sobre la iglesia de la Encarnación de Montefrío, el primer encaje fue el situar la esfera perfecta que se podía inscribir en el espacio interior.

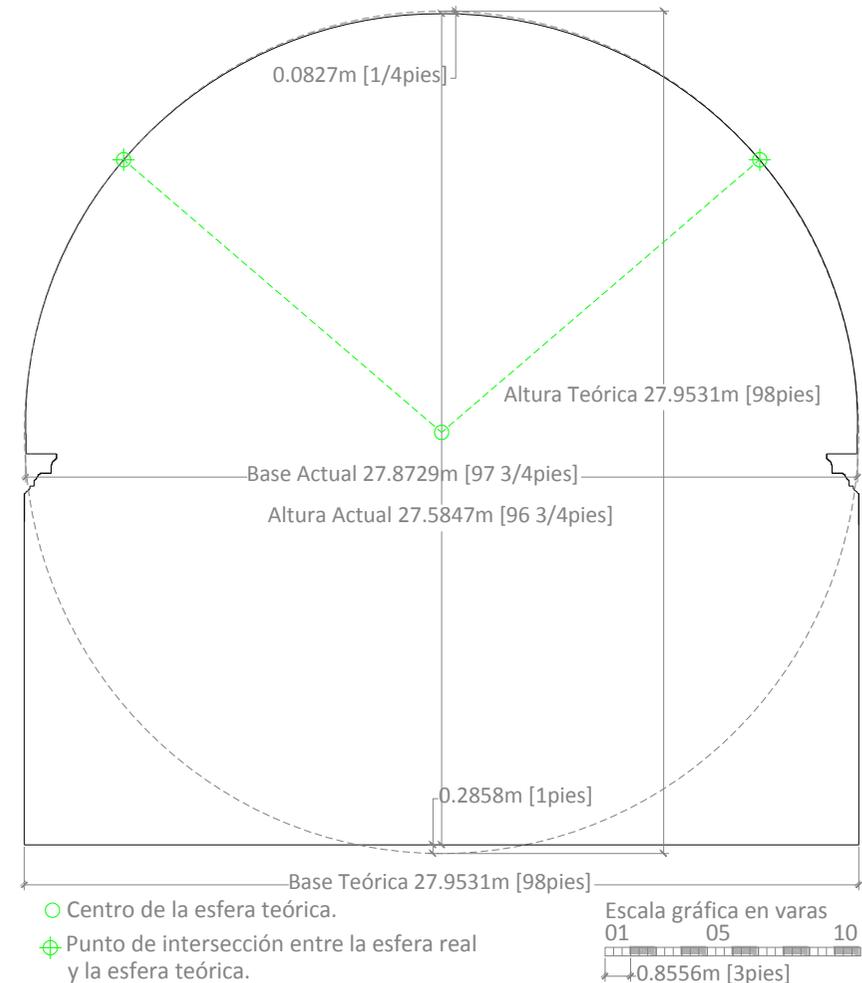


Figura 6.19. Superposición de la esfera real y la esfera teórica. Elaboración propia.

Se consigue inscribir una esfera perfecta de diámetro 27.9531m (98pies) a falta de 0.2858m (un pie) en la parte inferior; 8.27cm (1/4p) en su parte superior.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

A continuación se estudia los puntos de contacto de la esfera teórica y la real. Se produce la intersección a 49.6556° de la vertical. En la Parte V de Estabilidad se verá como es a 52° sobre la vertical donde se produce el cambio de trabajo de la cúpula, según el profesor Heyman, quedando así un cuarto en color azul (zona de tracción) y otro en rojo (zona de compresión).

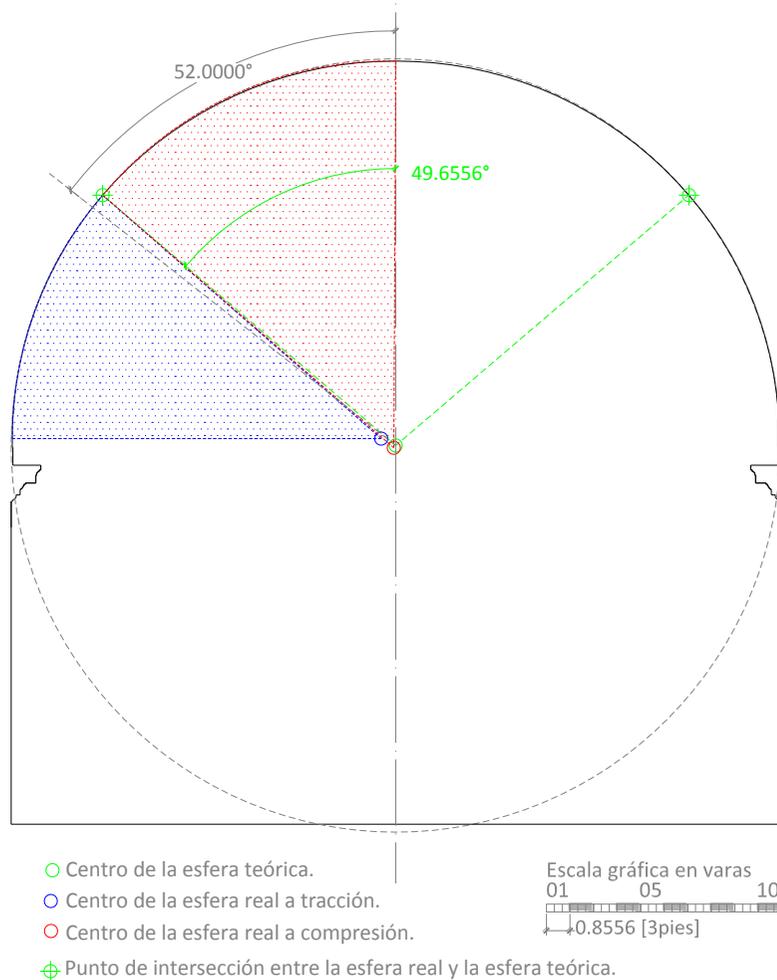


Figura 6.20. Intersección de la esfera real y la teórica. Elaboración propia.

Hacemos una ampliación de la localización de los distintos centros de las circunferencias que integran el contorno de la cúpula actual. Podemos estudiar cómo, respecto del centro teórico, existe una desviación del cuarto superior (rojo) de 0.0825m hacia abajo y del cuarto inferior (azul) 0.2523m hacia arriba.

La respuesta a estas diferencias es debida a la deformación que sufre el conjunto. De los desplazamientos de los centros se puede deducir que se ha producido un giro de las porciones para acomodarse una vez que la cúpula ha ido entrando en carga por anillos autoportantes.

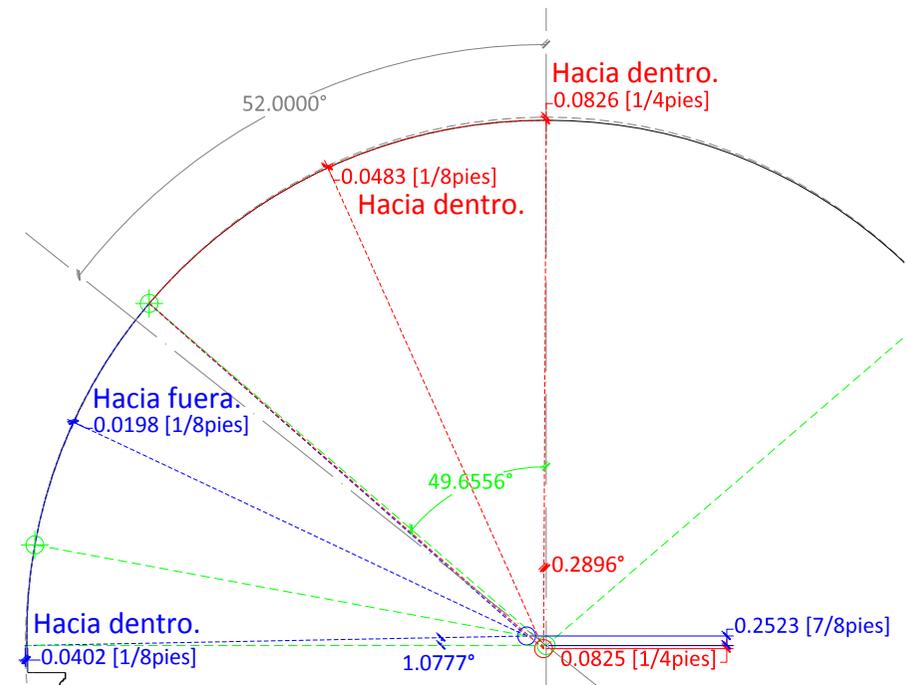


Figura 6.21. Deformaciones. Elaboración propia.

El siguiente paso fue analizar el espesor de la cúpula. Para esto contamos con el contorno exterior que nos proporciona la medición con la estación de rayo laser.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Al contorno exterior se ha descontado el espesor de los faldones de tejas que protegen la estructura de piedra del agua de lluvia.

Se toman los datos del trasdós aportados por el barrido del escáner, y se llega a las proporciones señaladas.

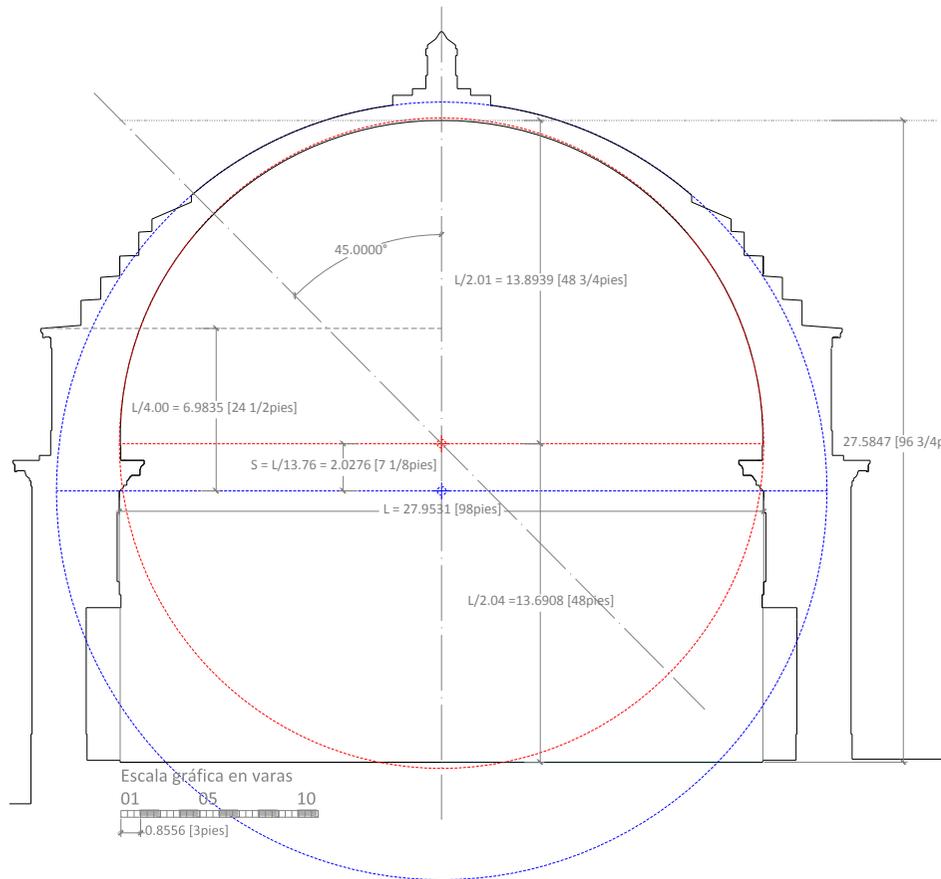


Figura 6.22. Proporciones de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío en comparación con las proporciones que establece Palladio. Elaboración propia.

Buscando referencias históricas donde se han estudiado las proporciones más usuales de cúpulas, nos encontramos con Palladio.

Andrea Palladio (1508-1580). Su tratado “Los cuatro libros de arquitectura” publicado en Venecia en 1570, es uno de los más influyentes de la historia de la arquitectura. La obra completa fue traducida al español en 1797 y fue sin duda conocido y empleado por los arquitectos españoles⁶⁸.

En su informe pericial sobre le Duomo nuovo de Brescia, expone las proporciones idóneas para una cúpula. El texto es:

“En cuanto a la cúpula, se debe hacer de manera que sea gruesa a la altura de la imposta, y se construirá un muro que la rodee que tenga de alto la mitad de su semidiámetro; este muro no solo hará un buen efecto, sino que pesando sobre la imposta la mantiene unida y firme. La parte superior, donde va la linterna, deberá ser delgada, para disminuir la carga en la medida de lo posible. La altura y anchura de la linterna vendrán determinadas por un triángulo equilátero, construido sobre el diámetro de la cúpula, como lo indica el dibujo. Las gradas que vienen encima del citado muro, se construyen tanto por belleza como por firmeza, pues su peso cae precisamente sobre el borde de la imposta de la cúpula. Por lo demás, la construcción se hará simple y sin ornamento”.

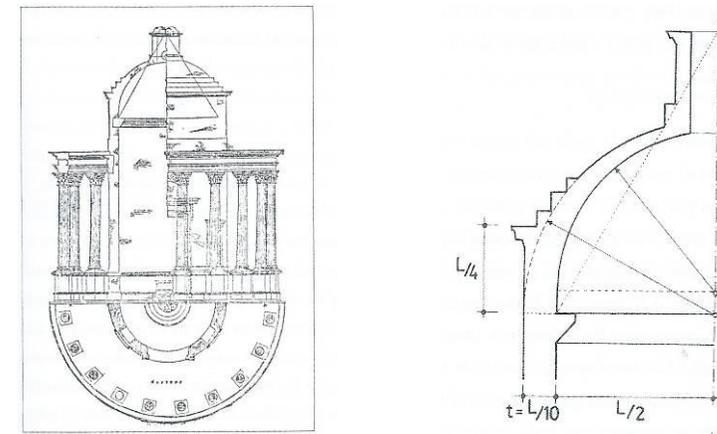


Figura 6.23. Dibujo que elige Rondelet para comentar la discusión de Palladio. Huerta, (2004) pág.201).

⁶⁸ HUERTA, Santiago (2004): Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.193

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

En la figura 22 se ve que el intradós de la cúpula es una semiesfera peraltada "S".

El trasdós vuelve a ser una superficie esférica y su radio es el del tambor que soporta la cúpula. Palladio no define el espesor, pero se deduce que será un décimo de la luz.

La imposta de la cúpula la sitúa a $L/4$ y el principio del escalonamiento se encuentra a 45° de la vertical tal como figura en el esquema romano.

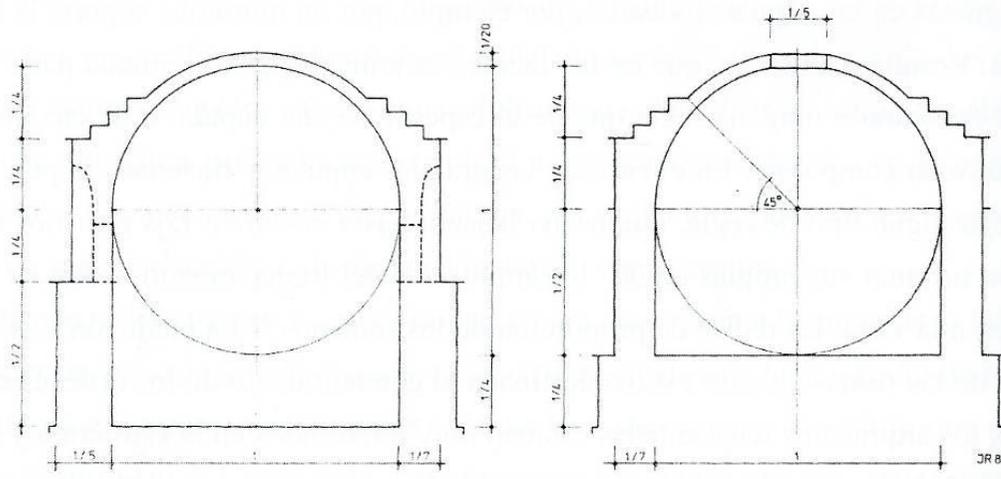


Figura 6.24. Regla romana para el cálculo del tambor de una cúpula que se verifica en numerosos templos redondos, entre ellos el Panteón; el tambor tiene de espesor $1/7$ de la luz. (Rasch, 1985). (HUERTA, (2004) pág.460)).

En esquema se aprecian las proporciones consideradas para nuestra Iglesia de Montefrío donde el arquitecto Domingo Lois de Monteagudo plasma las proporciones romanas.

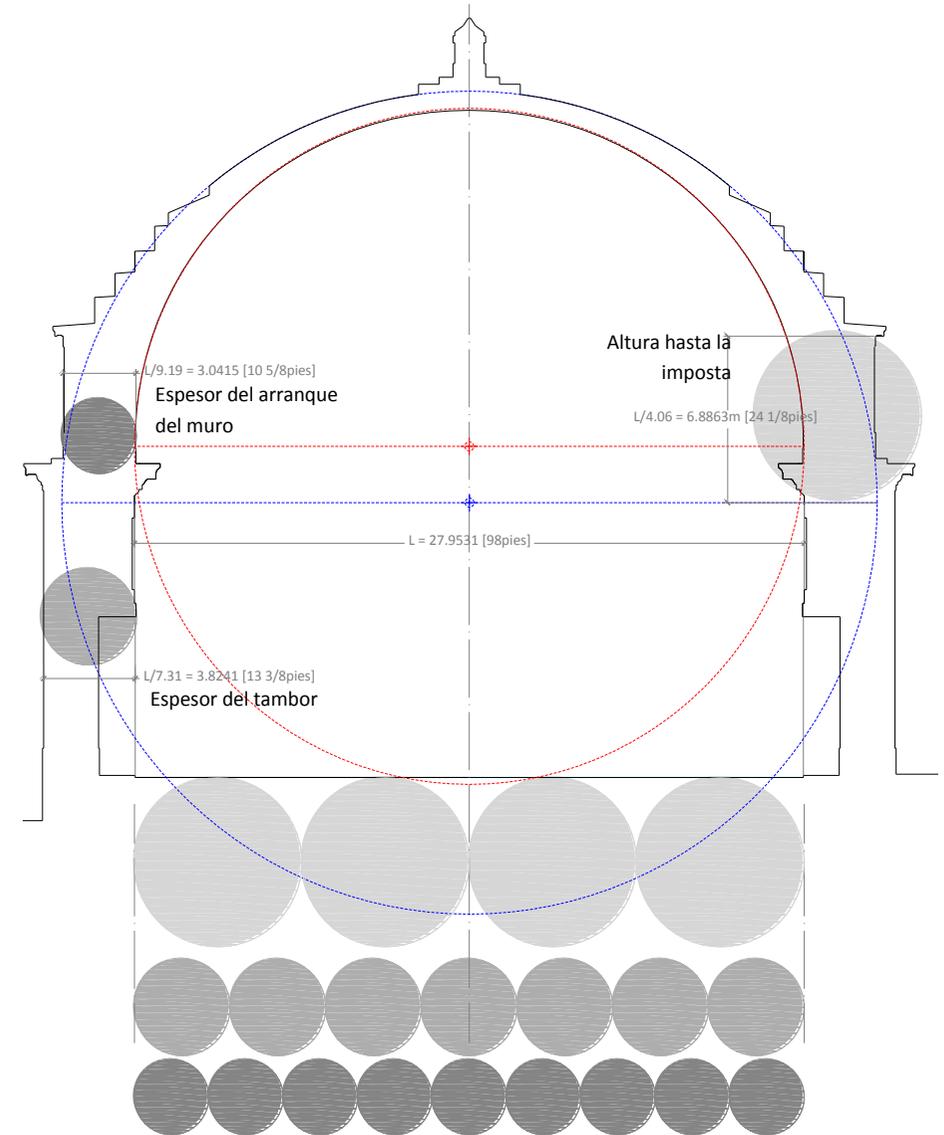


Figura 6.25. Proporciones de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío en comparación con las proporciones que establece el templo romano. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Será Simón García (1650-1697) en su tratado, de 1681, “Compendio de Arquitectura y Simetría de los Templos” recoge reglas de Rodrigo Gil de Hontañón (1500-1577 Arquitecto español más importante y prolífico del siglo XVI, gótico) y completa datos de las proporciones citadas por Palladio.

Simón García distingue diferentes proporciones del tambor según si este alberga capillas laterales o no.

Si se dispone de capilla como es nuestro caso el espesor del muro debe dividirse en cinco partes de las cuales 2 formarán el hueco y 3 partes será para el macizo⁶⁹.

En nuestro caso, la torre recoge las proporciones que debiera tener la hipotética linterna que le correspondería a nuestra cúpula de la Iglesia de Montefrío.

Pero será Carlo Fontana (1638-1714, Arquitecto de los más representativos del barroco romano) el arquitecto experto sobre la estabilidad de cúpulas; en 1673 para la iglesia de Santa Margarita en Montefiascone, en 1675 para la iglesia de Santa María en Vallicella y, finalmente, en 1680 para San Pedro de Roma.

De este trabajo se publicó “Il Tempio Vaticano e sua origine” que contiene reglas geométricas y aritméticas para el proyecto de cúpulas y de su sistema de contrarresto.

Las reglas geométricas de Fontana fueron una referencia para el proyecto de cúpulas en el siglo XVIII.

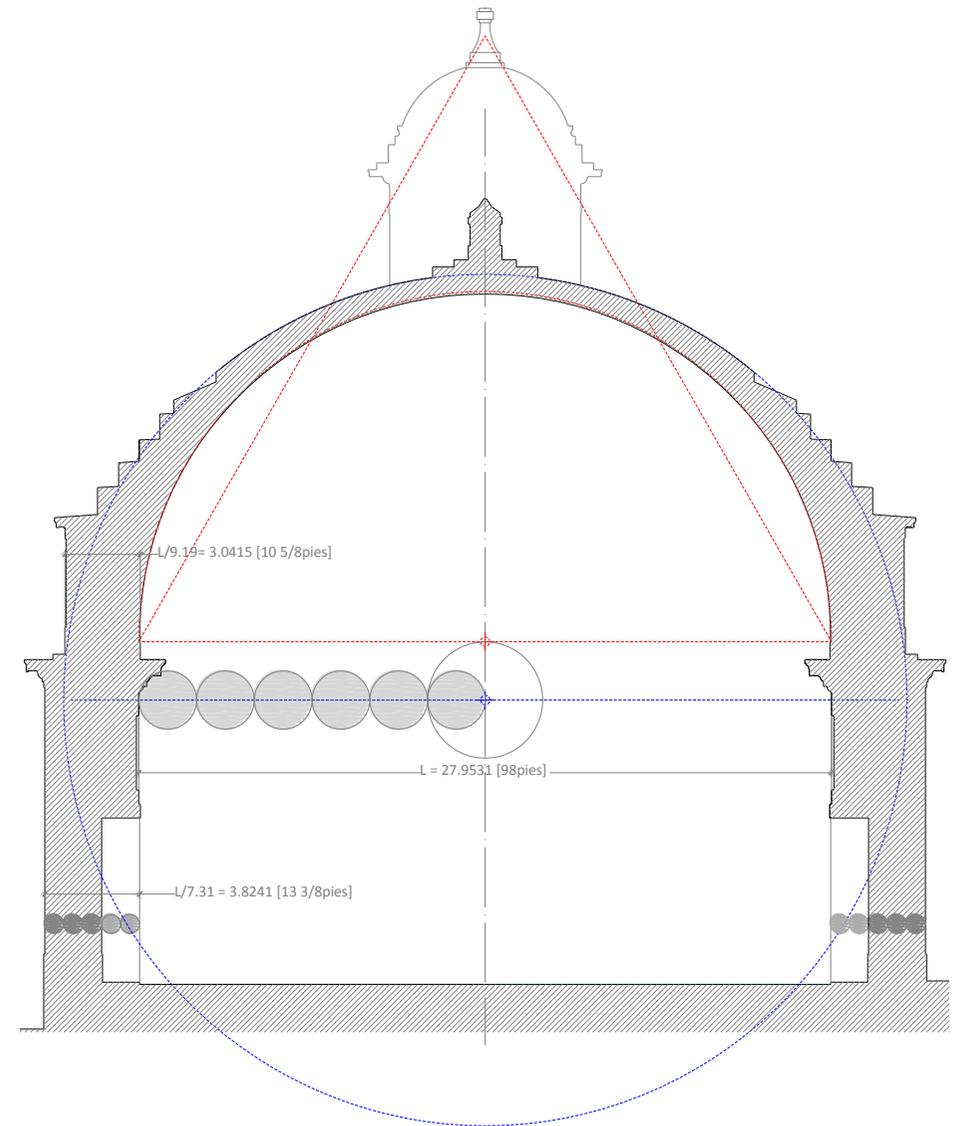


Figura 6.26. Proporciones de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío en comparación con las proporciones que establece Palladio y junto a las reglas de Simón García. Elaboración propia.

⁶⁹ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.259

Reglas para las cúpulas.

Fontana distingue entre cúpulas dobles, formadas por dos cáscaras como la de San Pedro (1506-1590 en tres etapas), y las simples, compuestas por una cáscara única.

Cúpulas simples: Según Fontana el escaso presupuesto es lo que provoca el uso de las cúpulas simples, o por una mala proporción de los muros o soportes que no son aptos para soportar las dobles.

“Reglas del Autor para construir los Tambores y Cúpulas Simples con Linternas” es fruto de años de experiencia y reflexión. Al hacer los informes periciales de las cúpulas de Montefiascone y Vallicella, demuestran que Fontana estudió los perfiles y espesores de cúpulas existentes, y los cotejó con las reglas de proyecto por él conocidas, con vistas a deducir una regla general. Realizó comparaciones gráficas y numéricas, basándose no solo en medidas de iglesias existentes; también acudió a reglas o secciones de los tratadistas.

Esto lo resumió en la tabla representada gráficamente en la lámina adjunta. Busca una regla de proporción, que es independiente del tamaño de la cúpula. Fontana concluye que el tambor que soporta la cúpula debe tener un espesor igual a la décima parte de la luz libre interior, $L/10$, cuando el tambor sea de excelente fábrica de ladrillo y que debe incrementarse a $L/9$, para fábricas de calidad inferior de toba o piedra⁷⁰.

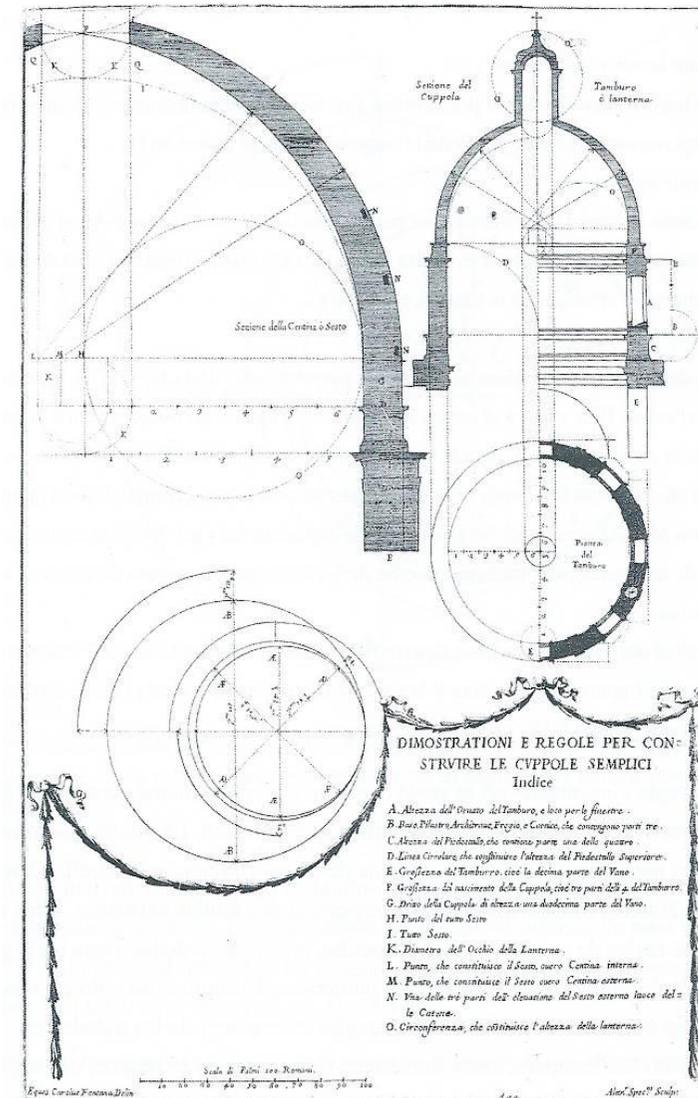


Figura 6.27. Regla de Carlo Fontana para el proyecto de las cúpulas simples, de una sola hoja. La regla recoge la experiencia de decenios y el estudio de otras cúpulas análogas; ejerció una gran influencia en los tratadistas posteriores. Fontana (1694). (HUERTA, (2004) pág.271).

⁷⁰ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.270

Las reglas de Fontana no pasaron desapercibidas y aparecen citadas en dos de las controversias suscitadas sobre la estabilidad de las cúpulas en el siglo XVIII, concretamente sobre las de San Francisco el Grande en Madrid (1761-1784) y Santa Genoveva (El Panteón de Paris, 1764-1790), ambos proyectos coetáneos de nuestra Iglesia de Montefrío.

El caso más interesante para nosotros es el de San Francisco el Grande en Madrid ya que es el propio Ventura Rodríguez quien cita las reglas de Fontana en su informe a la Academia de Bellas Artes de 1761, para desautorizar el proyecto presentado por Fray Francisco Cabezas⁷¹.

Es por esto que el arquitecto Domingo Lois de Monteagudo siguiera las reglas marcadas por Fontana ya que era la referencia que Ventura Rodríguez tomaba para emitir informes favorables a aquellos proyectos que se presentaban ante la Cámara de Castilla, como fue nuestro caso. El informe que emitió sobre el proyecto presentado para la iglesia de la Encarnación de Montefrío por Domingo Lois de Monteagudo se adjunta y en él se da como favorable sin tener que sufrir ninguna modificación estética ni estructural.

⁷¹ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.274

INDICE DE FIGURAS

Figura 6.1. Sección constructiva del tablero cerámico de cubrición según planos del proyecto de rehabilitación de cubiertas de la iglesia de Montefrío en 2003, recogido en el trabajo monográfico del proyecto fin de carrera de Anabel Córdoba. (CORDOBA, Anabel (2013))	3	Figura 6.16. Sección Transversal. Ortofoto	14
Figura 6.2. Planta acotada con medidas tomadas manualmente en el trabajo monográfico de proyecto fin de carrera de Anabel Córdoba. E.T.S.I.E. Universidad de Granada. (CORDOBA, Anabel (2013))	4	Figura 6.17. Unidades de longitud castellanas del siglo XVI.	21
Figura 6.3. Planta acotada con medidas tomadas a partir de la estación topográfica en el trabajo monográfico de proyecto fin de carrera de Anabel Córdoba. E.T.S.I.E. Universidad de Granada. (CORDOBA, Anabel (2013))	5	Figura 6.18. Listado de tratados de cantería. (GUERRA, Rosa Ana (2012))	23
Figura 6.4. Sección acotada con medidas tomadas a partir de la estación topográfica para el trabajo de monografía de investigación, Trabajo fin de Carrera de la iglesia de la Encarnación de Montefrío realizado por Anabel Córdoba Cruz. (CORDOBA, Anabel (2013))	6	Figura 6.19. Superposición de la esfera real y la esfera teórica. Elaboración propia.	24
Figura 6.5. Modelo utilizado para la medición.	8	Figura 6.20. Intersección de la esfera real y la teórica. Elaboración propia.	25
Figura 6.6. Rectificación digital de imágenes fotográficas. Según el profesor Almagro.	9	Figura 6.21. Deformaciones. Elaboración propia.	25
Figura 6.7. Emplazamiento de la toma de datos. Elaboración propia.	10	Figura 6.22. Proporciones de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío en comparación con las proporciones que establece Palladio. Elaboración propia.	26
Figura 6.8. Vista en perspectiva del modelo de nube de puntos.	10	Figura 6.23. <i>Dibujo que elige Rondelet para comentar la discusión de Palladio.</i> Huerta, (2004) pág.201).	26
Figura 6.9. Alzado principal. Nube de puntos generados por el escáner.	11	Figura 6.24. Regla romana para el cálculo del tambor de una cúpula que se verifica en numerosos templos redondos, entre ellos el Panteón; el tambor tiene de espesor 1/7 de la luz. (Rasch, 1985). Huerta, (2004) pág.460).	27
Figura 6.10. Alzado Principal. Ortofoto.	11	Figura 6.25. Proporciones de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío en comparación con las proporciones que establece el templo romano. Elaboración propia.	27
Figura 6.11. Alzado Lateral. Nube de puntos generados por el escáner.	12	Figura 6.26. Proporciones de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío en comparación con las proporciones que establece Palladio y junto a las reglas de Simón García.	28
Figura 6.12. Alzado Lateral. Ortofoto.	12	Figura 6.27. Regla de Carlo Fontana para el proyecto de las cúpulas simples, de una sola hoja. La regla recoge la experiencia de decenios y el estudio de otras cúpulas análogas; ejerció una gran influencia en los tratadistas posteriores. Fontana (1694).	29
Figura 6.13. Planta. Nube de puntos generados por el escáner.	13		
Figura 6.14. Planta. Ortofoto.	13		
Figura 6.15. Sección Longitudinal. Ortofoto.	14		

7 ≡ Estereotomía.....	1
7.1 Introducción.....	1
7.2. El material.....	1
7.2.1. Canteras y origen de los materiales.....	2
Descripción macroscópica.....	4
7.2.2. Técnicas analíticas y muestreo.....	5
Ensayo a compresión uniaxial.....	5
Balanza hidrostática.....	8
Ultrasonidos.....	10
7.2.3. Otras propiedades.....	11
7.3. La técnica de la cantería. Obtención de las dovelas.....	12
7.4. Interpretación de los datos.....	17
INDICE DE FIGURAS.....	21
INDICE DE TABLAS.....	21

>> 7 ≡ Estereotomía.

7.1 Introducción.

La RAE define la estereotomía como el arte de cortar piedras y maderas. Es una rama de la cantería que estudia el modo en que pueden tallarse, partirse y aprovecharse las rocas extraídas de la cantera en arreglo a su colocación específica en obras de arquitectura e ingeniería.

La palabra estereotomía aparece como tal en el siglo XVIII en Francia y en el siglo XIX en España. Las técnicas de estereotomía fueron muy utilizadas en ambos países, y se conocieron desde el Medioevo como monteá.

En España, en el siglo XVI comienzan a aparecer tratados más específicos, que detallan las formas de cada pieza con mayor atención.

En esta parte del trabajo, se continúa profundizando en las trazas del templo, en cuanto a su sección transversal, pero antes se tratará el estudio del material y la técnica de la monteá que hace posible la construcción de la iglesia.

Para el estudio de la cantería, se han tomado probetas del material utilizado para la construcción de la iglesia. La piedra se ha recogido de las canteras que describe el documento de compra-venta encontrado en el Archivo de Protocolos y a través de ensayos mecánicos en el laboratorio de materiales de la UGR se describirá sus características y formará parte de este capítulo del trabajo.

Se va estudiar el proceso técnico utilizado en la época por el cual se obtiene, a partir de un volumen capaz, una de las dovelas que entrarán a formar parte estructural de la cúpula. Qué tipo de herramientas se utilizaba y la manera en la que se transmitían, a través de las monteas, las ordenes en la ejecución de la obra.

Por último, se va a proponer una hipótesis de disposición de las dovelas debido a la falta de datos que se pueden recoger actualmente. Se tiene como dato la localización

de las dovelas en el intradós de la cúpula y también el despiece de los alzados exteriores a partir de las ortofotos que se tomaron en la visita al templo. Lo que no se ha podido constatar es el despiece del trasdós de la cúpula.

Al estar la cúpula protegida por faldones de tejas, no se ha podido registrar el despiece exterior de esta zona. Es por eso que solo podemos hacer una hipótesis del despiece constructivo.

7.2. El material.

Esta parte del trabajo trata la caracterización del material pétreo utilizado en la envolvente estructural del monumento mediante la aplicación de las técnicas más representativas para determinar sus parámetros físico-mecánicos de mayor relevancia.

El edificio presenta una litología predominante en la ejecución de elementos estructurales de su envolvente (sobre todo en la cúpula) mediante la utilización de piedra calcarenita bioclástica de grano fino de procedencia local.

7.2.1. Canteras y origen de los materiales.

El material utilizado en la construcción de la iglesia de Montefrío viene descrito en el documento de la subasta de piedra con fecha del 18 de octubre de 1788 que se adjunta en el anexo II. En él se comenta que: “de la cantera que hay en el sitio de San Cristobal”.

El proceso para localizar esta cantera fue laborioso. El motivo era la no existencia en la actualidad de esta, así que solo tenía la información de los vecinos del pueblo.

La primera orientación que obtuve de los vecinos del pueblo, nos indicaban lo que podían ser los restos de una cantera histórica originaria que se encuentra en el borde sur de la localidad a unos 500m de las edificaciones, en el lugar denominado “Cantera El lugar de San Cristobal”. En el encuadre geológico, la zona se encuentra en un ambiente deposicional del terciario en el que predominan areniscas calcáreas bioclásticas cementadas y poco cementadas (Instituto Geológico y Minero de España. Montefrío – Hoja 1008).

Pero la información decisiva fue la obtenida de un vecino empresario de una nave industrial dedicada al mármol (Mármoles Montefrío). Consulté al propietario para que me orientase y me comentó que el lugar que en la actualidad recibe el nombre de “San Cristóbal” no existía piedra en cantidad suficiente como para construir la iglesia de la Encarnación y que para la rehabilitación de la torre⁵⁵ de la Iglesia de la Villa que proyectó Diego Siloe se tomaron piezas del mismo monte.

La orientación estaba clara. Nos dirigimos hacia el paraje de La Enrea. Allí localizamos los cortes practicados a la ladera para la restauración tal como nos orientaron y que coincide con la descripción que Madoz hace sobre el lugar de San

⁵⁵ En el Archivo Histórico Provincial se guarda con la referencia Exp. de conservación/Conservación 1[1] 987AL 11/29 B.C.06.6/1989 el proyecto de obras de restauración de la torre de la iglesia de la Encarnación o de la Villa de Montefrío (Proyectada por Siloe) de fecha del 26 de octubre de 1989 redactado por el arquitecto Miguel Angel Martín Céspedes. El proyecto tiene como principal objetivo la restauración de piezas de piedra, en torre y muro que aún se conservan y la instalación de un pararrayos (carencia que motivó el desperfecto por descarga de un rayo en 1776). El acta de replanteo tiene fecha de 19 de noviembre de 1993.

Cristobal el cual lo describe con la ubicación de una fuente de agua de donde se abastece la localidad. Ver apartado de historia “la Iglesia de la Encarnación”.

El frente de cantera se presenta de forma continua y homogénea que permite la extracción de grandes bloques para la confección de sillares históricos, del que se han extraído varias muestras de dimensiones aproximadas 25x20x10cm para su posterior análisis y ensayos.



Figura 7.1. Recogida de muestras para su análisis en laboratorio. Elaboración propia.

El Instituto Geológico y Minero de España clasifica este lugar.



Figura 7.2. IGME Magna50_1008, Montefrío⁵⁶

⁵⁶ En el punto 1 se sitúa el lugar de donde se extrajeron las muestras para hacer las probetas.

A continuación recogemos la clasificación que de esta zona describe el IGME.

(42) Areniscas calcáreas bioclásticas poco cementadas.

(43) Areniscas calcáreas bioclásticas.

(42) Afloran en dos sectores; al noreste y sur de Zagra, y en Montefrío.

Aunque las características del material en ambos sectores son similares, en Montefrío se disponen de cortes donde se pueden hacer mejores precisiones sobre su estratigrafía y sedimentología.

Se trata de calcirruditas, calcarenitas bioclásticas y niveles de conglomerados de color amarillo con esporádicos niveles margosos, que no suelen exceder los 30-40cm.

En los niveles detríticos, el material bioclástico está compuesto por fragmentos de briozoos, lamelibránquios, algas rojas, foraminíferos planctónicos y bentónicos, balanús, y gasterópodos. El resto de material siliclástico y fragmentos de rocas, está formado por cuarzo muy redondeado, calizas, sílex y micasquistos.

Las margas se presentan por lo general masivas, si bien es posible observar una tenue laminación horizontal.

A medida que se asciende en la serie, se produce una sensible disminución granulométrica y un aumento en el contenido de los componentes bioclásticos.

En cuanto a las estructuras sedimentarias de ordenamiento interno se presenta: granoselección positiva y cantos blandos a la base, megaestratificación cruzada planar y en artesa, en ocasiones con láminas contiguas de polaridad opuesta (herringbone) y grandes superficies erosivas de gran continuidad lateral. Es de destacar el hecho de la aparición de sets de estratificación cruzada con láminas deformadas sinsedimentariamente.

Los levigados efectuados en los niveles margosos de este término, permiten datar un Serravaliense terminal-Tortoniense inferior, con Globorotalia menardii D'ORB sin Turborotalia siakensis LE ROY ni Turborotalia acostaensi BLOW, y un Tortoniense inferior con este último y sin Turborotalia humerosa TAK. y SAITO.

En su conjunto este tramo se presenta fuertemente buzante, en ocasiones con estratos subverticales y coronados por una espectacular discordancia angular bien visible en el pueblo de Montefrío.

A partir de la composición y estructuras sedimentarias de estas calcarenitas, se puede atribuir a un ambiente de plataforma somera dominada por mareas –estratificación cruzada en herringbone-. En un marco de clara inestabilidad tectónica –deformaciones sinsedimentarias de las láminas, que en opinión de RODRIGUEZ-FERNANDEZ Y VERA (1980), se encuentran relacionadas con sacudidas sísmicas dentro de la cuenca-. Esta actividad tectónica culmina con la generación de la discordancia antes aludida (intratortoniense), ya puesta de manifiesto anteriormente por VERA Y GONZALEZ-DONOSO (1964), VERA (1969), ESTEVEZ et al (1980) y RODRIGUEZ-FERNANDEZ (1982).

(43) Materiales que descansan sobre la discordancia anterior. Se trata de unas calcarenitas bioclástica de tamaño de grano medio-fino, con idénticas características texturales que las anteriores. Con éstas, las diferencias que se encuentran son, de un lado el mayor contenido en algas rojas y corales solitarios y de otro el descenso en el régimen hidrodinámico de las estructuras –laminación o estratificación planar o cruzada muy tendida y niveles con pequeños ripples de corriente u oscilación-. En ocasiones la intensa bioturbación puede destruir la laminación original.

El ambiente sedimentario deducido para este término, es semejante al anterior –plataforma marina somera-, de edad marcada por Globorotalia plesiotumida BLOW Y BANNER y Globigerinoides extremus BOLLI Y BERM, Tortoniense superior.

Los efectos de la compresión intra-Tortoniense provocaron un cambio en las condiciones paleogeográficas de la cuenca; cambio que también se hizo sensible en su propia dinámica. Esto provoca un descenso en el régimen energético, posiblemente debido a una paulatina retirada del mar durante el Tortoniense superior.

Ambos términos (42 y 43), se encuentran afectados por una etapa compresiva posterior a la intra-Tortoniense, puesta de manifiesto por fallas inversas y movimientos dextrorsos, que han originado cabalgamientos y delizamientos laterales.

Descripción macroscópica.



Figura 3. Fotografía desde la torre hacia la cúpula. Elaboración propia.

Existe una clara similitud textural y macroscópica con la piedra del monumento que podemos describir como de color crema claro a beige, de estructura homogénea, con un tamaño medio de grano fino donde se observa que algunos clastos son fragmentos de esqueletos procedentes de varios organismos (principalmente algas rojas, foraminíferos, briozoos, equinodermos y lamelibranquios).

Son bastante deleznable y los granos no presentan mucha cohesión ya que la piedra pierde material con facilidad, sobretodo en la parte más externa debido a la actuación de los agentes atmosféricos. Los procesos de arenización son mucho más marcados en la parte que se encontraba al exterior que el corte en contacto con el interior.

Las muestras extraídas no muestran fisuras o fracturas de ningún tipo. Se aprecian bastantes poros a simple vista con un tamaño homogéneo en torno a 2mm de diámetro distribuidos uniformemente.

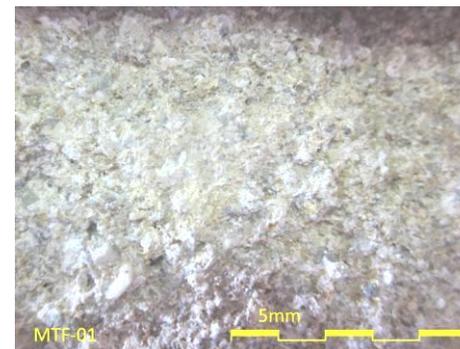


Figura 7.4. Textura macroscópica de la muestra sin cortar. Elaboración propia.

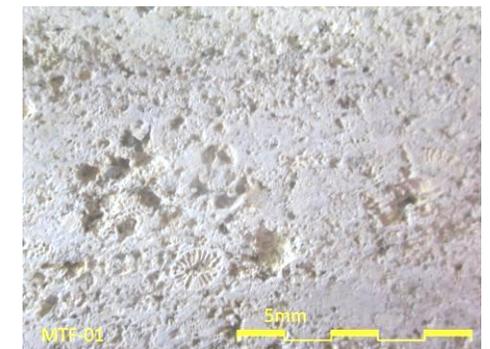


Figura 7.5. Textura macroscópica de la muestra cortada. Elaboración propia.

7.2.2. Técnicas analíticas y muestreo.

Las técnicas instrumentales utilizadas y los ensayos realizados han sido los siguientes:

Ensayo a compresión uniaxial.

Por medio de esta técnica se ha puesto de manifiesto la resistencia a compresión del material, dato básico para evaluar el material y realizar cálculos de resistencia del mismo. (UNE-EN 1926:2007 Métodos de ensayo para la piedra natural). Se ha utilizado una prensa hidráulica del Departamento de Mecánica de Estructuras de la Universidad de Granada.



Figura 7.6. Proceso de obtención de las probetas a partir de las muestras. Elaboración propia.

La preparación de muestras ha consistido en la confección de 9 probetas cúbicas de 5x5x5 cm expuestas a humedad ambiente simulando condiciones externas similares al que se encuentra el material en el edificio.

El proceso consistió en localizar la estratificación de la muestra recogida y tratar de dar los cortes lo más parecido al proceso de sedimentación ya que esta será la manera en la que se pondrá a trabajar.

Una vez obtenidas las probetas, se pulieron las caras paralelas a la estratigrafía y se introdujeron en la estufa desecadora a 110°C para eliminar el agua absorbida en el proceso de corte.

A las 24 horas se sacaron y se dejaron durante 10 días en un ambiente exterior para que volvieran a su estado de equilibrio de humedad intentando reproducir las condiciones en las que se encuentra el material en el edificio.



Figura 7.7. Probetas y máquina pulidora. Elaboración propia.

Pasado este tiempo, a nueve de ellas se les aplicó el ensayo a compresión.

Las dos restantes no eran adecuadas para la máquina que iba a realizar la prueba y se reservaron para la prueba de ultrasonidos y así contrastar el resultado del Módulo de Young por tensión-deformación de la prueba de compresión y el resultado aportado por la técnica de ultrasonido.

El proceso se realiza aplicando un incremento de fuerza, perpendicular a la estratificación, hasta llegar a la rotura y el programa refleja el resultado gráficamente y mediante tabla Excel.



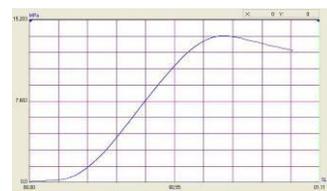
Figura 7.8. Desecadora. Elaboración propia.



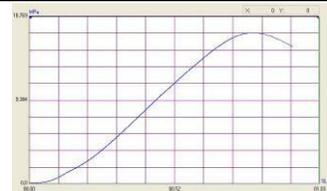
Figura 7.9. Prueba de compresión. Elaboración propia.

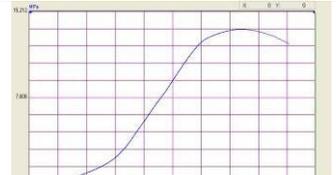
Probeta	Características
	Superficie (mm) 49.18
	Altura (mm) 48.5
	F máxima (KN) 33.43
	Resistencia (MPa) 13.71
	Carrera (mm) 1.51
	E (N/mm ²) 866.66

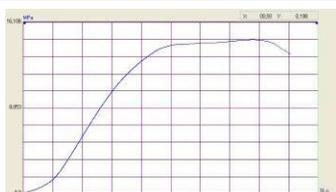
Diagrama tensión-% deformación

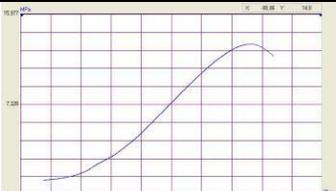


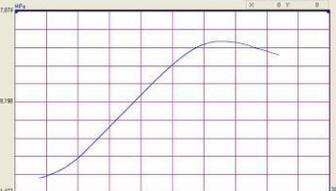
	Superficie (mm) 53.31
	Altura (mm) 53.0
	F máxima (KN) 48.49
	Resistencia (MPa) 16.93
	Carrera (mm) 1.41
	E (N/mm ²) 1049.72

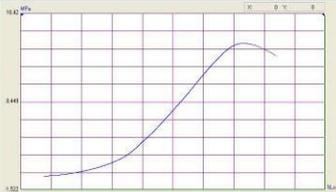


	Superficie (mm) 50.55	
	Altura (mm) 49.5	
	F máxima (KN) 35.33	
	Resistencia (MPa) 13.63	
	Carrera (mm) 2.62	
	E (N/mm ²) 632.18	

	Superficie (mm) 49.75	
	Altura (mm) 42.0	
	F máxima (KN) 36.24	
	Resistencia (MPa) 14.42	
	Carrera (mm) 2.17	
	E (N/mm ²) 778.31	

	Superficie (mm) 50.25	
	Altura (mm) 51.5	
	F máxima (KN) 33.34	
	Resistencia (MPa) 13.12	
	Carrera (mm) 1.09	
	E (N/mm ²) 1087.98	

	Superficie (mm) 50.81	
	Altura (mm) 49.0	
	F máxima (KN) 38.14	
	Resistencia (MPa) 14.68	
	Carrera (mm) 1.26	
	E (N/mm ²) 1081.61	

	Superficie (mm) 49.36	
	Altura (mm) 48.5	
	F máxima (KN) 35.09	
	Resistencia (MPa) 15.06	
	Carrera (mm) 1.91	
	E (N/mm ²) 774.75	

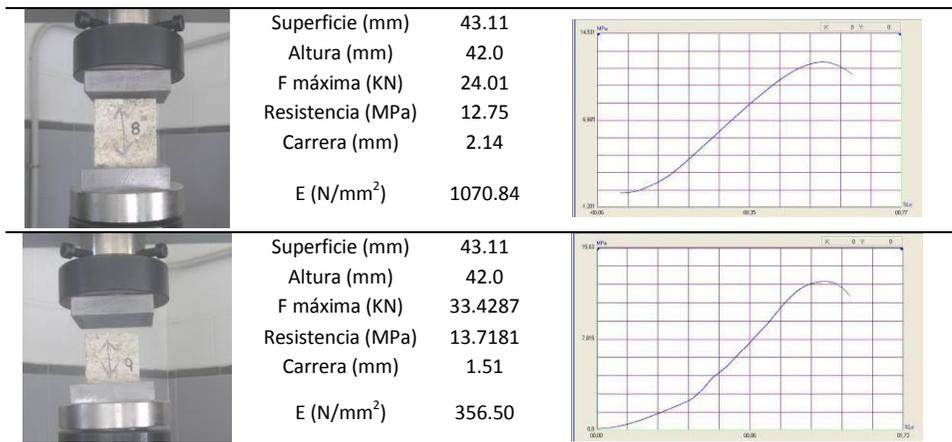


Figura 7.10. Secuencia de la toma de datos. Elaboración propia.

La resistencia obtenida tiene coherencia con la tabla de resistencias existentes en bibliografía, en figura 7.13.

La interpretación de los resultados en cuanto al Módulo de Young es la siguiente:

El programa de ordenador de la prensa mecánica nos da los datos de fuerza máxima aplicada en KN, nos da la resistencia del material en MPa y la carrera en mm. En la carrera se mide la deformación sufrida por el probeta pero también por las placas que entran en contacto en la probeta, a parte el programa de ordenador devuelve una tabla Excel con los resultados de la fuerza aplicada y su correspondiente deformación.

El diagrama tensión-deformación que nos da la pantalla y que es el que se recoge en la tabla de la figura 9, viene en MPa y en tanto por ciento de deformación. El proceso para calcular en Módulo de Elasticidad o de Young su el siguiente:

Probeta	Área (mm ²)	σ inicial (N/mm ²)	Fuerza (KN)	σ final (N/mm ²)	Fuerza (KN)	$\Delta\sigma$	Longitud	ϵ inicial	ϵ final	$\Delta\epsilon$	E(N/mm ²) = $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$
1	2418,90	6,57	15,89	13,14	31,78	6,57	48,50	0,01	0,02	0,01	866,67
2	2842,20	5,63	16,00	11,26	32,01	5,63	53,00	0,01	0,01	0,01	1049,73
3	2555,80	4,56	11,66	11,41	29,16	6,85	49,50	0,02	0,03	0,01	632,18
4	2474,80	3,22	7,97	9,66	23,92	6,44	42,00	0,01	0,02	0,01	778,31
5	2525,10	4,40	11,10	10,26	25,91	5,86	51,50	0,01	0,01	0,01	1087,98
6	2581,90	5,74	14,82	11,48	29,63	5,74	49,00	0,01	0,01	0,01	1081,61
7	2436,90	5,07	12,35	12,67	30,88	7,60	48,50	0,02	0,03	0,01	774,75
8	2543,90	4,00	10,17	8,66	22,04	4,67	51,00	0,01	0,01	0,00	1070,84
9	1858,60	5,47	10,17	9,38	17,43	3,91	42,00	0,03	0,04	0,01	356,50

Tabla 7.1. Módulo de Elasticidad a partir de los ensayos de compresión.

De la gráfica tensión-%deformación se obtuvieron los valores de tensión inicial y final pertenecientes al tramo central (recto).

Estos datos se dividen entre el área de la probeta analizada y se obtuvo la fuerza aplicada en ese momento. En la tabla Excel se buscó la deformación, en mm, inicial y final correspondiente al valor de la fuerza. Con la longitud de la pieza se determinó la deformación unitaria.

El resultado del Módulo de Elasticidad será el cociente entre el incremento de tensión y el incremento de deformación unitaria, tal y como se recoge en la siguiente tabla.

De este estudio se concluye que este método no es adecuado para la obtención del Módulo de Young. Existen otros métodos con el uso de abrazaderas para probetas cilíndricas que llevan extensómetros y miden la deformación de la muestra, pero la probeta extraída no era cilíndrica. A continuación de la prueba de la balanza hidrostática para el cálculo de la densidad aparente, se recoge la técnica de ultrasonidos utilizada para determinar el módulo de manera satisfactoria.

Balanza hidrostática.

Por medio de esta técnica se ha puesto de manifiesto la densidad y peso específico del material, dato básico para determinar el peso propio de la piedra, para el estudio del comportamiento estructural de la cúpula.

Para ello se ha utilizado una balanza hidrostática y una estufa de desecación del Departamento de Mecánica de Estructuras de la Universidad de Granada.



Figura 7.11. Muestras para obtener la densidad aparente del material. Elaboración propia.

La preparación de muestras ha consistido en la utilización de restos de la muestra de donde se ha confeccionado las probetas cúbicas. No se disponía de más material y para calcular la densidad del material no es necesaria una forma geométrica específica.

Las muestras, que habían sido mojadas para poder cortarlas con la radial, contenían agua en sus poros así que se decidió sumergirlas durante 24 horas para terminar de saturarlas y empezar el proceso al contrario de lo habitual ya que se había detectado que la muestra perdía algo de materia en el proceso de mojado y esta opción de hacer la secuencia del proceso a la inversa era más adecuado.

Después de estar 24 horas sumergidas en agua se procedió a pesarlas. Primero se retiró el agua sobrante con una bayeta y se pesó la muestra saturada en la balanza, a continuación se vuelve a pesar la muestra sumergida y se toma el nuevo valor. La diferencia de estos dos valores nos da el volumen (cm^3).

Muestra Saturada(g)	Muestra Sumergida(g)	Volumen(cm^3)	Muestra seca(g)	$\gamma(\text{kg}/\text{m}^3)$
		1547.1-852.4 =694.7		1442/694.7 2076
		764.0-419.6 =344.4		712.3/344.4 2068
		854.8-463.3 =391.5		788.5/391.5 2014
		1113.9-603.2 =510.7		1026.9/510.7 2011

Figura 7.12. Tabla del proceso de cálculo de la densidad aparente (kg/m^3).
Elaboración propia.

Las muestras desecadas previamente en una estufa de desecación a 110°C durante 72 horas se vuelven a pesar para obtener la densidad seca de la muestra (kg/m^3).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

La interpretación de los resultados, mediante el cociente entre masa y volumen del cuerpo, ha determinado el valor de densidad seca y densidad aparente del material.

A partir de los valores obtenidos se hace una media ponderada de donde queda una densidad aparente de 2040kg/m³.

Si lo comparamos con los existentes en la bibliografía:

Calcarenita	γ (kg/m ³)	V _p (m/s)	E (GPa)	μ
		X = 3994	20.3	0.33
Escúzar	1860	Y = 4459	22.0	0.36
		Z = 4342	21.6	0.35
		X = 3328	-	-
La Escribana	1850	Y = 3566	-	-
		Z = 3441	-	-

Tabla 7.2. Tabla de materiales granadinos⁵⁷.

Vemos que es un resultado coherente dentro del intervalo de este tipo de piedra.

Así que, la densidad aparente calculada de 2040kg/m³, será la densidad aparente que se tomará para estimar el peso del gajo estructural que es un dato necesario para el cálculo gráfico de la línea de empujes objeto principal de este trabajo.

Es una tabla de resistencias a compresión de las piedras (en kg/cm²; 1kg/cm² = 0.1 N/mm²) tomada de un manual de ingeniería de la segunda mitad del siglo XIX. (Collignon 1885)⁵⁸ La segunda columna por la derecha representa la altura máxima (en metros) de una torre o columna de sección constante sometida a su propio peso.

⁵⁷ UROSEVIC, M.; SEBASTIAN PARDO, E.; RUIZ AGUDO, E. Y CARDELL, C. (2011). *Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España*. Materiales de Construcción, vol. 61, 301, pp 125.

⁵⁸ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2. Pág. 16

INDICATION DES MATÉRIEAUX.	Poids du décimètre cube.	Charge d'écrasement par centimètre carré.	Hauteur représentative de la charge d'écrasement (1).	OBSERVATIONS.
<i>Pierres volcaniques.</i>				
Basalte de Suède.	kilogr. 3,06	kilogr. 1912	mètres. 6248	Rondelet.
Basalte d'Auvergne.	2,88	2078	7215	Id.
Lave du Vésuve, dite <i>Piperno</i>	2,60	563	2163	Id.
Lave grise des environs de Rome.	1,97	228	1157	Id.
Tuf de Rome.	1,22	58	478	Id.
<i>Granits.</i>				
Granit d'Aberdeen bleu.	2,62	767	2927	G. Rennie.
Granit vert des Vosges.	2,85	620	2175	Rondelet.
Granit gris de Bretagne.	2,74	654	2383	Id.
Granit de Normandie, Gatmos.	2,66	702	2639	Id.
Granit gris des Vosges.	2,64	423	1603	Id.
<i>Grès.</i>				
Grès très-dur.	2,52	813	3226	Id.
Grès blanc.	2,48	923	3713	Id.
Grès bigarré des Vosges.	2,17	400	1843	Conservatoire des arts et métiers.
<i>Pierres calcaires.</i>				
Marbre noir de Flandre.	2,72	789	2901	Rondelet.
Marbre blanc veiné.	2,70	298	1104	Id.
Marbre rouge du Devonshire.	2,70	522	1933	Rennie.
Calcaire de Portland.	2,42	262	1083	Id.
Pierre de Caserte, près Naples.	2,72	595	2191	Rondelet.
Pierre noire de St-Fortunat (Lyon)	2,65	627	2366	Id.
Liais de Bagneux, près Paris.	2,44	445	1824	Id.
Travertino de Rome.	2,36	298	1262	Id.
Roche de Châtillon, près Paris.	2,29	174	760	Id.
Roche douce de Châtillon.	2,08	134	644	Id.
Roche d'Arcueil, près Paris.	2,00	255	1100	Id.
Pierre de Saillancourt, 1 ^{re} qualité.	2,41	141	585	Id.
<i>Briques.</i>				
Brique dure très-cuite.	1,55	150	962	
Brique rouge.	2,17	57	262	
Brique rouge pâle.	2,08	39	187	
<i>Mortiers.</i>				
Mortier de chaux et de sable de rivière.	1,63	31	»	Rondelet.
Mortier de ciment de tuileau.	1,46	48	»	Id.
Mortier de pouzzolanes de Naples et de Rome mêlées.	1,46	37	»	Id.
Mortier avec chaux éminemment hydraulique.	»	144	»	Vicat.

Figura 7.13. Tabla de resistencias a compresión y densidades de piedras. (Collignon, 1885)

Ultrasonidos.

Mediante la aplicación de esta técnica ha sido posible la determinación de la velocidad de transmisión de ondas a través del material (UNE-EN 12668-1), imprescindible para el cálculo de los módulos de Young. Para ello se ha utilizado un medidor de ultrasonidos del Departamento de Mecánica de Estructuras de la Universidad de Granada.



Figura 7.14. Prueba de ultrasonidos con transductores de 500MHz. Elaboración propia.

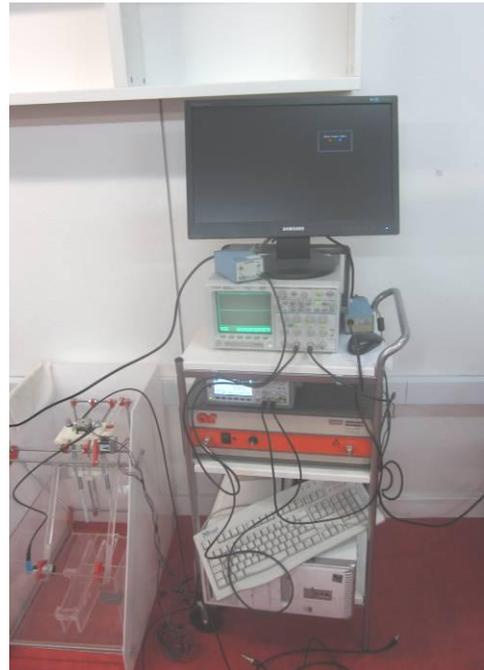
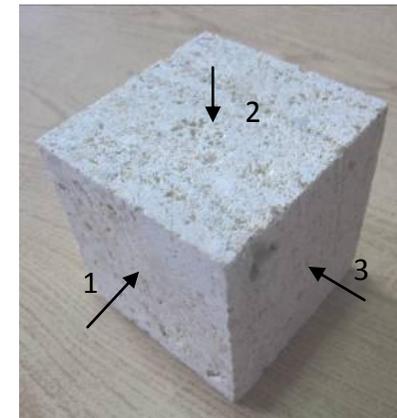


Figura 7.15. Prueba de ultrasonidos con transductores de 50MHz. Elaboración propia.

Se ha realizado sobre una muestra cúbica preparada de 8.3x8.3x8.3cm sin fracturas y con planeidad de caras expuesta a temperatura y humedad ambiente. La interpretación de resultados se basa en el análisis de los valores registrados para las ondas principales P.

La medición se hace con las caras enfrentadas. Se ha hecho una medición con el traductor de 500MHZ, alta frecuencia, y un ciclo de 10 voltios pico-pico obteniendo un tiempo de vuelo de 27 microsegundos. Se decidió hacer otra toma de datos con otro traductor de 50MHZ de menor frecuencia lo que hace que sea más idóneo para la caracterización de este material.

Los resultados fueron más ajustados en el caso del traductor de 50 y se recogen en la siguiente tabla:



	1	2	3
Tiempo de vuelo (μs)	27.2	24	23.2
Longitud (cm)	8.3	8.3	8.3
Velocidad (m/s)	3051.47	3458.33	3577.59
Módulo de Poisson (μ)	0.25	0.25	0.25
E (GPa)	15.8	21	17.4

Figura 7.16. Especimen utilizado para la prueba de ultrasonidos. Elaboración propia.

La toma de datos ha consistido en aplicar los transductores en primer lugar de manera perpendicular a la estratigrafía, en segundo y en tercer lugar son pruebas realizadas de manera paralela a la estratigrafía.

La técnica de ultrasonido toma como dato el tiempo de vuelo de las ondas P (compresivas) y como este dato depende de la densidad del material, del módulo de poisson y del módulo de Elasticidad, podemos despejar.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Hemos tomado la densidad aparente de las muestras 2040kg/m³ y como módulo de poisson se ha tomado uno semejante a un hormigón de resistencia semejante a la de nuestra muestra, es decir, $\mu=0.25$

$$C_p = \sqrt{[E(1-\mu)] / [\gamma \cdot (1+\mu) \cdot (1-2\mu)]} \quad E = C_p^2 \cdot [\gamma \cdot (1+\mu) \cdot (1-2\mu)] / (1-\mu)$$

De la prueba de compresión axial obtenemos el módulo de elasticidad analizando la parte de la gráfica σ/ϵ que queda lineal y que hemos visto que no da resultados coherentes. De ahí que se decidió realizar una prueba de ultrasonidos que han dado valores dentro del intervalo bibliográfico.

Tipo	Bóveda	Materiales de la bóveda
Bóveda de piedra ordinaria	0.604	1.37-2.71
Bóveda de ladrillo	0.278	0.45-1.62
Bóveda de hormigón en masa	2.460	

Tabla 7.3⁵⁹. Módulo de elasticidad (*10⁵kg/cm²) de una fábrica a partir de los de sus componentes. Resultados del estudio realizado por los ingenieros austriacos en 1895.

Los valores obtenidos de la prueba de ultrasonido y los valores recogidos por las pruebas de compresión axial se han comparado con la bibliografía:

1.- Una tabla de mayor antigüedad, de 1895, perteneciente a una extensa serie de ensayos, que la Asociación de Ingenieros y Arquitectos Austríacos hizo, sobre grandes arcos de fábrica y hormigón armado para demostrar una cierta proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones medidas, que se consideró una demostración de la validez de la teoría elástica, si bien había una enorme discrepancia entre el módulo de elasticidad de la estructura y el del material.

2.- Una tabla moderna pues incluye módulo de Young; solo a partir de finales del siglo XIX se consideró que las propiedades elásticas era relevantes en el análisis de estructuras de fábrica.

⁵⁹ HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/> pág. 38

	σ_c (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	E (KN/mm ²)	γ (KN/mm ³)
Tiza	2-12	0.1-1.5	2-10	14.0
Caliza	7-40	0.5-5	5-30	21.0
Caliza Compacta	40-100	4-15	30-60	23.6
Esquistos	15-70	1-10	7-50	22.2
Granito	60-180	6-15	15-70	28.5
Cuarcita	80-300	7-20	25-80	30.6

Figura 7.17. Resistencias mecánicas y peso específico de las piedras (Delbecq 1983). Santiago Huerta (2004)

7.2.3. Otras propiedades.

Por último, es conveniente hacer referencia a otras propiedades intrínsecas del material (composición, matriz y propiedades hídricas) para completar la descripción de sus propiedades intrínsecas. Para ello se ha tomado de referencia la calcarenita bioclástica de Santa Pudia⁶⁰, una piedra de características muy similares en cuanto a su formación, textura, etc. y muy utilizada en edificios monumentales de la ciudad de Granada.

Ésta se define como una roca sedimentaria muy porosa y permeable, formada por fragmentos carbonatados de las partes duras de organismos marinos y clastos de rocas silicatadas en una matriz carbonatada. Cuando se extrae de cantera, su color oscila de blanco a pardo claro (amarillento), similar a nuestra muestra.

Presenta una composición mayoritaria a partir de carbonato cálcico (calcita, CO₃Ca) y un tamaño medio de grano entre 0.3 y 1 mm con escasa matriz y cemento entre partículas lo que hacen que sea bastante laborable pero muy deleznable. Es un material heterogéneo en cuanto a sus propiedades hídricas (10 y 30 % en muestras frescas de cantera, y 30-50 % en muestras alteradas), con una distribución de los tamaños de poro irregular formando un sistema interconectado.

⁶⁰ CARDELL, Carolina (2003): *Cristalización de sales en calcarenitas: aplicación al monasterio de San Jerónimo de Granada*. Universidad de Granada. Departamento de Mineralogía y Petrología. <http://digibug.ugr.es/handle/10481/26083>

7.3. La técnica de la cantería. Obtención de las dovelas.

La Rae define la palabra montea como: Dibujo a tamaño natural de un elemento arquitectónico realizado cerca de su lugar de emplazamiento para que sirva como guía a la hora de construirlo. También define la palabra cantería como: Arte de labrar las piedras para las construcciones. Y por último la palabra estereotomía como: Arte de cortar piedras y maderas.

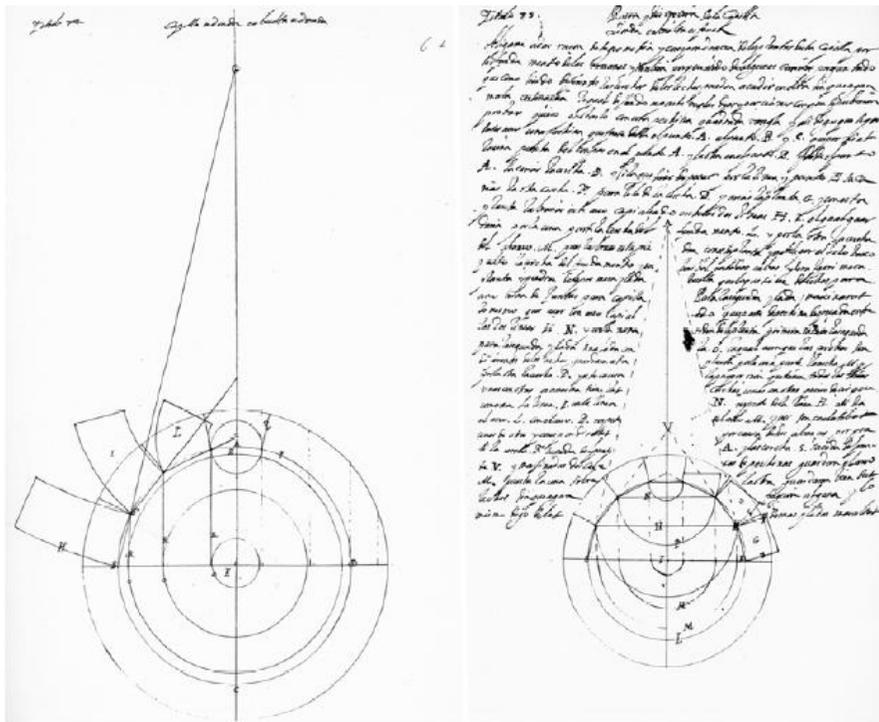


Figura 7.18. Trazas para el corte de la «capilla redonda en vuelta redonda» en el tratado de Vandelvira⁶¹.

⁶¹ GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica*. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid.

Gracias a la proliferación de tratados de corte desarrollados en el renacimiento se mantenía vivo el arte del trabajo de la piedra.

Como referencia tenemos a Alonso de Vandelvira (ca. 1591, 60v-61v) explica detalladamente el procedimiento de su despiece mediante el desarrollo de sus hiladas, una operación a la que recurrirá para resolver otras construcciones a lo largo de su tratado. Denomina a esta cúpula “Capilla redonda en vuelta redonda” y la califica de “principio y dechado de todas las capillas romanas”.

Casi todas las demás imágenes que aparecen son semejantes a la dibujada por Vandelvira.

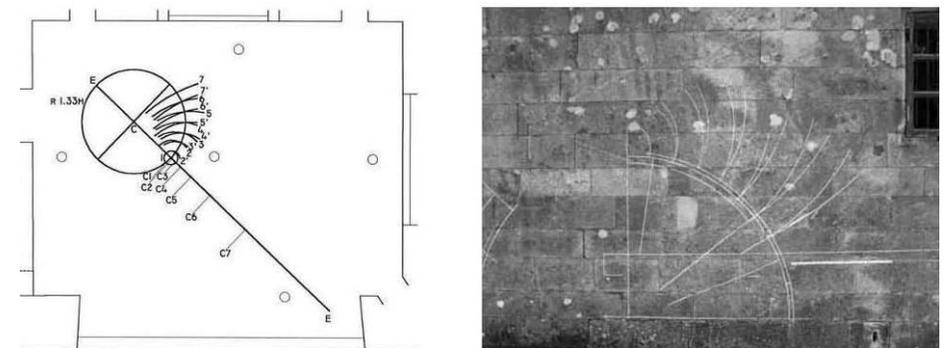


Figura 7.19. Monteas monteas encontradas en las azoteas de la catedral de Sevilla o en la pared de la cabecera de Santa Clumba de Carnota. GUERRA, Rosa Ana (2012).

En la tesis de Rosa Ana Guerra se escribe que en ninguno de los tratados se contemplan las peculiaridades de cúpulas de espesor variable. Tampoco aparece reseñada la posibilidad de recurrir a lechos horizontales (como se dibujaron en las trazas de la capilla del Sagrario de la catedral de Segovia (Ruiz Hernando 2003, 54-55), ni siquiera en las hiladas inferiores; la solución de sillares acodados que se utilizó en el cupulino del monasterio de El Escorial y, probablemente en las primeras hiladas

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

de su media naranja (López Mozo 2009a, 475-477; 2009b, 228), tampoco quedó fijada en ningún texto.

Aún así, con los datos tomados con el escáner vemos que la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío se desarrolla con un espesor variable. Otra cuestión es descubrir si el interior que delimita el contorno hallado es macizo o relleno en su parte más interna.

Por lo pronto se ha procedido al estudio de la dovela como pieza que hay que tallar de un volumen de piedra extraído de la naturaleza, y más tarde se tomará la hipótesis del desarrollo interno.

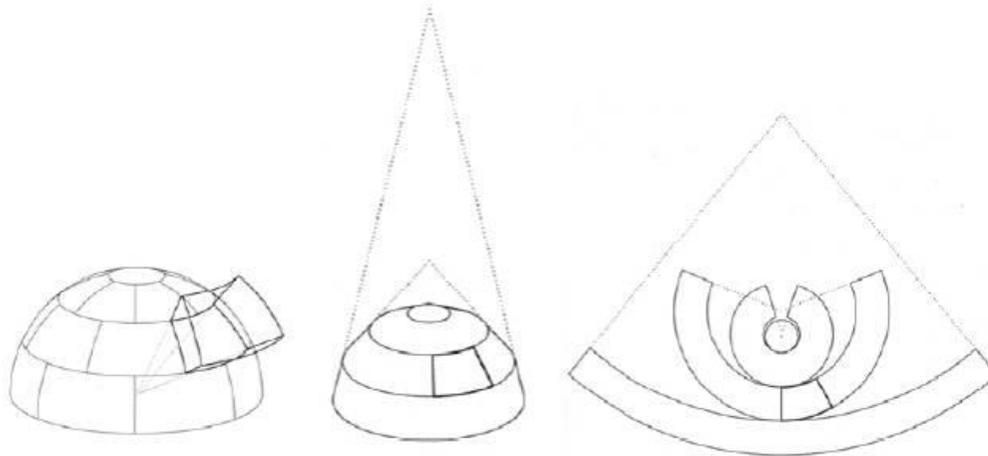


Figura 7.20. Procedimiento de obtención de plantillas.

Cada dovela es una pieza compleja formada por dos superficies esféricas (intradós y trasdós), dos cónicas (lechos inferior y superior) y dos planas (juntas verticales). El procedimiento de labra habitual es el método directo, que utiliza las plantillas de intradós —que serán distintas para cada hilada—, y el baivel⁶².

⁶² GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica*

Al ser la esfera una superficie no desarrollable, para la obtención de las plantillas se supone que cada hilada es una franja horizontal de la superficie de un cono, y estas franjas son las que se desarrollan.

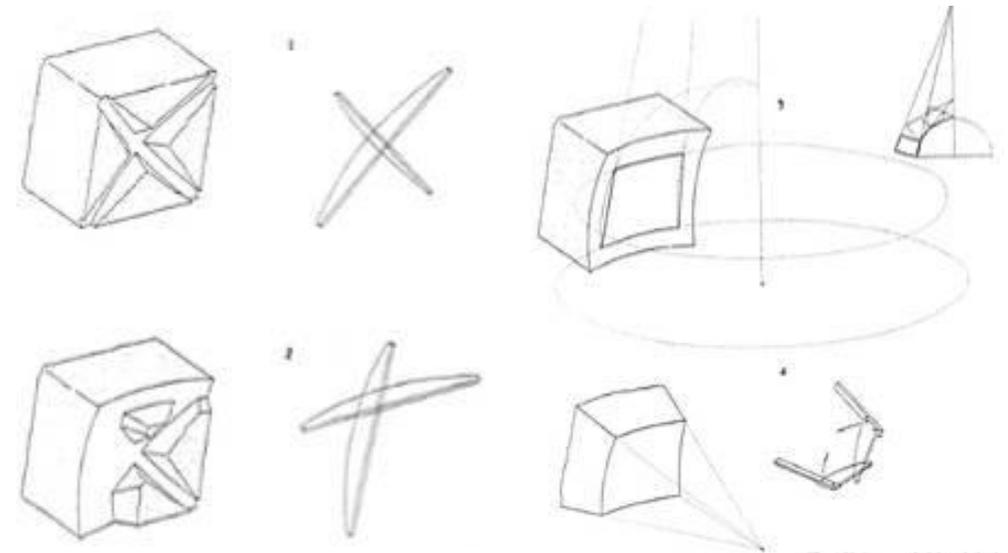


Figura 7.21. Proceso de labra para bóveda esférica. RABASA, (2000) pág.176).

Para tallar estas dovelas tenemos que prestar atención a la curvatura de la esfera, que es igual en todas las direcciones, por lo que la cercha o perfil curvo del andamiaje si se coloca ortogonalmente sobre la superficie, sirve como guía. El uso del baivel, que cuenta con la curva y la recta de las generatrices de cada anillo, deberá deslizarse por la juntas de todas las aristas que forman el intradós⁶³.

Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid.

http://webspersoais.usc.es/export/sites/default/persoais/rosana.guerra/descargas/GUERRA_2012_Tesis_Parte2.pdf

⁶³ RABASA, Enrique (2000): *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX.* Ediciones Akal, S.A., 2000 ISBN: 84-460-1542-0

Herramientas: Salvarregla

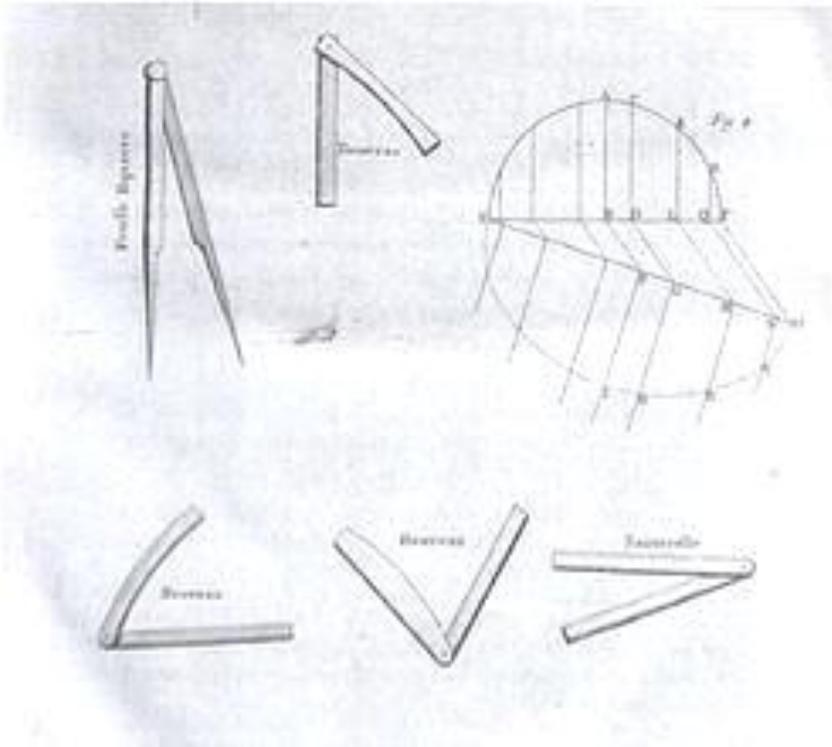


Figura 7.22. Salvarregla según De la Rue (Traité de la Coupe des pierres).

La salvarregla es una escuadra articulada de ramas rectas que sirve para trasladar y comprobar ángulos.

El baivel es una especie de escuadra con frecuencia rígida, con una rama recta y otra curva cóncava o convexa que se adapta a encuentros como los que se producen entre el lecho y el intradós en la dovela de un arco, actuando como generatriz de ambas superficies a la vez o como comprobación de que el ángulo que forman es el correcto.

Herramientas: Baivel

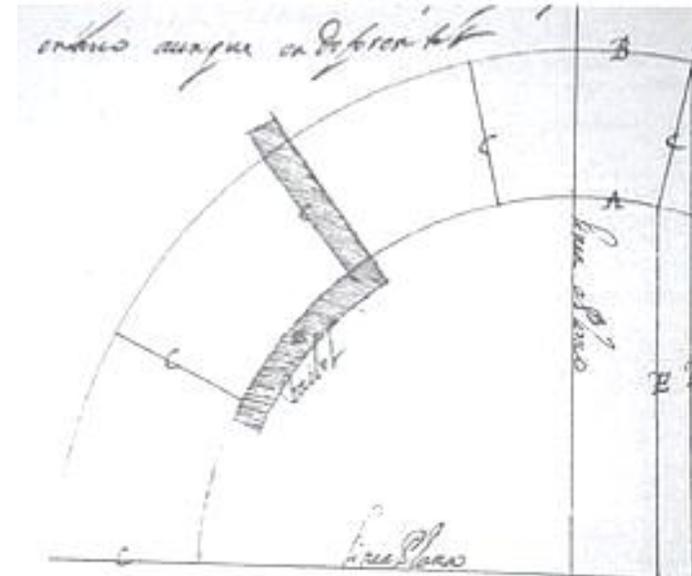


Figura 7.23. Baivel en el libro de Vandevira.

Plantillas:

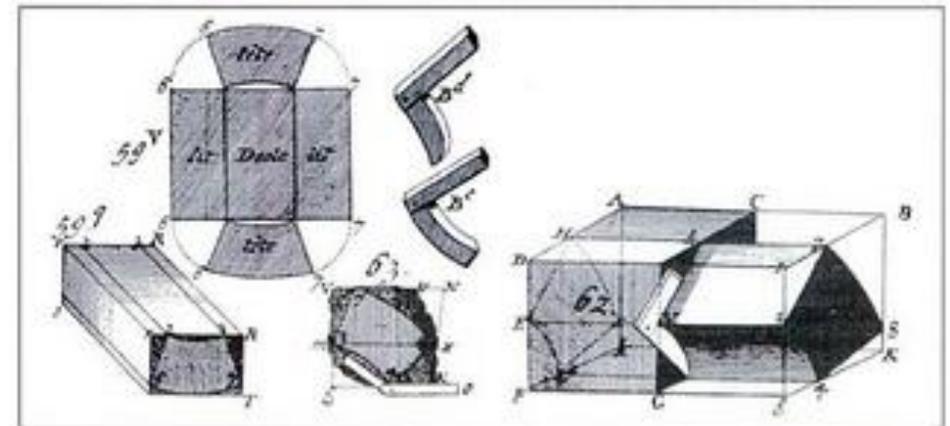


Figura 7.24. Plantillas o escuadría para la talla de una dovela.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Las plantillas o paneles sirven para llevar sobre la piedra el perímetro de alguna de las caras que se pretende obtener, son a modo de patrones de estas caras, y en consecuencia se colocan o extienden sobre una superficie tallada para marcar o comprobar su contorno. Podrían ser rígidas, de madera, para señalar el perímetro de caras planas, o flexibles, de cartón, hojalata o plomo, para su uso sobre superficies desarrollables, como conos o cilindros⁶⁴.

Este es el método llamado “por plantas y saltarreglas” en el tratado de Vandelvira, en su Tratado de Arquitectura (1575-1591).

Enrique Rabasa expone que la colocación sucesiva de las hiladas redondas de una cúpula, cuando una de ellas ha sido completada enteramente, aunque quede un orificio central, la cúpula es autoestable y no necesita apeo; pero mientras se van asentando los sillares de cada hilada, antes de terminarla, es necesario que queden apoyados o sostenidos de alguna manera⁶⁵.

Alonso de Vandelvira explica que cada una de las hiladas, sean horizontales o verticales, debe ser interpretada como un arco “capialzado”, es decir, como un arco que presenta un frente más alto que el otro, cuyas curvas de embocadura delantera y trasera son las líneas de junta aparentes entre las hilas en la bóveda. Es decir, se concibe la bóveda como una sucesión de arcos abocinados⁶⁰.

Los siguientes tratados en relación a la técnica de cantería, en cuanto a España se refiere, contienen aún trazas como las de Vandelvira sin grandes novedades. Destacan el tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás (1633-1664); el de Juan Caramuel (1678); el tratado del padre Tosca (1707); manuscritos como el de Portor y Castro (1708).

⁶⁴ RABASA, Enrique (2000): *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Ediciones Akal, S.A., 2000 ISBN: 84-460-1542-0

⁶⁵ RABASA, Enrique (2000): *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Ediciones Akal, S.A., 2000 ISBN: 84-460-1542-0 pág.167,169

Mientras tanto en Francia en el siglo XVIII pública (estamos en el periodo de la ilustración, surgen las academias y museos) sistemáticamente las técnicas de las artes y oficios, y lo hará a través del cuidado de lo gráfico en el tratado de De la Rue (que ayuda al entendimiento del proceso) y del rigorismo geométrico de Frézier (utiliza una teoría geométrica abstracta).

Será con Frézier (Ingeniero militar francés, 1682-1773) que se produzca un entusiasmo por las formas geométricas simples, que él llama regulares, frente a las formas derivadas de los métodos de la talla, tal como las regladas que comprueba el cantero pasando una regla por dos directrices. Esta preocupación por cierta pureza geométrica será extremada por Gaspard Monge a final del XVIII (*Géométrie Descriptive*, 1795 traducido del francés al español en 1803 por Agustín de Betancourt). Este y otros motivos dan lugar a la importante ruptura que separará la estereotomía del siglo XIX de la tradición anterior⁶⁶.

Así, la geometría descriptiva nace de la cantería.

Como referencia más cercana a nuestros días está la Global Vipassana Pagoda.

⁶⁶ RABASA, Enrique (2000): *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Ediciones Akal, S.A., 2000 ISBN: 84-460-1542-0 pág.241

Se puede ver que en una obra actual se siguen utilizando herramientas del siglo XVIII.



Figura 7.25. Trabajo de cantería en la ejecución de la Global Vipassana Pagoda. 2009⁶⁷

Una obra terminada en 2009 donde el material utilizado es la piedra y donde las herramientas siguen siendo el baivel y la salvarregla.

⁶⁷ <http://www.globalpagoda.org/building-the-pagoda>

7.4. Interpretación de los datos.

Se ha teniendo en consideración la información comentada en el apartado anterior y el despiece habitual encontrado en otros estudios de cúpulas en los que se divide la esfera en hiladas horizontales hasta que empiezan a colocarse de forma radial y así aprovechar el peso propio de la pieza para equilibrar el anillo de forma autónoma.

Es por esto que para el estudio de la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío se ha tomado la siguiente decisión:

Hipótesis de despiece.

Se plantea como hipótesis de despiece una semejante a la que realiza Ana López Mozo en su artículo “La cúpula de El Escorial: geometría, estereotomía y estabilidad” ya que no se disponen de datos más precisos de los que anteriormente se han comentado y por ser esta cúpula anterior a la que estamos estudiando por lo que podría servir de ejemplo a nuestro arquitecto.

Se ha comparado la hipótesis de la disposición de las dovelas del Escorial que tiene como parte representativa la de colocar de forma horizontal aquellas dovelas que se encuentran a 29.65° respecto de la horizontal y a partir de este valor su disposición pasa a ser radial.

El cambio de pasar de dovelas horizontales a dovelas radiales las realiza con dovelas intermedias en forma acodaladas.

Siguiendo este patrón se ha encajado el despiece de la cúpula de Montefrío.

Como dato tenemos las ortofotos que nos dan información muy valiosa del interior y del exterior.

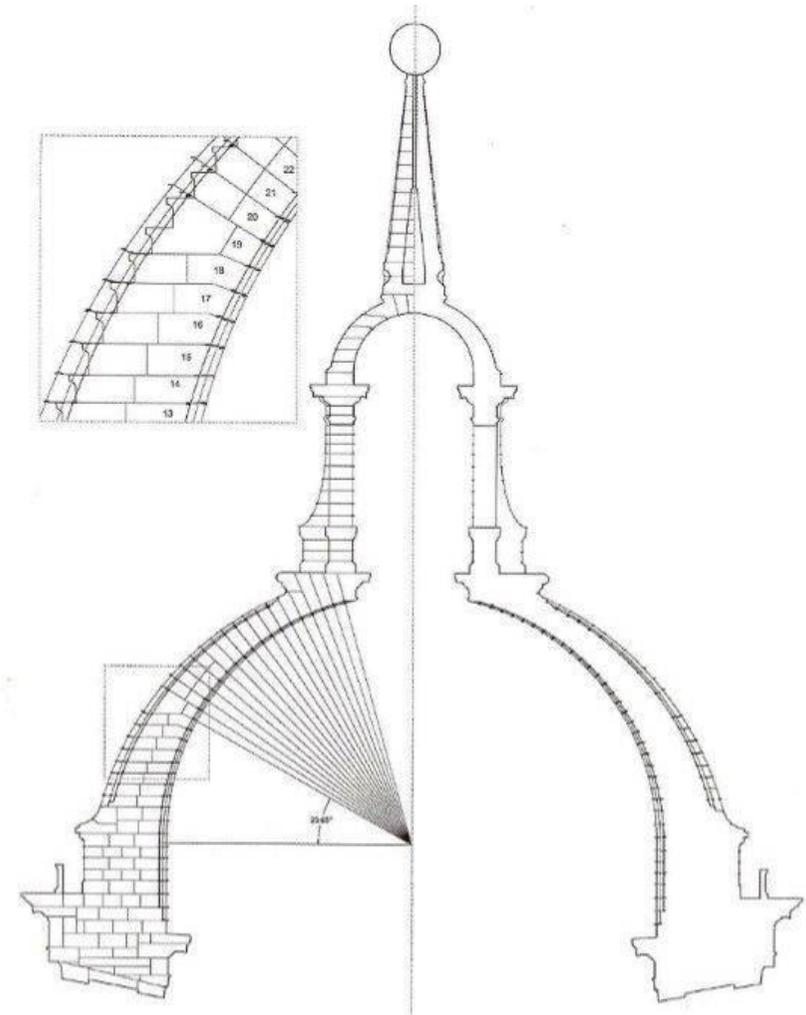


Figura 7.26. A la derecha, puntos de medición de hiladas, girados hasta coincidir en un mismo plano meridiano. A la izquierda, hipótesis de disposición constructiva⁶⁸.

⁶⁸ LÓPEZ, Ana (2009): *La cúpula de El Escorial: geometría, estereotomía y estabilidad*. Actas del Sector Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Valencia, 21-24 octubre 2009. Eds. S. Huerta, R. Marín, R. Soler, A. Zaragoza. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2009.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Vamos a diferenciar entre el tambor y la cúpula:

1.- El tambor tiene un despiece que coincide la disposición horizontal de las hiladas interiores y la exteriores.

2.- La cúpula, vista desde el exterior, se puede observar un tramo vertical hasta la imposta y la parte semiesférica del casquete.

2.1.- El tramo vertical posee, por el exterior, una descomposición de 11 hiladas hasta llegar a la imposta mientras que por el interior se llegan a contabilizar una hilada más.

La explicación a este desfase de hiladas es una incógnita. Por lado, si hacemos caso a los dibujos encontrados de cúpulas que han sido estudiados últimamente con escáner, el número de hiladas de la cúpula hasta la imposta coinciden en el exterior y en el interior.

Por otra parte, es verdad que el espesor del tambor es del orden de $L/7$, y que se ajusta más a las recomendaciones de Fontana de usar un espesor mayor de $L/9$ en el caso de cúpulas dobles que al espesor recomendado para las cúpulas simples que las sitúa en $L/10$, cuando el material sea de excelente fábrica de ladrillo y de $L/9$ para fábricas de calidad inferior como la toba o la piedra franca.

Probablemente el uso de una proporción mayor en el tambor está más ligado a la baja capacidad del material que analizaremos en el siguiente capítulo ya que la cúpula no tiene las proporciones, interior-exterior, como para desarrollar una doble cáscara.

2.2.- Del tramo del casquete no se tiene información de las hiladas por el trasdós ya que quedan ocultas tras el manto de tejas.

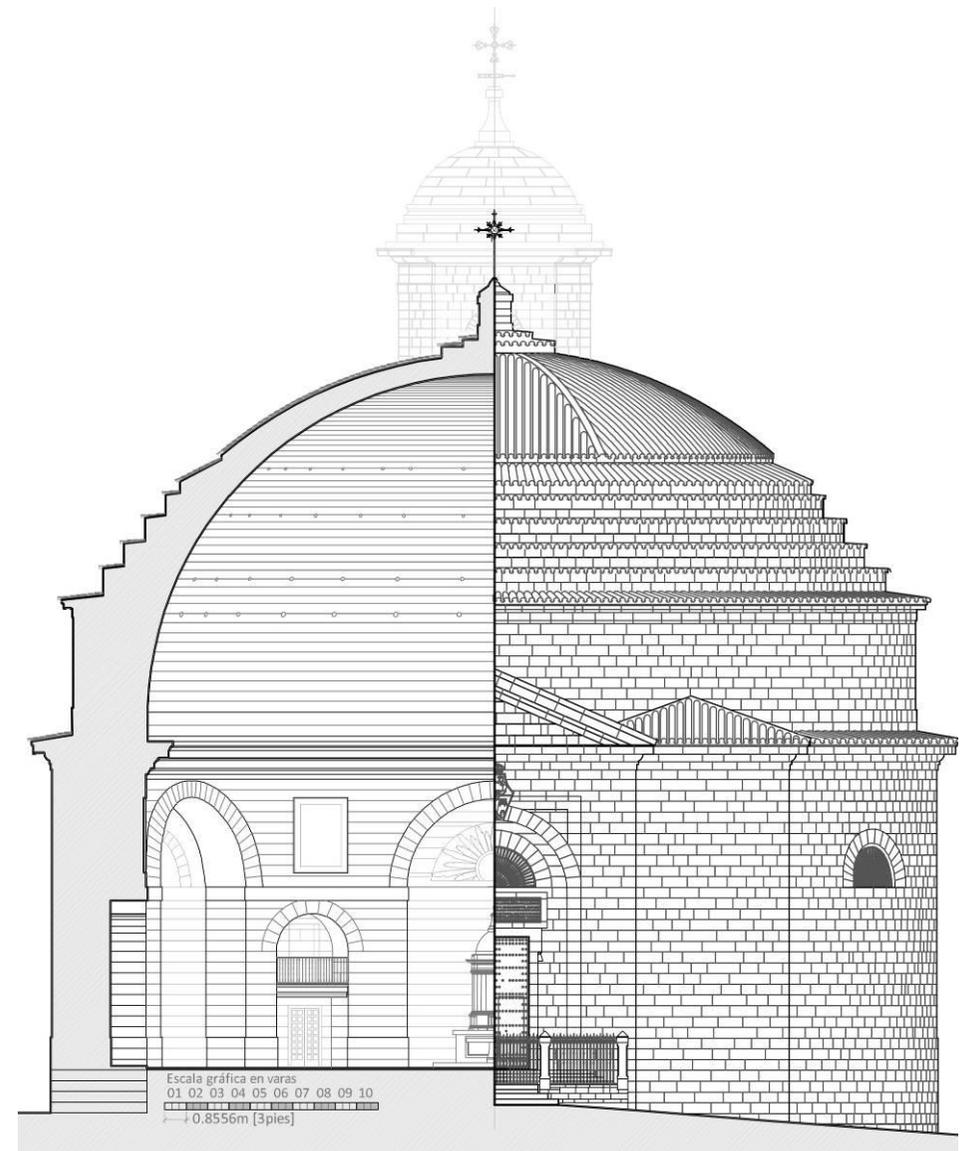


Figura 7.27. Disposición de las hiladas en el exterior y en el interior.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Teniendo en cuenta lo anterior se llega a la siguiente hipótesis sobre el despiece de dovelas en la sección:

1.- Por un lado, se mantiene la disposición horizontal hasta la dovela número 19 que viene a coincidir con el ángulo de 30.67° muy parecido al que se obtiene en el Escorial.

2.- Por otro lado, se distribuye de forma radial el resto de las dovelas ajustándose las llagas interiores con las llagas exteriores mediante piezas acodadas que permitan el encuentro.

3.- A falta de más datos concretos esta es la hipótesis de despiece ya que la documentación más reciente que se tiene de la reparación de la cubierta, realizada por el Arquitecto Luis Alberto Martínez, se basa en el contorno dibujado por el historiador y arquitecto Luis Cervera. Del proyecto de reparación queda claro que la cubrición con teja se realiza sobre rastreles de madera fijados sobre la propia cubierta con un espesor no mayor de 5cm.

Así que teniendo el contorno interior y el exterior de la cúpula se le han restado los centímetros de espesor de la intervención sobre la cubierta, quedando el resto como parte estructural.

Una vez obtenido la hipótesis de despiece de las dovelas de la cúpula se continuó con el estudio de la disposición constructiva.

Se han adoptado dos hipótesis de sección.

Hipótesis 1:

Por un lado se ha tomado la decisión de hacer la sección del tambor maciza a falta de otros datos.

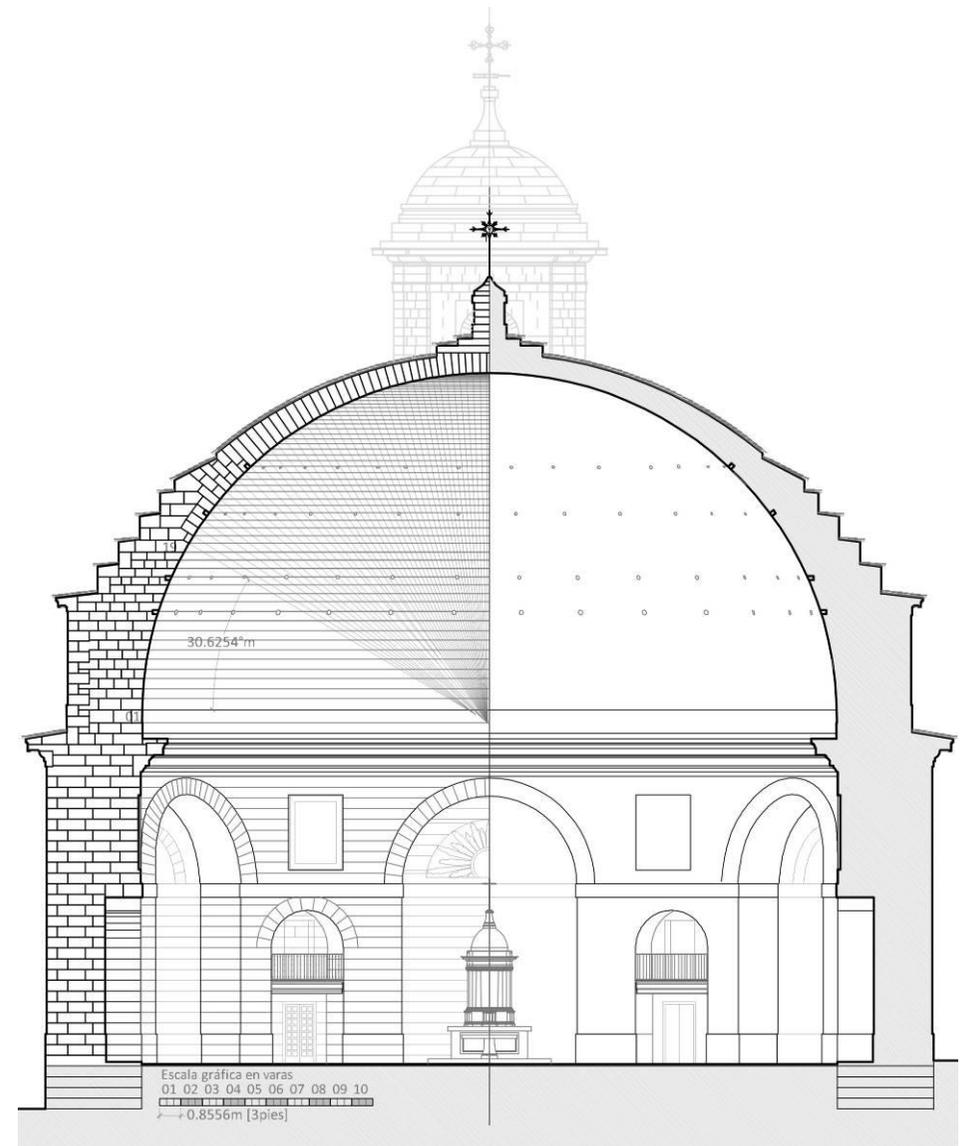


Figura 7.28. Despiece de dovelas semejante al despiece de Ana López Mozo en el Escorial Los ejes radiales se proyectan desde el centro de cada segmento de circunferencia en la que se divide la cúpula deformada.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Hipótesis 2:

En algunos textos dibujan el tambor construyendo el contorno del trasdós e intradós de la cúpula de sillares de piedra mientras que macizan el interior con otro tipo de material, ya sea ladrillo-adobe o piedras cortadas en basto.

Como referencia de esta segunda hipótesis tenemos la construcción actual del Global Vipassana Pagoda.



Figura 7.29. Construcción de la Global Vipassana Pagoda. 2009⁶⁹.

⁶⁹ <http://www.globalpagoda.org/building-the-pagoda>

El estudio de este trabajo será el comportamiento estructural de la cúpula así que el estudio del tambor quedará postergado para otro trabajo.

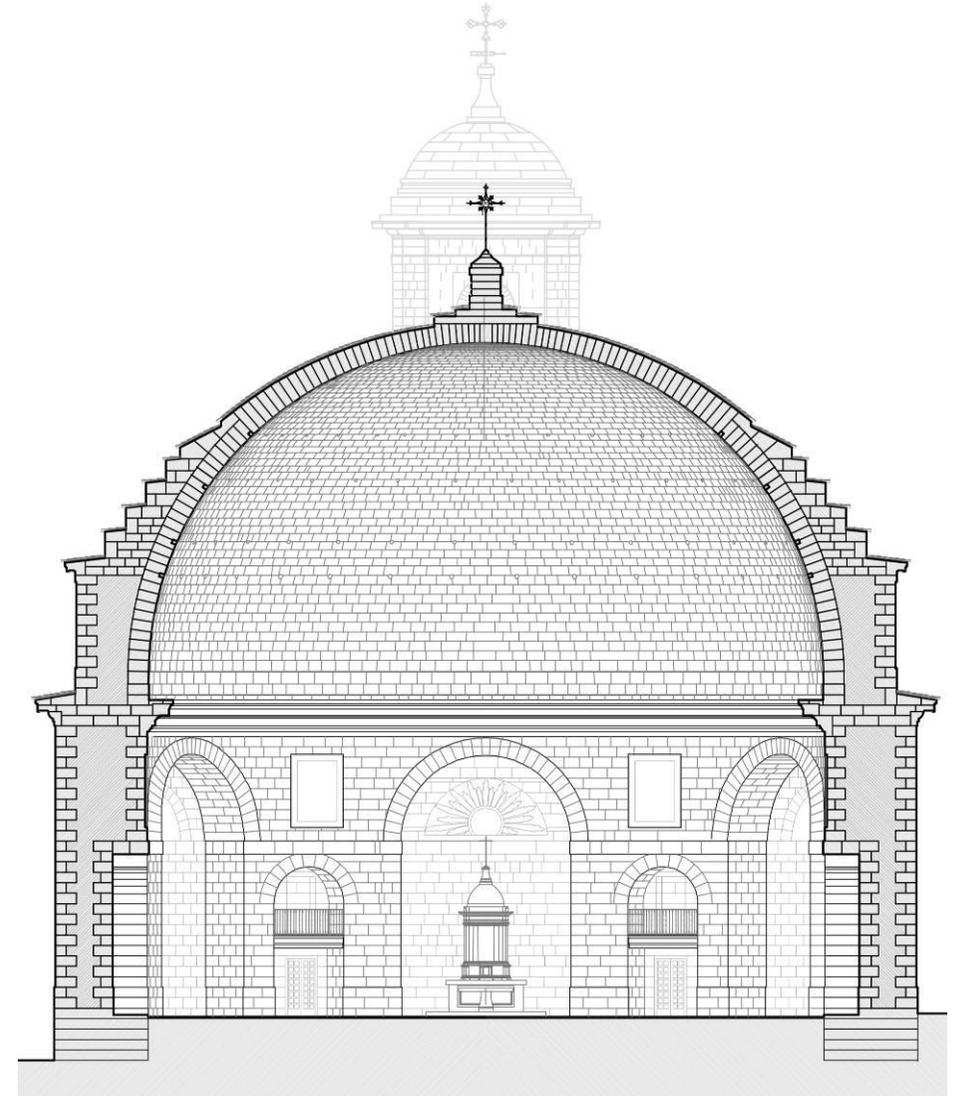


Figura 7.30. Despiece de la cúpula con tambor relleno de mampuestos.

INDICE DE FIGURAS

Figura 7.1. Recogida de muestras para su análisis en laboratorio. Elaboración propia.	2	Figura 7.22. Salvarregla según De la Rue (Traité de la Coupe des pierres).	14
Figura 7.2. IGME Magna50_1008, Montefrío.....	2	Figura 7.23. Baivel en el libro de Vandelvira.	14
Figura 3. Fotografía desde la torre hacia la cúpula. Elaboración propia.	4	Figura 7.24. Plantillas o escuadría para la talla de una dovela.....	14
Figura 7.4. Textura macroscópica de la muestra sin cortar. Elaboración propia.....	4	Figura 7.25. Trabajo de cantería en la ejecución de la Global Vipassana Pagoda. 2009	16
Figura 7.5. Textura macroscópica de la muestra cortada. Elaboración propia.	4	Figura 7.26. A la derecha, puntos de medición de hiladas, girados hasta coincidir en un mismo plano meridiano. A la izquierda, hipótesis de disposición constructiva.....	17
Figura 7.6. Proceso de obtención de las probetas a partir de las muestras. Elaboración propia. 5		Figura 7.27. Disposición de las hiladas en el exterior y en el interior.	18
Figura 7.7. Probetas y máquina pulidora. Elaboración propia.	5	Figura 7.28. Despiece de dovelas semejante al despiece de Ana López Mozo en el Escorial Los ejes radiales se proyectan desde el centro de cada segmento de circunferencia en la que se divide la cúpula deformada.....	19
Figura 7.8. Desecadora. Elaboración propia.....	6	Figura 7.29. Construcción de la Global Vipassana Pagoda. 2009.	20
Figura 7.9. Prueba de compresión. Elaboración propia.....	6	Figura 7.30. Despiece de la cúpula con tambor relleno de mampuestos.....	20
Figura 7.10. Secuencia de la toma de datos. Elaboración propia.	7		
Figura 7.11. Muestras para obtener la densidad aparente del material. Elaboración propia.	8		
Figura 7.12. Tabla del proceso de cálculo de la densidad aparente (kg/m ³).	8		
Figura 7.13. Tabla de resistencias a compresión y densidades de piedras. (Collignon, 1885)	9		
Figura 7.14. Prueba de ultrasonidos con transductores de 500MHz.	10		
Figura 7.15. Prueba de ultrasonidos con transductores de 50MHz. Elaboración propia.	10		
Figura 7.16. Especimen utilizado para la prueba de ultrasonidos. Elaboración propia.	10		
Figura 7.17. Resistencias mecánicas y peso específico de las piedras (Delbecq 1983). Santiago Huerta (2004)	11		
Figura 7.18. Trazas para el corte de la «capilla redonda en vuelta redonda» en el tratado de Vandelvira.	12		
Figura 7.19. Montañas encontradas en las azoteas de la catedral de Sevilla o en la pared de la cabecera de Santa Clumba de Carnota. GUERRA, Rosa Ana (2012).	12		
Figura 7.20. Procedimiento de obtención de plantillas.	13		
Figura 7.21. Proceso de labra para bóveda esférica. RABASA, (2000) pág.176).....	13		

INDICE DE TABLAS

Tabla 7.1. Módulo de Elasticidad a partir de los ensayos de compresión.....	7
Tabla 7.2. Tabla de materiales granadinos.....	9
Tabla 7.3. Módulo de elasticidad (*10 ⁵ kg/cm ²) de una fábrica a partir de los de sus componentes. Resultados del estudio realizado por los ingenieros austriacos en 1895.	11

8 ≡ Proceso constructivo.	1
8.1 Antecedentes. Sistemas constructivos.	1
· Época Nazarí.	1
· Época de la Reconquista. XVI-XVII.	1
· Época XVII-XVIII.	2
8.2. Proceso constructivo. El Cuerpo Cilíndrico.	3
8.3 Proceso constructivo. La Cúpula.	4
8.3.1. Uso de estructuras auxiliares en la construcción de cúpulas históricas.	5
Uso de andamios sin necesidad de cimbras: Santa María del Fiore de Florencia. ..	5
Uso de cimbras. San Pedro de Roma.	7
8.3.2 Hipótesis sobre el uso de sistemas auxiliares en la construcción de la cúpula semiesférica de la Iglesia de Montefrío.	10
8.3.2.1. Hipótesis del uso de andamios sin necesidad de cimbras.	12
8.3.2. 2. Hipótesis del uso de andamios usando cimbras.	18
8.4. Construcción actual de una cúpula de piedra. Global Vipassana Pagoda.	20
INDICE DE FIGURAS	23

» 8 ≡ Proceso constructivo.

8.1 Antecedentes. Sistemas constructivos.

Vamos a recoger, de forma breve, los precedentes históricos en cuanto a las técnicas constructivas que se utilizaban de forma general en el Reino de Granada y que se encuentra en la bibliografía consultada:

• Época Nazarí.

Según Encarnación Motos Guirao, Arqueóloga que estudia los restos del castillo-siglo X, las construcciones en esta época eran de muros de mampostería, contruidos por cantos rodados unidos en seco, pavimentos de piedra apisonada y cubierta de madera con tejas. Dice que hay indicios de ocupación visigoda anterior a la invasión musulmana⁵⁵.

• Época de la Reconquista. XVI-XVII.

Muros: Técnicas y materiales ⁵⁶

La arquitectura granadina es fundamentalmente elaborada como obra de albañilería. Hasta ahora se habían utilizado las técnicas constructivas medievales, esencialmente mudéjar. La mayoría de las construcciones emplearán la técnica y modos mudéjares, ya que los constructores granadinos no disponían de otra técnica.

De esta manera se empieza a entre mezclar ambas culturas, los moriscos asumen las tipologías cristianas y los cristianos reproducen formas y técnicas de ascendencia morisca.

⁵⁵ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

⁵⁶ GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1987): *La transición del Renacimiento al Barroco en la arquitectura religiosa granadina (1560-1650)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1989. ISBN: 8433806262 <http://hdl.handle.net/10481/6043>

Cantería.

Se usa la cantería, por cuestiones de economía, para edificios de rango superior de Granada y su provincia ya que se trata de un lujo. También se usa en partes determinadas de edificios de menor prestigio pero que exigían una mayor resistencia, como los cimientos, esquinas o cornisas, o de especial simbolismo como las portadas.

Las canteras que nutrieron o abastecieron la obra de la iglesia de Diego de Siloé fue:

Montefrío⁵⁶. Para la iglesia que se iba a realizar a principios del siglo XVII, se menciona que la piedra de esquinas, sillares y tizones (toba) sería del Peñón de la Higuera y el resto (franca) del Arrastradero (1603)

En las obras eran entregadas las piezas contratadas según unos tamaños y precios concretos.

Bóvedas y cúpulas⁸³.

Las iglesias renacentistas que estaban cubiertas por bóvedas eran en su mayor parte proyectos de Siloé, según un esquema de tradición gótica en el que la bóveda se organizaba al modo de crucería estrellada cubriendo la capilla mayor, recurriéndose en la nave o bien a una armadura (Colomera, Guadahortuna, Moclín, Montejícar) o a una bóveda de crucería sencilla (Montefrío).

Será más usual en el siglo XVII la construcción de iglesias abovedadas. Se abandona la tradición mudéjar que en algunos casos había sido recogida en los templos conventuales del siglo XVI. También en las nuevas construcciones parroquiales de la capital se acudirá a la bóveda y los nuevos modelos clasicistas con un claro sentido de superación o cambio cultural.

Un caso especial lo constituyen las cúpulas. A partir de 1620, siguiendo el modelo de la jesuita granadina (1574), comenzarán a aparecer cúpulas con tambor y linterna aunque en las primeras con una oscuridad manifiesta al quedar mal resuelto el problema de articulación entre los vanos del casquete y linterna con el cimborrio que las cubría.

La construcción de la cúpula de los jesuitas supone una clara novedad. Aunque formalmente repite el modelo escurialense, en Granada su impacto visual y ritual hubo de ser enorme. Con ella emergía en el horizonte urbano granadino una cúpula, un hito eminente, que pugnaba en lo arquitectónico (y en lo ideológico), con los edificios e instituciones de alto prestigio. La elección de su forma obedeció al “capricho” del rector del colegio, que con su voluntad manifestaba el intento de legitimar la ascendencia de la orden y su preeminencia al enlazarla nada menos que con San Pedro del Vaticano y El Escorial.

• Época XVII-XVIII.

A continuación se recoge la información constructiva, que existe en bibliografía, de la iglesia de la Encarnación de Montefrío.

Las tipologías⁵⁷.

Sin duda alguna el más significativo exponente de las iglesias de planta central es la iglesia de la Encarnación de Montefrío cuya planta circular sólo queda interrumpida por el cuerpo del atrio adosado y la cabecera, constituyendo una de las más valientes variaciones sobre el modelo del Panteón Romano.

Fachadas³⁷.

Esquema general. La fachada queda conformada por la puerta de acceso, generalmente adintelada, sobre la que una cartela conmemorativa hace alusión al real patronazgo de los mismos. Tras nombrarse al soberano, bajo cuyo reinado se inició la construcción, Carlos III, se indica la financiación de las obras con la cuarta decimal de los diezmos del arzobispado. Es frecuente la anotación, mediante cartela situada en la puerta de acceso, de la fecha de comienzo y fin de las obras y quien detentaba los cargos de arzobispo o presidente de la Chancillería.

La presencia del escudo viene a ratificar la pertenencia al Real Patronato de esos templos. Como ejemplos significativos están los escudos que figuran en la fachada de

⁵⁷ GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1987): *La transición del Renacimiento al Barroco en la arquitectura religiosa granadina (1560-1650)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1989. ISBN: 8433806262 <http://hdl.handle.net/10481/6043>

Santa Fe, Vélez Benaudalla, Alomartes y Montefrío que sellan estas obras como lo harían con otro tipo de edificios civiles como los pósitos.

Torres⁵⁸.

En las iglesias concebidas por Ventura Rodríguez es habitual el achaflanamiento de las esquinas de la torre en los cuerpos superiores (Loja, Santa Fe, siendo este recurso también empleado por Domingo Lois en la Iglesia de Montefrío en la que adopta asimismo la colocación de los espacios resultantes de cuatro pirámides o pequeños obeliscos.

Bóvedas y Cúpulas.

Se continúa con la misma técnica del siglo pasado. La más sorprendente cubierta es la inmensa cúpula de la Encarnación de Montefrío, de unos treinta metros de diámetro realizada en cantería, en la que la perfección geométrica de su trazado no queda ni siquiera interrumpida por la presencia de linterna alguna en el centro de la semiesfera. En esta ocasión las canteras utilizadas proceden de la misma localidad, de las canteras del “sitio de san Cristóbal”⁵⁹.

Con estas intervenciones se fomenta una nueva cultura simbólica con la ideación de nuevos objetos y edificios religiosos que se alejan del oscurantismo impuesto por el contrarreformismo del periodo anterior.

⁵⁸ GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>

⁵⁹ GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918

8.2. Proceso constructivo. El Cuerpo Cilíndrico.

La información obtenida en la investigación de los Archivos de Protocolos de Montefrío situado en la Calle San Jerónimo, 50 de Granada es muy valiosa para situar con fechas el proceso constructivo.

Se puede deducir el tiempo que se invirtió en la construcción de la obra gracias a las fechas de los contratos de subasta de material que se guardan en el Archivo de Protocolos de Montefrío.

Por la cartela, sobre el dintel de acceso al templo, sabemos que el periodo que abarca el proyecto y ejecución de la iglesia de la Encarnación de Montefrío hasta su inauguración fue entre los años 1786-1802. El 5 de noviembre de 1785⁶⁰ se emite el informe de la Cámara de Castilla una vez analizado el proyecto por la Real Academia de San Fernando.

A partir de esa fecha, y de la consulta del Archivo de Protocolos, se confirma que se necesitaron demoler hasta 4 viviendas, que fueron compradas para la construcción de la “nueva Iglesia” (con fechas: 6 marzo 1786; 16 enero 1787; 27 febrero 1787; 5 agosto 1788)⁶⁰. Por lo que desde que se tiene el informe favorable hasta que se dispone del solar, transcurren casi 3 años.

También se ha encontrado el contrato de subasta de la piedra de cantera utilizada con fecha del 18 de Octubre de 1788 y el contrato de los portes con fecha del 29 de Octubre de 1788⁶⁰. Esta será la fecha de partida para la construcción material del templo.



Figura 8.1. Maqueta de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío realizada en 3DStudio. Elaboración propia.

⁶⁰ Ver Anexo II de Documentación.

8.3 Proceso constructivo. La Cúpula.

El siguiente documento localizado era otro contrato de la subasta de la arroba de hierro para cadenas grandes y chicas, grapas y gatillos de todas las clases y la libra de hierro para rejas, balcones⁶¹ y antepechos rectos, con fecha del 8 de Abril de 1794⁶².

Por lo que se puede deducir que el cuerpo cilíndrico se debió ejecutar entre finales del año 1788 hasta principios del 1794, es decir, en algo más de cinco años. Para esta fecha se necesitaría hacer la cerrajería de las vidrieras que iluminan el interior del templo y los balcones del módulo de la sacristía, de ahí la subasta de la libra de hierro para rejas, balcones y antepechos.

En el mismo contrato, se subasta la arroba de hierro para cadenas grandes y chicas, grapas y gatillos de todas las clases, por lo que se puede deducir que son piezas necesarias para continuar con la construcción del templo, es decir, la construcción de la cúpula semiesférica.

Como se ve en la figura 8.2 para poder ajustar la cimbra y posteriormente descimbrar es necesario utilizar algún sistema de ajuste, ya sea por medio de cuñas, o gatos o cajones de arena intentando conseguir, en el caso del descimbrado, un descenso homogéneo.

Antiguamente las cimbras se hacían de manera que permitían algún movimiento; actualmente se prefieren las de construcción rígida que constan de planchas o tablas clavadas o unidas por pernos. Se rigidizan mediante la colocación de riostras que triangulan la armadura y, más adelante, se colocan las necesarias vigas tirante.

⁶¹ Excepto la baranda de la cornisa interior del templo que se instala a iniciativa de los mayordomos de la Hermandad de Nuestra Señora la Virgen de los Remedios en 1880 y la baranda de acceso al coro que tiene fecha de 1817 como se lee grabado en el pasamanos de la baranda.

⁶² Transcripción realizada por Gerardo Pérez Avilés. (Abril, 2013).

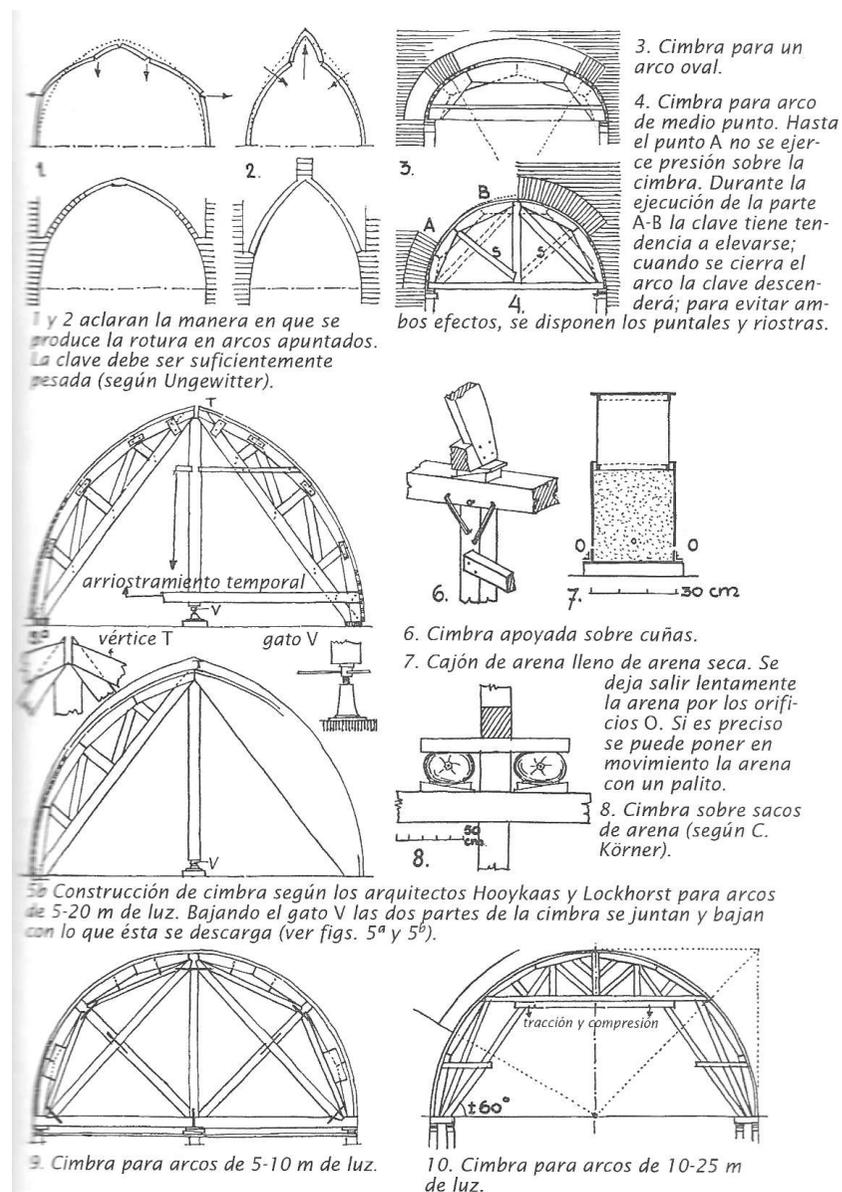


Figura 8.2. Sistemas de descimbrado. (THUNNISEN, Henri J.W. (1950, 2012), pág.47.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Los soportes de la cimbra se hacen también rígidos; a veces constan de varios postes que se ajustan con cuñas dobles. Después del ajuste se unen mutuamente por medio de listones rigidizadores⁶³.

En bóvedas colocadas a gran altura, las cimbras no se intentan apoyar desde el suelo, sino que se apoyan sobre perfiles salientes de la construcción.

El que en este último contrato de la subasta de hierro se hace referencia a la arropa de hierro para cadenas grandes y chicas, nos lleva a pensar que posiblemente esta cúpula posee algún tipo de arriostramiento de hierro forjado en la parte inferior interna de la cúpula del templo a semejanza de la cúpula de San Pedro de Roma⁶⁴, aunque esta suposición no podemos confirmarla.

8.3.1. Uso de estructuras auxiliares en la construcción de cúpulas históricas.

Alberti explica el funcionamiento estructural de las cúpulas esféricas diciendo que se componen de "arcos" y "cornijas" (cornisas), que determina su comportamiento estructural, pues la cúpula se vuelve autoportante por efecto de las compresiones resistidas por los anillos, y puede construirse sin cimbra, o llevar un óculo en su coronación.

Mainstone aclara este concepto. Dice que no se necesitaría andamios o cimbras solo para construir el último anillo ya que una vez endurecido se puede apoyar las ayudas de andamio para construir las siguientes y de esta forma acabar la obra, como le ocurre a la cúpula de Santa María del Fiore.

⁶³ THUNNISSEN, Henri J.W. (1950, traducido en 2012): Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura. "Gewelven. Constructie en toepassing in de historische en hedendaagse bouwkunst". Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 978-84-9728-425-7 pág.47

⁶⁴ Ver apartado de la estabilidad del templo donde se desarrolla este aspecto.

Vamos a desarrollar las dos hipótesis de planteamiento de estructuras auxiliares que se pudo usar para la construcción de la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío, según dos ejemplos fundamentales desarrollados en la historia: Santa María del Fiore y San Pedro de Roma.

Uso de andamios sin necesidad de cimbras: Santa María del Fiore, Florencia.

El primer modelo de construcción lo encontramos en Santa María del Fiore en Florencia (1420-1436). En 1288 el arquitecto florentino Arnolfo comenzó la construcción de la iglesia, no pudiendo llevar a cabo su plan de construir en el centro una gran cúpula.

En 1419 Brunelleschi ideó una cúpula nervada con una luz de 41.97m. Sobre las ocho esquinas se colocaron nervios de 3.50m de ancho en la base, disminuyendo hacia arriba hasta 0.75m. En cada paño hay, además, una pareja de gruesos nervios de refuerzo de 1.75m de ancho en el arranque que se adelgazan también hacia arriba (Figura 8.4). Los paños de bóveda situados sobre dichos nervios se construyeron hasta una altura de 2.50m por hiladas horizontales, abarcando todo el espesor que alcanzó los 5.40m; después, las cúpulas se elevaron independientes. La cúpula exterior es de 0.60m de espesor. Entre ambas cúpulas hay un espacio de 1.50m.

La cúpula exterior está unida a los nervios principales mediante nueve arcos planos situados en posición anular. Estos arcos discurren a través de los nervios intermedios, con su trasdós tocando la superficie exterior de la cúpula.

La cúpula apoya sobre todo en los ocho nervios principales, donde se concentran los mayores esfuerzos.

Respecto a los nervios intermedios, Brunelleschi mandó cocer ladrillos apantillados con pesos de 12 a 15kg mientras que los rectangulares y normales pesaban entre 5 y 7kg. Estos ladrillos en forma de L se unieron en las esquinas con los ladrillos normales con un aparejo de espina pez. (Figura 8.4 fig.2).

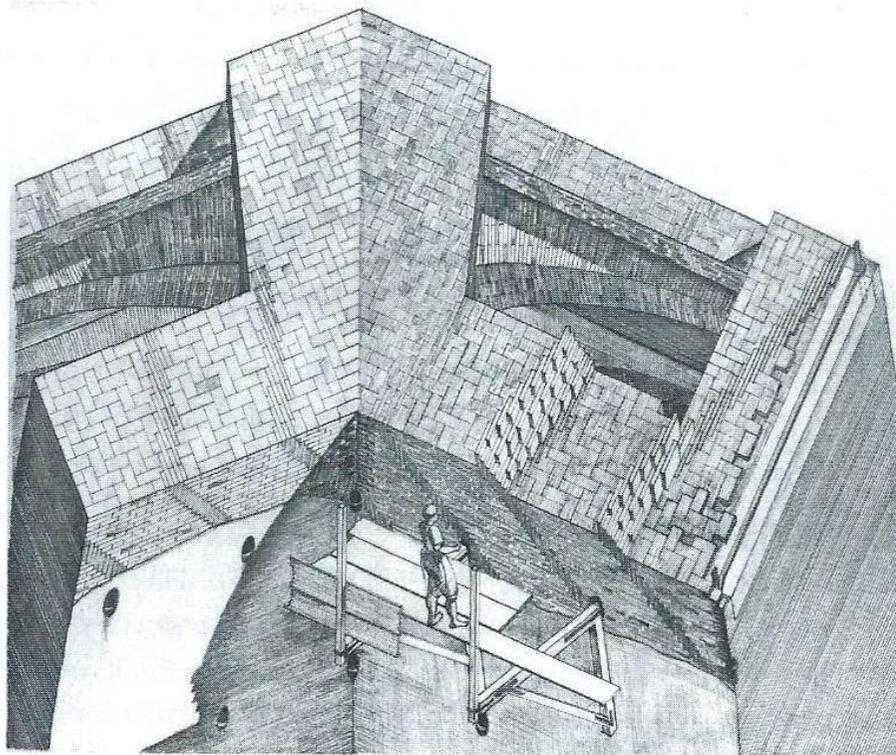


Figura 8.3. Proceso constructivo de Brunelleschi para Santa María del Fiore. La cúpula se construyó sin cimbras, empleando un aparejo de ladrillo en espina de pez. Existen varias interpretaciones, la figura de la izquierda de Sanpaolesi (1941)⁶⁵.

⁶⁵ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág. 188.

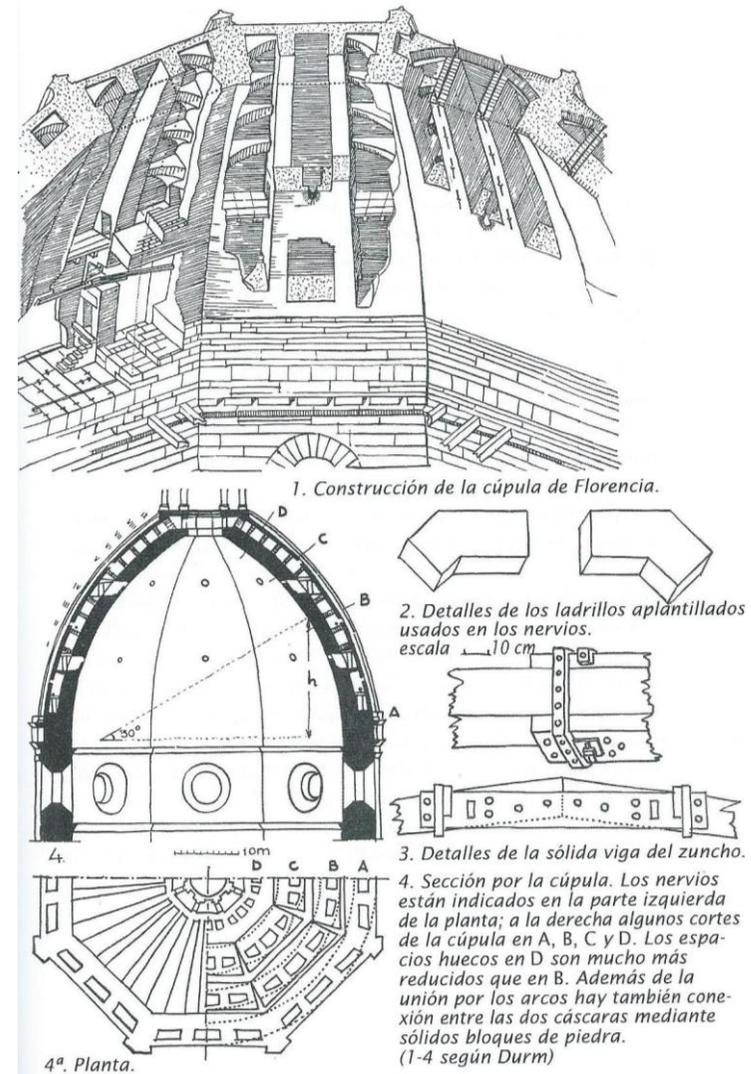


Figura 8.4. Construcción de la cúpula de S. María del Fiore en Florencia⁶⁶.

⁶⁶ THUNNISSEN, Henri J.W. (2012): *Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura. "Gewelven. Constructie en toepassing in de historische en hedendaagse bouwkunst"*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 978-84-9728-425-7 pág.263

Se puede suponer que hasta una altura de aproximadamente 18m sobre el arranque, la cúpula se pudo ejecutar sin cimbra, o existiendo hasta dicha altura ningún peligro de rotura.

Más arriba la inclinación se hace mayor, pero el paño es cada vez más pequeño. Además, las cúpulas interior y exterior se unieron entre sí, tal como se verá más adelante.

Una cuestión que ha sido muy debatida es en qué medida se pudo levantar esta cúpula sin hacer uso de cimbras.

El profesor Mäkelt (1942) opina que esto fue posible hasta una altura h que se podía determinar trazando una línea desde el centro del arco con un ángulo de unos 30° con el plano horizontal. Por encima de ella es necesaria una cimbra al igual que al hacer una bóveda de cañón (Figura 8.4. fig.4). Considerando que los nervios se erigieron a la vez que los paños, se deduce que, si se excluye el empleo de pesadas cimbras, se formó cada vez un anillo de fábrica que sin embargo necesitaría una cimbra de apoyo hasta que el anillo se cerrara; después, el anillo se mantendría por sí mismo en equilibrio.

Brunelleschi tomó diversas medidas para hacer su construcción lo más sólida posible. El arranque se hizo con bloques macizos de piedra de Macigno sólidamente unidos con grapas de hierro; cinco metros por encima se encuentra un zuncho de 24 vigas de castaño, de 35cm de altura y 30cm de ancho, en lazadas en los ángulos con una unión formada por tablones de roble de 12cm de grueso unidos con espigas, reforzada con pletinas de hierro de 6x0.8cm de sección (Figura 8.4, fig.3)⁶⁶.

El anillo tuvo sentido durante el largo periodo de fraguado del mortero. Por encima de él se colocaron además algunos otros zunchos; su número incluso se incrementó con uno o dos zunchos añadidos hacia 1696, cuando se descubrieron grietas en la cúpula y el tambor.

Uso de cimbras. San Pedro de Roma.

En San Pedro, tanto las costillas como las cáscaras son de ladrillo, éstas últimas con un aparejo en espina de pez, a 45°.

Los datos conocidos no son muchos, Carlo Fontana indica que primero se levantaron las costillas y después, las cáscaras intermedias, con la ayuda de dieciséis cimbras de madera apoyadas sobre el ático del tambor, y cuyos restos al parecer todavía pudo encontrar él un siglo después de la terminación de las obras.

Después, utilizando todo el cimbrado y las propias costillas, se construyeron las cáscaras. El sistema es, pues, claramente diferente al empleado por Brunelleschi en Santa María de Fiore, que no requería de ninguna cimbra.

Miguel Ángel proyectó una cúpula exterior y otra interior de espesores 0.50m y 1.40m, respectivamente, que iban unidas por fuertes anclajes de hierro de direcciones rectas y oblicuas, y entre las que había espacio para que pudiera circular el aire.

Sobre el tambor apoya la cúpula que, según Simil, tiene una luz de 41.44m, un espesor en la base de 3m y está macizada hasta aproximadamente dos quintos de su altura. A partir de ahí, los dieciséis nervios portantes de la cúpula se elevan separados del macizo y ascienden hasta encontrarse con el pesado anillo sobre el que se apoya la linterna.

Otro aspecto de la construcción, importante a considerar, es el de los zunchos. Al parecer se colocaron tres zunchos de hierro, mediante barras enlazadas por cuñas o pestillos, durante el proceso constructivo, y no a posteriori. Pudieron tener el papel de ayudar a la fábrica en la retracción del mortero. Estaban colocados, uno en la linterna, y los otros dos en la zona de arranque de la cúpula.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

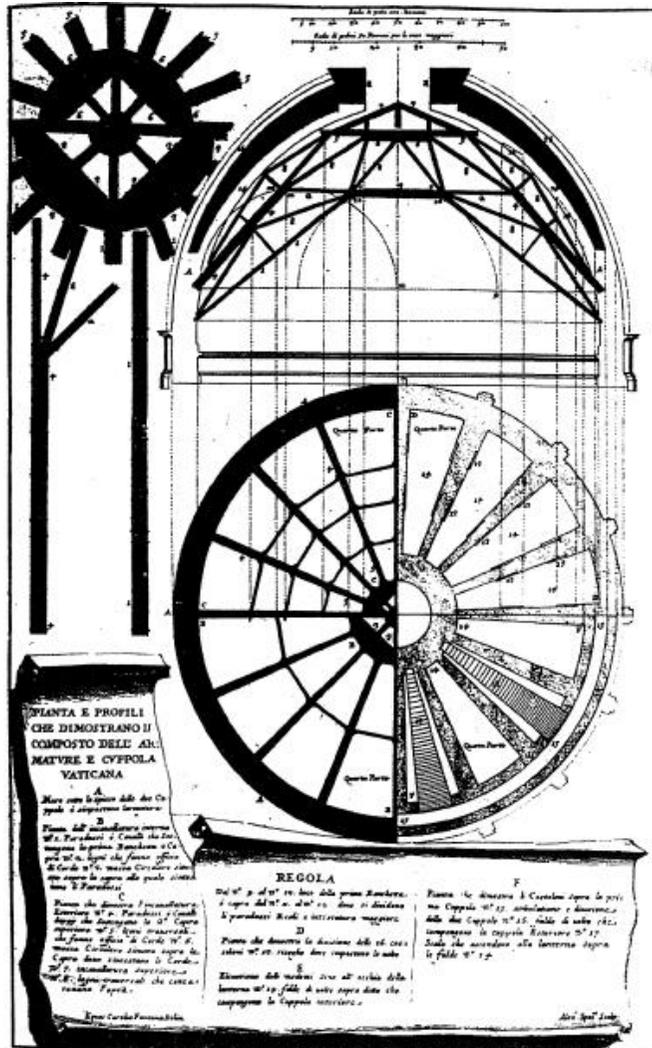


Figura 8.5. Cimbra de San Pedro de Roma. Fontana (1694)⁶⁷

⁶⁷ LÓPEZ, Gema M. (1998): *La estabilidad de la cúpula de S. Pedro: el informe de los tres matemáticos*. Universidad de la Coruña. II Congreso nacional de historia de la construcción, 1998: 285-294 ISBN: 84-89977-44-5, <http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/10583/1/HC%2037.pdf> pág.287

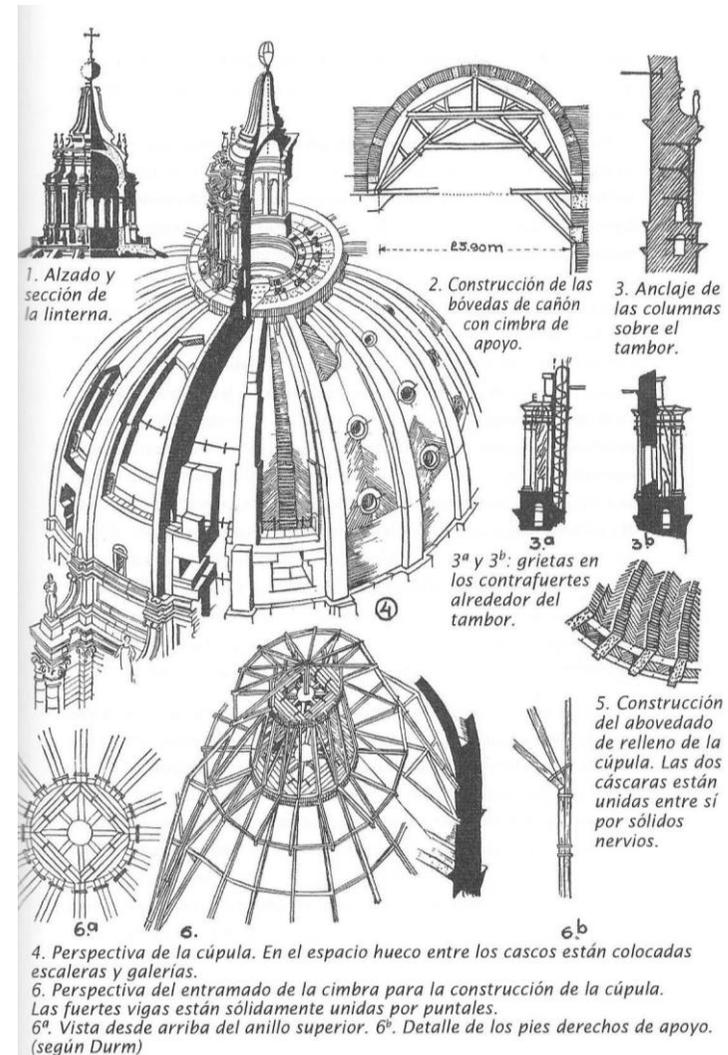


Figura 8.6. Cimbra de San Pedro de Roma. (H. J. W. Thunnissen (1890-1978))⁶⁸

⁶⁸ THUNNISSEN, Henri J.W. (1950 traducido en 2012): *Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura*. "Gewelven. Constructie en toepassing in de historische en hedendaagse bouwkunst". Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 978-84-9728-425-7 pág.271

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

En 1743 y 1748 se añadieron aún otros seis más, cada uno con una sección de 5.30x8.90cm, que se fijaron en la superficie exterior de la cúpula atados mediante uniones en cuña todo ello según indicaciones de Vanvitelli (1700-1773, también recibió el encargo de estabilizar la cúpula de San Pedro).

Esto ocurrió después de que diferentes expertos, entre los que sobre todo se encuentra a Poleni, llevaran a cabo una profunda investigación y detallados cálculos.

El estudio de Rondelet estima que el peso de la linterna (15.000.000kg), es demasiado grande como para que los nervios la puedan soportar con seguridad.

El estudio de Scheffeler, que llevó a cabo un análisis estático de la estabilidad de la cúpula, llegó a la misma conclusión. Según sus cálculos, el empuje horizontal exigiría una mayor masa de fábrica en la base o bien un zuncho de hierro con una sección de 34x36cm. Debido a todo tipo de asentamientos han surgido grietas entre las cúpulas interior y exterior por lo que la linterna carga principalmente sobre la cúpula interior.

Thunnissen (1890-1978), establece que el defecto principal estriba sin embargo en el uso de materiales heterogéneos y en el desigual apoyo de la pesada cúpula, que carga en parte sobre el masivo tambor, pero también en parte sobre la corona de contrafuertes y columnas que hay en torno a ella, que son de diferente material. Además, en el machó adyacente a cuatro de estos contrafuertes se colocaron huecos para escaleras de caracol.

Por otra parte, las columnas están hechas de grandes bloques de piedra, pero los rellenos están formados por fábrica de ladrillo, con lo que la magnitud de la retracción no es la misma y se han producido asentamientos. Por esta razón se han separado las columnas que rodean el tambor en su parte exterior. Las grietas mayores están en los contrafuertes donde se sitúan las escaleras de caracol. (Figura 8.6. fig.3^a b).

La ejecución: El modelo de madera de Miguel Ángel nos cuenta también todo sobre la forma en que se realizaron los anclajes entre las distintas partes. En el modelo, uno

de los pilares sobre los que descansa el tambor se puede separar y sobre la sección están indicados con pintura azul los anclajes de hierro. También podemos ver en él que el recubrimiento exterior se ejecutó con grandes bloques de travertino mientras que el interior estaba hecho de mampostería (Figura 8.6. fig.3)

La cimbra empleada en la construcción de la cúpula fue dibujada por Fontana (Figura 8.5) y por Bonanni en unos hermosos grabados mientras que P. Roca dejó una detallada descripción por escrito. La cimbra se levantó sobre el tambor y consistió en una construcción de madera de enormes dimensiones. Se utilizaron troncos de más de 22m de longitud, tan gruesos, que dos hombres apenas podían rodearlos con los brazos abiertos. Durm hizo un bello dibujo de esta cimbra (Figura 8.4, figs., 2,6)

8.3.2 Hipótesis sobre el uso de sistemas auxiliares en la construcción de la cúpula semiesférica de la Iglesia de Montefrío.

Según se ha expuesto el arquitecto Domingo Lois de Monteagudo debía conocer las técnicas usadas para la construcción de la cúpula de Santa María del Fiore y San Pedro de Roma por desarrollar sus estudios de arquitectura como arquitecto pensionado en Roma.

Es por esto que se plantean ambas hipótesis.

El espacio circular que conforma el cuerpo cilíndrico se cubre con la cúpula semiesférica que es la que vamos a analizar.

Una primera fase, correspondería al desarrollo de cúpula por hiladas de lechos horizontales. Esta parte llegará hasta la imposta.

A partir de ahí la cúpula se desarrolla por hiladas de lechos radiales hacia el intradós aunque todavía se compone el perfil del trasdós por medio de hiladas con lechos horizontales. La última fase, desarrolla la cúpula por hiladas de lechos radiales hacia el intradós y también hacia el trasdós. En esta fase es donde se estrecha el espesor de la cúpula en relación al espesor de las fases anteriores.

Toda esta construcción, incluyendo la ejecución de la cúpula y la cubrición de la misma por el tablero cerámico que la protege, pudo haberse desarrollado, según las referencias de las fechas de contratos, entre principios de 1794 (fecha del contrato de subasta del hierro) y la fecha de finalización que fija la cartela de acceso al templo en el 12 de Agosto de 1802. Para este proceso se debió utilizar alguno de los sistemas auxiliares conocidos en la época y son los que se van a exponer.

Si estudiamos la cúpula se observan mechinales formando radios que se pueden agrupar por parejas como si constituyesen una unidad. Estas parejas forman 16 brazos sobre los cuales se desarrollarían las distintas plataformas de trabajo necesarias.



Figura 8.7. Maqueta 3D de la iglesia de la Encarnación. Elaboración propia.

Así vista en planta la distribución queda:

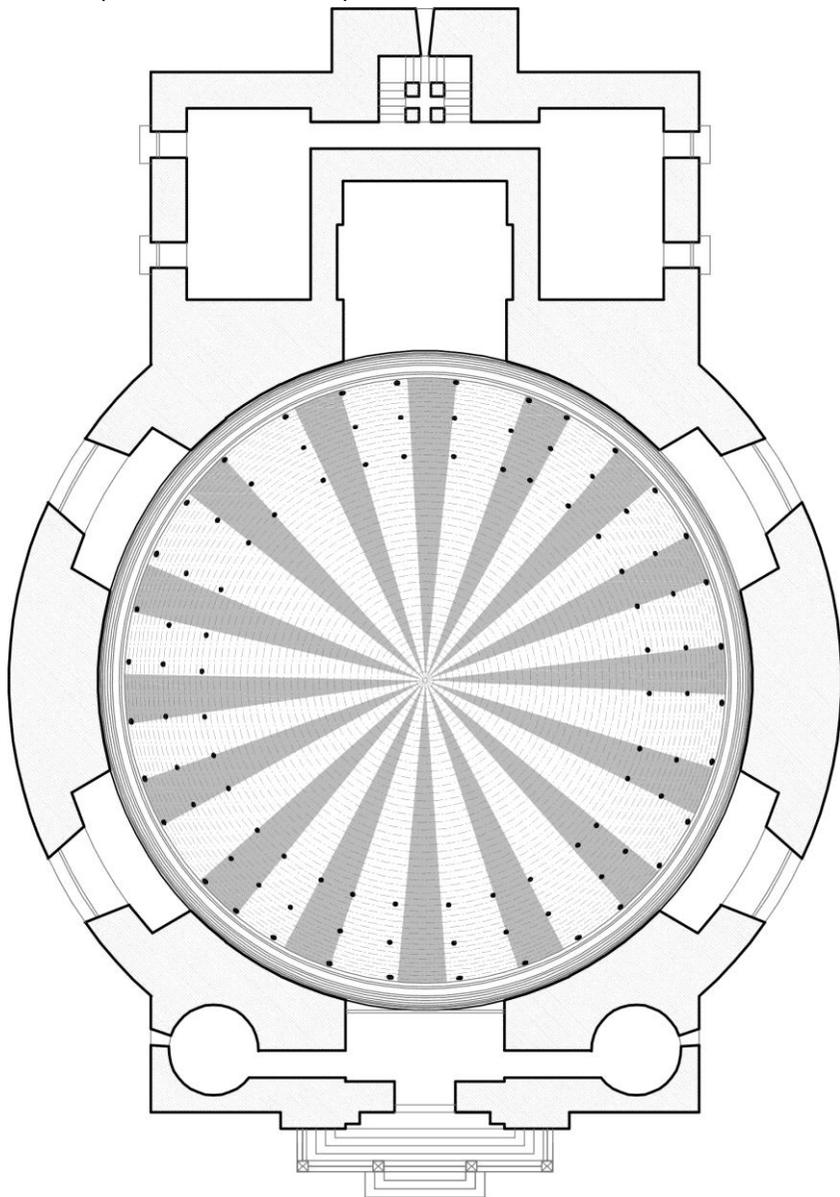


Figura 8.8. Distribución de los mechinales en planta. Elaboración propia.

Vista de la iglesia seccionada.

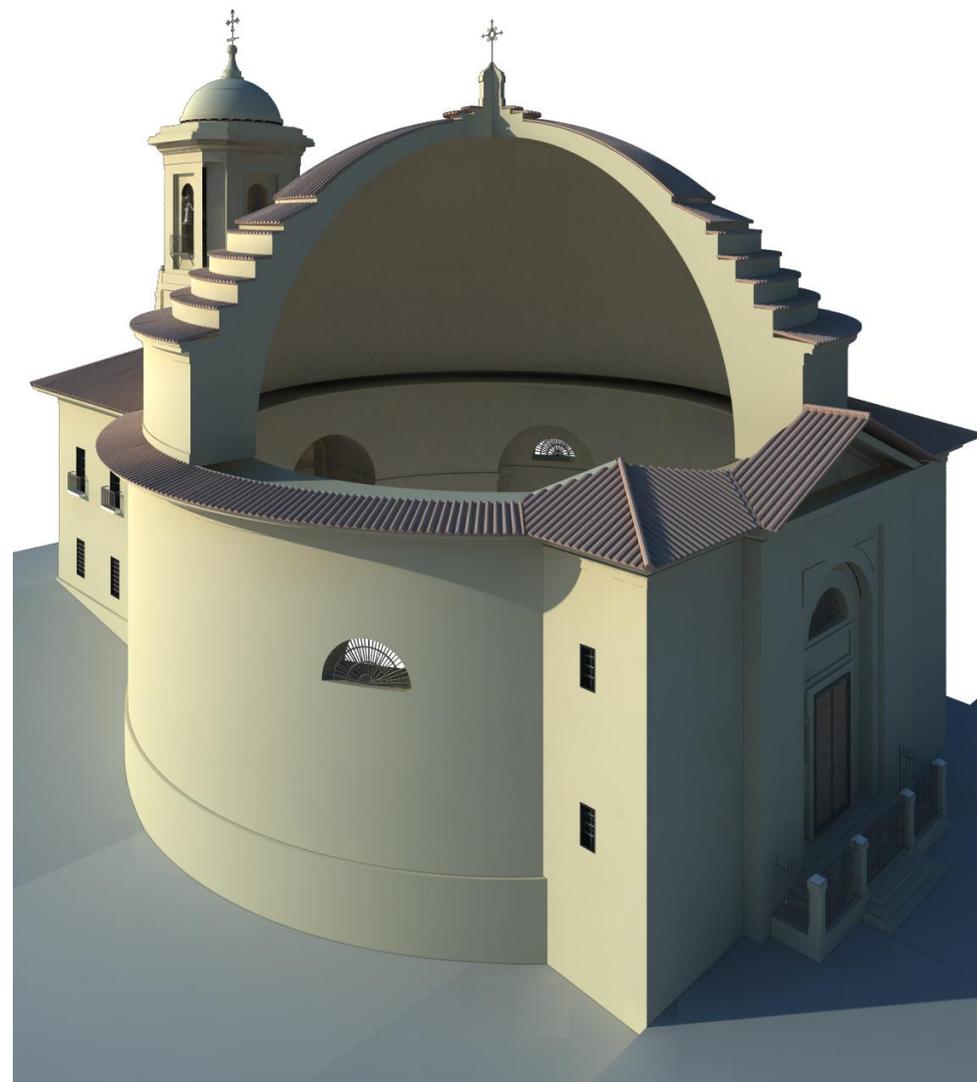


Figura 8.9. Imagen de la cúpula seccionada. Elaboración propia.

8.3.2.1. Hipótesis del uso de andamios sin necesidad de cimbras.

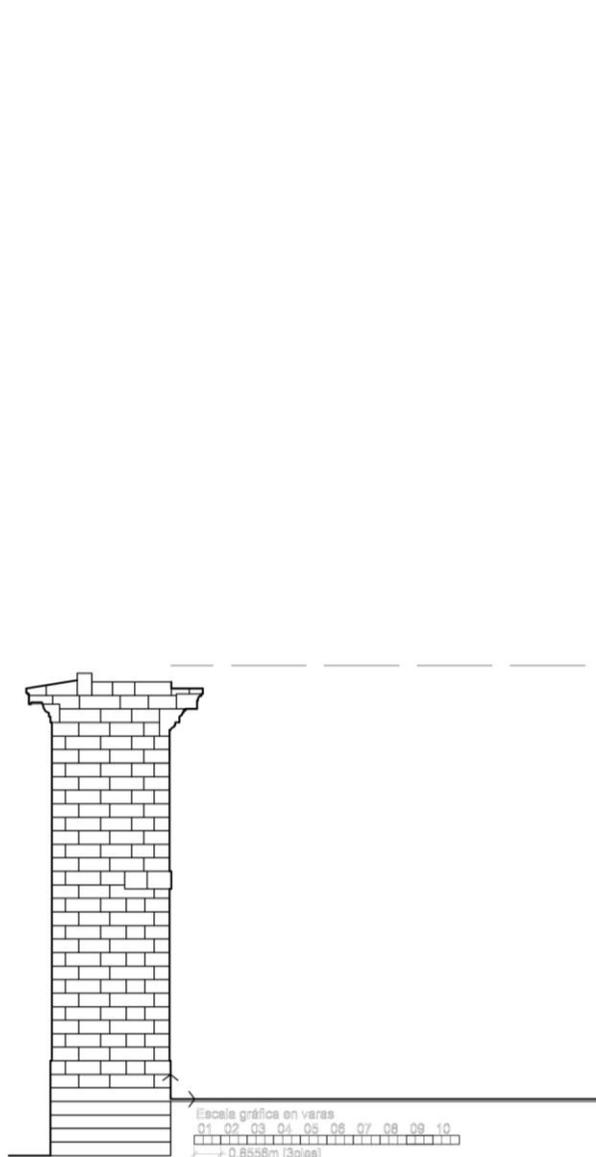


Figura 8.10. Fase del cuerpo cilíndrico. Elaboración propia.

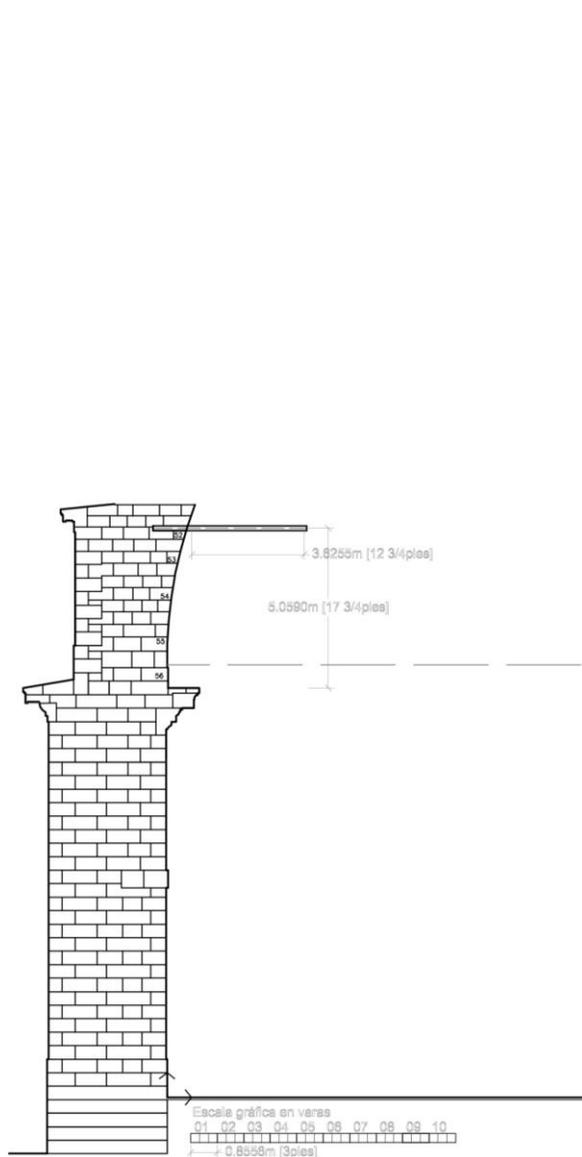


Figura 8.11. Fase de hiladas de lechos horizontales. Elaboración propia.

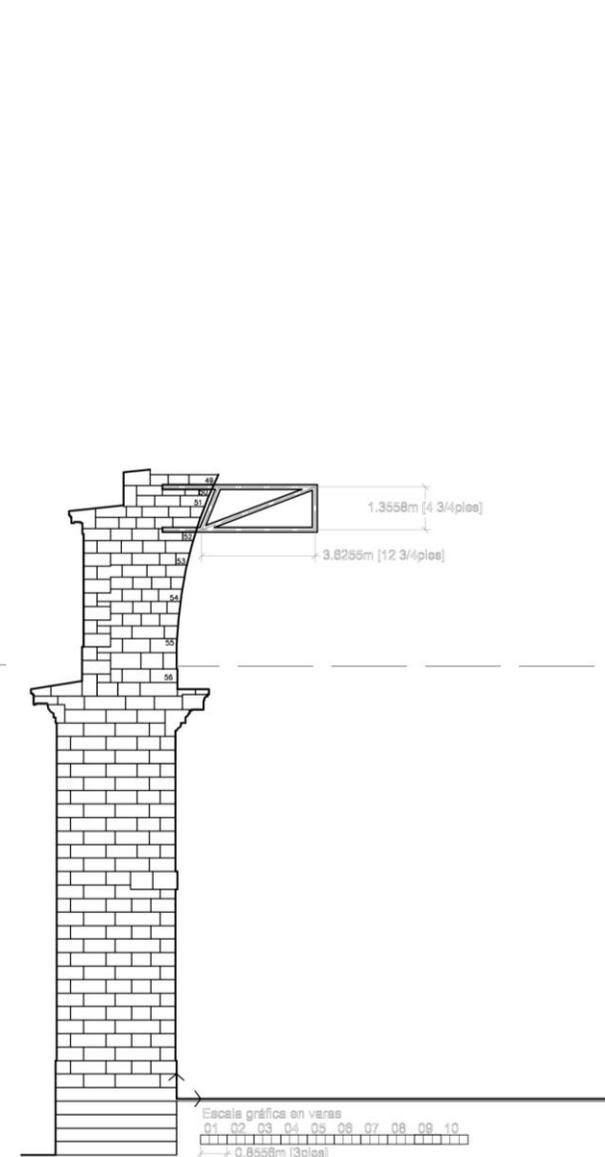


Figura 8.12. Fase de construcción de la primera plataforma. Elaboración propia.

Vista en perspectiva. Fase de hiladas con lechos horizontales.

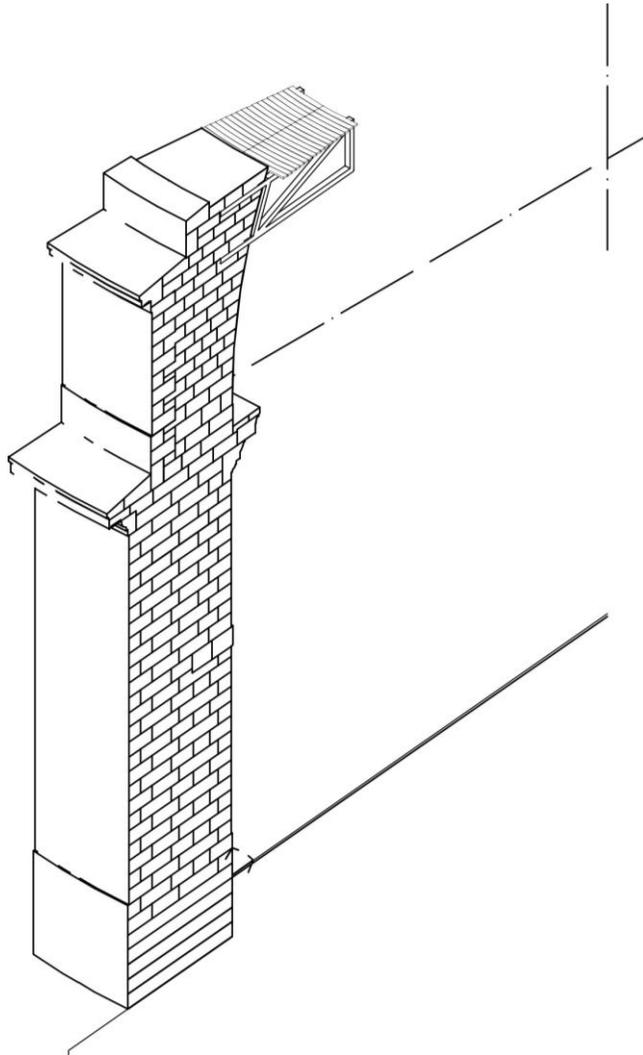


Figura 8.13. Vista en perspectiva de la primera plataforma para el desarrollo del proceso constructivo de la cúpula.
Elaboración propia.

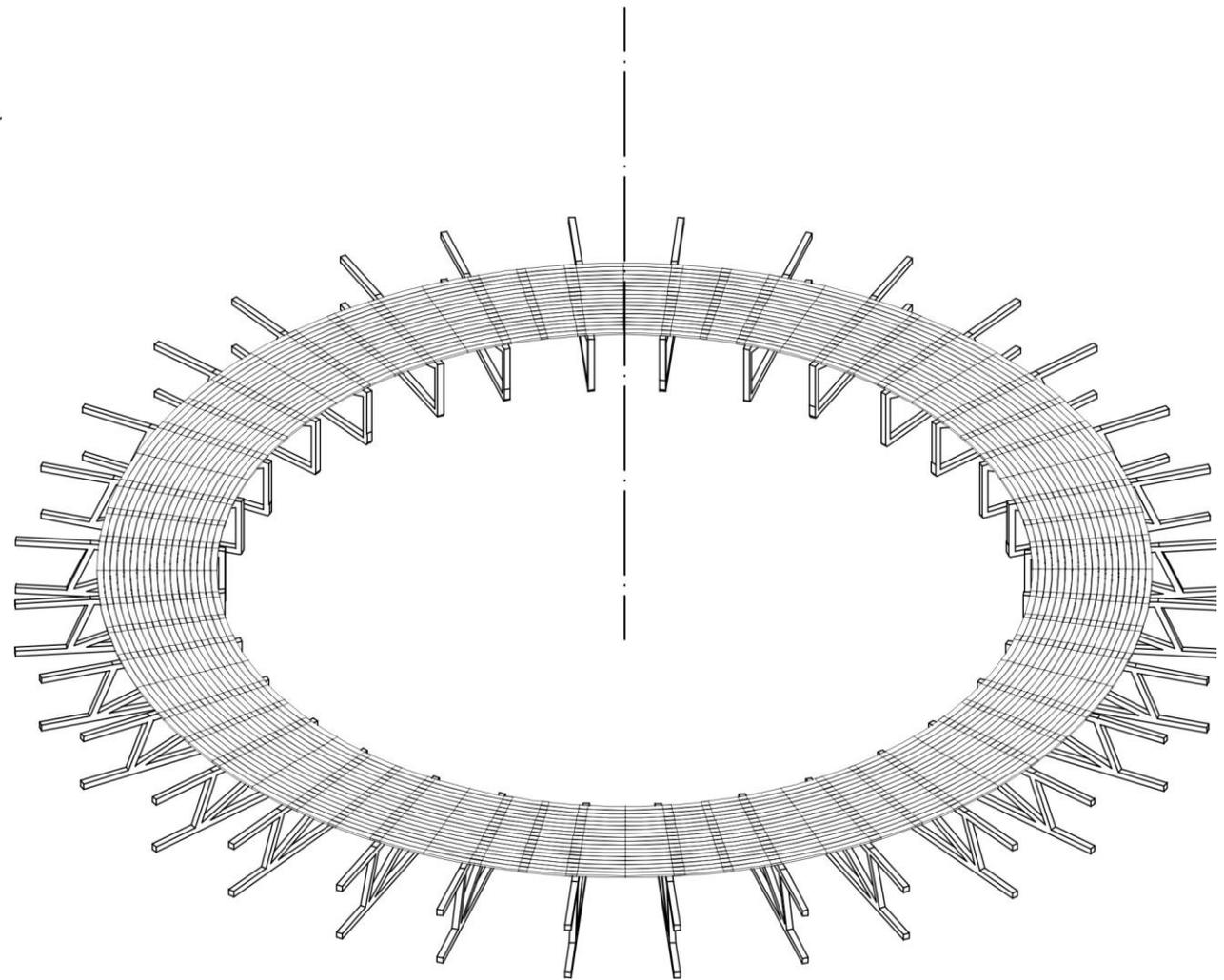


Figura 8.14. El sistema plantearía un sistema auxiliar para la construcción de un anillo completo autoportante. Conforme se ha completado un anillo, este se comporta como una unidad estructural. Solo será necesario ir apuntalando el anillo siguiente mientras se cierra. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Fase constructiva donde se desarrolla las hiladas acodaladas.

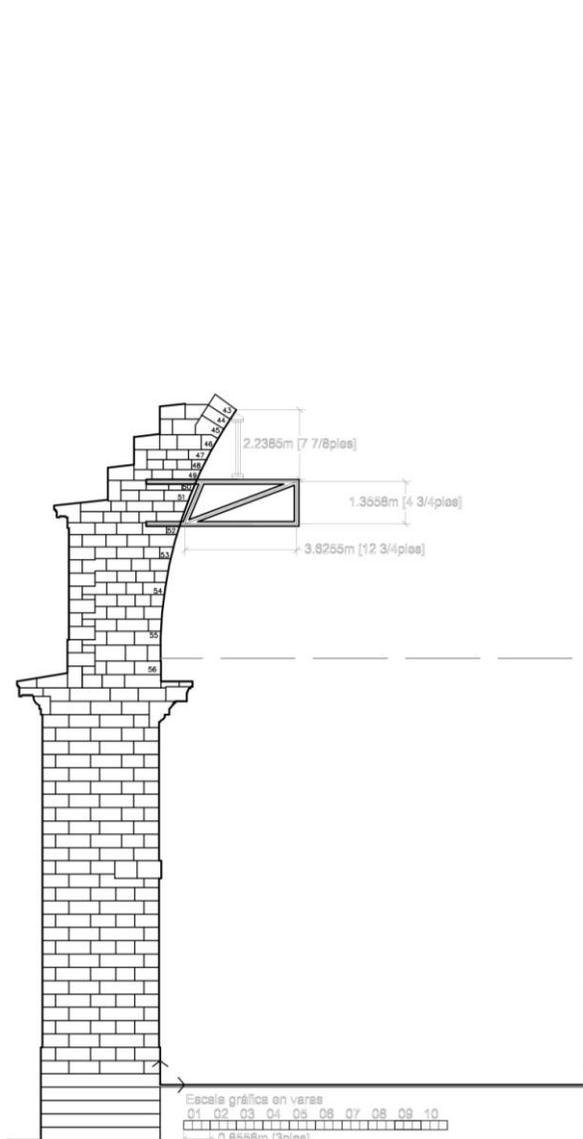


Figura 8.15. Sobre la plataforma se va apuntalando la hilada a desarrollar hasta que esté completa. Elaboración propia.

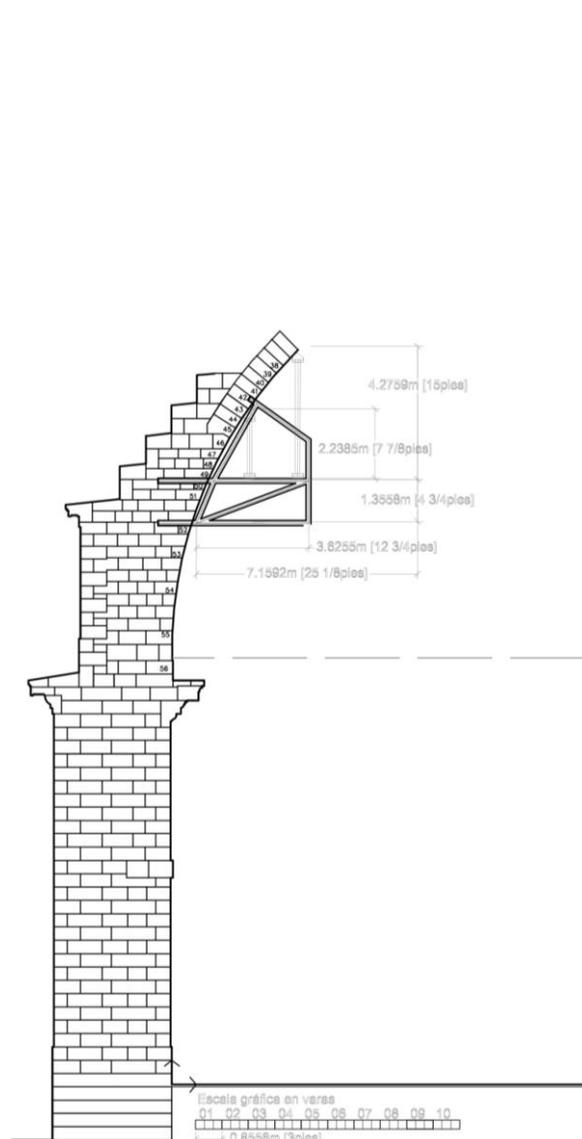


Figura 8.16. Para las siguientes hiladas se apuntala el anillo que no está completo. Elaboración propia.

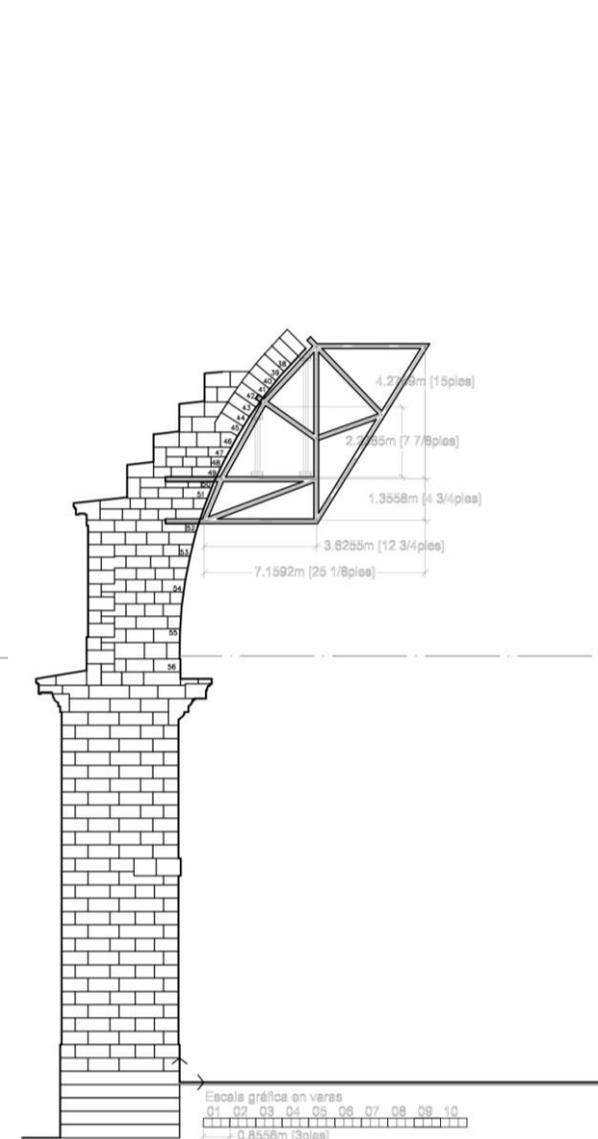


Figura 8.17. El resto de los anillos inferiores estarían trabajando en el momento que se cierran. Elaboración propia.

Vista en perspectiva. Fase de hiladas acodaladas.

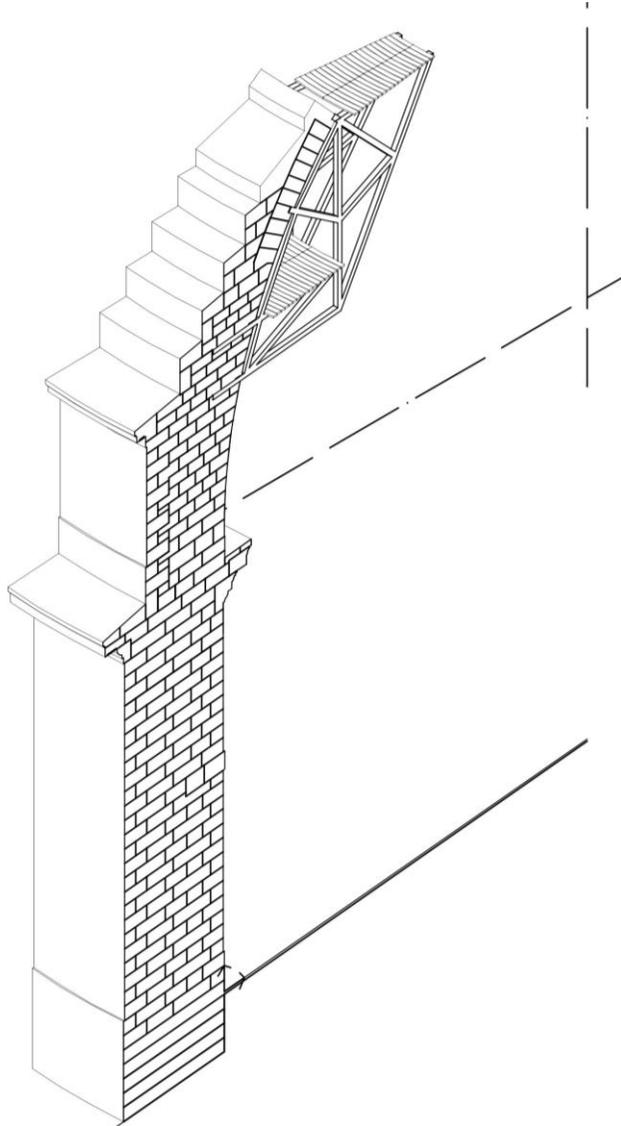


Figura 8.18. Vista en perspectiva de la segunda plataforma para el desarrollo del proceso constructivo de la cúpula.
Elaboración propia.

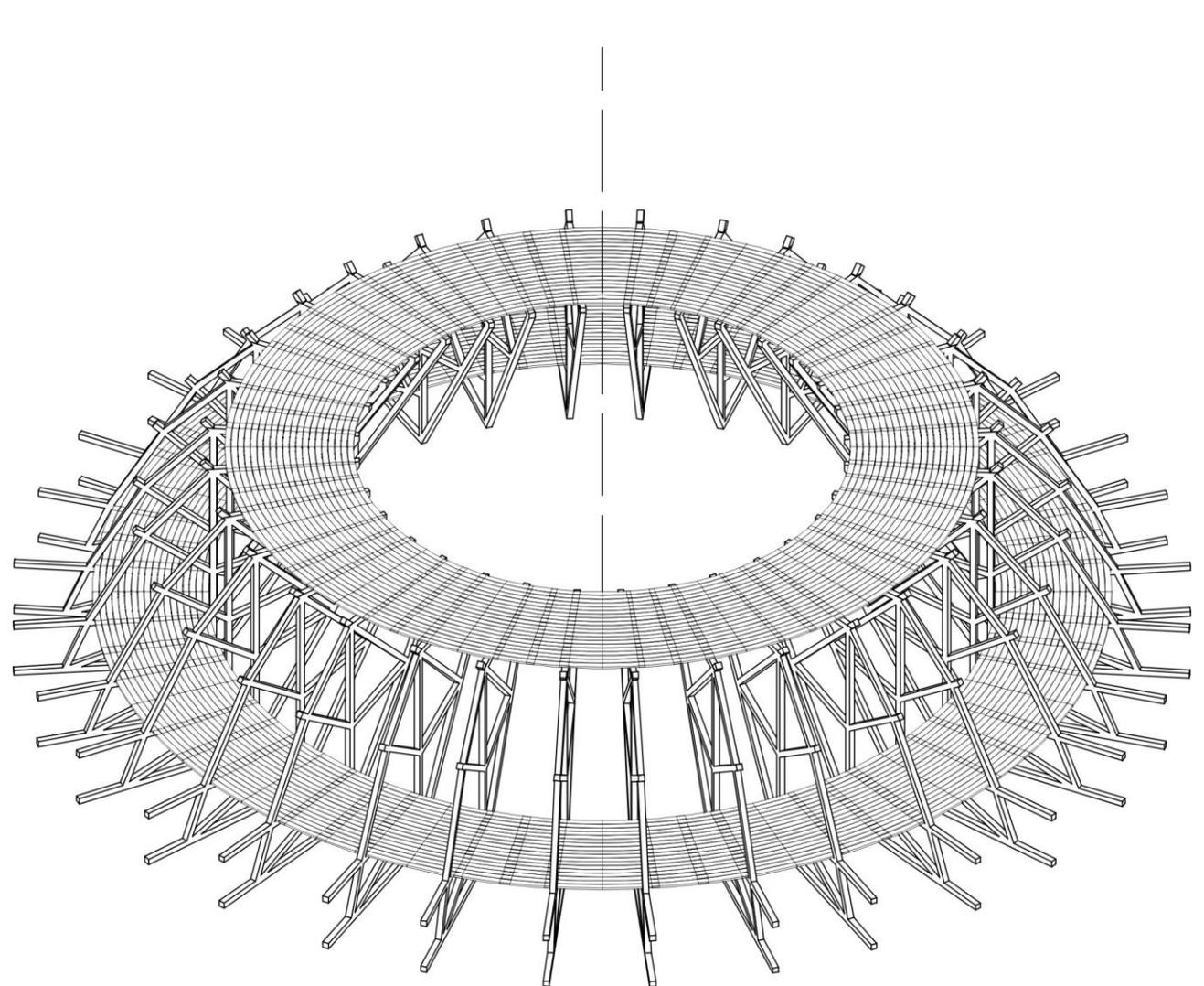


Figura 8.19. El sistema plantearía un sistema auxiliar para la construcción de un anillo completo autoportante. Conforme se ha completado un anillo, este se comporta como una unidad estructural. Solo será necesario ir apuntalando el anillo siguiente mientras se cierra. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Fase constructiva donde se desarrolla las hiladas acodaladas.

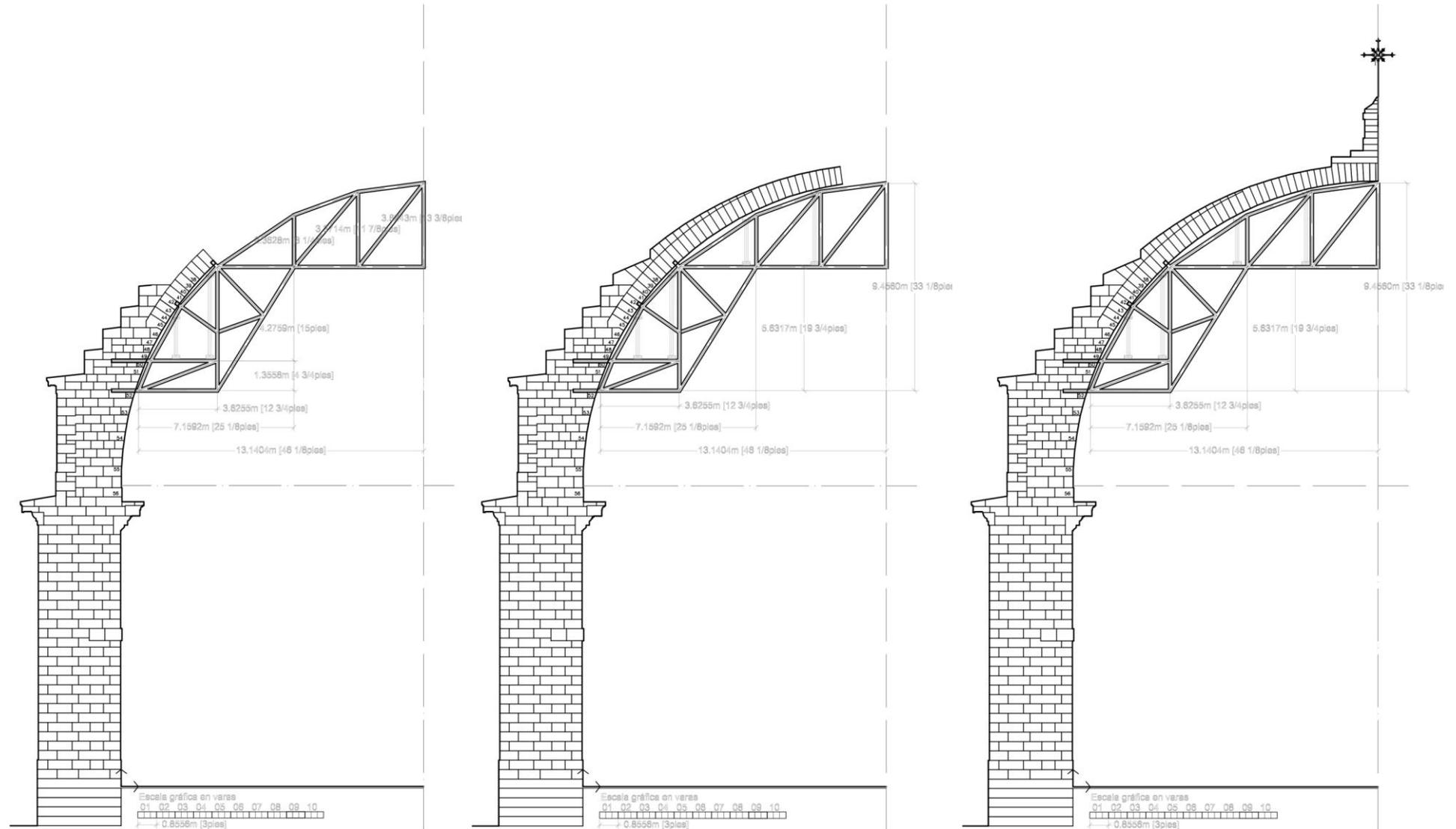


Figura 8.20. Final de la construcción de la cúpula. Las hiladas se desarrollan por lechos radiales. En esta fase la plataforma cubre el espacio por completo. Elaboración propia.

Vista en perspectiva. Fase de hiladas dispuesta de forma radial.

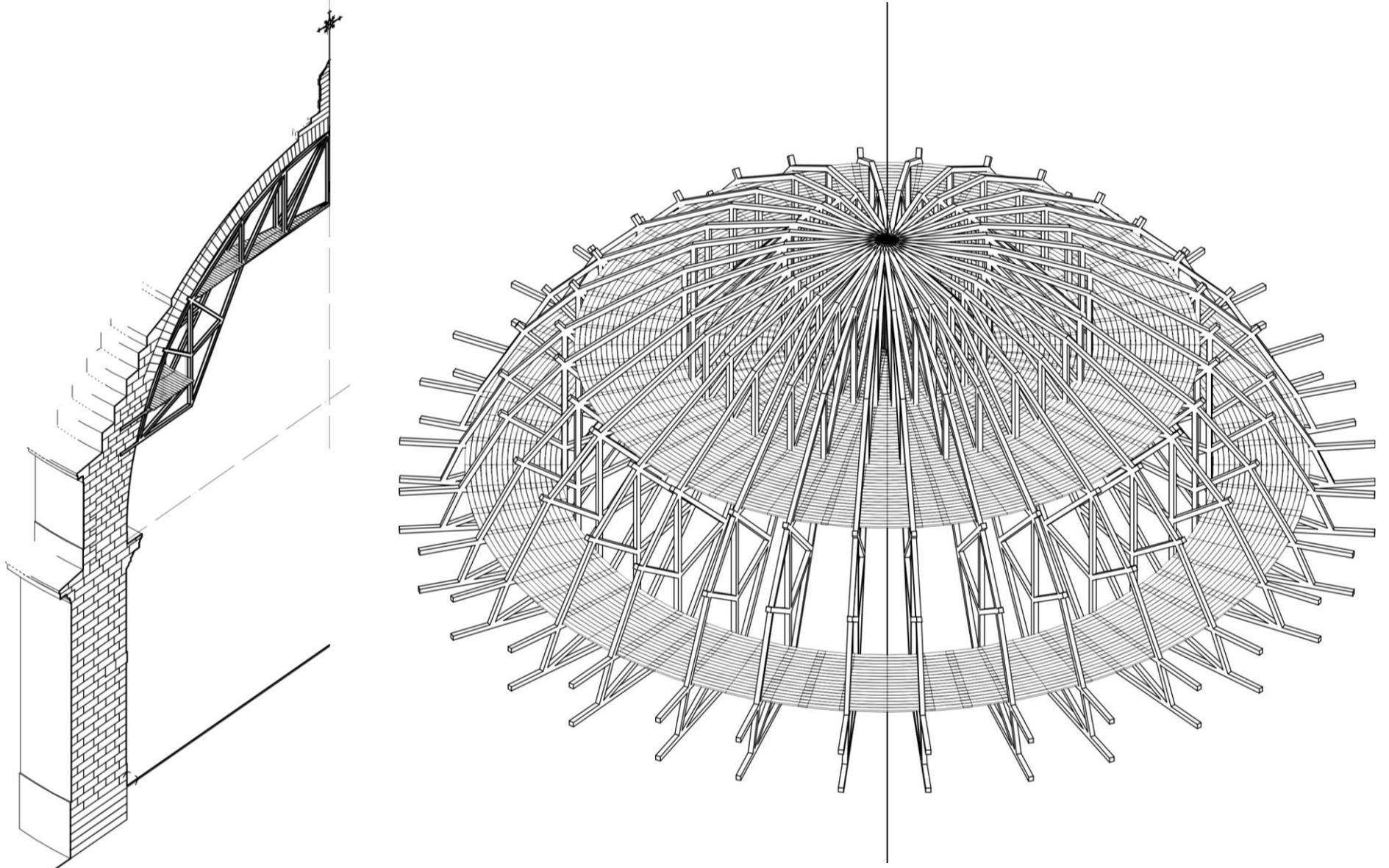


Figura 8.21. Finalización de la cúpula. Elaboración propia.

8.3.2. 2. Hipótesis del uso de andamios usando cimbras.

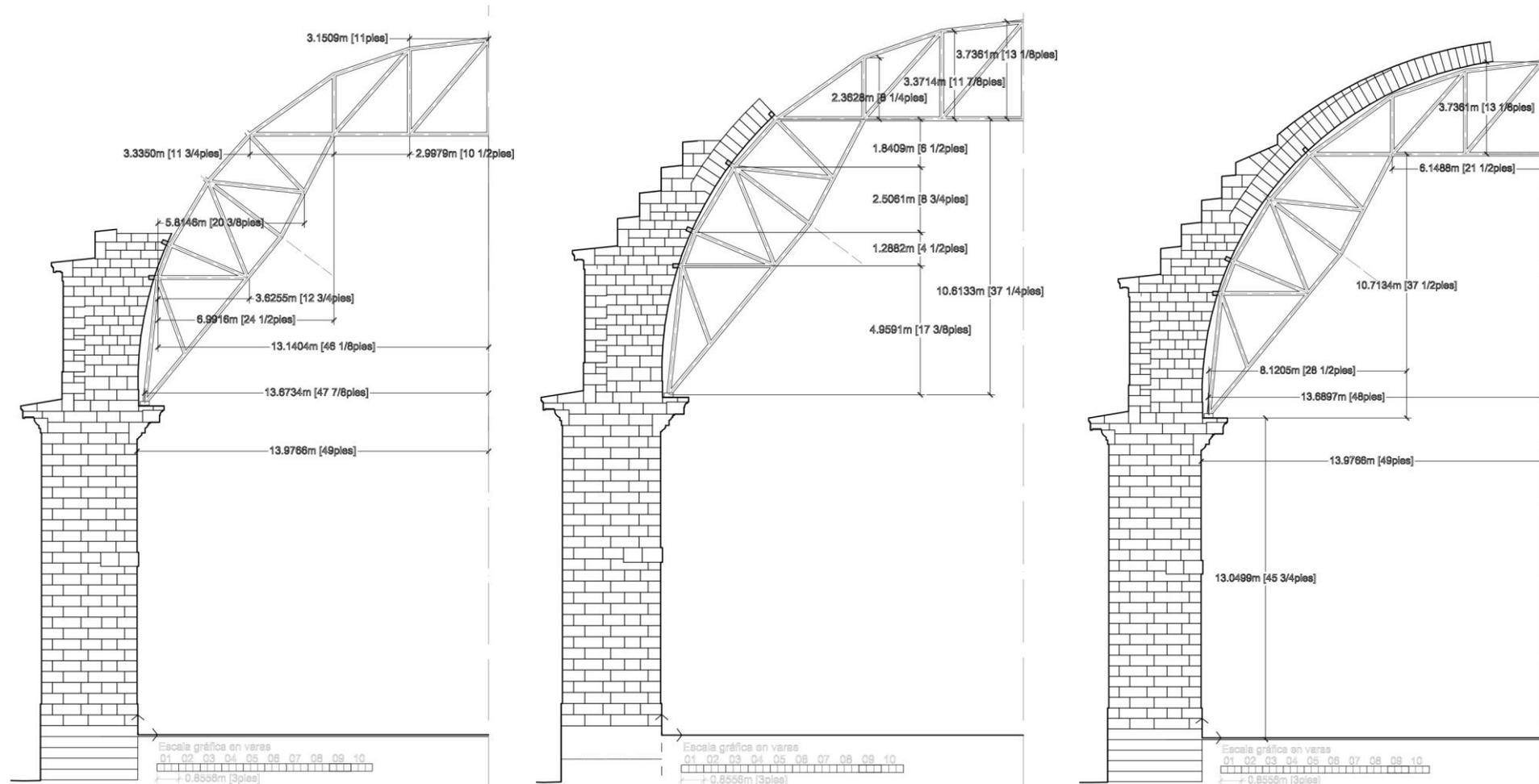


Figura 8.22. Proceso constructivo utilizando cimbras. Las cimbras estarán completamente instaladas antes de comenzar con la construcción de la cúpula a diferencia del caso anterior con el uso de plataformas de trabajo que se van construyendo a la vez que la cúpula. Aquí se va trabajando por el trasdós de la cimbra colocando tableros que irán recibiendo las dovelas. Elaboración propia.

Vista en perspectiva.

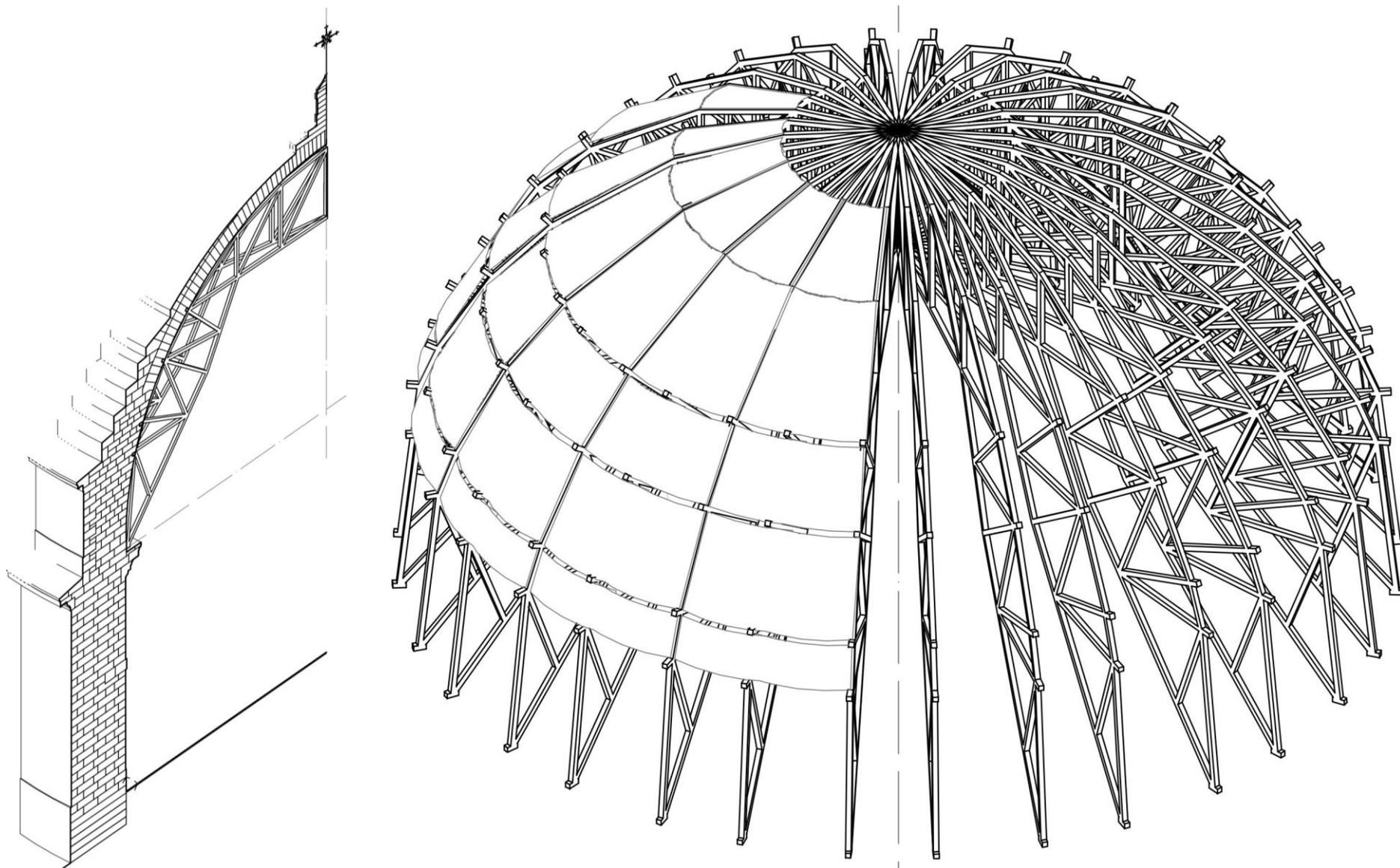


Figura 8.23. La cimbra estaría compuesta por 16 pares de arcos que arrancan en la cornisa del intradós donde se une el cuerpo cilíndrico con la cúpula. Elaboración propia.

8.4. Construcción actual de una cúpula de piedra. Global Vipassana Pagoda.

Como referencia actual existe la construcción de la Global Vipassana Pagoda (Mumbai, India (2000-2008)).

El centro de meditación Global Vipassana Pagoda contiene la cúpula de piedra más grande del mundo construido sin pilares de apoyo. Se trata de una cúpula semiesférica rebajada. La altura de la cúpula principal es de aproximadamente 29 metros (semejante a la cúpula de la iglesia de Montefrío).

Sobre esta se desarrolla un cúpula catenaria para terminar elevando, sobre la segunda, una cúpula cónica. La sucesión de cúpulas hace que la altura del edificio sea de 96,12 metros. El diámetro exterior de la sección más grande de la cúpula es 97.46m y las secciones más cortas es 94.82m. El interior de la pagoda es hueco y sirve como una gran sala de meditación con una superficie de más de 6.000 m².

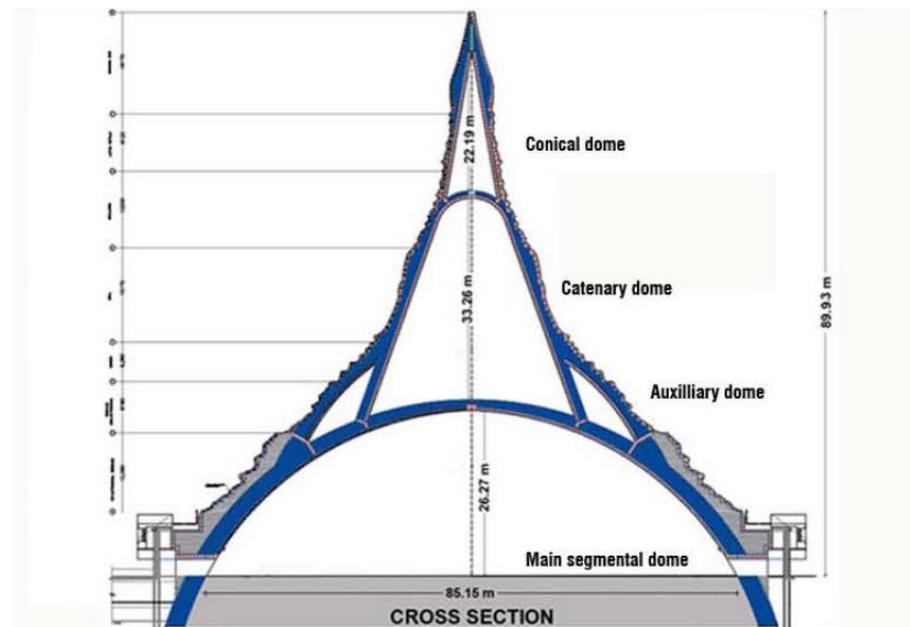


Figura 8.24. Sección transversal de la Global Vipassana Pagoda.

La planificación de la construcción de la Vipassana Pagoda Global se inició en 1997, mientras que el trabajo de construcción del edificio comenzó en 2000. Como hemos visto la pagoda se compone de tres sub-cúpulas.

La primera y la más grande cúpula fue terminada en octubre de 2006, cuando las reliquias óseas de Gautama Buda estaban consagrados en la piedra central de la clave de la cúpula principal. La segunda y tercera cúpulas se sientan encima de la primera cúpula. La construcción de la tercera cúpula fue terminada estructuralmente el 21 de noviembre de 2008.



Figura 8.25. Proceso constructivo de la Global Vipassana Pagoda.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO, GRANADA.

Como se puede apreciar en la figura 8.23 la cúpula principal se construye con un sistema auxiliar formado por cañas de bambú.

No es necesario un sistema complicado de andamiaje. Teniendo en cuenta el funcionamiento de las cúpulas, donde el cierre del anillo que se va construyendo hace que la cúpula sea estable. Solo se necesita sustentar el anillo que está en proceso de construcción.

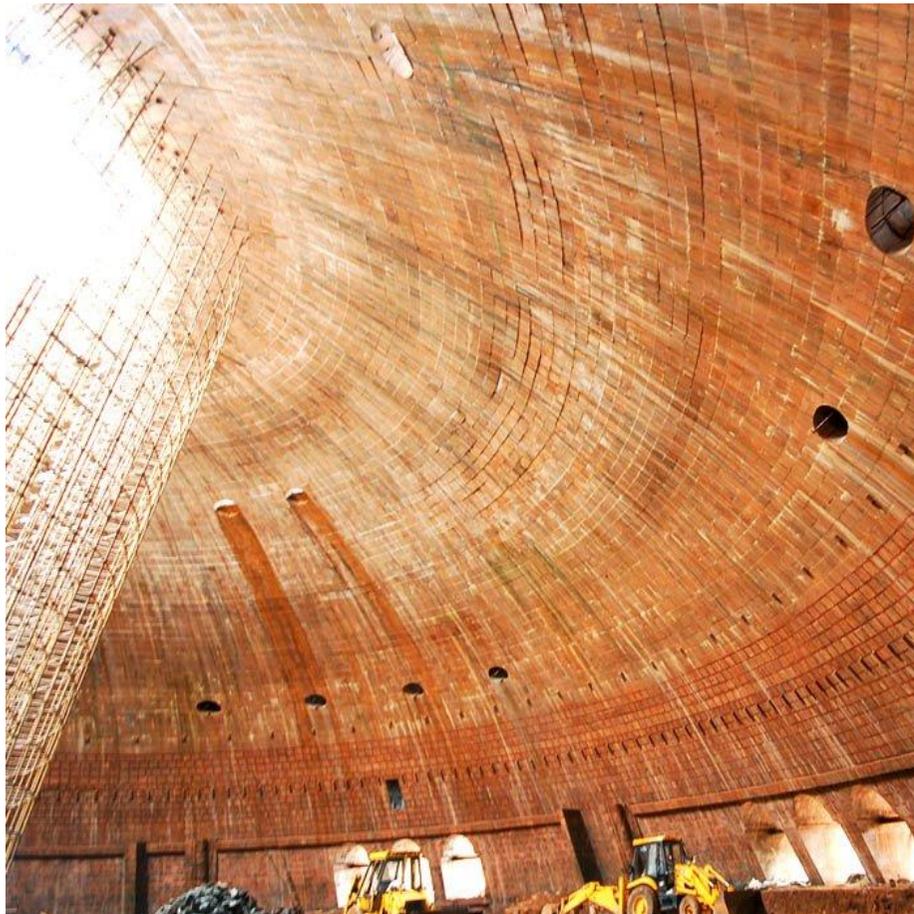


Figura 8.26. El sistema auxiliar trabaja mientras se está construyendo el anillo.

Esta cúpula puede tener un óculo o puede ser cerrada y en ambas condiciones se mantendrá en pie.

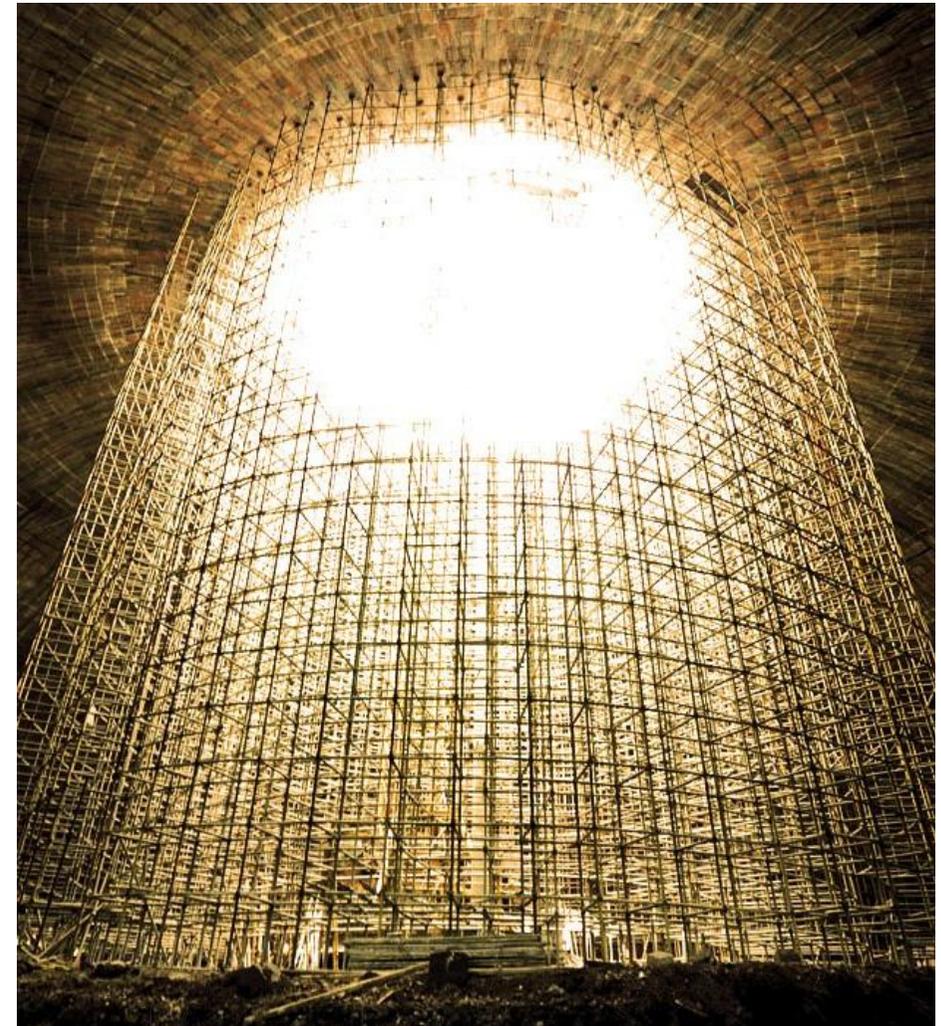


Figura 8.27. Sistema auxiliar necesario para la terminación de la cúpula principal de la Global Vipassana Pagoda.



Esta solución constructiva no viene recogida en la bibliografía histórica dedicada al estudio de la construcción y comportamiento estructura de una cúpula.

Así que no tenemos constancia de que el arquitecto Domingo Lois de Monteagudo pudiera usar un modelo semejante al utilizado en la construcción de la Global Vipassana Pagoda.

Figura 8.28. Imagen de la iglesia de la Encarnación de Montefrío. Elaboración propia.

INDICE DE FIGURAS

Figura 8.1. Maqueta de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío realizada en 3DStudio. Elaboración propia.	3	Figura 8.16. Para las siguientes hiladas se apuntala el anillo que no está completo. Elaboración propia.	14
Figura 8.2. Sistemas de descimbrado. (THUNNISSEN, Henri J.W.(1950,2012), pág.47.	4	Figura 8.17.El resto de loa anillos inferiores estarían trabajando en el momento que se cierran. Elaboración propia.	14
Figura 8.3. Proceso constructivo de Brunelleschi para Santa María del Fiore. La cúpula se construyó sin cimbras, empleando un aparejo de ladrillo en espina de pez. Existen varias interpretaciones, la figura de la izquierda de Sanpaolesi (1941).	6	Figura 8.18. Vista en perspectiva de la segunda plataforma para el desarrollo del proceso constructivo de la cúpula. Elaboración propia.	15
Figura 8.4. Construcción de la cúpula de S. María del Fiore en Florencia.	6	Figura 8.19. El sistema plantearía un sistema auxiliar para la construcción de un anillo completo autoportante. Conforme se ha completado un anillo, este se comporta como una unidad estructural. Solo será necesario ir apuntalando el anillo siguiente mientras se cierra. Elaboración propia.	15
Figura 8.5. Cimbra de San Pedro de Roma. Fontana (1694).....	8	Figura 8.20. Final de la construcción de la cúpula. Las hiladas se desarrollan por lechos radiales. En esta fase la plataforma cubre el espacio por completo. Elaboración propia.....	16
Figura 8.6. Cimbra de San Pedro de Roma. (H. J. W. Thunnissen (1890-1978))	8	Figura 8.21. Finalización de la cúpula. Elaboración propia.	17
Figura 8.7. Maqueta 3D de la iglesia de la Encarnación. Elaboración propia.	10	Figura 8.22. Proceso constructivo utilizando cimbras. Las cimbras estarán completamente instaladas antes de comenzar con la construcción de la cúpula a diferencia del caso anterior con el uso de plataformas de trabajo que se van construyendo a la vez que la cúpula. Aquí se va trabajando por el trasdós de la cimbra colocando tableros que irán recibiendo las dovelas. Elaboración propia.	18
Figura 8.8. Distribución de los mechinales en planta. Elaboración propia.	11	Figura 8.23. La cimbra estaría compuesta por 16 pares de arcos que arrancan en la cornisa del intradós donde se une el cuerpo cilíndrico con la cúpula. Elaboración propia.	19
Figura 8.9. Imagen de la cúpula seccionada. Elaboración propia.	11	Figura 8.24. Sección transversal de la Global Vipassana Pagoda.	20
Figura 8.10. Fase del cuerpo cilíndrico. Elaboración propia.	12	Figura 8.25. Proceso constructivo de la Global Vipassana Pagoda.	20
Figura 8.11. Fase de hiladas de lechos horizontales.....	12	Figura 8.26. El sistema auxiliar trabaja mientras se está construyendo el anillo.	21
Figura 8.12. Fase de construcción de la primera plataforma. Elaboración propia.	12	Figura 8.27. Sistema auxiliar necesario para la terminación de la cúpula principal de la Global Vipassana Pagoda.	21
Figura 8.13. Vista en perspectiva de la primera plataforma para el desarrollo del proceso constructivo de la cúpula.	13	Figura 8.28. Imagen de la iglesia de la Encarnación de Montefrío. Elaboración propia.	22
Figura 8.14. El sistema plantearía un sistema auxiliar para la construcción de un anillo completo autoportante. Conforme se ha completado un anillo, este se comporta como una unidad estructural. Solo será necesario ir apuntalando el anillo siguiente mientras se cierra. Elaboración propia.	13		
Figura 8.15. Sobre la plataforma se va apuntalando la hilada a desarrollar hasta que esté completa. Elaboración propia.	14		

TEMPLO.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

9	Estabilidad del templo.	1
9.0	Introducción.....	1
9.1	Antecedentes históricos.	1
9.1.1	Método de cálculo.	3
9.1.2	Ensayos de Barlow.	4
9.1.3	Funcionamiento de un arco.	5
9.2	Teoremas fundamentales del análisis límite. Análisis a rotura.....	7
9.3	Comportamiento estructural de las Cúpulas. Asimilación a arcos.....	11
9.3. 1.	Antecedentes.	11
9.3.2.	Método de los cortes.	12
9.4	Estudio de la línea de empujes en cúpulas históricas.	14
	San Pedro de Roma XVII (42.59m)	14
	Cúpula de Santa María del Fiore (41m).....	16
	Cúpula Gol Gumbaz (39m)	17
	Cúpula idealizada según la regla de Fontana (1638-1714).....	18
9.5.	Estimación práctica del coeficiente geométrico de seguridad en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Método de los cortes.	19
9.5.1.	Hipótesis.....	19
9.6.	Método de análisis de membrana.	40
9.7.	Estudio de la línea de empujes en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Análisis de Membrana.....	47
9.8.	Conclusiones del estudio de la línea de empujes en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío.	53
9.8.1.	Estudio de la cúpula haciéndola semejante a los arcos.	53
9.8.2.	Estudio de la cúpula interpretada como membrana.....	54
9.9.	Posibles líneas de investigación	55
	INDICE DE FIGURAS.....	56
	INDICE DE TABLAS.....	58

» 9 ≡ Estabilidad del templo.

9.0 Introducción.

Vamos a estudiar el comportamiento estructural de la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Se va a analizar el equilibrio de la estructura de fábrica de piedra por métodos gráficos usando el concepto de “línea de empujes”⁵⁵.

Las líneas de empujes permiten “ver” la transmisión de esfuerzos dentro de la fábrica. Cada línea de empujes representa una posible situación de equilibrio; de hecho, una línea de empujes es una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio⁵⁶.

Veremos cómo se puede hacer la reducción del problema espacial de la cúpula al problema plano del arco, por lo que a continuación se describe el funcionamiento del arco para poder entender mejor el de la cúpula.

La definición de arco según Antonio José Mas-Guindal: “Estructura de directriz curva o poligonal que salva una luz y deposita la carga en los apoyos mediante una fuerza inclinada llamada empuje”. La existencia de esta fuerza es determinante para su equilibrio, por lo que sin ella la estructura no existe.

A continuación vemos como se ha tratado este concepto a lo largo de la historia.

⁵⁵ El desarrollo matemático lo plantea Santiago Huerta en su Tesis en la página 43. HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/>

⁵⁶ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2. Pág. 36.

9.1 Antecedentes históricos.

La línea de empujes es el lugar geométrico del punto de paso de los esfuerzos por un sistema de planos de corte dados. El concepto de línea de empujes fue intuitivo ya por Hooke (1670) en su analogía con los cables, pero su formulación rigurosa se produce en el decenio 1830-40, de forma independiente en Inglaterra (El matemático Moseley, 1835) y Francia (El ingeniero Méry 1840).

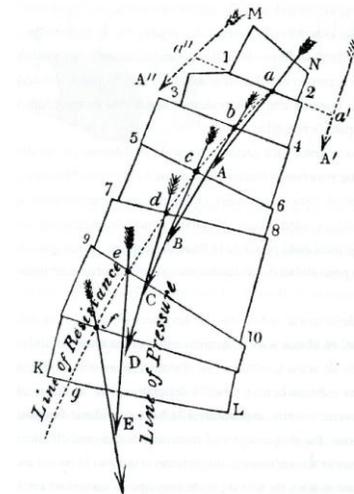


Figura 9.1. Línea de empujes en un macizo de fábrica: Exposición de Moseley. La línea de empujes (línea de puntos) es el lugar geométrico del punto de paso de la resultante por su sistema de planos de corte dados. Estos planos de sección pueden corresponder a juntas reales o imaginadas. Moseley llamó a esta curva “Line of Resistance” (línea de reacciones) y a su envolvente, que define la dirección de los empujes, “Line of Pressure” (línea de presiones). (Moseley, 1843) (HUERTA 2004, pág 37)

Así la línea de empujes depende de la forma y sistema de cargas de la estructura y, también de la familia de planos de sección elegidos.

Dada una estructura de cualquier forma geométrica, sometida a un determinado sistema de cargas y cuyas partes están en contacto según una serie de superficies definidas geoméricamente, los métodos del análisis matemático permiten escribir

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

su ecuación. También se puede proceder a la inversa: dada una línea de empujes, podemos deducir la forma geométrica de una estructura compatible con ella.

Un ejemplo muy acertado es el expuesto por Santiago Huerta en su libro Arcos, bóvedas y cúpulas.

Las dovelas se montan sobre una cimbra y al descimbrar, tienden a caer hacia abajo. Cada dovela está “en el aire” con los empujes (resultantes de tensiones de compresión) producidos por las dovelas adyacentes. Estos empujes se transmiten hacia los apoyos; la trayectoria es la línea de empujes. Nótese que, dado que las fuerzas son verticales, la componente horizontal de los empujes es constante.

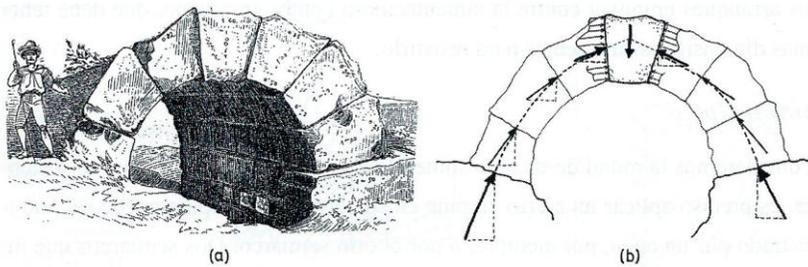


Figura 9.2. Arco etrusco de dovelas de piedra. (Durm 1885). (HUERTA 2004, pág 39)

La componente horizontal, que se va transmitiendo hasta los arranques es lo que se denomina empuje del arco. La última dovela de los arranques empuja contra la cimentación o contra un estribo, que debe tener unas dimensiones suficientes para resistirlo⁵⁷.

En el arco simétrico solo nos bastará con estudiar la mitad sometido a un cierto empuje en su clave. Así lo estudió Snell (1846) aplicando la noción de línea de

⁵⁷ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2. Pág. 39

empujes para investigar el equilibrio. Los valores de los empujes y pesos están representados sobre el mismo dibujo por segmentos a una cierta escala de fuerzas.

La condición de simetría equivale a suponer el empuje horizontal en la clave. Se supone un cierto empuje aplicado y, luego, se van componiendo sobre el propio dibujo las fuerzas a partir de la clave.

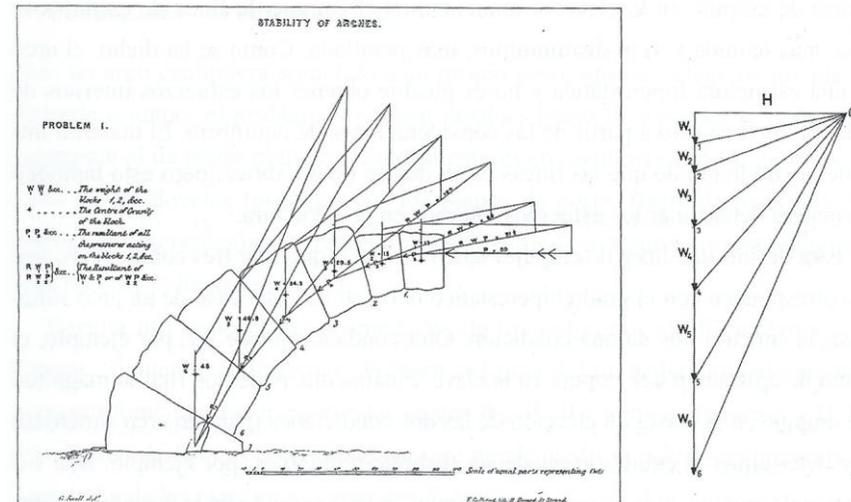


Figura 9.3. Equilibrio de una arco simétrico. (Snell, 1846) (HUERTA 2004, pág. 41).

Los puntos de la línea de empujes son el resultado de la intersección de las resultantes con los planos de junta. La composición de fuerzas se ha añadido a la derecha. Los empujes forman un polígono en cuyos vértices están aplicados los pesos. Podemos imaginarlo como un sistema de barras articuladas en los vértices que tiene la forma justa para resistir las cargas. Nótese que la línea de empujes no coincide con este polígono de empujes: resulta de unir los centros de empujes, que son los puntos en que el polígono corta a los planos de junta. Los pesos y sus centros de gravedad dependen, a su vez, de las juntas elegidas, y variando las juntas obtendríamos una línea de empujes de forma ligeramente distinta.

9.1.1 Método de cálculo.

Cálculo de la línea de presiones: Polígono antifunicular.

El semiarco tiene que estar en equilibrio. Las fuerzas que actúan son el peso total del semiarco, el empuje aplicado en la clave y la reacción en el arranque.

1.- Sobre el dibujo del semiarco se plantea el equilibrio de estas fuerzas que se obtiene teniendo como dato el Peso total del semiarco dibujado sobre el centro de gravedad del semiarco, a continuación se decide colocar el Empuje en el medio de clave (como hipótesis para comenzar) y donde confluyen las líneas de acción de ambas fuerzas será donde confluirá la línea de acción de la Reacción.

2.- A la derecha, redibujamos el esquema de fuerzas que actúan en el sistema haciendo una suma de vectores. Al ser un arco simétrico tendremos un esquema de triángulo rectángulo.

3.- Subdividimos el semiarco en segmentos. Calculamos los pesos de los segmentos que serán “las dovelas” que componen el semiarco. En el dibujo de la derecha también se recoge la división del Peso total del semiarco como suma de los pesos de los segmentos y si unimos los segmentos nuevos con el punto de corte del Empuje con la Reacción estamos calculando el polígono de empujes, que no es la línea de empujes, en cuyos vértices están aplicados los pesos. El polígono de empujes es un polígono antifunicular de los pesos de las dovelas concentrados en sus centros de gravedad.

4.- Volvemos sobre el dibujo del semiarco y desplegamos el esquema de fuerzas obtenido en el apartado 3.

Necesitamos dibujar la línea de acción de los pesos de cada dovela que pasa por el centro de gravedad de cada una. Así, a partir del punto de corte entre la línea de acción del Empuje dibujado en el apartado 1 y la línea de acción de la “semiclave” pasamos una paralela a la primera línea inclinada del polígono. La prolongación de la nueva línea inclinada corta a la línea de acción del peso de la siguiente dovela, y el

punto de corte será por donde pasa la siguiente línea inclinada del polígono de empujes y así sucesivamente.

5.- Para finalizar, la línea de empujes será la unión de los puntos de corte del polígono antifunicular desplegado sobre el dibujo del semiarco y el despiece en dovelas del semiarco.

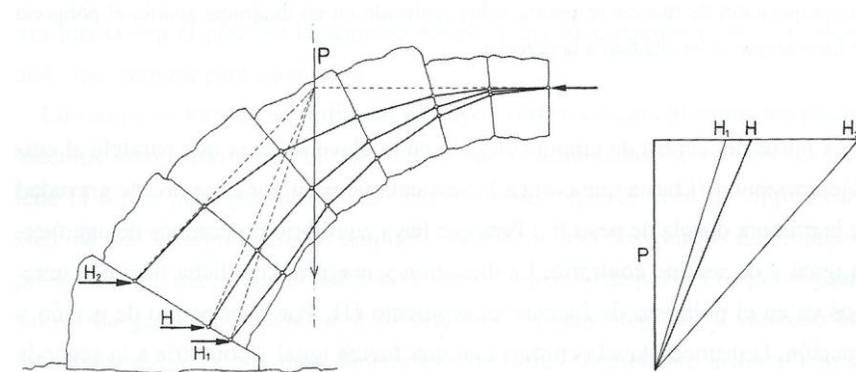


Figura 9.4. Posibles líneas de empujes en el arco. Para cada centro de empuje elegido en la clave, es posible dibujar infinitas líneas de empujes dentro de la fábrica. (HUERTA, (2004) pág.42).

La línea de empujes obtenida es sólo una de las infinitas que se podrían hacer, ya que las variables son la posición del Empuje y la posición de la Reacción.

Otra hipótesis puede ser variando la posición del Empuje hacia abajo o arriba, manteniendo la Reacción en el medio y viceversa⁵⁸.

⁵⁸ Existe un ejemplo de cálculo de polígono antifunicular para un arco cualquiera con cargas verticales en: HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el*

9.1.2. Ensayos de Barlow.

Para verificar el método, en 1846 el ingeniero inglés W.H. Barlow publicó una serie de ensayos en un artículo titulado “Sobre la existencia (en la práctica) de la línea de empuje horizontal constante en los arcos...” Barlow demuestra con experimentos las ideas de Moseley. El modelo más útil para comprender el concepto de línea de empujes y algunas de sus propiedades fundamentales es el que se reproduce.

Se trata del dibujo original de Barlow. Se trata de un arco de seis dovelas separadas por juntas compuestas por tablillas de madera.

Figura 5(a) El modelo del arco está compuesto por dovelas separadas por juntas de tablillas; Barlow ha dibujado tres posibles líneas de empujes, mediante un método gráfico: “abc” es el empuje mínimo, “df” es el empuje máximo y “ghi” que se aproxima a la línea media del arco.

Figura 5(b) Considerada una cierta línea de empujes, se pueden retirar las tablillas a las que no corta. Quedando dibujada físicamente la trayectoria de los empujes.

Si las tablillas de separación no estuvieran dispuestas siguiendo la forma de una cierta línea de empujes, el equilibrio es imposible.

Otro modelo ideado por Barlow para ver la forma de la línea de empujes es la figura 9.5.

Se trata de un arco en el que las juntas de las dovelas, en vez de ser planas, presentan una cierta convexidad. De esta forma, el contacto tiene que producirse en un punto, y el lugar geométrico de dichos puntos es la línea de empujes.

Barlow, tras descimbrar el modelo, observa que cambia de forma, debido a los giros de las dovelas, e interpreta, correctamente, que esto se debe a la diferente forma del arco y de la línea de empujes.

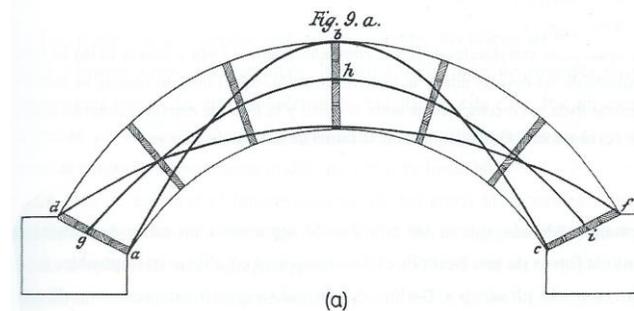
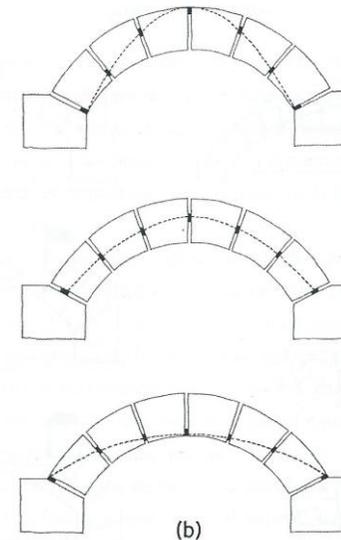


Figura 9.5. Ensayo para “demostrar la existencia en la práctica de la línea de empujes” propuesto por Barlow en 1846. (HUERTA, (2004) pág.51).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Una excentricidad del empuje respecto al punto de contacto, hace girar las dovelas y el arco modifica su forma, de manera que la línea de empujes pase por los puntos de contacto en el arco distorsionado. Barlow advierte que el modelo puede servir para ver las variaciones de la línea de empujes al variar la carga sobre el arco.

Esta última idea de Barlow fue recogida, sin ser citado, por Jenkin en el artículo "Bridge" para la 9ª edición de la Enciclopedia Británica (1876).

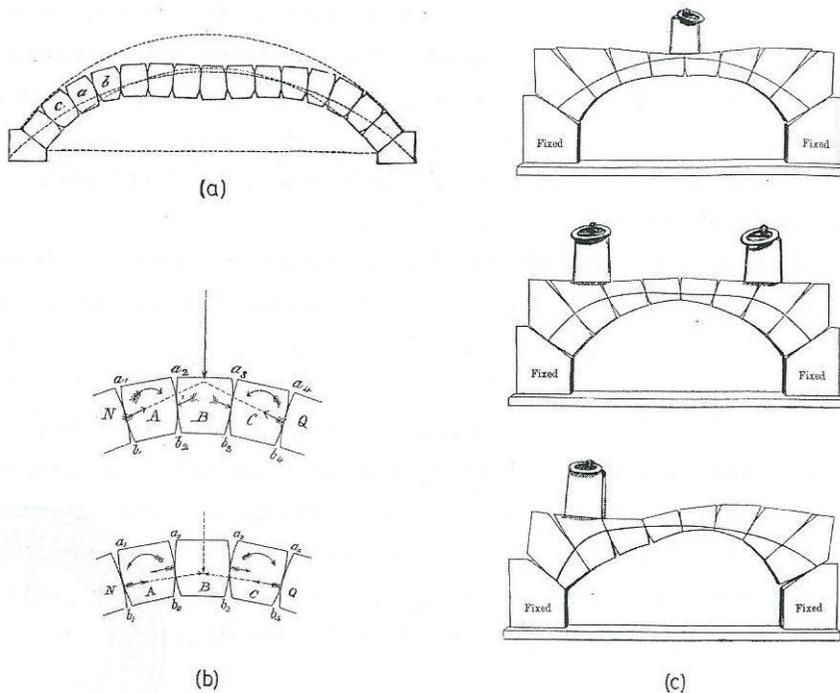


Figura 9.6. Modelos de arcos con dovelas de juntas convexas. (Barlow 1846 y Jenkis 1876). El punto de contacto de las dovelas dibuja la línea de empujes. (a) El modelo cambia su forma al descimbrar dada la no coincidencia entre el perfil y la línea de empujes, como se explica en (b); (c) al cambiar las cargas, cambia la forma de la línea de empujes. (HUERTA, (2004) pág.52).

Jenkin explica las consecuencias del modelo en un apartado titulado "Demostración experimental de que el equilibrio de una serie de dovelas es estable si puede

dibujarse una línea de empujes que cumpla las condiciones enunciadas antes" (que esté contenida dentro del arco). Este enunciado es el del Teorema de la Seguridad, y resulta muy interesante la consideración del ensayo desde este punto de vista.

9.1.3. Funcionamiento de un arco.

Si el arco soporta sólo cargas verticales y, además, los planos de corte se consideran también verticales, entonces, la forma de la línea de empujes coincide exactamente con la del antifunicular de las cargas.

El problema del equilibrio de los arcos se puede asimilar entonces al equilibrio de los cables.

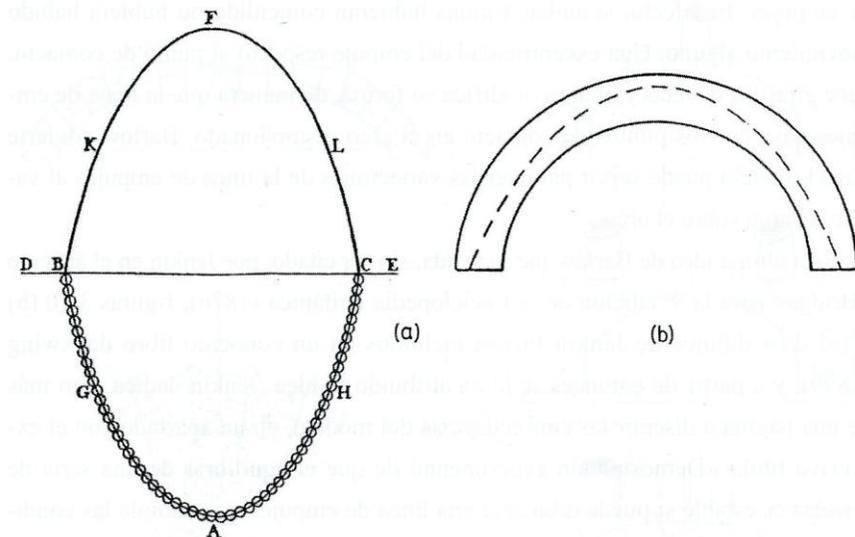


Figura 9.7. (a) Analogía de la cadena de Hooke para el análisis de arcos. Un cable trabaja siempre a tracción; si se invierte, las tracciones se convierten en compresiones, y la catenaria invertida es, según Hooke, la figura de un arco perfecto (Poleni 1748, en la cúpula de San Pedro). (b) Arco de fábrica en equilibrio con una catenaria en su interior (Heyman 1999a) (HUERTA, (2004) pág.54).

En 1670-80 Robert Hooke plantea la idea de asimilar el funcionamiento de los arcos al de cables invertidos o al de una cadena colgante, es decir, la forma de una catenaria.

Si se invierte la catenaria, que trabaja a tracción, tenemos un arco que trabajará a compresión, y la fuerza que en el cable trata de unir los apoyos, en el arco catenario los empuja tratando de separarlos.

El profesor Heyman considera que Hooke fue el que resolvió el problema técnico aunque no lo resolvió matemáticamente y su idea nos hace conocer cómo funciona un arco, por lo que será de gran importancia en la teoría de estructuras.

Pero fue en el 1773⁵⁹ cuando se escribió sobre la primera técnica eficiente de análisis estructural ideada por Coulomb⁶⁰ en la que se postuló que el fallo en un arco de fábrica se produce cuando la línea de empujes ya no se halla contenida en la sección, basándose en las condiciones de equilibrio del elemento.

Esta visión del funcionamiento de una obra de fábrica reside en una serie de suposiciones que fueron posteriormente planteadas por Heyman que se describen más adelante en este trabajo.

⁵⁹ HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/>

⁶⁰ Físico francés, 1736-1806, graduado en la Real escuela de ingeniería de Mézières. Las Reales escuelas eran el fruto de las ideas de la ilustración y del triunfo del racionalismo con su método científico observación versus experimentación que apostaron por el cálculo como resultado cierto y seguro dejando de lado los postulados basados en forma, geometría y proporción que habían dominado hasta entonces.

9.1.4. La evolución de la posición de la verdadera línea de empujes.

Gracias a Moseley (1843) se propuso por primera vez la teoría de la línea de empujes.

Más tarde Scheffler (1857) y Poncelet (1852) proponen considerar las propiedades elásticas del material para encontrar la verdadera línea de empujes. Hasta entonces el análisis elástico se aplicaba a arcos de madera o hierro y el análisis rígido para arcos de fábrica.

Castigliano (1879) realizó el estudio del arco de fábrica considerándola como un material elástico unilateral (sin resistencia a tracción); cuando la línea de empujes se salía del tercio central (coeficiente de seguridad 3) una parte de la sección dejaba de trabajar a compresión. Descartaba esta zona traccionada y volvía a analizar al arco con la sección reducida en dichas partes. Tras una o dos iteraciones obtenía la línea de empujes para el material elástico unilateral.

Tipo	Bóveda	Materiales de la bóveda
Bóveda de piedra ordinaria	0.604	1.37-2.71
Bóveda de ladrillo	0.278	0.45-1.62
Bóveda de hormigón en masa	2.460	---

Figura 9.8⁶¹. Módulo de elasticidad ($*10^5 \text{ kg/cm}^2$) de una fábrica a partir de los de sus componentes. Resultados del estudio realizado por los ingenieros austriacos en 1895

⁶¹ HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/> pág. 38

Durante 1895 la Asociación de Ingenieros y Arquitectos Austríacos realizó una extensa serie de ensayos sobre grandes arcos de fábrica y hormigón armado para demostrar la veracidad de las hipótesis elásticas donde se pudo constatar una cierta proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones medidas, que se consideró una demostración de la validez de la teoría elástica, si bien había una enorme discrepancia entre el módulo de elasticidad de la estructura y el del material.

A partir de 1900 se consideró que la teoría elástica⁶² era la más adecuada para calcular los arcos de fábrica y que la verdadera línea de empujes era la correspondiente al estado normal del arco; todas las aportaciones teóricas fueron dirigidas a simplificar los métodos del cálculo elástico.

El estudio del efecto de las perturbaciones sobre el estado de equilibrio de los arcos de fábrica como puede ser los pequeños movimientos de los estribos tras el descimbramiento tienen una importancia fundamental en la distribución interna de los esfuerzos en un arco o bóveda de fábrica.

Para entender el efecto de los pequeños movimientos hay que considerar las características esenciales del material, que se resumen en los principios del análisis límite de fábricas, enunciados por Heyman: se trata de un material rígido unilateral, con una resistencia infinita a compresión, nula a tracción y en el que el fallo por deslizamiento es imposible.

⁶² HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.73

9.2 Teoremas fundamentales del análisis límite. Análisis a rotura.

El análisis elástico se basa en el concepto de tensión admisible. El análisis a rotura se basa en el concepto de carga o configuración límite, aquella para la cual se produce el colapso de la estructura, y en establecer la seguridad con respecto a ella.

Como primera aportación al análisis límite o de rotura al análisis de arcos, se puede citar la memoria del matemático francés La Hire: P. La Hire "Sur la construction des voûtes dans les edifices" Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1712.

El primer análisis a rotura de una cúpula fue realizado por Poleni (1748). A continuación se expone el proceso que llevó a Poleni al estudio de la cúpula de San Pedro de Roma.

En 1742 se observan varias grietas en la cúpula de San Pedro de Roma (42.59m) y el Papa Benedicto XIV decide que se estudie la estabilidad de la cúpula y el modo de reforzarla.

En primer lugar, se solicitó el estudio a tres matemáticos italianos en 1743 sobre la cúpula de San Pedro de Roma: T. Le Seur, F. Jacquier y R.G. Boscovitch Parere di tre matematici sopra i danni, che si sono trovati nella cupola di S. Pietro (Roma: 1743)⁶³.

De acuerdo a sus cálculos la cúpula presentaba condiciones de peligrosidad y advirtieron la necesidad de colocar anillos de hierro alrededor para reforzarla.

Otros intelectuales publicaron sus propias conclusiones alarmados por el informe de los tres matemáticos concluyendo, la mayor parte de ellos, en que la cúpula era segura. Ante la controversia el Papa decidió consultar a otro famoso erudito italiano,

⁶³ HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/> pág. 58

Giovanni Poleni (Venecia 1683-1761). El informe lo escribe en 1743 pero se publica en 1748⁶⁴.

A principios del siglo XX, ya no hubo nuevas aportaciones al tema del análisis de rotura de las estructuras de fábrica, si bien los métodos gráficos de líneas de empujes se siguieron empleando como alternativa al laborioso análisis elástico⁶⁵.

Alrededor de los años 1920 se dejaron, prácticamente, de construir grandes arcos y bóvedas de fábrica. Fue en 1940 con el aumento del peso de los vehículos y en particular los tanques durante la II Guerra Mundial que se plantea la resistencia de los arcos y bóvedas de fábrica.

Los primeros estudios estaban destinados a realizar comprobaciones y utilizaban el método elástico suponiendo el arco biarticulado en sus extremos. Los inconvenientes de este método y el desarrollo alcanzado ya en aquel momento por el método plástico de análisis de estructuras metálicas hicieron volver de nuevo el interés hacia los métodos de rotura y en particular, sobre la aplicación de los teoremas fundamentales, demostrados ya para estructuras metálicas, también al tema de los arcos. Así en los últimos años ha habido un verdadero “redescubrimiento” del análisis de rotura de las estructuras de fábrica que había permanecido hibernado durante 100 años.

El enunciado general y riguroso de las condiciones que debe cumplir el material “fábrica” para la traducción de los teoremas fundamentales del análisis límite se debe a Heyman.

⁶⁴ LÓPEZ, Gema M. (2006): *Poleni's Manuscripts about the Dome of Saint Peter's*. Tesis dirigida por Santiago Huerta. ETSAM.UPM. <http://www.arct.cam.ac.uk/Downloads/ichs/vol-2-1957-1980-lopez.pdf>

⁶⁵ HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/> pág. 58

En 1966 Heyman enuncia en su artículo “The Stone skeleton” las tres condiciones que debe cumplir el material fábrica para que pueda ser analizado dentro del marco teórico del análisis límite⁶⁶:

- 1.- La fábrica tiene una resistencia a compresión infinita.
- 2.- La fábrica no tiene resistencia a tracción.
- 3.- El fallo por deslizamiento es imposible.

A Heyman corresponde el mérito de haber enmarcado la teoría de las estructuras de fábrica dentro del marco de la teoría moderna de estructuras.

Hay tres teoremas:

El teorema de la seguridad:

El teorema del límite inferior se enuncia para los arcos de fábrica de la siguiente forma: Un arco de fábrica es seguro si es posible dibujar una línea de empujes en su interior. De esta manera se estudia el coeficiente de seguridad a través de las ecuaciones de equilibrio que quedan representadas por líneas de empujes.

De este teorema deriva el hecho de que si una cúpula seccionada se mantiene en pie, también lo hará dicha cúpula sin seccionar.

De entre las infinitas líneas de empuje posibles de encontrar que representen un estado de equilibrio, se ha buscado un todos los casos la de empuje mínimo que es la que determina el coeficiente de seguridad geométrico en el apoyo, resultado de dividir el espesor del arco real por el espesor del arco límite (arco de medio punto que con el menor espesor posible pueda inscribir la línea de empujes).

⁶⁶ HEYMA, Jacques (1999): *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-89877-73-9 pág. 17

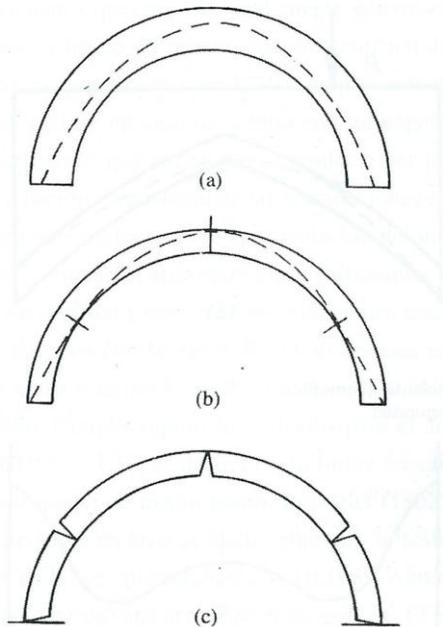


Figura 9.9. Definición del coeficiente geométrico de seguridad, (a) Arco de medio punto estable, como lo demuestra la línea de empujes dibujada en su interior; (b) Arco límite con el mínimo espesor que permite dibujar una línea de empujes en su interior; (c) Mecanismo de colapso del arco límite. El coeficiente geométrico de seguridad del arco se obtiene dividiendo su espesor por el del arco límite. (Heyman 1969). (HUERTA, (2004) pág.93).

Es importante resaltar que no es necesario encontrar la línea de empujes real, sino cualquiera que equilibre el arco y está en la interior del mismo. La holgura que tenga el trazado de las líneas de empujes entre el trasdós y el intradós determinará el grado de seguridad, siendo este un coeficiente de seguridad geométrico.

La regla del tercio central, establece que si la línea de empujes puede quedar inscrita dentro del núcleo central de inercia, el arco tiene un coeficiente de seguridad de valor 3⁶⁷, es decir, la línea de empujes estaría dibujada dentro del tercio central.

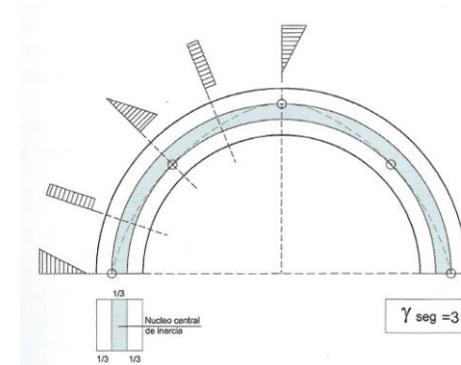


Figura 9.10. Regla del tercio central. (MAS-GUINDAL, 2011. Pág.53)

Si el coeficiente fuera de 2, significaría que se podría dibujar una línea de empujes dentro de la mitad central del arco, y así sucesivamente⁶⁸.

El teorema de la inseguridad:

O teorema del límite superior establece que el colapso se producirá si puede encontrarse una configuración de colapso cinemáticamente admisible, es decir, por

⁶⁷ MAS-GUINDAL, Antonio José (2011): *Mecánica de las estructuras antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban*. Ed. Munilla-Lería ISBN: 978-84-89150-90-4 pág.53

⁶⁸ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2. Pág. 102.

formación de un número suficiente de rótulas que convierten la estructura en un mecanismo es por eso que también es enunciado como teorema cinemático.

El término cinemáticamente admisible significa que un desplazamiento virtual de la estructura la suma de fuerzas exteriores e interiores produzca un trabajo positivo. Una configuración de colapso cinemáticamente admisible se caracteriza porque en un desplazamiento virtual del mecanismo, el trabajo realizado por las fuerzas exteriores es mayor o igual al realizado por las fuerzas interiores.

Heyman, dentro del marco de los teoremas límites de la plasticidad, y aplicando las hipótesis, expuso las grandes posibilidades que tiene aplicar el cálculo desarrollado por Coulomb, planteando que cuando la línea de empujes se hace tangente con el contorno, se puede afirmar que se forma un rótula plástica.

El número de rótulas que se requieren para que se produzca un mecanismo de colapso es fácilmente calculable. Así, un arco, que es considerado una estructura hiperestática de tercer grado, necesitaría tres rótulas para transformarse en una estructura isostática, donde la cuarta rótula la convierte en un mecanismo⁶⁹.

El teorema de la unicidad:

Afirma que la carga de colapso es única (pero puede haber varios mecanismos que conduzcan a la misma carga de colapso).

A parte del coeficiente de seguridad existe el concepto de empuje máximo y empuje mínimo. Así, las dos posiciones extremas de la línea de empujes, máximo y mínimo, tienen una interpretación física en el contexto del efecto de los pequeños movimientos de los estribos. La posición de las grietas puede predecirse en base al estudio de las líneas de empujes.

⁶⁹ HEYMAN, Jacques (1995): *Teoría y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. ISBN 8477902135

Estos agrietamientos son inevitables y pueden considerarse, incluso naturales. El arco agrietado de tres articulaciones es una estructura isostática y los esfuerzos internos pueden ser calculados simplemente a partir de las ecuaciones de equilibrio⁷⁰.

No es raro que una fábrica se agriete; las grietas visibles en una estructura indican simplemente que el edificio ha estado sometido, en algún momento, a movimientos impuestos desde el medio externo. Si no hay evidencias de movimientos recientes, la intervención correcta consiste en sellar las grietas con mortero para prevenir la entrada de agua que puede conducir a un deterioro interno más rápido.

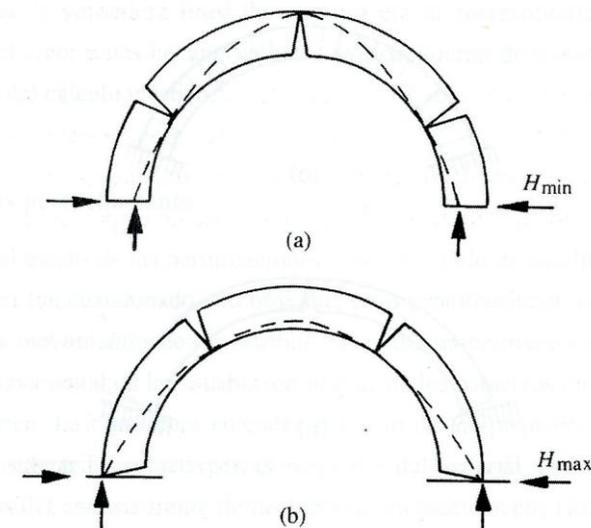


Figura 9.11. Agrietamientos típicos de un arco de fábrica. (a) Pequeña separación de los apoyos; el empuje se hace mínimo. (b) Pequeño acercamiento de los apoyos, el empuje se hace máximo. (Heyman 1999a)⁷¹. (HUERTA, (2004) pág.76).

⁷⁰ HEYMA, Jacques (1999): *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-89877-73-9 pág.19, 27

9.3. Comportamiento estructural de las Cúpulas. Asimilación a arcos.

9.3. 1. Antecedentes.

La cúpula, al igual que el arco, es una estructura que traslada carga al suelo según un empuje de arco, en función de la tangente a la curva de la cúpula.

Esa inclinación, al igual que en el arco, genera un empuje horizontal que en su base se transforma en una tracción en el anillo.

El comportamiento de una cúpula no es muy distinto del de un arco en su origen, que a pesar de tener una doble infinitud constitucional de hiperestatismo, que lo hace doblemente complejo, tiene una doble curvatura que aporta multitud de mecanismos secundarios que favorecen la estabilidad del conjunto⁷².

Si un arco exento se arruina con la aparición de 4 rótulas, una cúpula puede ser estable con multitud de grietas según los meridianos sin arruinarse.

Las bases del cálculo tradicional, antes del estudio científico que usa demostraciones, introducirán una asimilación del funcionamiento de la cúpula con el funcionamiento del arco.

Con anterioridad a Palladio nos encontramos con Leon Battista Alberti (1404-1472) su tratado de arquitectura publicado en 1485, fue traducido al español en 1582.

Alberti explica el funcionamiento estructural de las cúpulas esféricas diciendo que se componen de “arcos” y “cornijas” (cornisas), que determina su comportamiento estructural, pues la cúpula se vuelve autoportante por efecto de las compresiones

⁷¹ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2

⁷² MAS-GUINDAL, Antonio José (2011): *Mecánica de las estructuras antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban*. Ed. Munilla-Lería ISBN: 978-84-89150-90-4 pág.87

resistidas por los anillos, y puede construirse sin cimbra, o llevar un óculo en su coronación.

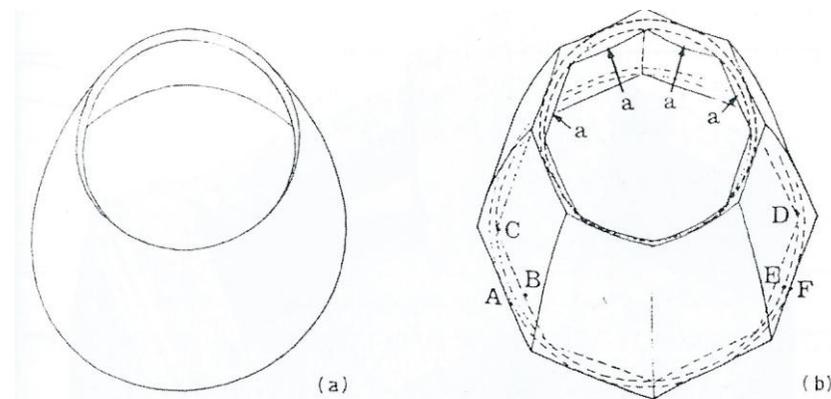


Figura 9.12. Estabilidad de cúpulas semiesféricas y poligonales. (a) la cúpula semiesférica es estable en todas las etapas intermedias de la construcción siempre que se ejecute realizando anillo completos, ya que el último anillo actúa como una clave; (b) la cúpula poligonal es estable si es capaz de contener dentro de su espesor un anillo circular. (Mainstone, 1977). (HUERTA, (2004) pág.187).

Mainstone aclara este concepto. Dice que se necesitaría andamios o cimbras solo para construir el último anillo ya que una vez endurecido se puede apoyar las ayudas de andamio para construir las siguientes y de esta forma acabar la obra, como le ocurre a la cúpula de Santa María del Fiore.

La diferencia entre un arco y una cúpula es que en el arco solo hay esfuerzos en dos caras, las juntas, mientras que en cúpula puede haber esfuerzos en cuatro caras, definidas, en general, por cortes según planos meridianos y paralelos.

9.3.2. Método de los cortes⁷³.

La posibilidad de generar esfuerzos según las cuatro caras de un cierto elemento de cúpula, permite “dirigir” espacialmente las cargas de infinitas maneras.

En este trabajo se va a estudiar la solución del equilibrio de cúpulas de fábrica por el método de los cortes.

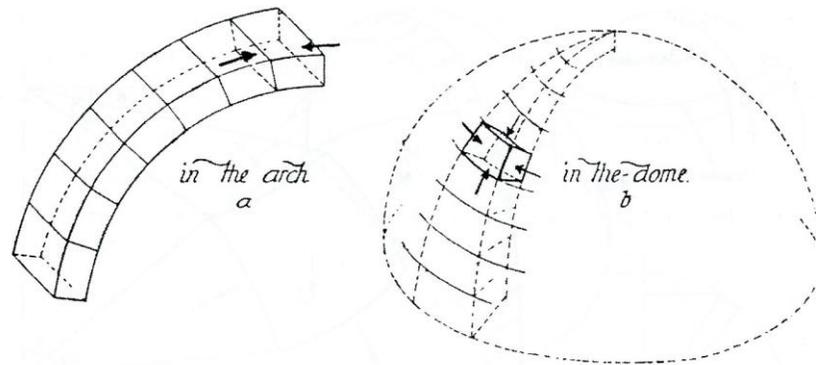


Figura 9.13. Diferencia entre un arco y una cúpula.(Dunn 1908)

En el análisis de equilibrio a compresión de una cúpula de revolución por el método de los cortes, la cúpula se imagina dividida en gajos cortados por planos meridianos. Cada dos gajos opuestos forman un arco. Si es posible dibujar una línea de empujes en su interior, cada arco elemental será estable y, por tanto, también lo será la cúpula completa. (Heyman 1988, modificado añadiendo la línea de empujes). (HUERTA, (2004) pág.437).

Existen otros métodos que se considerando la cúpula como membrana, que más adelante se va a desarrollar en este trabajo y se van a comparar ambos resultados.

⁷³ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2. Pág.442

Aunque el método de los cortes se justifica por el teorema de la seguridad y la elección de cortes meridianos resulta cómoda por su analogía con los arcos, existe una justificación “física” para la elección de este tipo de divisiones, que tiene que ver con la forma de agrietarse de las cúpulas de fábrica, debido a pequeños movimientos.

Una cúpula empuja radialmente hacia afuera y este empuje debe ser contrarrestado por algún tipo de sistema de estribo, cualquiera que sea, no será enteramente rígido y cederá ligeramente hacia afuera.

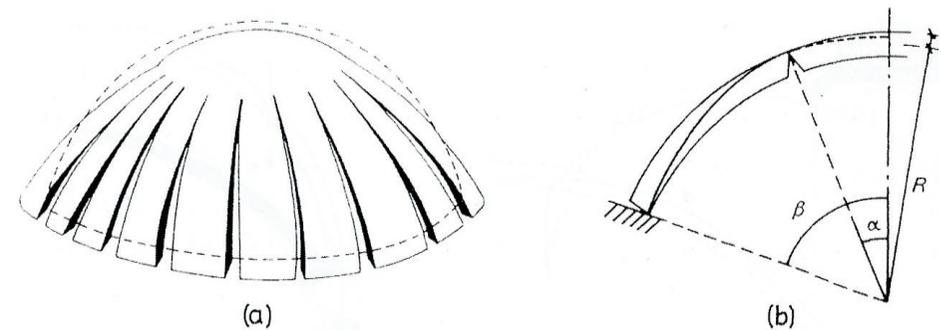


Figura 9.14. (a) Agrietamiento⁷⁴ de una cúpula de fábrica por un pequeño cedimiento uniforme del sistema de contrarresto. (b) Línea de empujes correspondiente; nótese que se hace tangente antes de llegar a la clave, permaneciendo sin agrietar el casquete superior. (Heyman 1988)⁷⁵. (HUERTA, (2004) pág.447).

⁷⁴ Esta interpretación de los agrietamientos en base a los cedimientos del sistema de contrarresto se remonta a los tres mattematici Le Seur, Jacquier y Boscovich (1742) que se verá con detenimiento en el estudio de cúpulas históricas estudiadas mediante el cálculo científico. De nuevo, ha sido Heyman (1988) quien ha incorporado de forma rigurosa el estudio de las grietas dentro del análisis límite de estructuras de fábrica.

⁷⁵ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.447

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Si el problema es simétrico, los cedimientos serán iguales en todas las direcciones y como consecuencia de ello, la circunferencia de la base aumentará de longitud. Así, la cúpula tiende a agrietarse para adaptarse al movimiento y se forman grietas meridianas como aparece en la figura 14. En una cúpula sin linterna, las grietas mueren a cierta distancia de la clave dejando un casquete sin agrietar. En la zona agrietada, la cúpula está compuesta, ahora sí físicamente por un sistema de arcos.

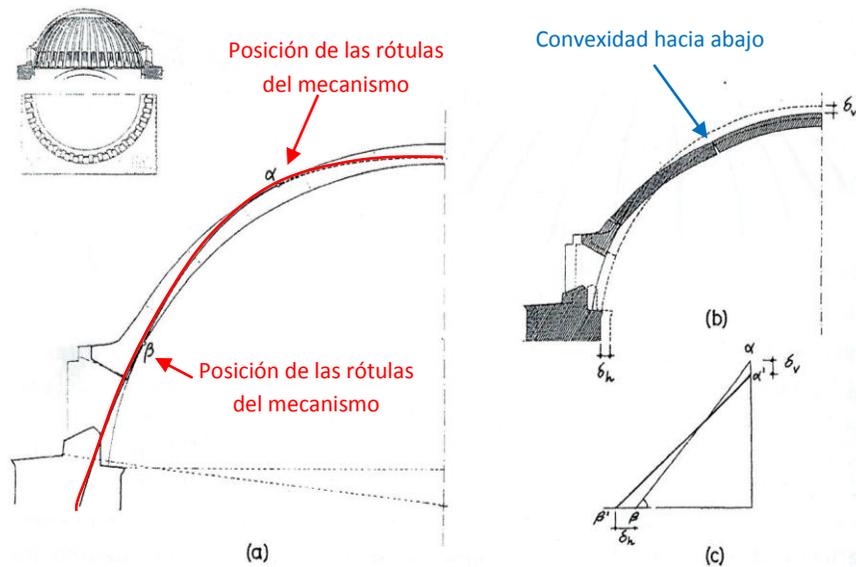


Figura 9.15. Estudio de un cedimiento simétrico del sistema de contrarresto en la cúpula de Santa Sofía. (a) Dibujo de la línea de empuje mínimo que determina la posición de las rótulas del mecanismo; (b) representación del movimiento correspondiente, se puede apreciar una cierta convexidad hacia abajo en la zona de la primera rótula; (c) relación geométrica ante la apertura radial δh y el descenso vertical δv del casquete de la clave⁷⁶. (HUERTA, (2004) pág.448).

⁷⁶ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.448

Este comportamiento lleva consigo su correspondiente respuesta en forma de desplazamientos. El análisis podría permitir relacionar los desplazamientos verticales y horizontales, para el caso de un movimiento simétrico.

Hay que tener en cuenta que la situación de agrietamiento corresponde a un empuje de la cúpula que es el mínimo y que se puede calcular. Y que este empuje mínimo será el que defina una línea de empujes que si resulta que queda tangente a los contornos del trasdós y del intradós del espesor de la cúpula me estaría señalando la posición de las posibles rótulas que podrían producir el colapso.

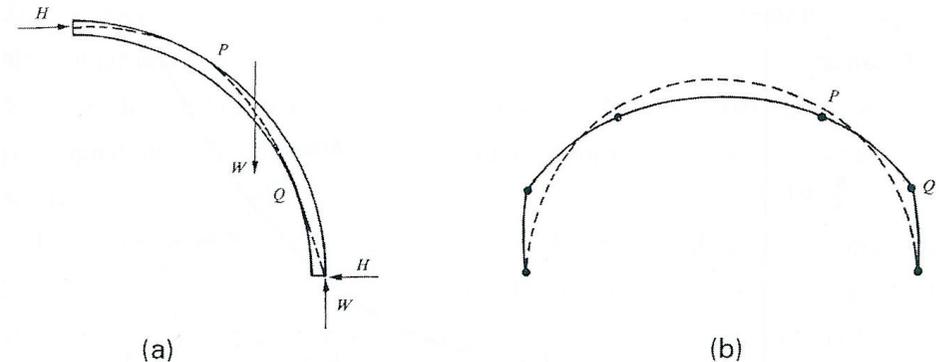


Figura 9.16. (a) Espesor límite de una cúpula semiesférica; la superficie de empujes está contenida justo dentro del dominio definido por las superficies de intradós y trasdós. Nótese que, a diferencia de los arcos, la línea de empujes no toca el borde en la clave. (b) Mecanismo de colapso asociado; el casquete por encima de P permanece sin agrietar. (Heyman 1977). (HUERTA, (2004) pág.449).

El cálculo correcto del espesor límite de una cúpula semiesférica será determinante para estar del lado de la seguridad estableciendo la relación entre ese espesor real y el espesor límite. El primero que hizo este cálculo fue el profesor Heyman (1967a).

9.4 Estudio de la línea de empujes en cúpulas históricas.

Antes de hacer el estudio de la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío por el método de los cortes vamos a revisar varios ejemplos que se han realizado en cúpulas históricas. Al final del documento se presentan una recopilación de estas cúpulas junto con otras de interés por sus dimensiones, materiales y época de ejecución.

San Pedro de Roma XVII (42.59m)

Es el primer estudio del comportamiento estructural de una cúpula (1748) que se realiza, aplicando un análisis límite⁷⁷.

Poleni comienza el informe con una completa revisión del estado de conocimientos, (La Hire -1712, Stirling-1717, Couplet- 1729), sobre el arco invertido en la construcción de fábrica donde se establece de forma clara que para que la fábrica sea estable la línea de empujes esté contenida dentro de la fábrica. Así demostró que la cúpula de San Pedro era segura en el estado agrietado.

Observó que las grietas ya habían dividido la cúpula en sectores parecidos a husos esféricos (gajos de naranja) por lo que para realizar su análisis dividió hipotéticamente la cúpula en 50 de esos gajos y procedió entonces a considerar el equilibrio de un arco completo prácticamente bidimensional formado por ese gajo y su opuesto. El objetivo básico de Poleni era mostrar que podría encontrarse una línea de empujes para dicho arco, que actuase siempre en su interior. Esto demostraría

entonces que la cúpula divide en gajos era segura, y que también lo sería la cúpula completa, agrietada o no. Poleni hizo esta demostración experimentalmente.

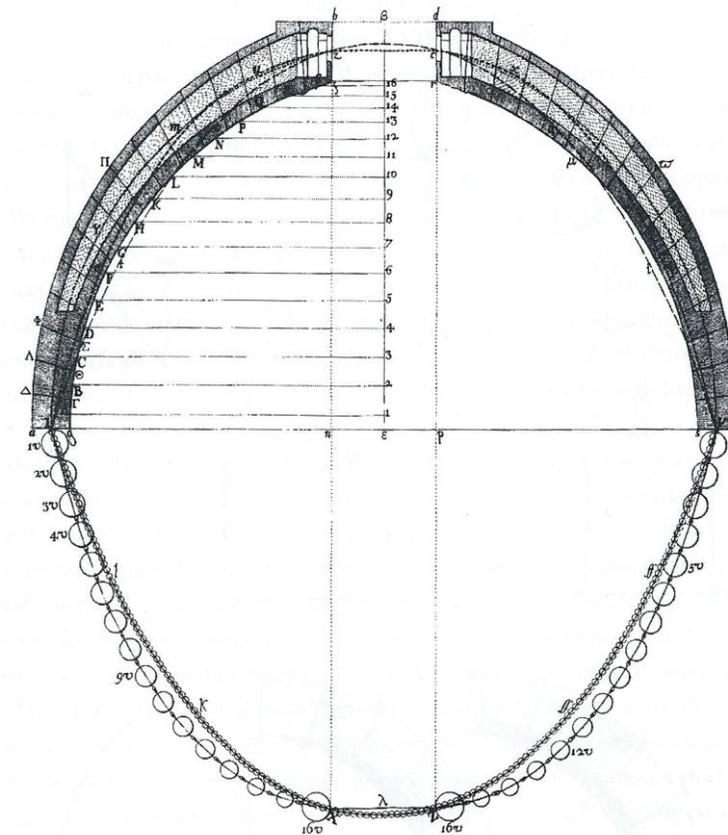


Figura 9.17.⁷⁸ Estudio de la Cúpula de San Pedro de Roma. Poleni (1748). (HEYMAN, (1995) pág.46).

⁷⁷ La cúpula había presentado daños desde durante se construcción en los arcos torales, a lo largo del XVI, pero será en el XVII cuando aparecen en la cúpula. Algunos, como Baldinucci (historiador del arte 1624-1697), sabían que se producían daños de este tipo en todas las cúpulas debidos al asiento de la fábrica al fraguar el mortero. Pero el problema se agravó, motivando las nuevas inspecciones en la cúpula y la publicación, en 1694, de Il Tempio Vaticano e sua origine, de Carlo Fontana, en el que se reafirmaba la solidez del edificio. Documentado por LÓPEZ, Gema (2006) La estabilidad de la cúpula de S. Pedro: el informe de los tres matemáticos. <http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/10583/1/HC%2037.pdf>

⁷⁸ LÓPEZ, Gema M. (2006): *Poleni's Manuscripts about the Dome of Saint Peter's*. Second International Congress on Construction History, Queen's College, Cambridge University; 29/03-02/04/2006 <http://www.arct.cam.ac.uk/Downloads/ichs/vol-2-1957-1980-lopez.pdf>

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Partiendo de un dibujo⁷⁹ de la sección de la cúpula, figura 17, calculó el peso del arco seccionado; para ello dividió cada semiarco en 16 partes.

Entonces cargó un hilo flexible con 32 pesos desiguales, cada uno en proporción a la parte correspondiente del arco, teniendo en cuenta el peso de la linterna que reposa sobre el óculo de la cúpula.

Al invertir la cadena puede verse que está pasa realmente entre las superficies interior y exterior del arco; las otras líneas mostradas en el dibujo representan la línea media del arco, y la catenaria invertida de una cadena cargada uniformemente; ésta última sobrepasa ligeramente el intradós en el dibujo de Poleni (aunque con un ligero ajuste se puede hacer que pase por el interior de la fábrica).

Poleni llegó a la conclusión de que el agrietamiento observado no era crítico, pero estuvo de acuerdo con una recomendación anterior que proponía colocar más zunchos; la inclinación de la cadena colgante en los puntos de apoyo muestra inmediatamente que hay un empuje horizontal en el arco seccionado que debe ser contrarrestado de algún modo.

Durante las obras de reparación realizadas por Vanvitelli los zunchos existentes, en un dibujo de Fontana⁸⁰ (1694) queda claro su existencia, aparecieron rotos y la cúpula estuvo en pie sin su contribución. Los zunchos, muy probablemente, tenían la función de mantener la forma de la cúpula durante la construcción, en el periodo de lento fraguado de los morteros de cal.

Arquitectos con Vignola (1507-1573, residente en España desde 1567, y proyecta la Iglesia del Gesù-1568) y Wren (Miembro fundador de la Royal Society 1632-1723, y

⁷⁹ HEYMA, Jacques (1999): *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-89877-73-9 pág.44

⁸⁰ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.269.

proyecta la Catedral de San Pablo-1675-1710) no eran partidarios de confiar la estabilidad de la fábrica a la adición de zunchos ya que la forma geométrica debía ser estable sin ellos.

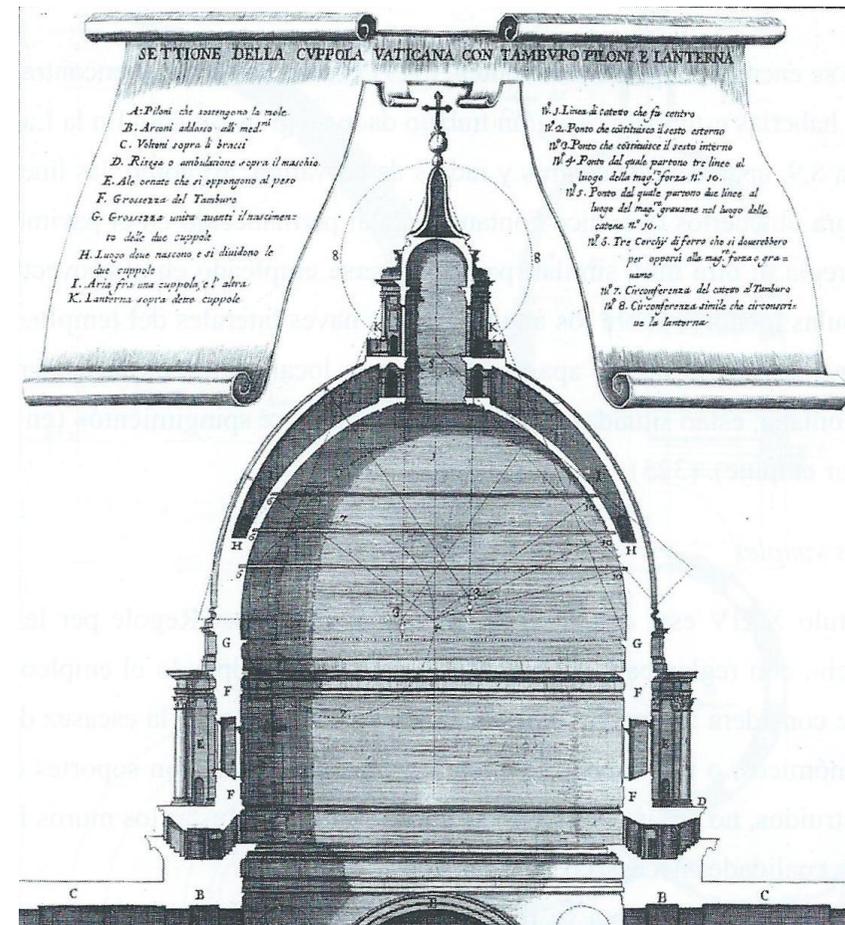


Figura 9.18. Regla geométrica para el perfil de las dos cáscaras de la cúpula de San Pedro. Fontana dice haber hallado esta traza grabada en el pavimento de la Basílica de San Paolo en Roma. Nótese que también se indica la situación de las cadenas de hierro. Fontana (1694). (HUERTA, (2004) pág.269).

Cúpula de Santa María del Fiore (41m).

Un ejemplo de cúpula de paños es Santa María del Fiore situada en Florencia, Italia perteneciente al siglo XV. Es un ejemplo donde se demuestra que el método de los cortes puede aplicarse a cúpulas de cualquier forma y la pericia del analista decidirá cuál es el estado de equilibrio más adecuado a sus propósitos.

En esta ocasión, Parsons (1939) también realizó un análisis de equilibrio mediante líneas de empujes.

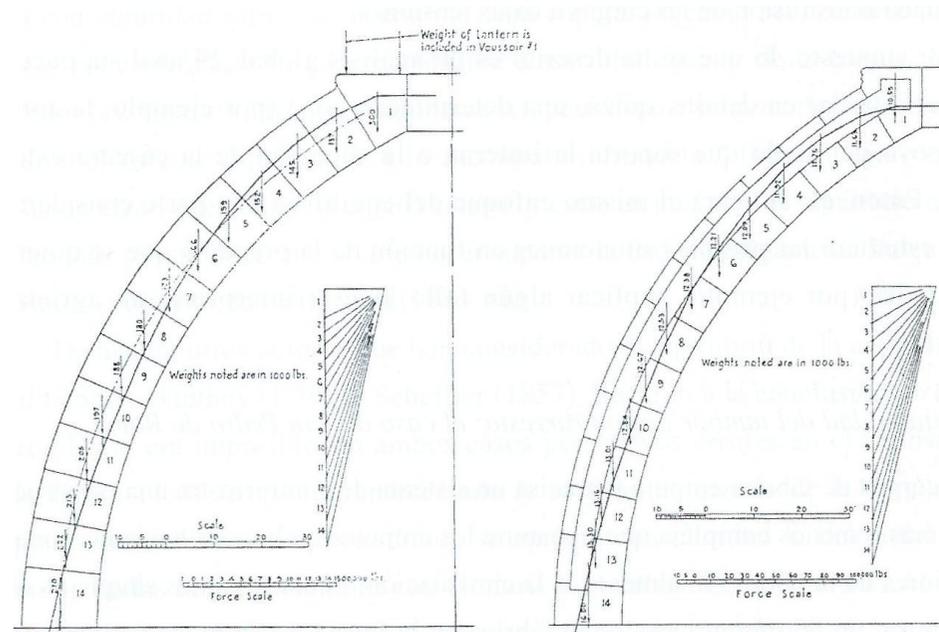


Figura 9.19. Línea de empujes en los nervios diagonales, que soportan todo el peso de linterna, y línea de empujes en la rebanada central del paño. (Parsons, 1939). (HUERTA, (2004) pág.453).

El resumen de este análisis está incluido en su libro donde plantea varias hipótesis:

- 1.- Teniendo en cuenta los nervios de las esquinas soportando todo el peso de la linterna.
- 2.- Considerando los paños entre nervios.

Como queda demostrado en la línea de empujes dibujado, se confirma que la cúpula tiene una forma correcta con la que transmite las cargas a bajas tensiones.

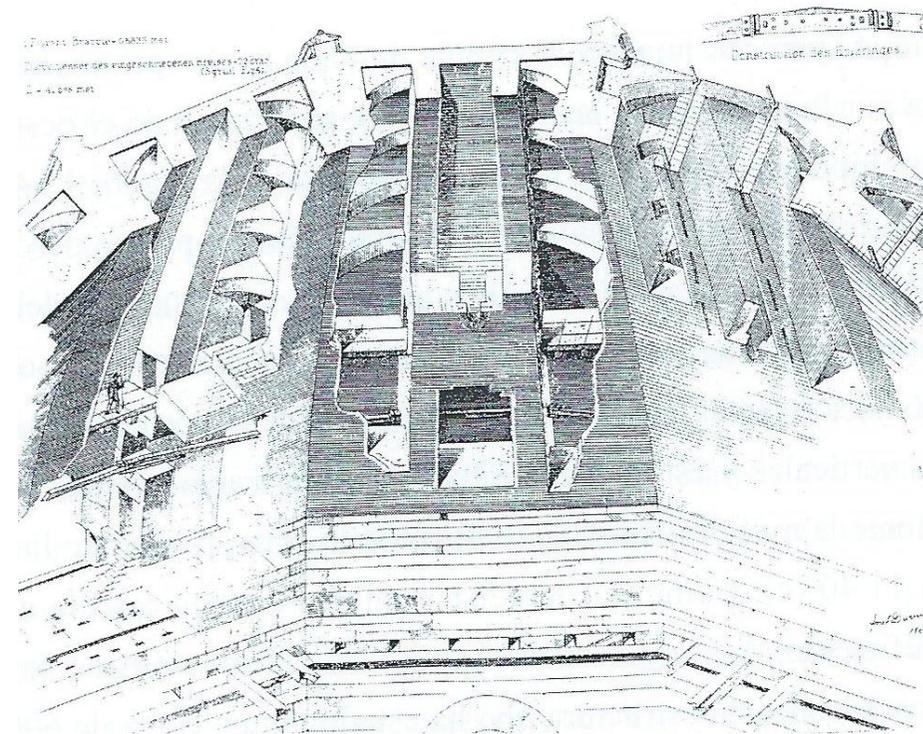


Figura 9.20. Cúpula de Santa María del Fiore, en Florencia. Sección constructiva de la cúpula, según Durm (1885). (HUERTA, (2004) pág.453).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Cúpula Gol Gumbaz (39m)

Como ejemplo de cúpula sin nervios es la cúpula Gol Gumbaz situada en Bijapur, India que es del siglo XVII como San Pedro de Roma. La cúpula también se ha analizado siguiendo el método de los cortes, dividiéndola en gajos y dovelas.

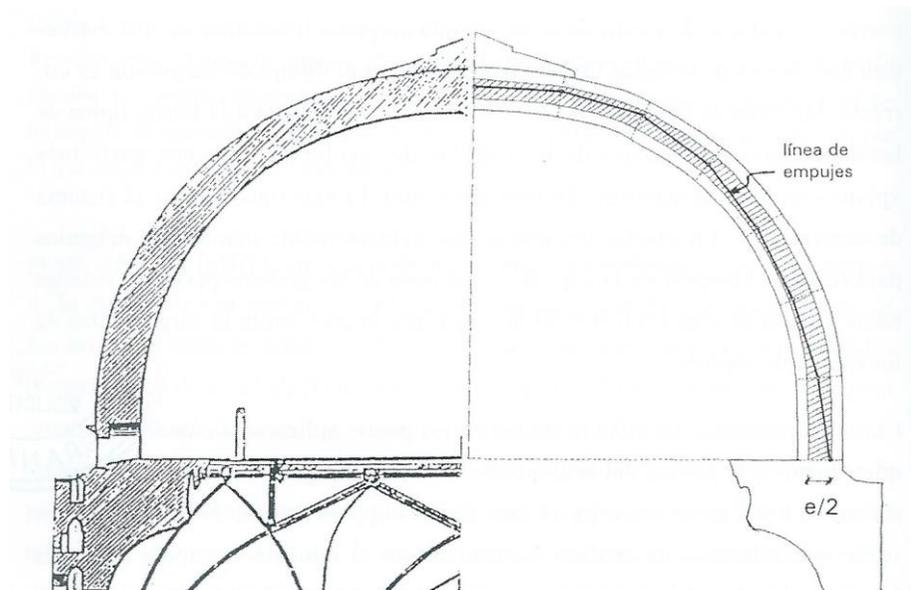


Figura 9.21. Análisis de equilibrio de la cúpula del Gol Gumbaz. (HUERTA, (2004) pág.452).

En esta ocasión, Fergusson (1859) también realizó un análisis de equilibrio mediante líneas de empujes.

Puede verse a simple vista que el coeficiente geométrico es mayor o igual que 2 ya que la línea de empujes está contenida confortablemente dentro de la mitad central.

Nótese que la forma no es semiesférica sino que se adapta a la forma de la cúpula "ideal" catenaria.

En la planta y la sección se puede ver el sistema de contrarresto: son las pechinas interiores voladas y las torres las que equilibran el empuje de la cúpula.

En esta estructura lo más inusitado es el sistema de contrarresto, ya que los muros son demasiado delgados para resistir el empuje de la cúpula y es el peso de las grandes pechinas voladas hacia el interior y de las torres de las esquinas, lo que centra la carga dentro del muro de soporte.

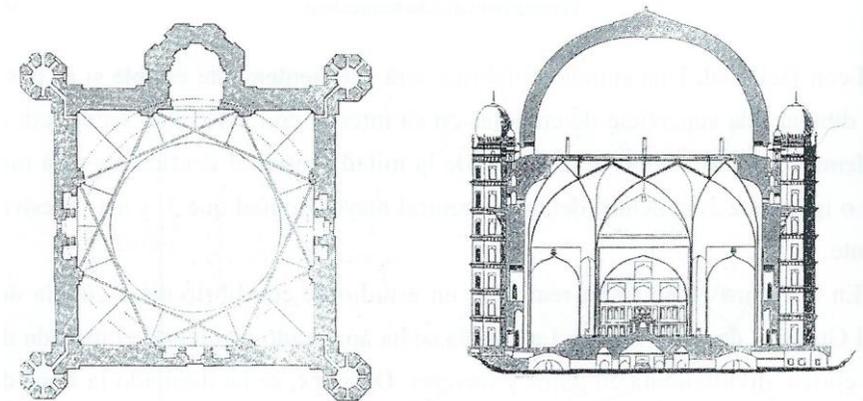


Figura 9.22. Planta y sección que permiten ver el sistema de contrarresto: son las pechinas interiores voladas y las torres las que equilibran el empuje de la cúpula. (Fergusson, 1859). (HUERTA, (2004) pág.452).

Las formas de las catenarias para un arco y una cúpula sin linterna son muy distintas:

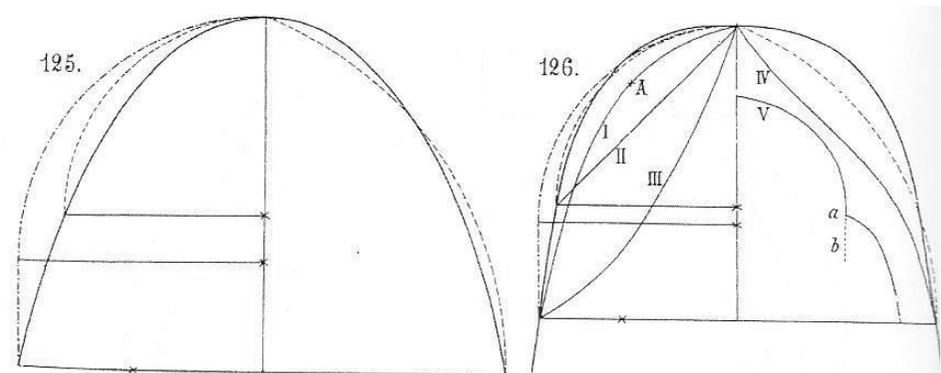


Figura 9.23. Formas catenarias de arcos (izquierda) y cúpulas. Nótese que en el segundo caso la forma se acerca mucho más a la circular y en las dos figuras se ha realizado esta comparación, con y sin peralte. (Ungewitter, 1890) (HUERTA, (2004) pág. 444)

Cúpula idealizada según la regla de Fontana (1638-1714).

Por último se ha recogido el comportamiento estructural de la cúpula idealizada con la regla para el proyecto de cúpulas de Fontana realizado por Santiago Huerta en su libro "Arcos, bóvedas y cúpulas" (2004). El problema del proyecto de cúpulas, consiste principalmente en darles un contrarresto adecuado.

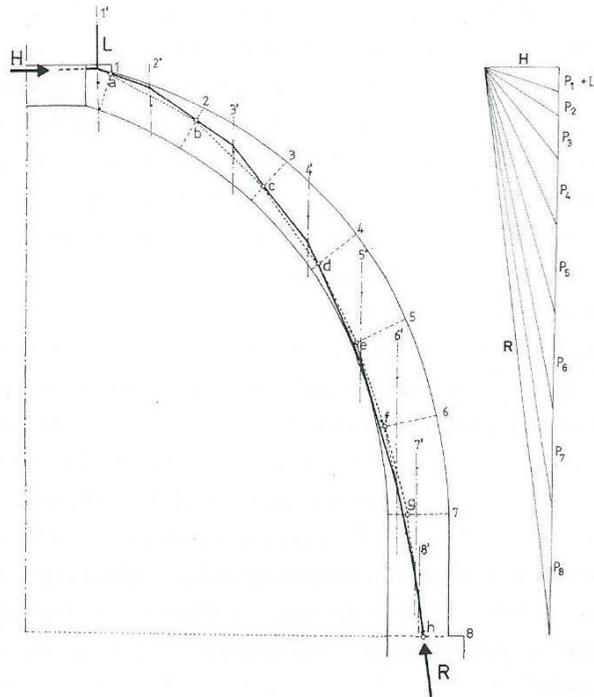


Figura 9.24. Análisis gráfico de una cúpula de revolución, que sigue la regla de Fontana, por el método de los cortes. La cúpula se ha dividido en gajos y cada gajo en "dovelas" cortando por los planos 1,2,3, etc. Se ha dividido el antifunicular de los pesos de las dovelas en línea gruesa; los puntos de la línea de empujes (a, b, c, etc.) se obtienen de la intersección de los lados del polígono con los planos correspondientes. (HUERTA, (2004) pág. 445)

La primera evidencia documental de una regla de este tipo aparece en el siglo XVII por el arquitecto Carlo Fontana, estudiado en el capítulo dedicado a la traza del

templo. Fontana fue quien midió y comparó las proporciones de los tambores de varias cúpulas construidas, y llegó a la conclusión de que el tambor debía tener 1/10 de la luz. Además suministró una construcción geométrica que definía la forma completa de la cúpula como se ha estudiado en el capítulo de la traza del templo.

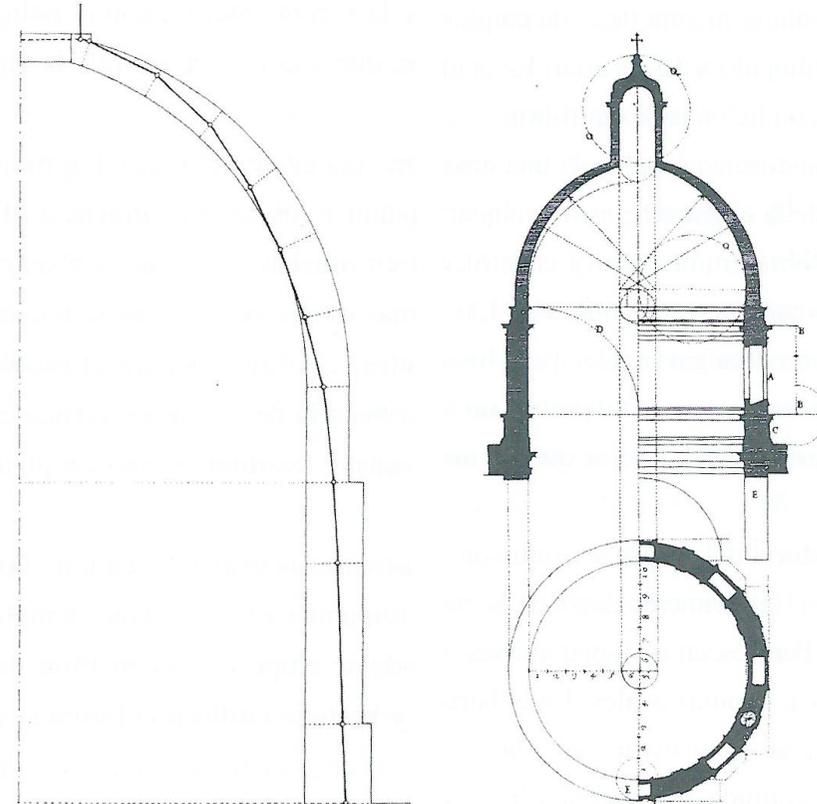


Figura 9.25. Verificación de la regla de Fontana (1694) para cúpulas. (a) línea de empuje mínimo; (b) dibujo original, en sección y planta, de la regla. (HUERTA, (2004) pág.461).

El análisis verifica la estabilidad de la cúpula en sí misma. Se ha supuesto el empuje mínimo y se aprecia que debido a la linterna, la línea de empujes no se hace tangente al trasdós sino que alcanza directamente el arranque; las grietas meridianas llegarían hasta el mismo óculo.

9.5. Estimación práctica del coeficiente geométrico de seguridad en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Método de los cortes.

Una vez nos hemos situado en el conocimiento del estudio del comportamiento estructural de las cúpulas vamos a exponer el resultado de la línea de empujes, según el método de los cortes⁸¹, en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío.

Verificaremos el teorema de la seguridad expuesto por el profesor Heyman y obtendremos el coeficiente de seguridad que le corresponde. Al final se plantearán una serie de conclusiones en relación a los resultados obtenidos.

9.5.1. Hipótesis.

A continuación se exponen las diferentes hipótesis que se han estudiado para encontrar una línea de empujes que quede dentro de la sección del gajo analizado.

Para la realización de cada hipótesis se ha distinguido entre cúpula y tambor (análogamente entre arco y estribo). Pero solo se va a estudiar la cúpula.

La primera decisión a la hora de abordar el trabajo fue el número de gajos en los que vamos a dividir la cúpula. Como referencia histórica tenemos la cúpula de San Pedro de Roma (42.59m) que Poleni dividió en 50 gajos. El enfoque de Poleni es correcto según el profesor Heyman y debido a que no existe otra referencia en los estudios de otras cúpulas históricas recopilados se ha tomado la decisión de dividir la cúpula de la iglesia de la Encarnación (27.95m) en 50 gajos para el estudio de su comportamiento estructural.

La siguiente decisión fue la subdivisión en “dovelas” que íbamos a hacer del gajo elegido. Se optó por subdividir en dovelas reales ya que la información fotográfica daba esa opción, aunque es posible hacerlo con “dovelas” que no coincidan con las juntas reales⁸².

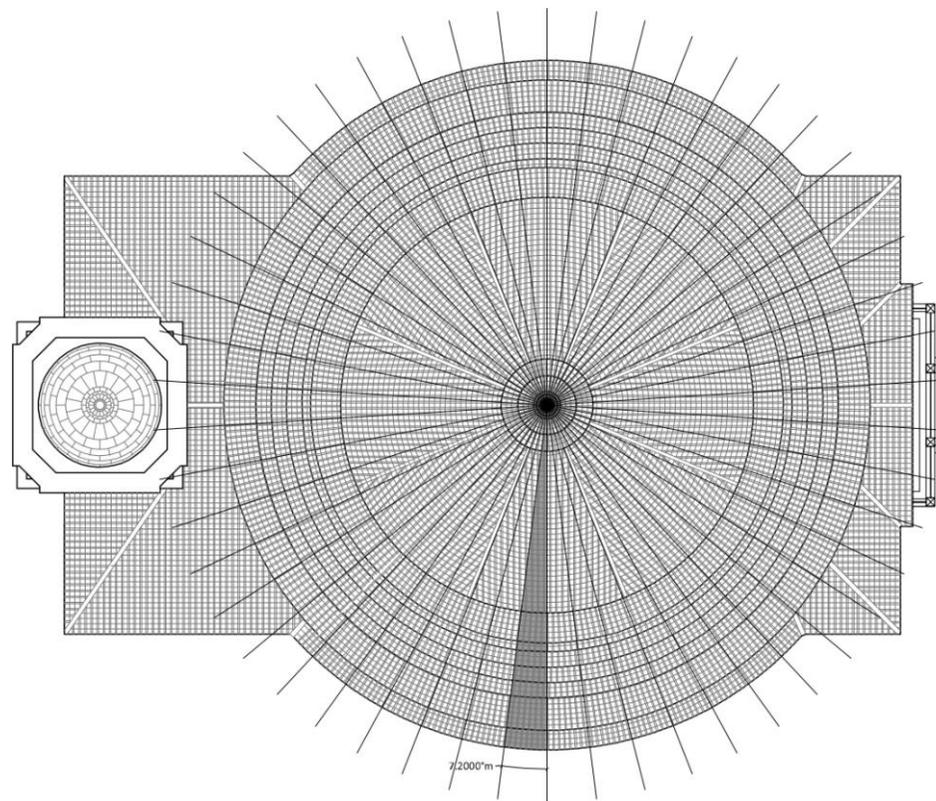


Figura 9.26. Gajo a estudiar. Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Elaboración propia.

⁸¹ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.442.

⁸² HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2 pág.435

La tercera decisión fue la de tomar como densidad aparente, 20.4 Kn/m^3 el valor obtenido en el laboratorio ya que se encuentra dentro del intervalo designado a este tipo de piedra, como se ha visto en el capítulo de la estereotomía.

Así se ha obtenido el peso de cada dovela aplicado en el respectivo c.d.g.

La cuarta decisión fue la de plantear el peso de las tejas como peso muerto sobre cada dovela, en el casquete superior, según se recoge en la figura 27 (a) (superior).

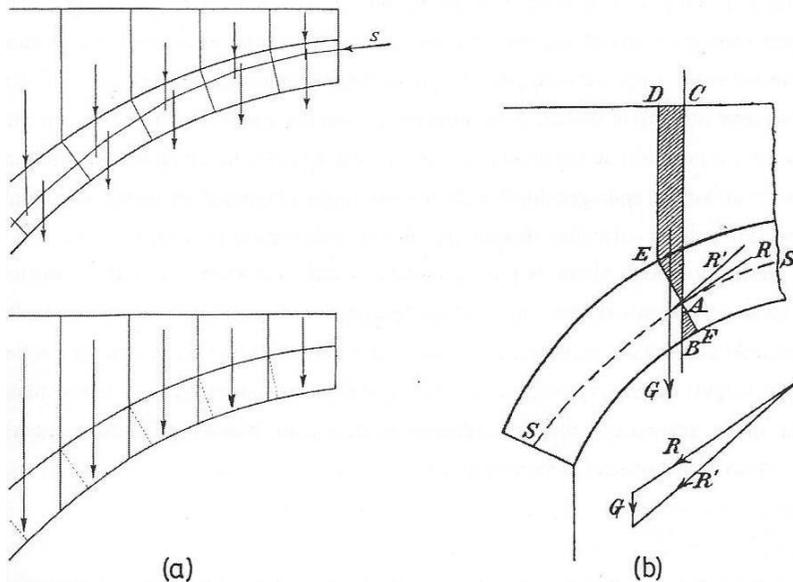


Figura 27. Arco trasdosado con un relleno. (a) Dos sistemas de planos de corte. El sistema de planos de corte verticales para arco y relleno simplifica notablemente los cálculos. (b) Cálculo del empuje en una cierta junta normal al intradós, a partir del empuje para planos de corte verticales. (Föppl, 1903) (HUERTA, (2004) pág.57,59)

De esta manera se ha adoptado la hipótesis de la acción del relleno como acción vertical.

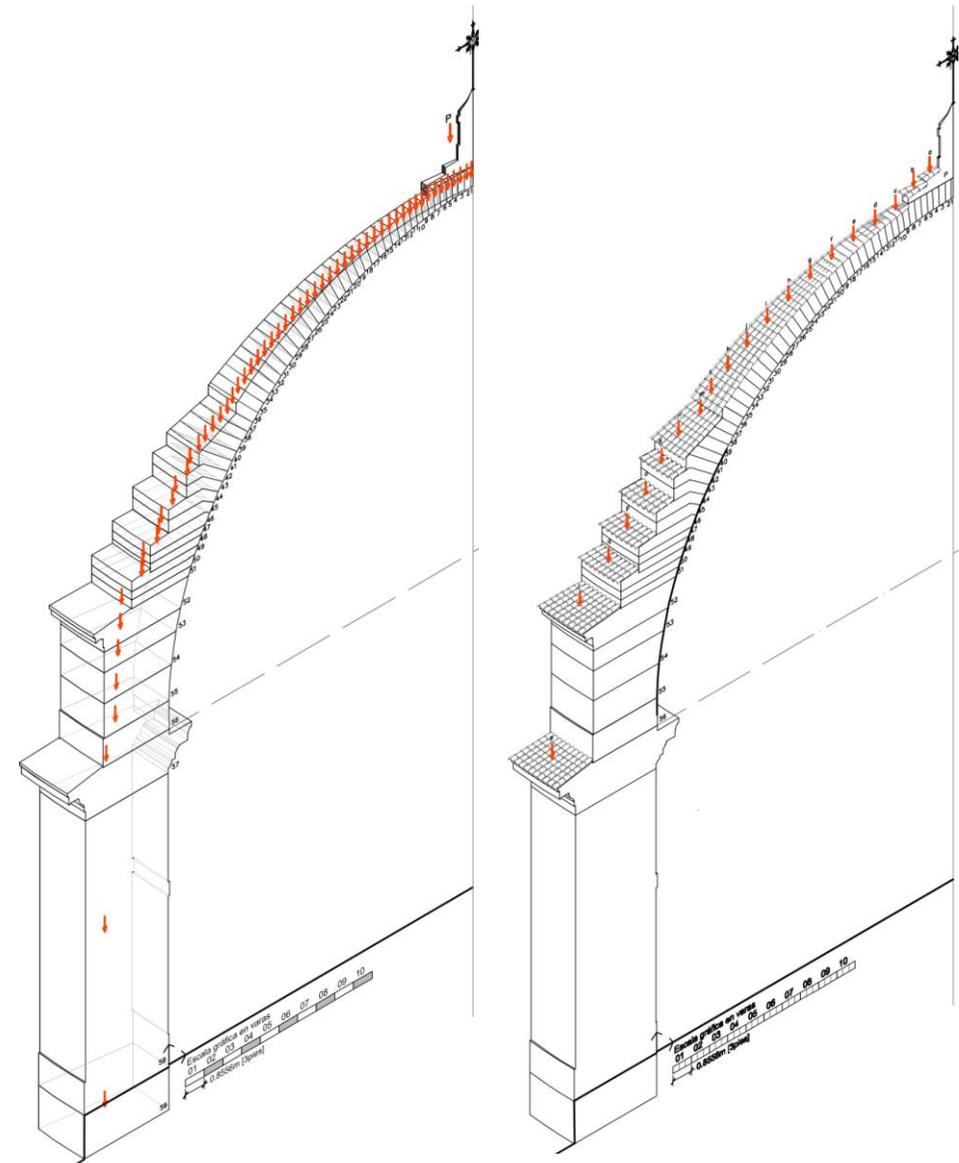


Figura 9.28. Descomposición en dovelas y peso propio en cada c.d.g. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Resumen de los cálculos realizados:

Dovela	Densidad (KN/m ³)	V(m ³)	P(KN)	Centro de Gravedad		
				Xg	Yg	Zg
1	20,400	0,001	0,012	13,868	0,005	27,982
2	20,400	0,007	0,137	13,671	0,017	27,988
3	20,400	0,016	0,330	13,395	0,034	27,986
4	20,400	0,024	0,479	13,112	0,052	27,978
P	20,400	0,161	3,291	12,948	0,063	29,030
a	20,000	0,024	0,480	12,890	0,053	29,112
5	20,400	0,030	0,614	12,844	0,069	27,972
6	20,400	0,041	0,832	12,574	0,086	27,961
7	20,400	0,054	1,095	12,289	0,104	27,948
b	20,000	0,025	0,504	12,172	0,116	28,841
8	20,400	0,064	1,312	12,001	0,122	27,930
9	20,400	0,061	1,240	11,733	0,139	27,833
10	20,400	0,064	1,306	11,474	0,155	27,794
c	20,000	0,020	0,401	11,377	0,163	28,270
11	20,400	0,077	1,561	11,213	0,172	27,750
12	20,400	0,092	1,881	10,933	0,189	27,697
13	20,400	0,105	2,150	10,638	0,208	27,636
d	20,000	0,032	0,642	10,469	0,210	28,107
14	20,400	0,127	2,589	10,326	0,228	27,565
15	20,400	0,137	2,797	10,007	0,248	27,485
16	20,400	0,157	3,199	9,685	0,268	27,397
e	20,000	0,063	1,268	9,515	0,279	27,879
17	20,400	0,175	3,578	9,354	0,289	27,298
18	20,400	0,188	3,825	9,025	0,309	27,192
19	20,400	0,191	3,888	8,712	0,329	27,084
f	20,000	0,092	1,830	8,554	0,338	27,591
20	20,400	0,213	4,349	8,404	0,348	26,970
21	20,400	0,240	4,904	8,085	0,369	26,844
22	20,400	0,262	5,339	7,761	0,389	26,707
g	20,000	0,094	1,878	7,594	0,399	27,240
23	20,400	0,288	5,881	7,433	0,410	26,560
24	20,400	0,305	6,230	7,108	0,430	26,404
25	20,400	0,329	6,705	6,787	0,450	26,242
h	20,000	0,094	1,878	6,634	0,461	26,821
26	20,400	0,337	6,865	6,475	0,470	26,075
27	20,400	0,382	7,787	6,164	0,489	25,899
28	20,400	0,418	8,521	5,844	0,510	25,707
i	20,000	0,121	2,424	5,700	0,500	26,343
29	20,400	0,418	8,535	5,533	0,529	25,514

Tabla 9.1. Resultado de los distintos pesos de la dovelas y de los sectores de tejas considerados para el análisis límite de la cúpula de la iglesia⁸³.

30	20,400	0,437	8,905	5,241	0,547	25,31
31	20,400	0,494	10,078	4,941	0,566	25,11
j	20,000	0,121	2,424	4,797	0,576	25,81
32	20,400	0,488	9,963	4,653	0,584	24,89
33	20,400	0,565	11,524	4,360	0,603	24,67
34	20,400	0,567	11,575	4,073	0,621	24,43
k	20,000	0,121	2,424	3,954	0,630	25,23
35	20,400	0,625	12,754	3,789	0,639	24,20
36	20,400	0,588	11,991	3,553	0,654	23,92
37	20,400	0,531	10,834	3,331	0,668	23,61
l	20,000	0,121	2,424	3,213	0,675	24,67
38	20,400	0,620	12,640	3,030	0,687	23,41
m	20,000	0,119	2,385	2,731	0,697	24,02
39	20,400	0,873	17,809	2,701	0,707	23,19
40	20,400	0,856	17,460	2,372	0,728	22,97
41	20,400	1,072	21,875	2,097	0,745	22,72
n	20,000	0,119	2,385	1,766	0,760	23,61
42	20,400	1,291	26,340	1,714	0,769	22,39
43	20,400	1,150	23,452	1,599	0,777	21,98
44	20,400	1,628	33,201	1,086	0,809	21,58
ñ	20,000	0,063	1,266	1,012	0,810	22,86
45	20,400	1,574	32,101	0,966	0,816	21,13
46	20,400	2,079	42,403	0,478	0,847	20,66
47	20,400	1,310	26,724	0,370	0,854	20,26
o	20,000	0,096	1,914	0,312	0,855	21,84
48	20,400	1,265	25,806	0,293	0,859	19,94
50	20,400	1,645	33,560	-0,297	0,896	19,28
49	20,400	1,972	40,237	-0,328	0,898	19,63
51	20,400	1,618	33,013	-0,367	0,900	18,94
p	20,000	0,110	2,202	-0,516	0,926	20,93
52	20,400	7,864	160,428	-1,239	0,955	18,24
53	20,400	5,233	106,747	-1,292	0,958	17,29
q	20,000	0,125	2,508	-1,333	0,941	19,94
54	20,400	7,398	150,925	-1,392	0,965	16,28
55	20,400	7,928	161,721	-1,467	0,969	14,99
56	20,400	6,614	134,922	-1,509	0,972	13,75
57	20,400	15,476	315,706	-1,903	0,997	12,37
58	20,400	87,578	1786,589	-1,963	1,001	5,691
59	20,400	13,216	269,615	-1,972	1,001	-0,92
r	20,000	0,295	5,892	-2,603	1,023	18,78
s	20,000	0,326	6,528	-3,839	1,107	13,17
		Peso 1-56	1321,459	0,497	0,852	18,95
		Peso 1-27	93,058	8,625	0,362	26,74
		Peso 1-28	101,579	8,391	0,355	26,80
		Peso casquete a 25º (1-21)	50,49460	7,9135		
		Peso debajo del casqueta de 25º (22-56)	1270,965	0,1162		
		Peso (22-28) + Casquete/2	101,579	7,3194		
		Peso pináculo + (1-8)	9,0869	11,8660		
		Peso pináculo + (1-8) + (9-28)	101,579	8,3183		

⁸³ Densidad de la teja cerámica: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=22>

El estudio lo compone el equilibrio de las fuerzas:

El Peso resultante de las “dovelas” ha de ser equilibrado por el Empuje y la Reacción.

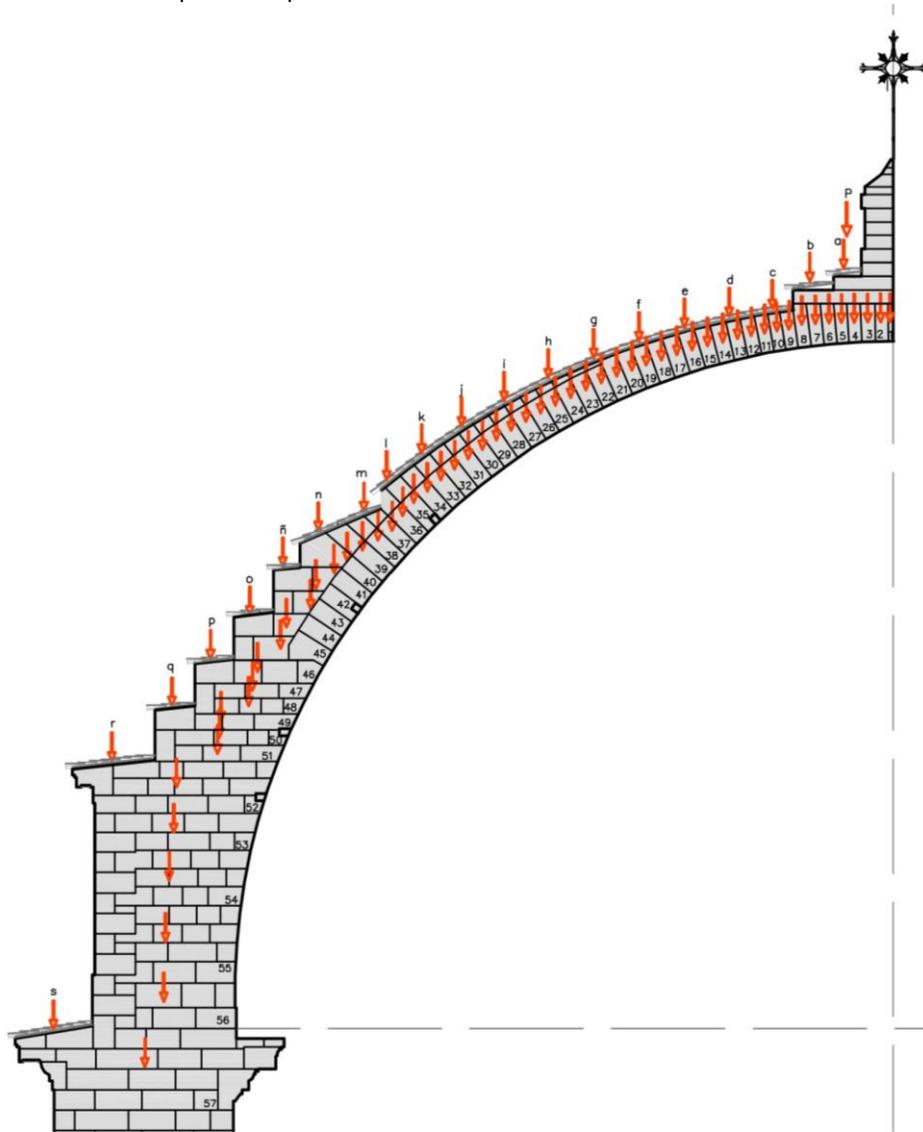


Figura 9.29. Pesos de las dovelas y de las piezas cerámicas que forman el tablero de cubrición.

Elaboración propia.

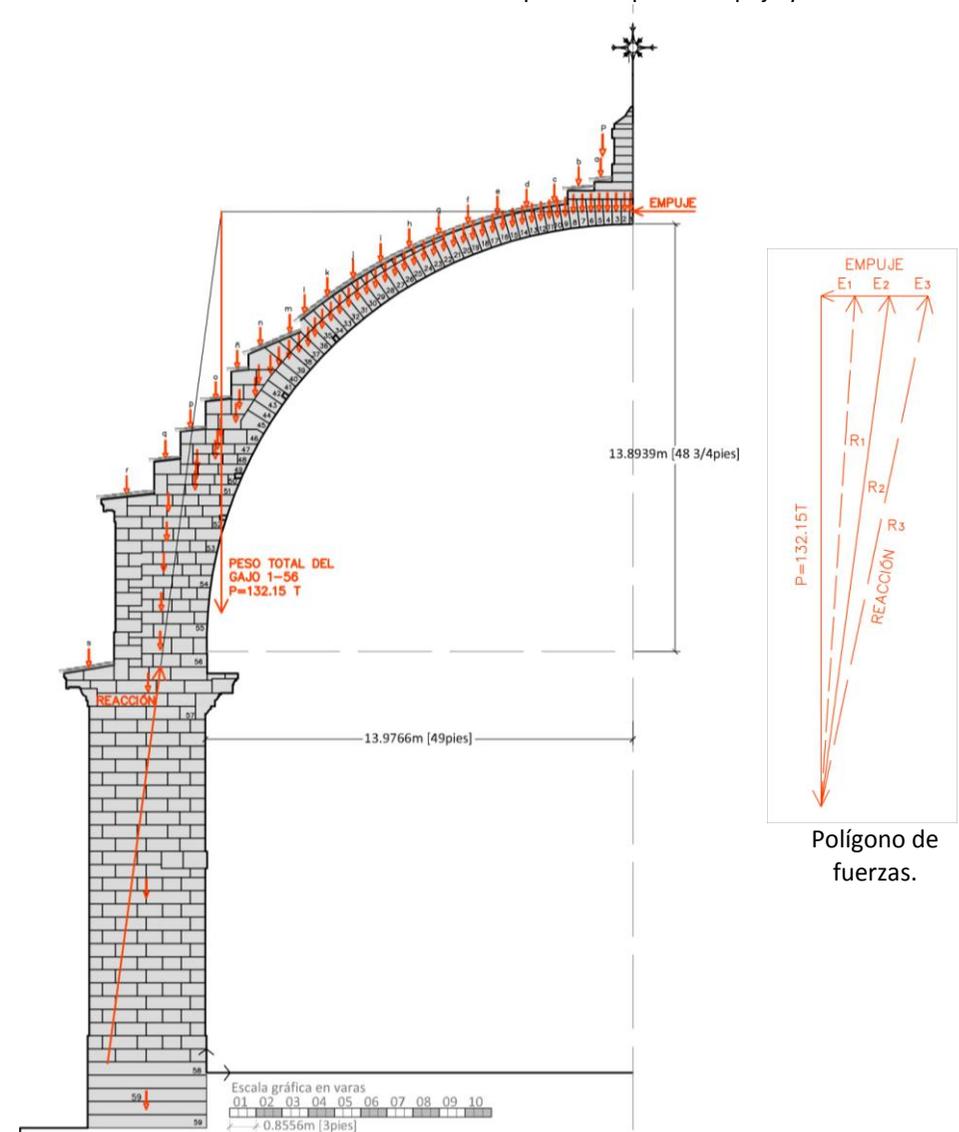


Figura 9.30. Distintos valores para el Empuje y la Reacción con el mismo Peso total de las dovelas.

Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

La construcción del polígono antifunicular se ha hecho de la siguiente manera:

Teniendo fijadas las premisas anteriores donde el dato del peso total es conocido, se ha compuesto el equilibrio de fuerzas por la intersección de las líneas de acción del peso total del semiarco, aplicado en el centro de gravedad del semiarco, con las del empuje, aplicado en diferentes posiciones según la hipótesis a estudiar, y la reacción aplicada en diferentes posiciones del arranque de la cúpula según la hipótesis a estudiar.

La magnitud del peso total es conocida, la magnitud del Empuje y la Reacción se obtienen por equilibrio de fuerzas según la hipótesis de colocación del empuje y la reacción.

A continuación se exponen las distintas hipótesis consideradas. A partir del peso de las dovelas, y del peso total del semiarco, para distintas situaciones del empuje E y de la reacción del tambor, se ha calculado gráficamente la posición de la línea de empujes, tratando de encontrar una situación de equilibrio, en la que la misma esté contenida en su totalidad en la sección de la fábrica, con la mayor seguridad geométrica posible.

Para ello vamos a realizar una secuencia de hipótesis empezando por comprobar si existe una línea de empujes que verifique un coeficiente de seguridad 3, 2...y así sucesivamente.

Hipótesis 1: Cúpula deformada.

- 1.- Se ha considerado el Peso del gajo correspondiente a las dovelas 1 - 56 que son las que componen la cúpula. En este caso hemos considerado el peso de la piedra estructural y del faldón de tejas que forma la cubrición.
- 2.- Se ha colocado el Empuje en el centro de la clave.
- 3.- Se ha considerado la Resultante que equilibra ambas fuerzas anteriores en el centro de la dovela 56.

De la intersección de las líneas de acción de estas fuerzas se construye el polígono de fuerzas que nos dará la línea de empujes correspondiente a las posiciones de E y R consideradas en esta hipótesis.

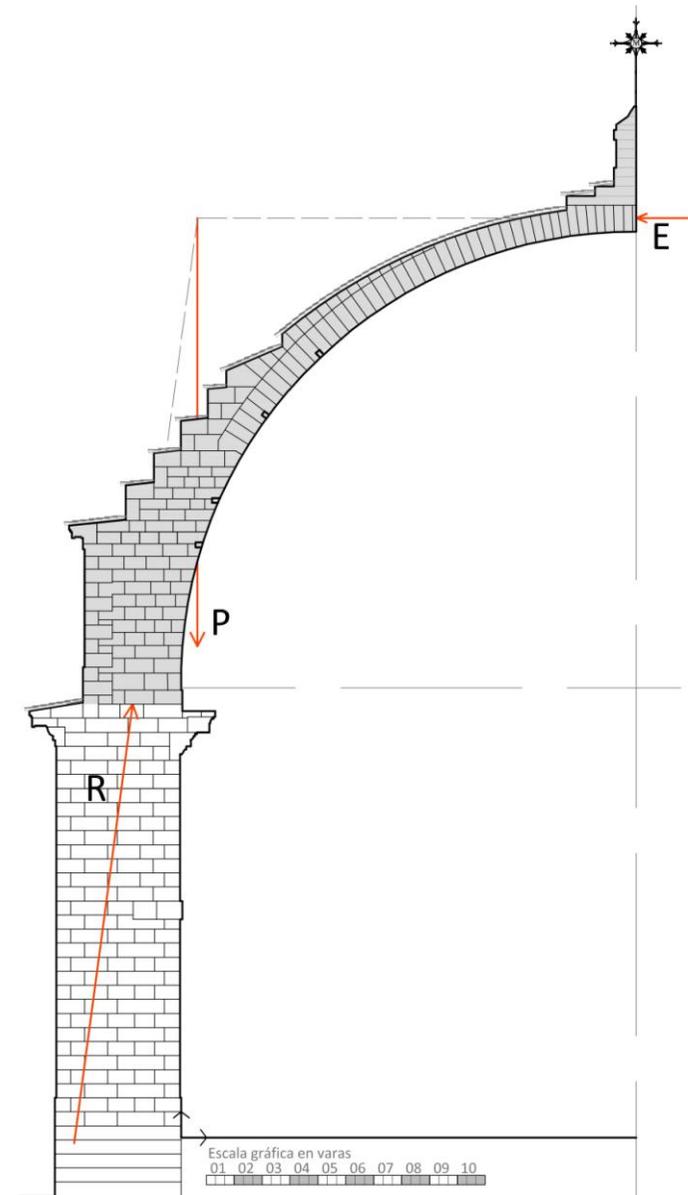
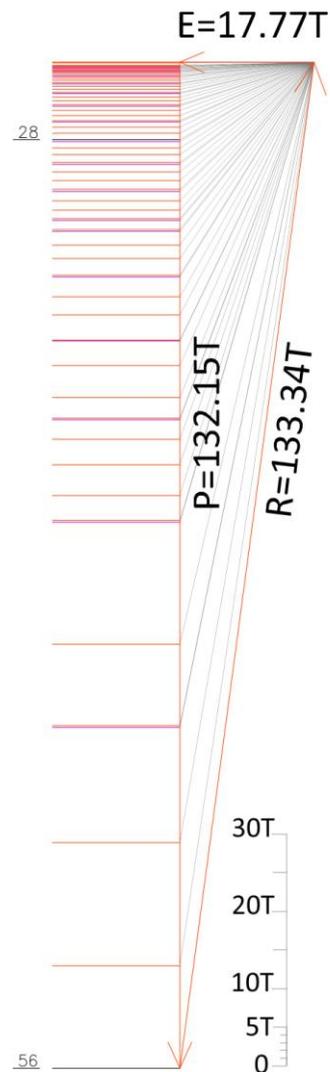


Figura 9.31. Hipótesis 1. Elaboración propia.

Polígono de fuerzas para la hipótesis 1.



En rojo están representados los distintos pesos de las dovelas.

En morado están representados los pesos del tablero cerámico de cubrición.

En gris están representadas las resultantes. Estas resultantes formarán la línea de empujes correspondiente a esta hipótesis 1.

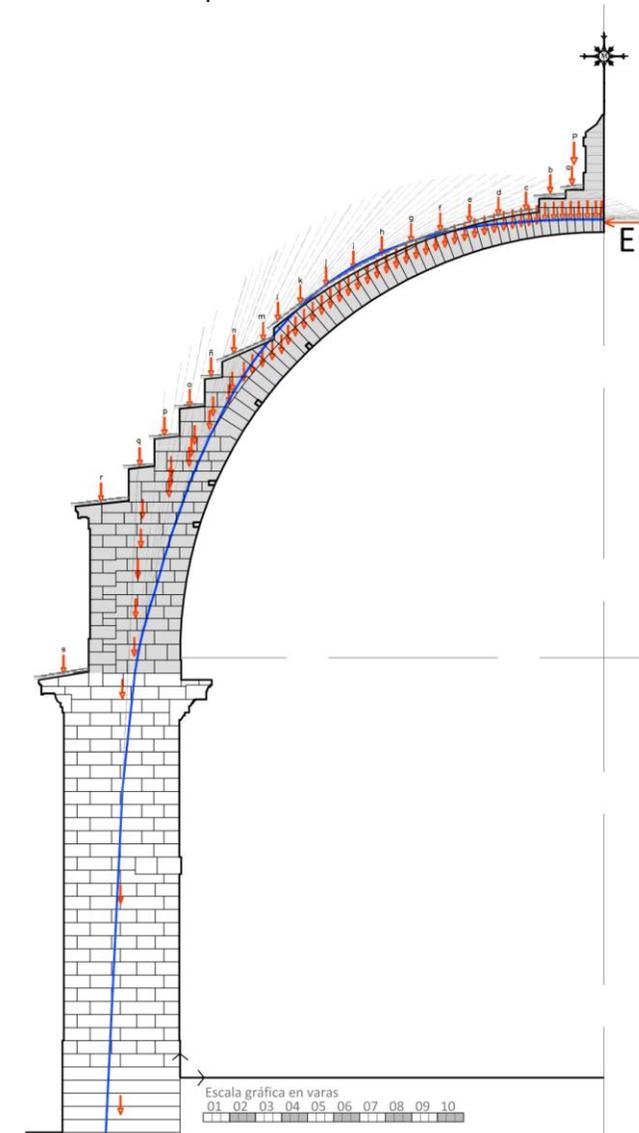
La construcción de la línea de empujes empieza en la posición del empuje en la clave. Donde se produce la intersección entre la línea de acción del Empuje y la línea de acción del peso propio de la primera dovela será por donde trazaremos una paralela a la primera resultante que nos aporta el polígono de fuerzas de la izquierda con la inclinación dada.

Se continúa obteniendo la intersección de la línea de acción de esta primera resultante, con la inclinación dada por el polígono de fuerzas, con la línea de acción del peso propio de la segunda dovela.

Y así sucesivamente hasta completar la dovela 56.

Figura 9.32. Polígono antifunicular para la hipótesis 1. Elaboración propia.

Como resultado queda:



Con el empuje y la reacción aplicados en el centro de la sección.

La línea de empujes se sitúa fuera de la sección de la fábrica en el trasdós entre las dovelas 27-28.

La hipótesis no es válida.

Figura 9.33. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 1.

Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

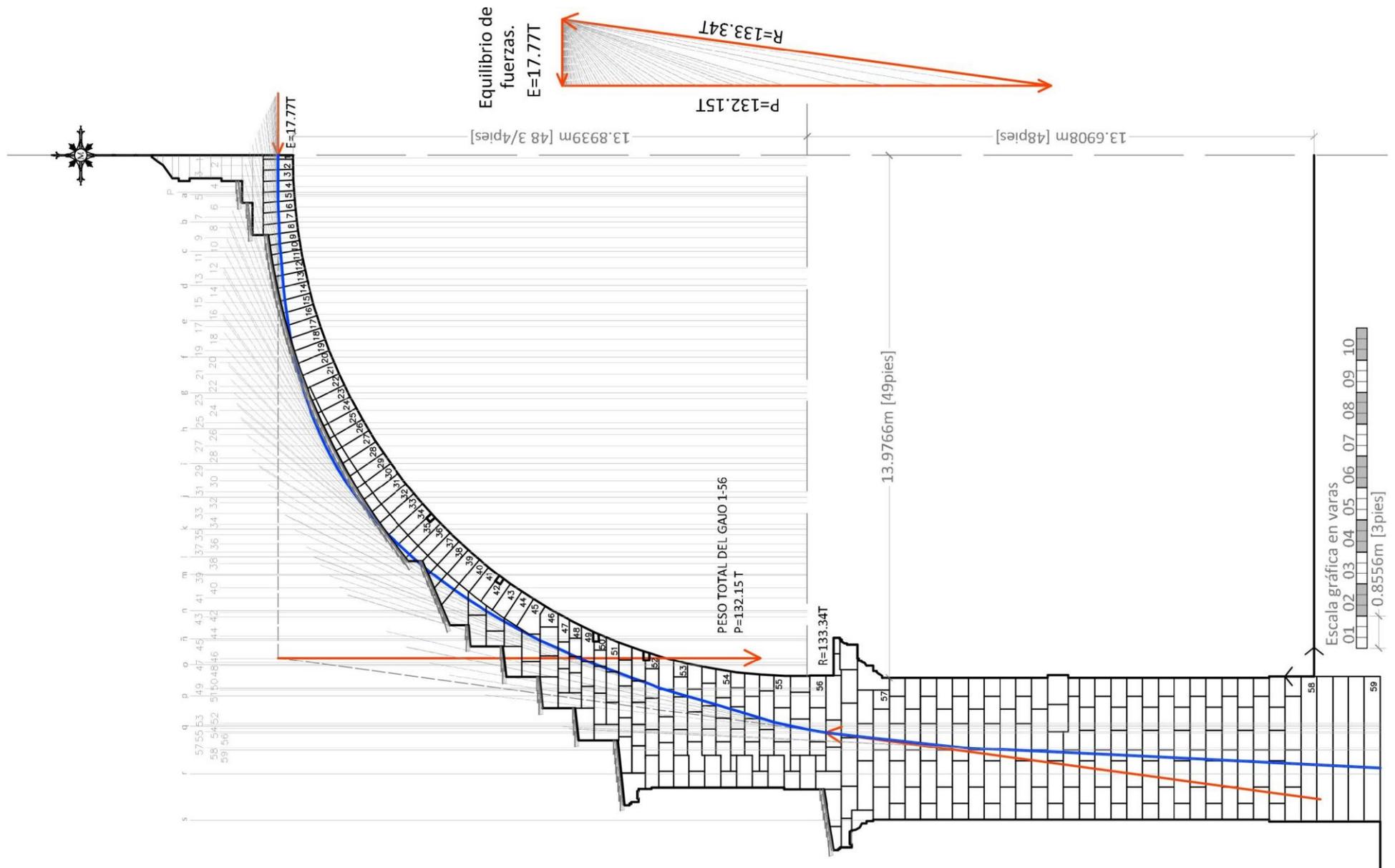


Figura 9.34. Hipótesis 1. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Hipótesis 2: Cúpula deformada.

1.- Se ha considerado el Peso del gajo correspondiente a las dovelas 1 - 56 que son las que componen la cúpula. En este caso hemos considerado el peso de la piedra estructural y del faldón de tejas que forma la cubrición.

2.- Se ha colocado el Empuje en el límite inferior del tercio central de la sección, es decir, hacia el intradós de la clave.

3.- Se ha considerado la Resultante que equilibra ambas fuerzas anteriores en el límite superior del tercio central, hacia el trasdós de la dovela 56.

De la intersección de las líneas de acción de estas fuerzas se construye el polígono de fuerzas que nos dará la línea de empujes correspondiente a las posiciones de E y R consideradas en esta hipótesis.

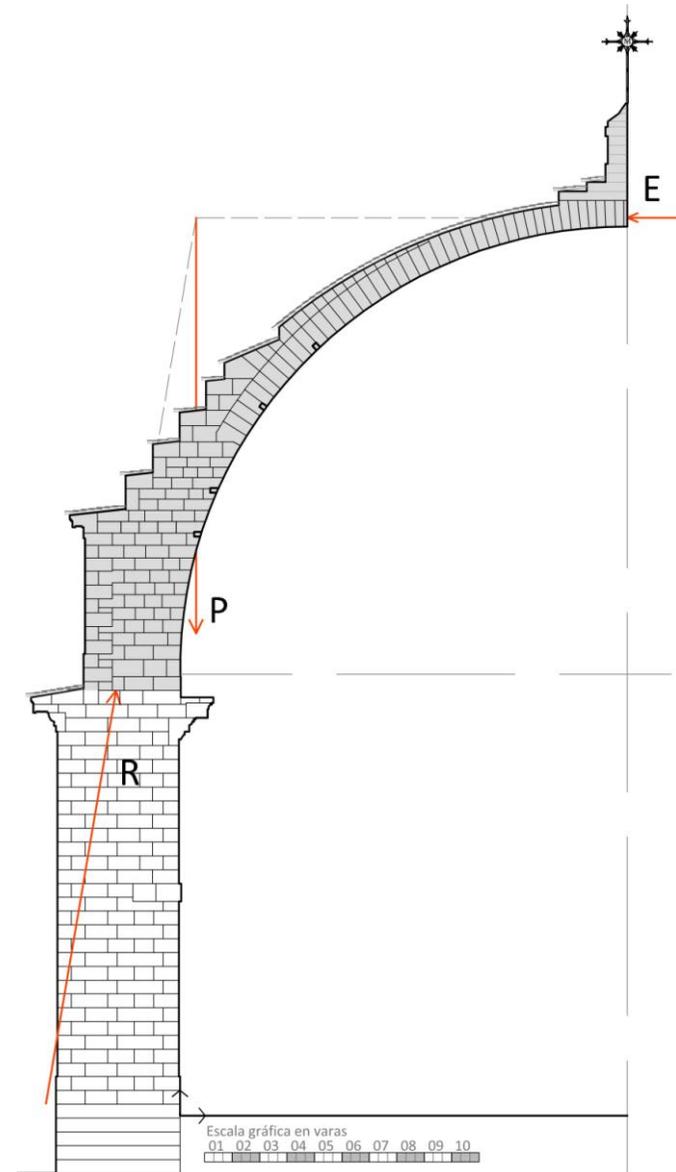


Figura 35. Hipótesis 2. Elaboración propia.

Polígono de fuerzas para la hipótesis 2.

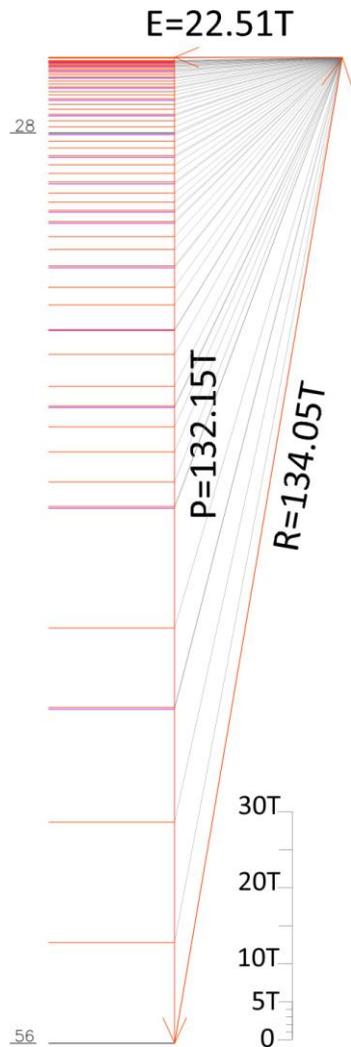


Figura 36. Polígono antifunicular para la hipótesis 2. Elaboración propia.

En rojo están representados los distintos pesos de las dovelas.

En morado están representados los pesos del tablero cerámico de cubrición.

En gris están representadas las resultantes. Estas resultantes formarán la línea de empujes correspondiente a esta hipótesis 1.

La construcción de la línea de empujes empieza en la posición del empuje en la clave. Donde se produce la intersección entre la línea de acción del Empuje y la línea de acción del peso propio de la primera dovela será por donde trazaremos una paralela a la primera resultante que nos aporta el polígono de fuerzas de la izquierda con la inclinación dada.

Se continúa obteniendo la intersección de la línea de acción de esta primera resultante, con la inclinación dada por el polígono de fuerzas, con la línea de acción del peso propio de la segunda dovela.

Y así sucesivamente hasta completar la dovela 56.

Como resultado queda:

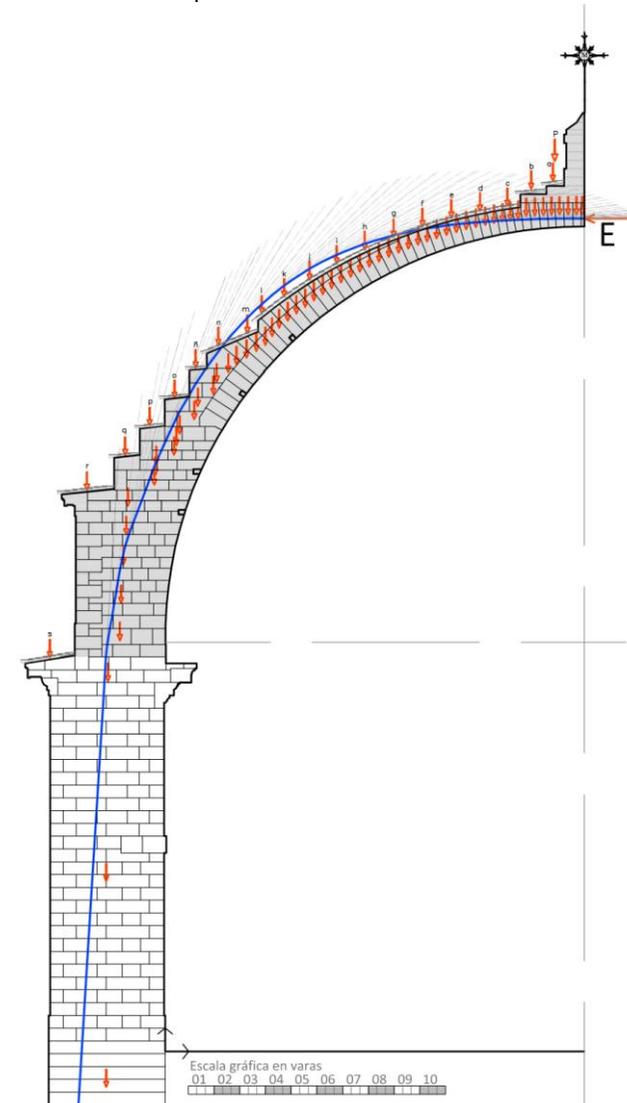


Figura 9.37. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 2. Elaboración propia.

Empuje y reacción situados en los límites inferior y superior del tercio central de la sección, respectivamente.

La línea de empujes se sitúa fuera de la sección de la fábrica en el trasdós entre las dovelas 30-31.

La hipótesis no es válida.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

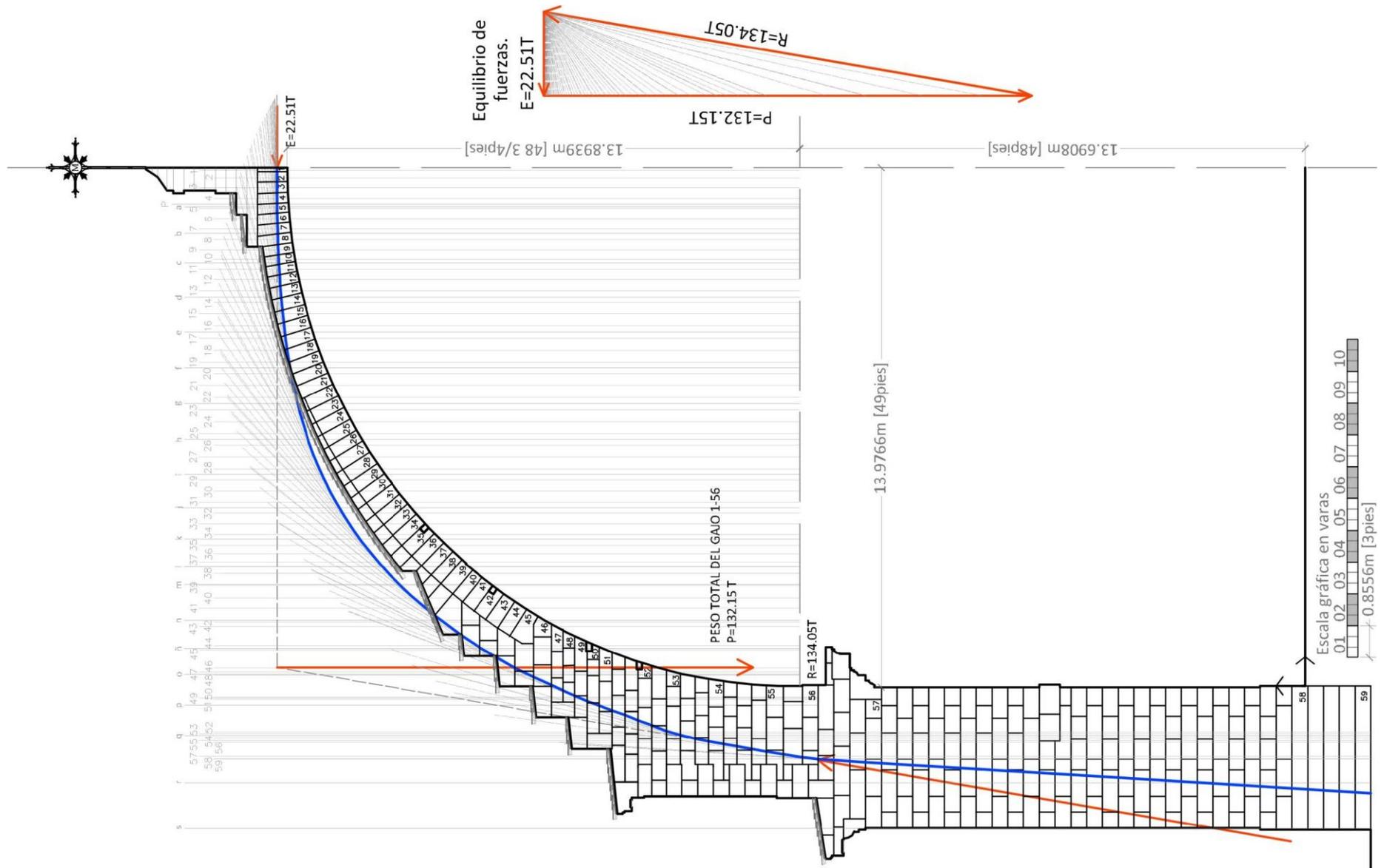


Figura 9.38. Hipótesis 2. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Hipótesis 3: Cúpula deformada.

1.- Se ha considerado el Peso del gajo correspondiente a las dovelas 1 - 56 que son las que componen la cúpula. En este caso hemos considerado el peso de la piedra estructural y del faldón de tejas que forma la cubrición.

2.- Se ha colocado el Empuje en el límite inferior de la mitad central de la sección, es decir, hacia el intradós de la clave.

3.- Se ha considerado la Resultante que equilibra ambas fuerzas anteriores en el centro de la sección de la dovela 56.

De la intersección de la líneas de acción de esta fuerzas se construye el polígono de fuerzas que nos dará la línea de empujes correspondiente a las posiciones de E y R consideradas en esta hipótesis.

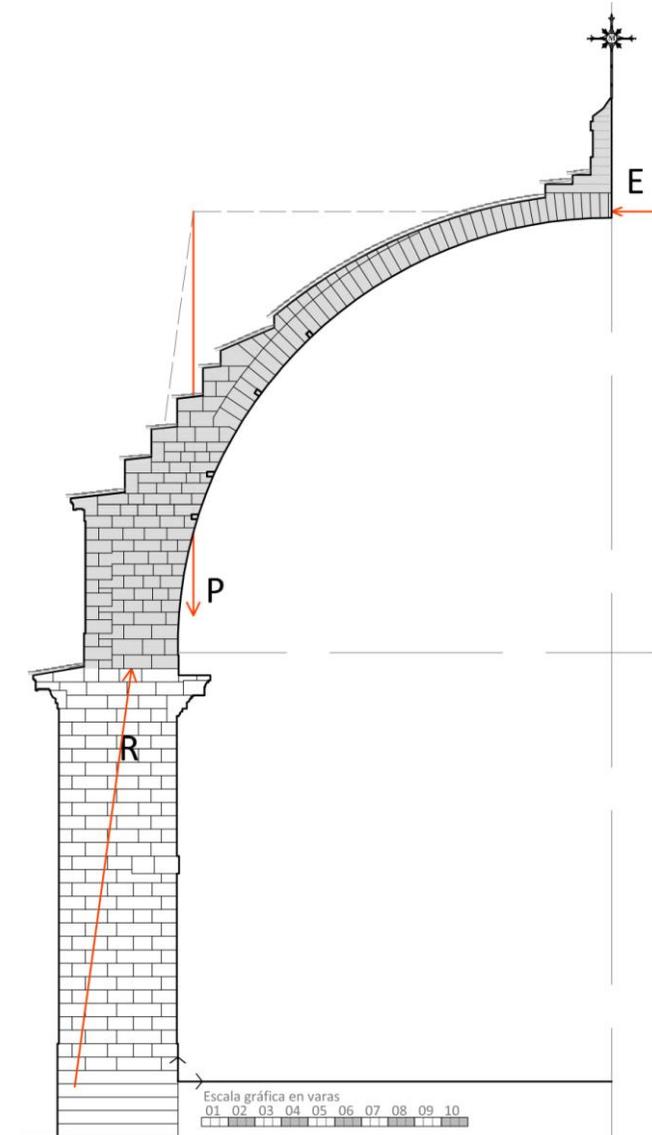
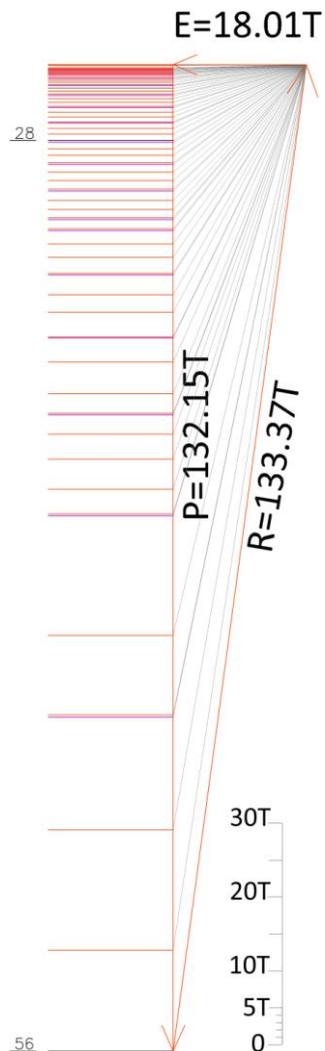


Figura 9.39. Hipótesis 3. Elaboración propia.

Polígono de fuerzas para la hipótesis 3.

Polígono de fuerzas para la hipótesis 3.



En rojo están representados los distintos pesos de las dovelas.

En morado están representados los pesos del tablero cerámico de cubrición.

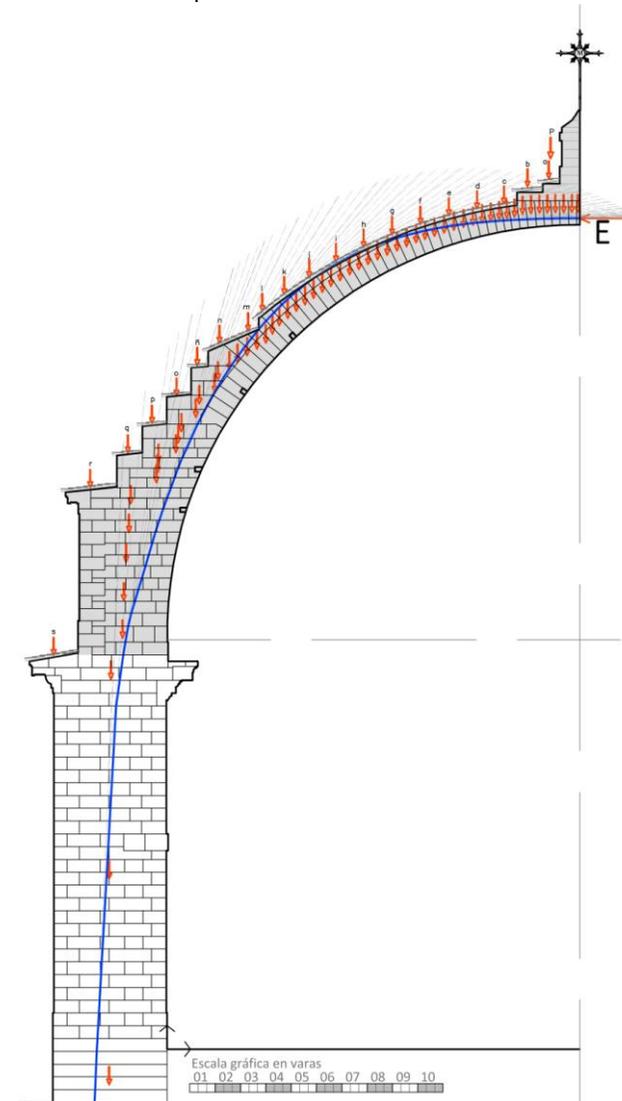
En gris están representadas las resultantes. Estas resultantes formarán la línea de empujes correspondiente a esta hipótesis 1.

La construcción de la línea de empujes empieza en la posición del empuje en la clave. Donde se produce la intersección entre la línea de acción del Empuje y la línea de acción del peso propio de la primera dovela será por donde trazaremos una paralela a la primera resultante que nos aporta el polígono de fuerzas de la izquierda con la inclinación dada.

Se continúa obteniendo la intersección de la línea de acción de esta primera resultante, con la inclinación dada por el polígono de fuerzas, con la línea de acción del peso propio de la segunda dovela.

Y así sucesivamente hasta completar la dovela 56.

Como resultado queda:



Empuje y reacción situados en los límites inferior de la mitad central y en el centro de la sección de la dovela-56, respectivamente.

La línea de empujes se sitúa fuera de la sección de la fábrica en el trasdós entre las dovelas 27-28.

La hipótesis no es válida.

Figura 9.41. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 3.

Elaboración propia.

Figura 9.40. Polígono antifunicular para la hipótesis 3. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

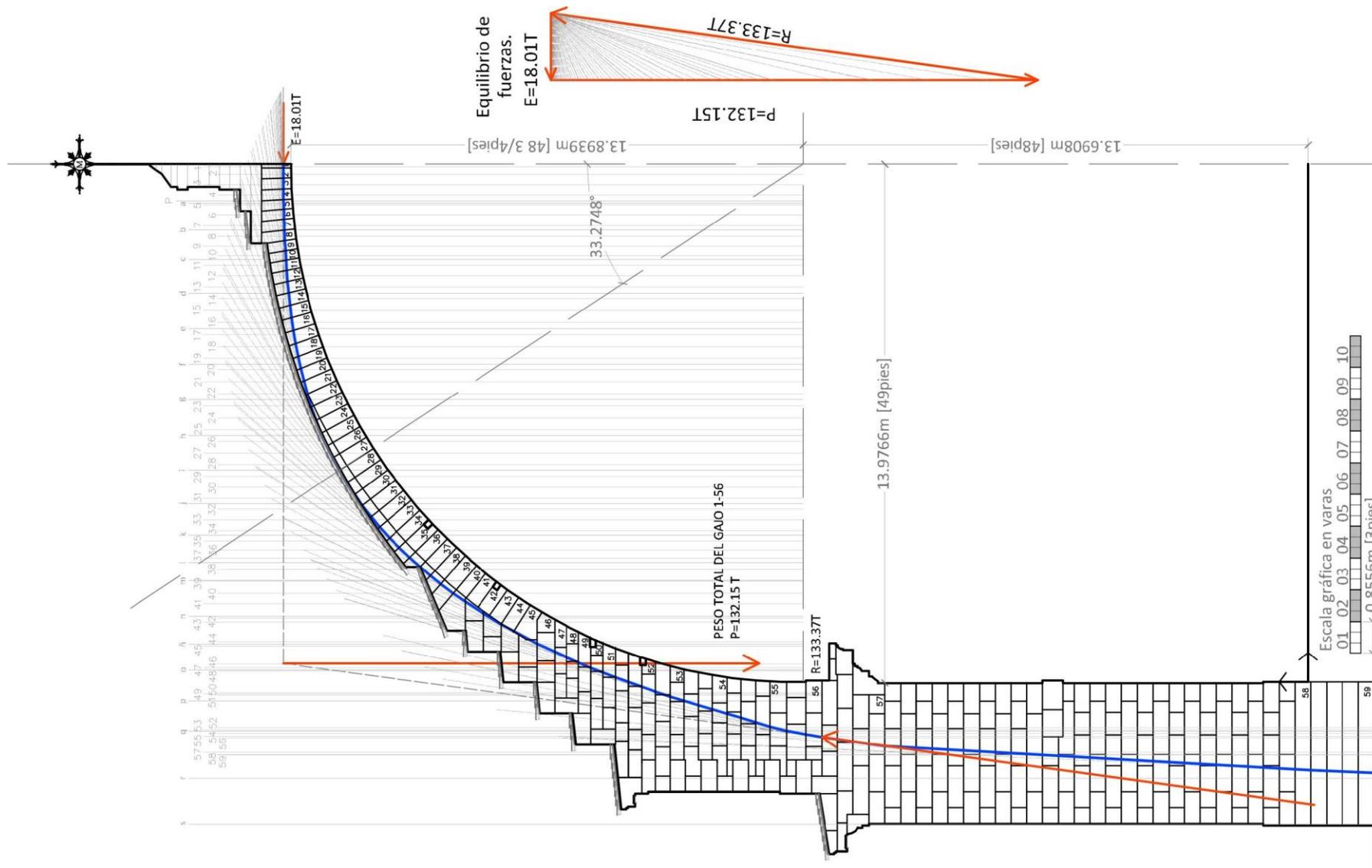


Figura 9.42. Hipótesis 3. Elaboración propia.

Hipótesis 4: Cúpula deformada.

Comprobamos en las hipótesis anteriores que la línea de empujes se sitúa fuera del trasdós entre las dovelas 27-28 y en esta siguiente hipótesis vamos a forzar a que la línea de empujes pase en este punto crítico por dentro de la sección del gajo y ver como se transmite hasta el tambor.

- 1.- Se ha considerado el Peso del gajo correspondiente a las dovelas 1 - 28 que son las que componen el sector de la cúpula a estudiar. En este caso hemos considerado el peso de la piedra estructural y del faldón de tejas que forma la cubrición.
- 2.- Se ha colocado el Empuje en el límite inferior de la mitad central de la sección, es decir, hacia el intradós de la clave.
- 3.- Se ha considerado la primera interacción entre las dovelas 27-28, situada en el límite superior de la mitad central de la sección.

De la intersección de la líneas de acción de esta fuerzas se construye el polígono de fuerzas que nos dará la línea de empujes correspondiente a las posiciones de E y R consideradas en esta hipótesis.

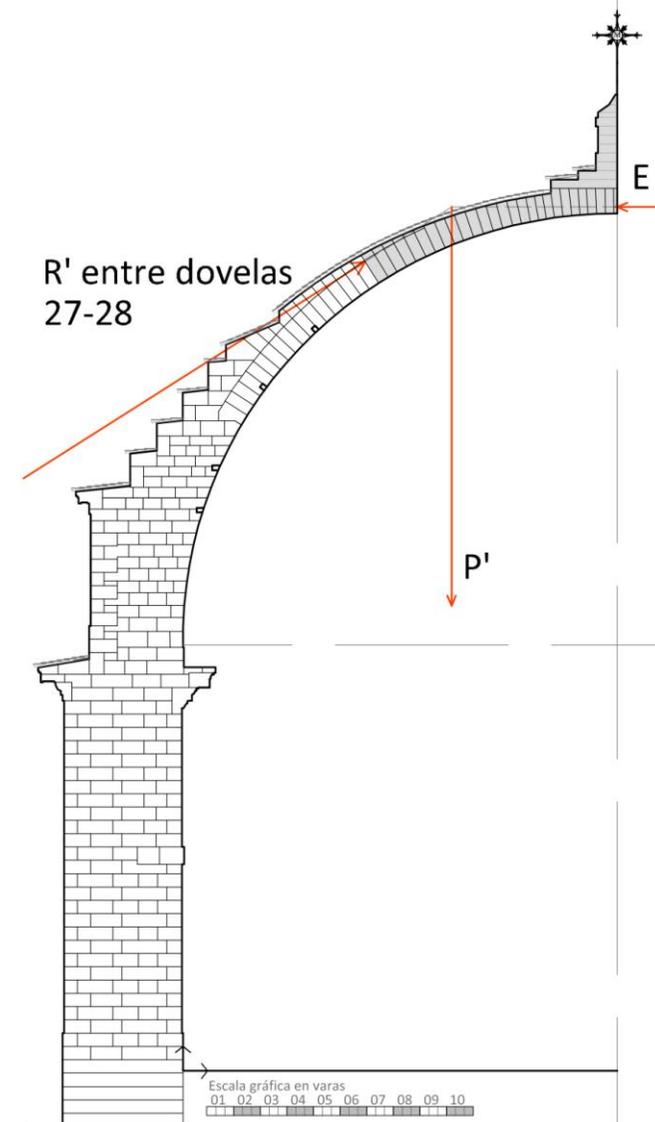
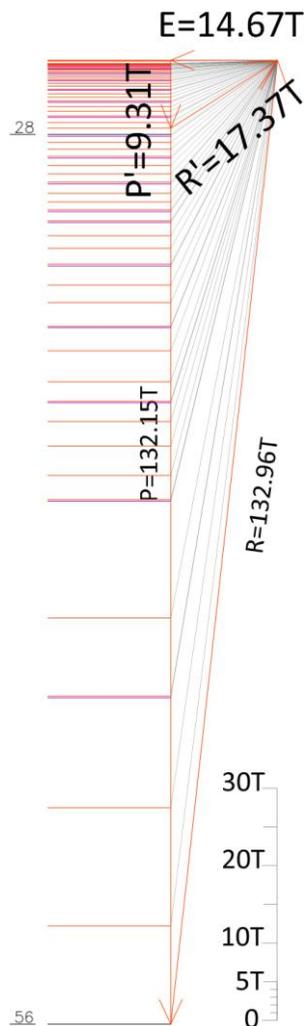


Figura 9.43. Hipótesis 4. Elaboración propia.

Polígono de fuerzas para la hipótesis 4.



En rojo están representados los distintos pesos de las dovelas.

En morado están representados los pesos del tablero cerámico de cubrición.

En gris están representadas las resultantes. Estas resultantes formarán la línea de empujes correspondiente a esta hipótesis 1.

La construcción de la línea de empujes empieza en la posición del empuje en la clave. Donde se produce la intersección entre la línea de acción del Empuje y la línea de acción del peso propio de la primera dovela será por donde trazaremos una paralela a la primera resultante que nos aporta el polígono de fuerzas de la izquierda con la inclinación dada.

Se continúa obteniendo la intersección de la línea de acción de esta primera resultante, con la inclinación dada por el polígono de fuerzas, con la línea de acción del peso propio de la segunda dovela.

Y así sucesivamente hasta completar la dovela 56.

Figura 9.44. Polígono antifunicular para la hipótesis 4. Elaboración propia.

Como resultado queda:

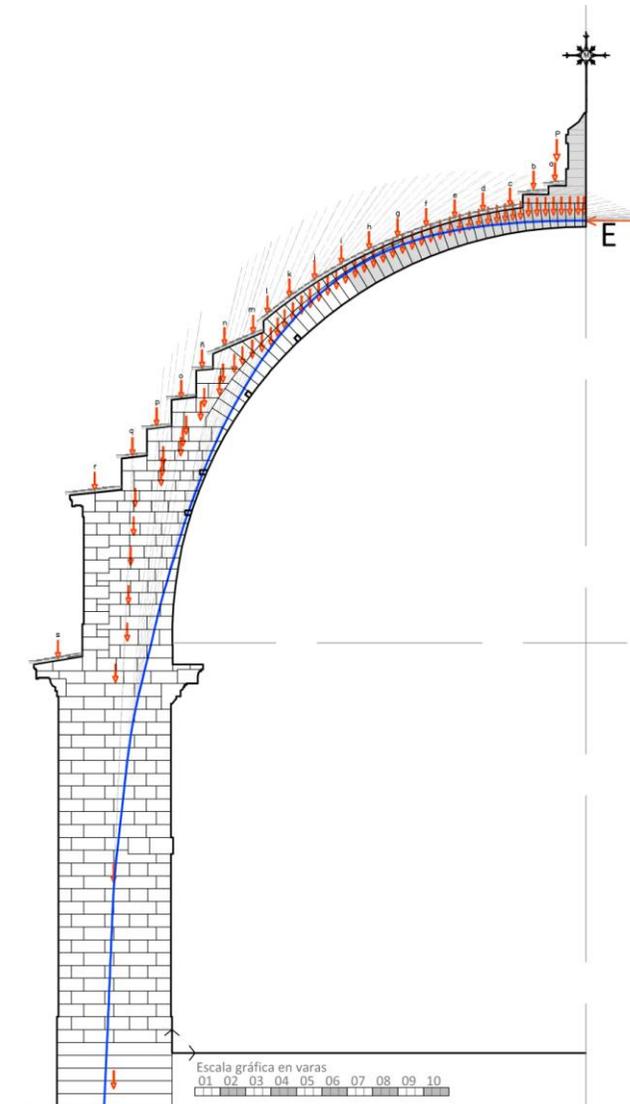


Figura 9.45. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 4. Elaboración propia.

Empuje situado en el límite inferior de la mitad central y interacción con la dovela 28 situada la reacción en el límite superior de la mitad central de la sección.

La línea de empujes se sitúa tangente a la sección de la fábrica en el intradós entre las dovelas 51-52.

La hipótesis es válida.

Se ve que se puede estudiar otra hipótesis, donde la línea de empujes quede en el interior de la sección y a la vez esté a una distancia igual en la clave en la dovela 28 donde se acerca hacia el trasdós y la dovela 51 donde la línea de empujes se acerca al intradós.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

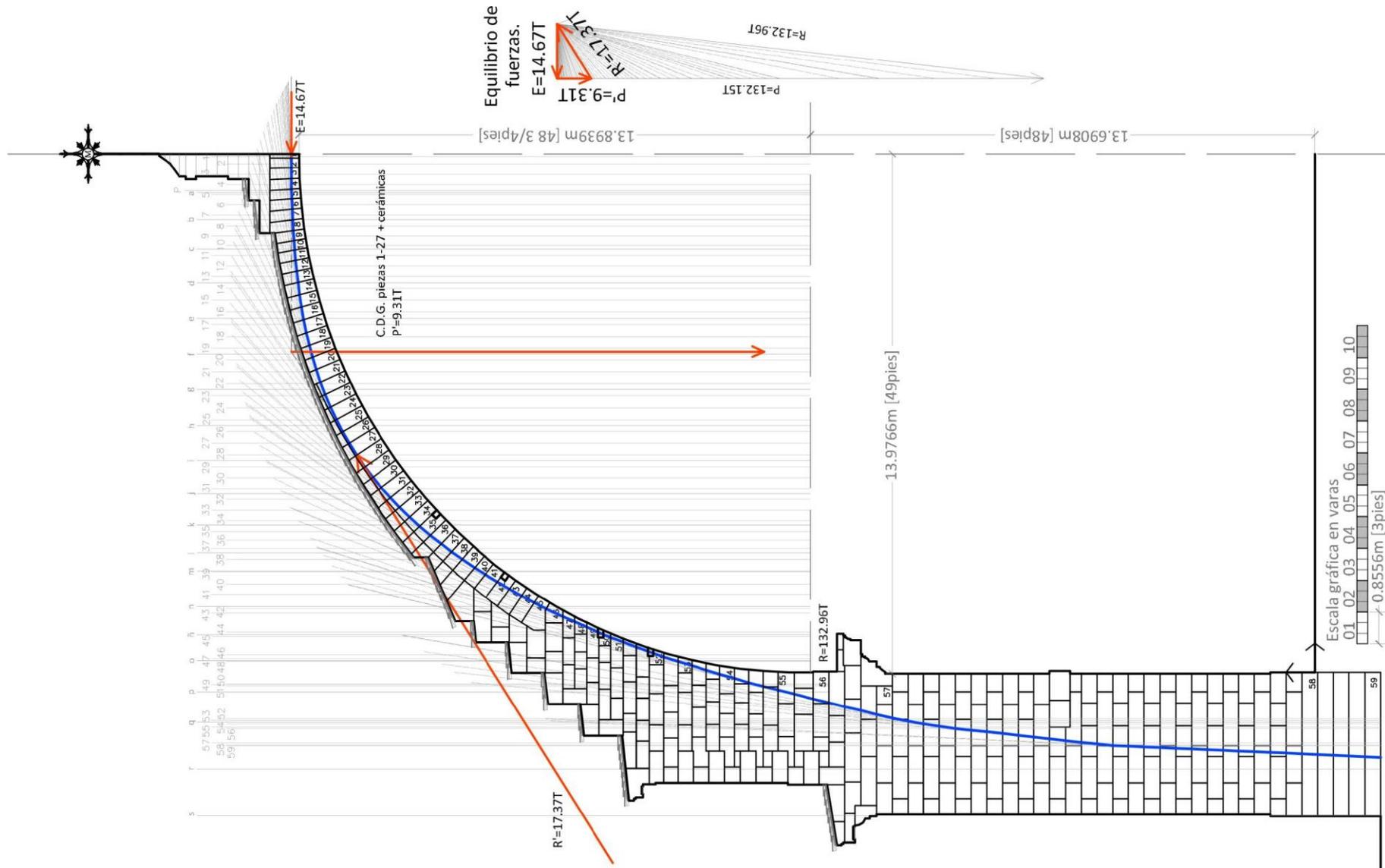


Figura 9.46. Hipótesis 4. Elaboración propia.

Figura 9.46. Hipótesis 4. Elaboración propia.

Hipótesis 5: Cúpula deformada.

Comprobamos en las hipótesis anteriores que la línea de empujes se sitúa fuera del trasdós entre las dovelas 27-28 y en esta siguiente hipótesis vamos a forzar a que la línea de empujes pase en este punto crítico por dentro de la sección del gajo y ver como se transmite hasta el tambor.

- 1.- Se ha considerado el Peso del gajo correspondiente a las dovelas 1 - 28 que son las que componen el sector de la cúpula a estudiar. En este caso hemos considerado el peso de la piedra estructural y del faldón de tejas que forma la cubrición.
- 2.- Se ha colocado el Empuje en el límite inferior del 1/5 de la sección, es decir, hacia el intradós de la clave.
- 3.- Se ha considerado la primera interacción entre las dovelas 27-28, situada en el límite superior del 1/5 de la sección.

De la intersección de la líneas de acción de esta fuerzas se construye el polígono de fuerzas que nos dará la línea de empujes correspondiente a las posiciones de E y R consideradas en esta hipótesis.

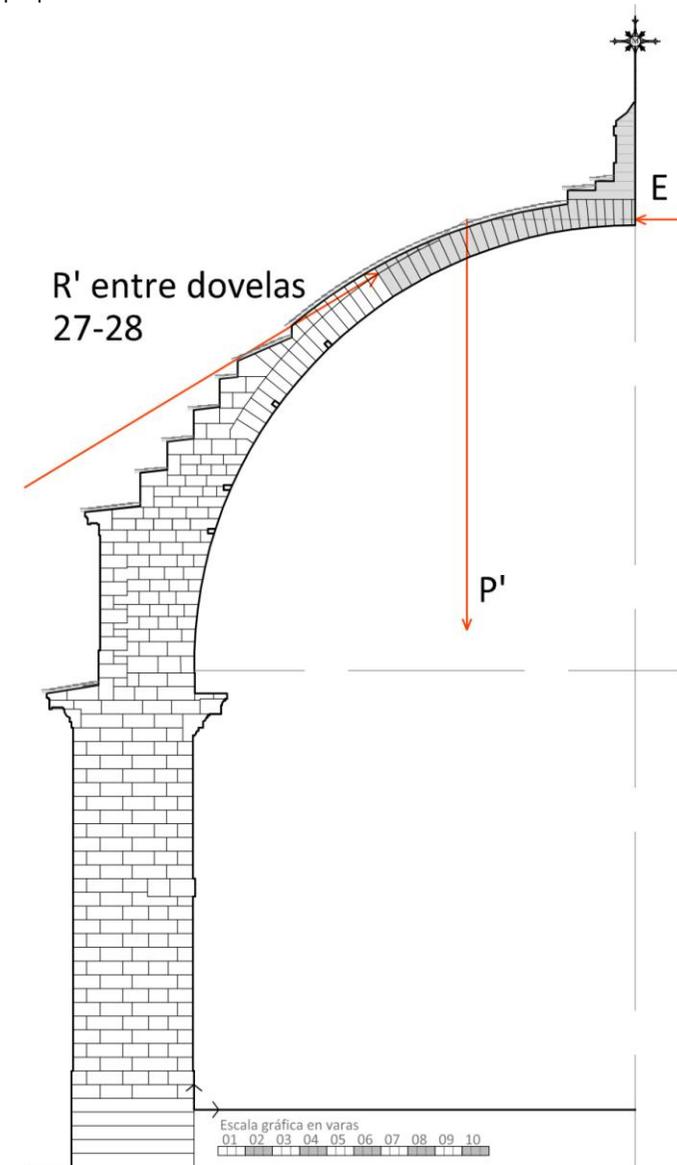
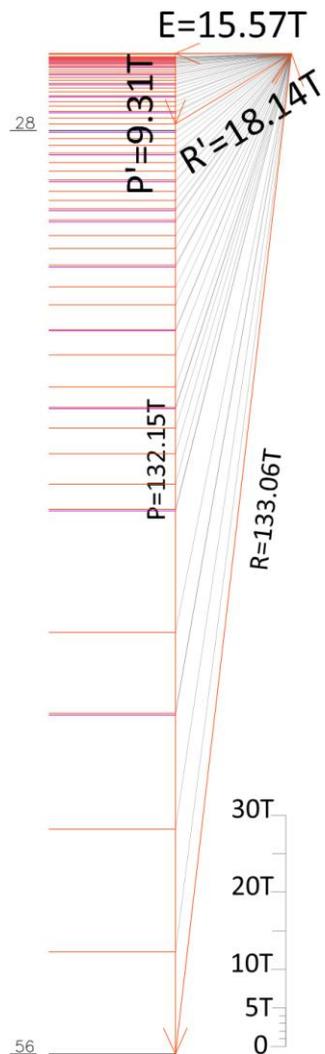


Figura 9.47. Hipótesis 5. Elaboración propia.

Polígono de fuerzas para la hipótesis 5.



En rojo están representados los distintos pesos de las dovelas.

En morado están representados los pesos del tablero cerámico de cubrición.

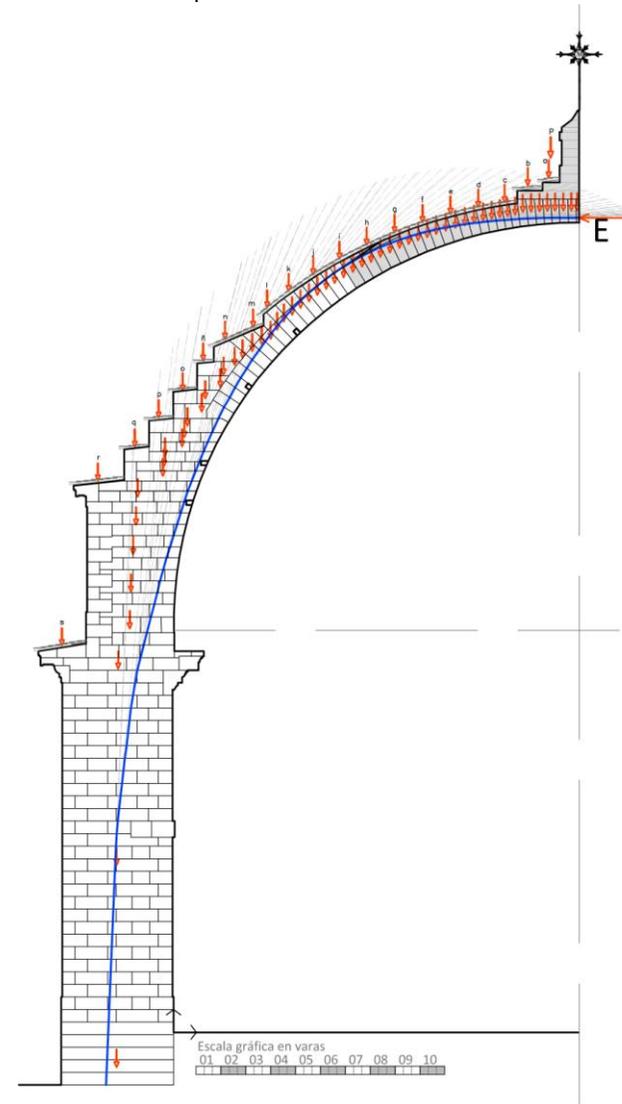
En gris están representadas las resultantes. Estas resultantes formarán la línea de empujes correspondiente a esta hipótesis 1.

La construcción de la línea de empujes empieza en la posición del empuje en la clave. Donde se produce la intersección entre la línea de acción del Empuje y la línea de acción del peso propio de la primera dovela será por donde trazaremos una paralela a la primera resultante que nos aporta el polígono de fuerzas de la izquierda con la inclinación dada.

Se continúa obteniendo la intersección de la línea de acción de esta primera resultante, con la inclinación dada por el polígono de fuerzas, con la línea de acción del peso propio de la segunda dovela.

Y así sucesivamente hasta completar la dovela 56.

Como resultado queda:



Empuje situado en el límite inferior del 1/5 de la sección y interacción con la dovela 28 situada la reacción en el límite superior del 1/5 de la sección.

La línea de empujes se sitúa a una distancia por igual en la clave, en la interacción de la dovela 28 cerca del trasdós y dovela 51 donde se acerca al intradós de la cúpula.

La hipótesis es válida.

Por lo que se procede al estudio del coeficiente de seguridad geométrico.

Figura 9.48. Polígono antifunicular para la hipótesis 5. Elaboración propia.

Figura 9.49. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 5. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

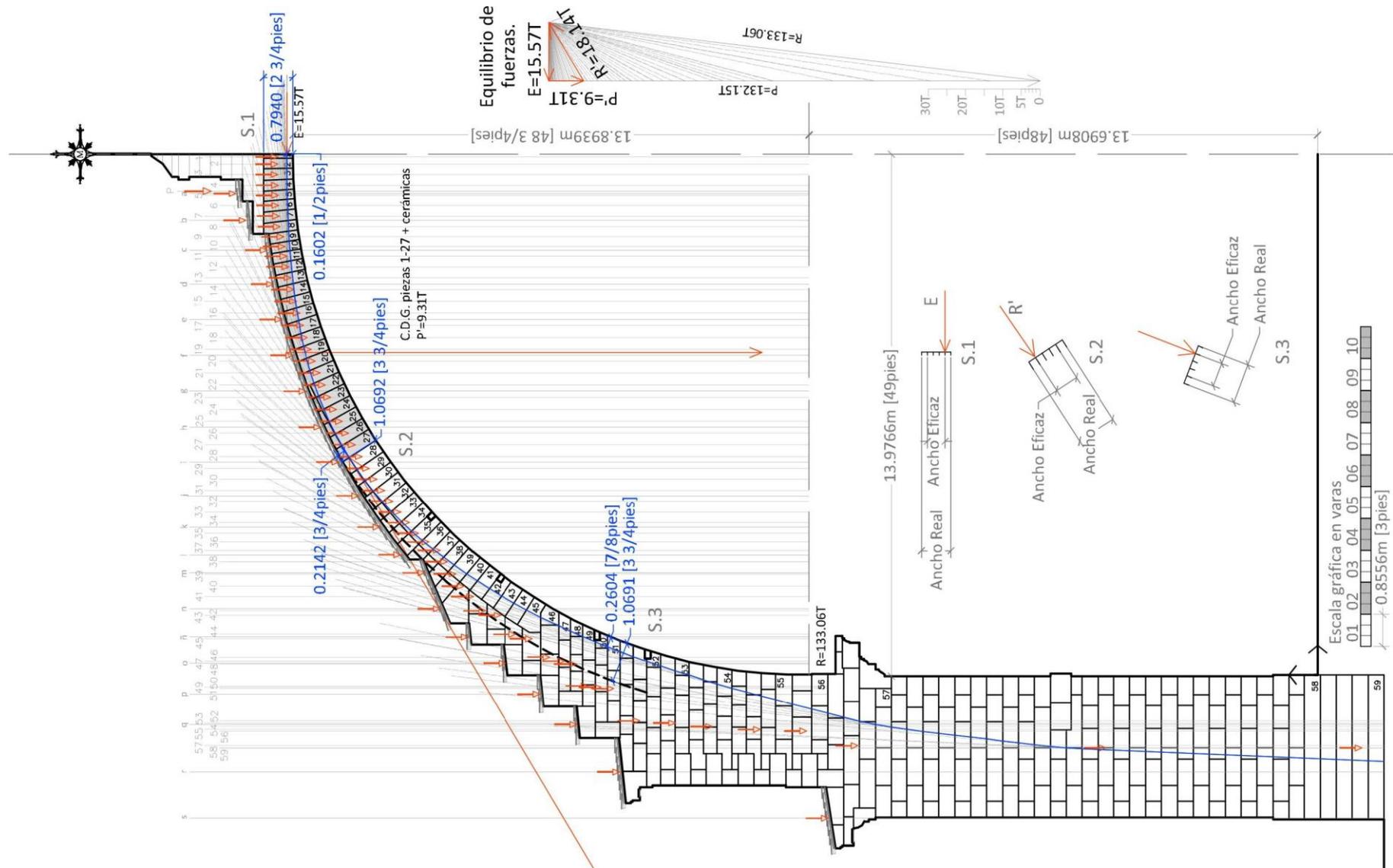


Figura 9.50. Hipótesis 5. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Otra comprobación que se realizará será la inclinación entre la línea de empujes y la dirección normal a los planos de lechos.

Según Huerta Fernández el ángulo de rozamiento que impide el fallo por deslizamiento se sitúa habitualmente por debajo de 30-35º (HUERTA, 2004, 65, 118).

La comprobación en los lechos que llevan la dirección de las dovelas radiales se puede hacer a simple vista viendo que la línea de empujes queda prácticamente perpendicular al lecho así que el ángulo que forma la intersección de la línea de empuje con el lecho radial correspondiente y la normal al lecho serán muy pequeños.

La comprobación crítica ocurre en la intersección de la línea de empujes y el lecho de las primeras dovelas acodaladas y las siguientes que poseen lechos en horizontal.

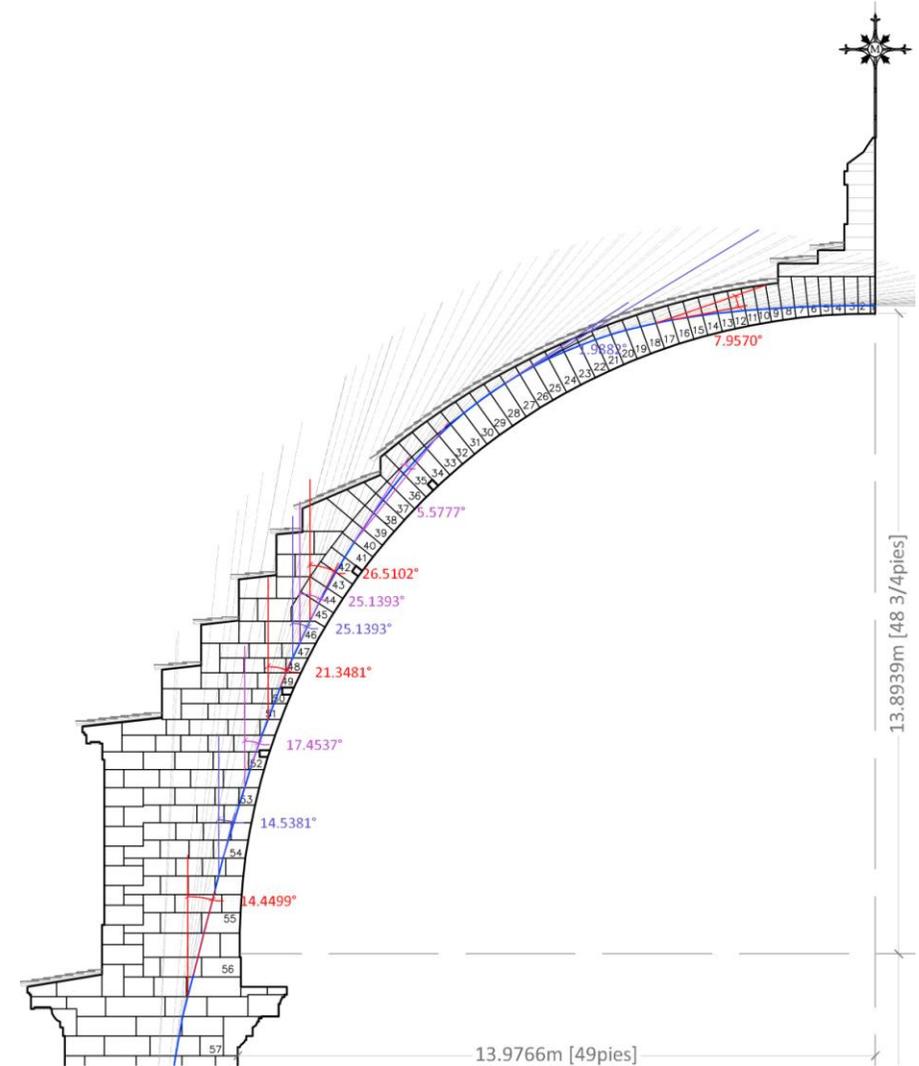


Figura 9.51. Ángulo de rozamiento que impide el fallo por deslizamiento está por debajo de 30-35º (HUERTA, 2004, 65, 118). Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Estudio del comportamiento de la cúpula durante la fase constructiva. En el capítulo del proceso constructivo se ha planteado la hipótesis de las fases constructivas.

En este apartado se va a comprobar la estabilidad de las distintas fases.

1.- Fase de construcción de todas las dovelas con lechos horizontales:

Se ha calculado los pesos de las distintas partes señaladas en la perspectiva.

Peso F1 (Rojo) = suma de las dovelas 56-52

Peso F2 (Morado) = suma de las dovelas 51-49

Peso F3 (Verde) = suma de las dovelas 48-46

Como resultado queda: Sector de hiladas horizontales (dovelas 56-46).

Pieza rígida apoyada en el tambor.

	P(KN)	Centro de Gravedad Xg
Peso F1=(56-52)	717,2506	-1,3814
Peso F2=(51-49)	109,0123	-0,3340
Peso F3=(48-46)	96,8474	0,3954
Resultante=	923,1103	-1,0713

Tabla 9.2. Resultados de la fase constructiva.

Como se puede comprobar la resultante queda dentro del núcleo central de la sección.

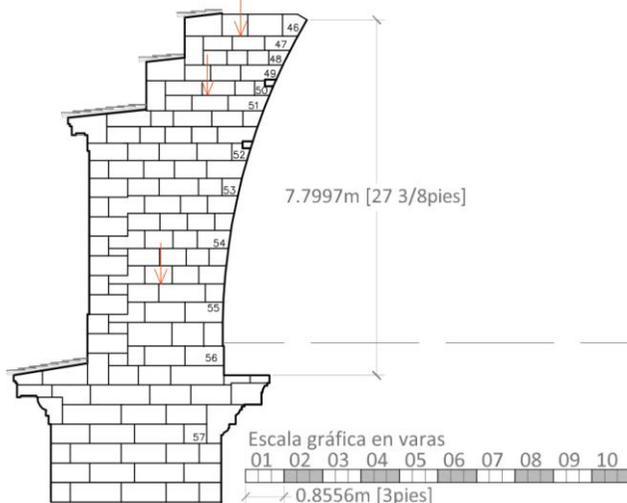


Figura 9.52. Fase constructiva. Construcción de dovelas en horizontal. Elaboración propia.

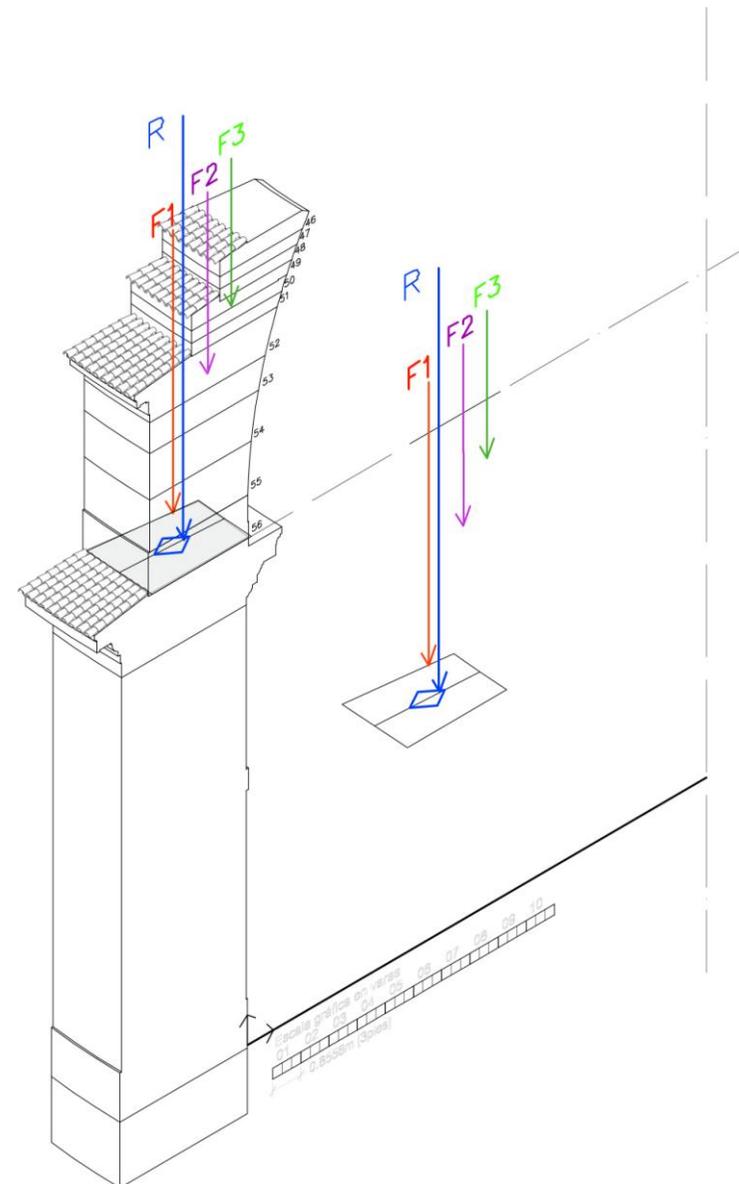


Figura 9.53. Fase constructiva. Elaboración propia.

9.6. Método de análisis de membrana.

Tradicionalmente se ha empleado la idea de imagina la cúpula de fábrica como formada por una serie de semiarcos, obtenidos cortando la cúpula por planos meridianos. Cada dos semiarcos o gajos opuestos formarán un arco completo; si es posible dibujar una línea de empujes en su interior, el arco se sostendrá. Así lo harán el resto de los arcos iguales y, por tanto, la cúpula hipotéticamente “cortada” o dividida será estable; con mayor razón lo será, entonces, la cúpula real.

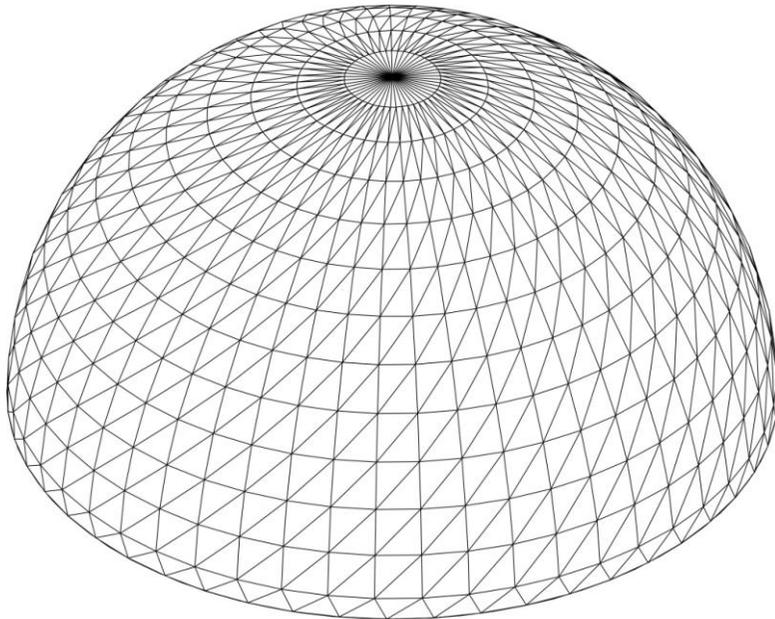


Figura 9.54. Cúpula de revolución. Elaboración propia.

En cambio, la solución de membrana impone una condición geométrica muy estricta: la tangencia de los esfuerzos a la superficie media. Para mantener esta tangencia a veces es preciso que aparezcan tensiones de tracción y esto impone una seria limitación a la aplicación de este tipo de análisis de membrana como un método

general para el análisis de cúpulas de fábrica: sólo puede aplicarse a casquetes rebajados que no soportan cargas concentradas. (HUERTA, (2004), 443)

Nuestro caso es un caso de cúpula semiesfera sometida a su propio peso ya que no posee linterna que suponga una carga puntual.

La solución de membrana tiene la posibilidad de generar esfuerzos en las cuatro caras de un cierto elemento de cúpula. Es posible hacer que todos los esfuerzos (resultantes de tensiones) sean tangentes a la superficie media de la cúpula. Es posible encontrar soluciones de equilibrio sobre una superficie. Estas soluciones reciben el nombre de soluciones de membrana y se pueden encontrar en todas las estructuras superficiales curvadas o cáscaras.

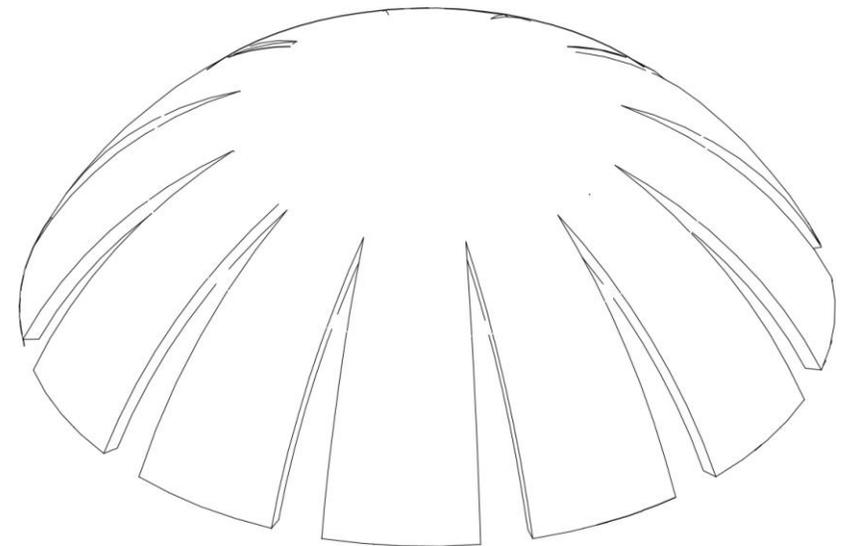


Figura 9.55. Deformación de la cúpula. La tracción hace que se abra en gajos. Elaboración propia.

El comportamiento de está cúpula bajo la acción de su propio peso producirá un descenso.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Se pueden identificar dos zonas de la cúpula, una a compresión en el casquete superior y otra a tracción desde un determinado punto hasta el borde inferior de la cúpula.

Analizamos un elemento de esta superficie que queda delimitado según planos meridianos y paralelos.

Elemento sometido a compresión. Zona superior de la cúpula.

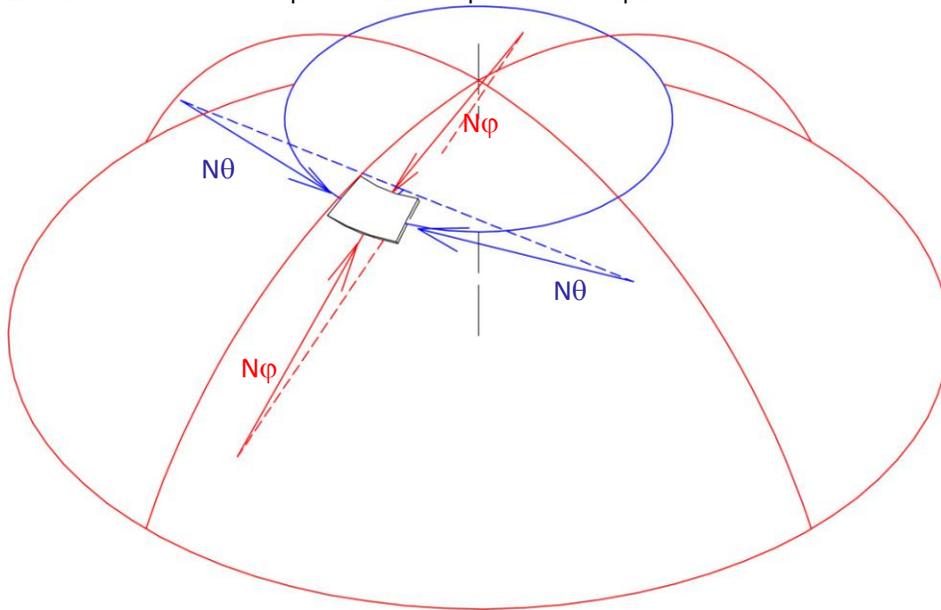


Figura 9.56. Elemento de la cúpula sometido a compresión anular. Elaboración propia. Este elemento está en equilibrio bajo su propio peso y las resultantes de tensiones que actúan en las cuatro caras del elemento⁸⁴.

$N\phi$, son de compresión y son tangentes a las líneas meridianas.

⁸⁴ HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2. Pág.438

$N\theta$, son las que permiten variar la dirección que naturalmente seguirían las cargas (la catenaria invertida de Hooke) para acomodarla a la forma del meridiano.

En una cúpula semiesférica, las tensiones anulares van variando desde la clave hacia los arranques; en la parte superior son de compresión, se anulan para un ángulo de unos 52° , y, a partir de ahí, se hacen de tracción.

Elemento sometido a tracción. Zona inferior de la cúpula.

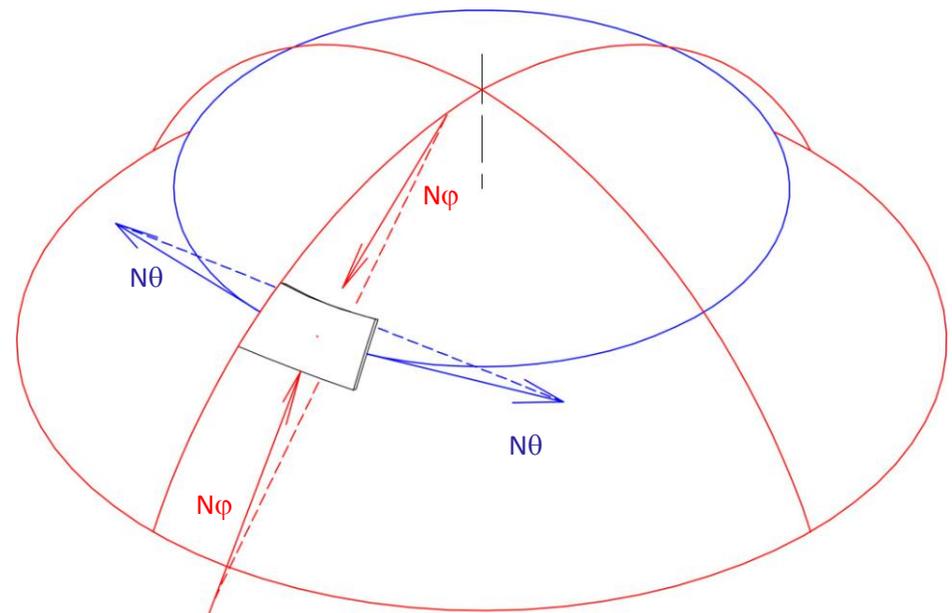


Figura 9.57. Elemento de la cúpula sometido a tracción anular. Elaboración propia.

La existencia de un óculo reduce la extensión de la zona traccionada y la adición de una linterna hace que las tracciones suban hasta alcanzar, incluso, el arranque de la propia linterna.

Las ecuaciones gráficas para el análisis de membrana de revolución fueron escritas por Rankine (1858) y se emplearon hasta principios del siglo XX. El ingeniero americano Eddy (1878) ideó un método gráfico de análisis. El método fue popularizado por Dunn (1904).

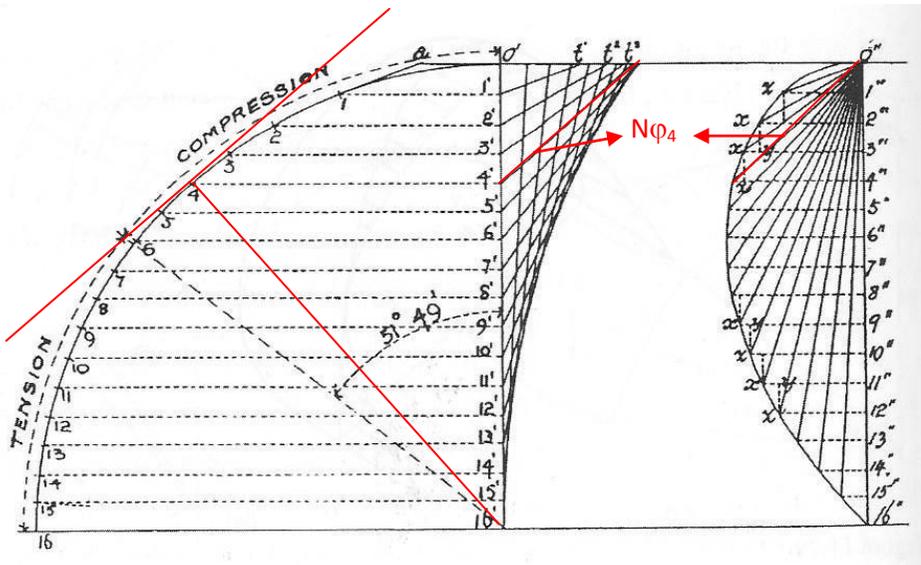
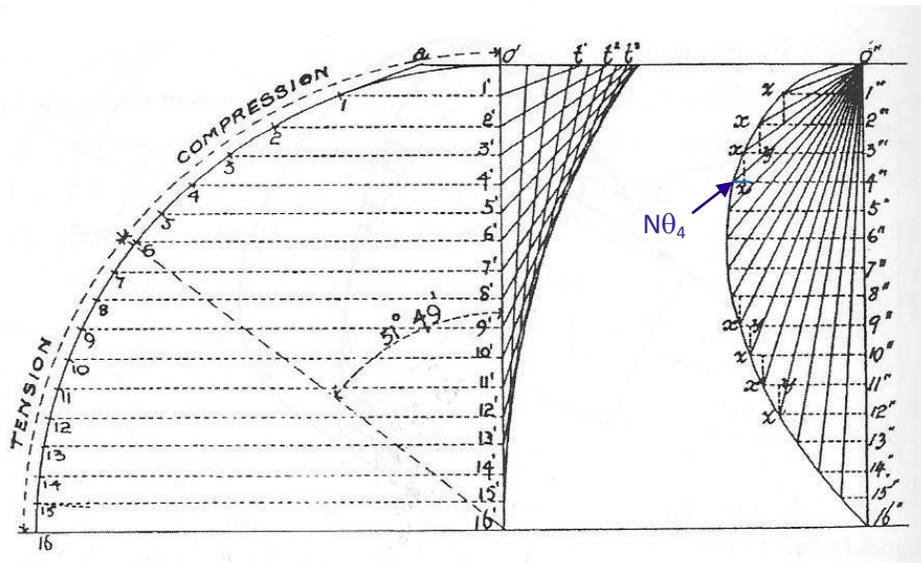


Figura 9.58. Análisis gráfico de membrana de una cáscara semiesférica. Dunn (1904). HUERTA, (2004) pág. 440.



$N\phi$: Por la condición de tangencia se determina la dirección y la magnitud de la resultante para cada anillo.

En la imagen anterior se ha señalado un ejemplo para el anillo número 4. La dirección de $N\phi_4$, será la perpendicular al radio por el anillo 4 en el dibujo de la izquierda. La magnitud se obtiene en el dibujo de la derecha que representa los pesos de los distintos anillos. Con la tangente a la semiesfera en el punto 4 se pasa una paralela por O" y donde corte con la horizontal que marca el peso 4" se obtiene la magnitud de $N\phi_4$.

$N\theta$: A partir del cálculo de $N\phi$, se calculará $N\theta$ que algunas veces "empujan". La componente horizontal queda hacia fuera ($N\theta$ de compresión) como se ve en la figura:

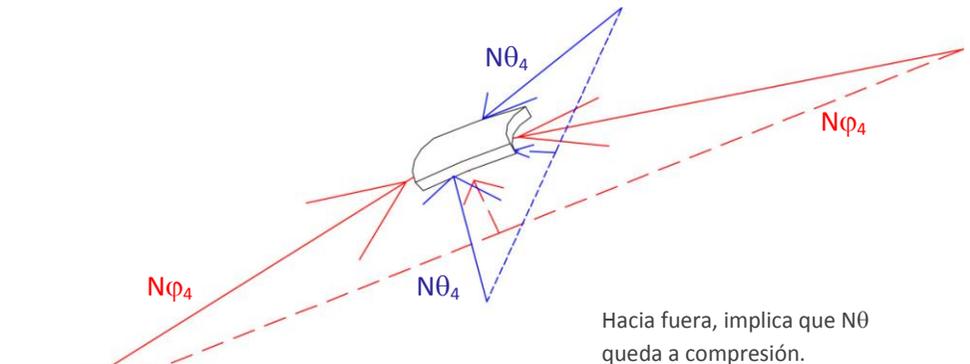


Figura 9.59. Elemento perteneciente a la zona de anillos sometidos a compresión.

Elaboración propia.

En una cúpula de fábrica sin linterna se puede encontrar un estado de membrana sobre la superficie media en su parte superior. En esta zona la cúpula podría ser muy delgada. A partir del punto en que aparecen tracciones, el material será incapaz de suministrar los anillos de tracción para centrar la carga y la trayectoria quedará determinada únicamente por la variación de los pesos verticales. La trayectoria de los esfuerzos se aparta de la superficie media y es preciso aumentar el grosor de la cúpula para acomodarla en su interior. Este principio aparece expresado por Föppl (1881) según la Figura 63.

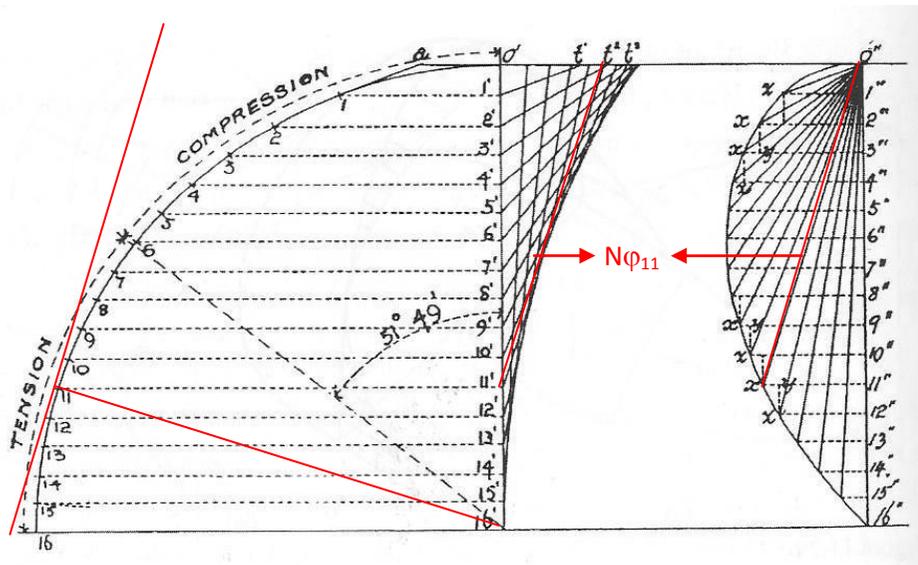
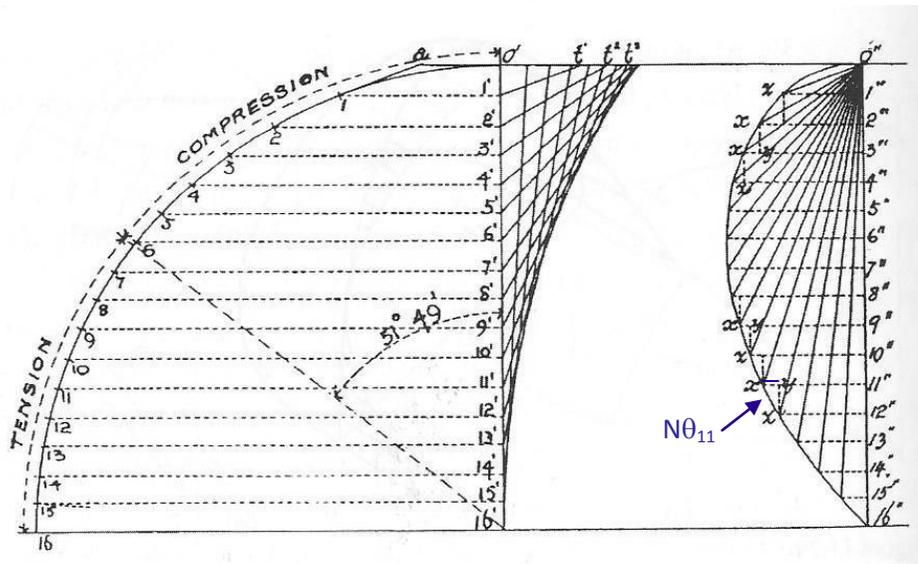


Figura 9.60. Análisis gráfico de membrana de una cáscara semiesférica. Dunn (1904) HUERTA, (2004) pág. 440.



La dirección de $N_{\phi_{11}}$, será la perpendicular al radio por el anillo 11 en el dibujo que delimitan las compresiones de las tracciones. La magnitud se obtiene en el dibujo de la derecha que representa los pesos de los distintos anillos. Con la tangente a la semiesfera en el punto 11 se pasa una paralela por O'' y donde corte con la horizontal que marca el peso 11" se obtiene la magnitud de $N_{\phi_{11}}$.

N_{θ} en este caso "tira" hacia dentro (N_{θ} de tracción)

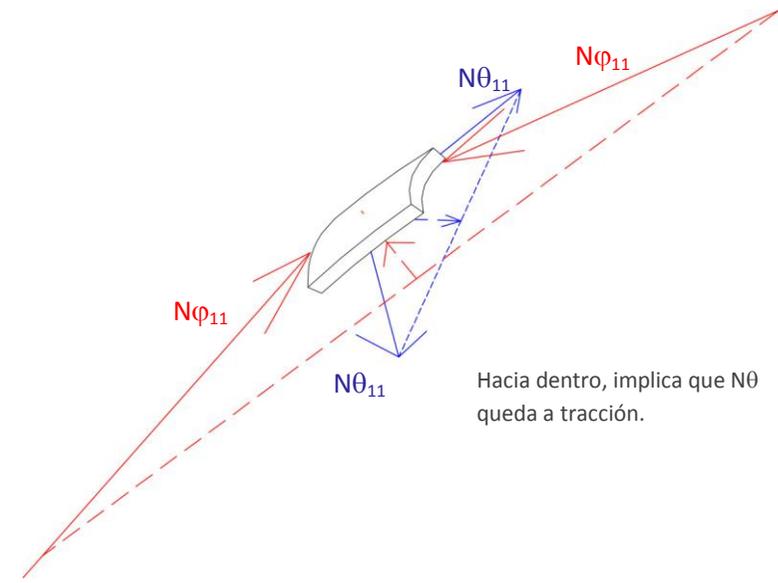


Figura 9.61. Elemento perteneciente a la zona de anillos sometidos a tracción. Elaboración propia.

Todo ha sido estudiado analíticamente por Heyman (1977).

En la imagen anterior se ha señalado otro ejemplo para el anillo número 11.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Para una cúpula semiesférica se pueden calcular los esfuerzos estudiados según lo describe Mas-Guindal:

En la gráfica de arriba queda evidente que el esfuerzo $P_v = N\phi$, según el meridiano, debe ir aumentando desde la coronación de la cúpula hasta el anillo inferior ya que va tomando peso superior de la cúpula, conforme el anillo es más bajo.

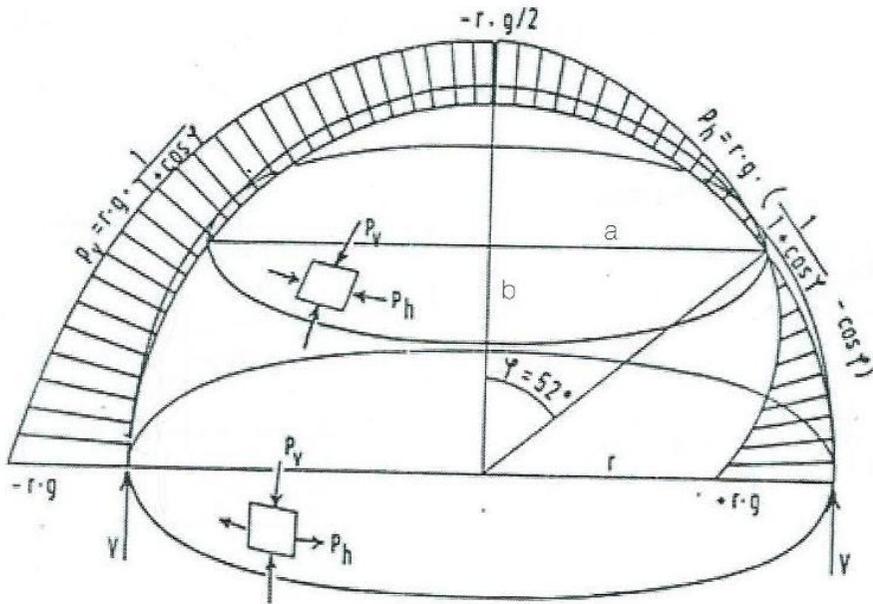


Figura 9.62. Gráfica de esfuerzos. $P_v = N\phi$. $P_h = N\theta$ ⁸⁵. Fórmulas solo utilizadas para una cúpula totalmente semiesférica sometida sólo a su propio peso.

En el caso del esfuerzo de anillo $P_h = N\theta$ en la parte superior está comprimida y en la inferior está traccionada. La tracción nula del anillo sucede para un ángulo de 51.82°. Curiosamente ese ángulo define un triángulo de proporción a/b de relación el número áureo.

$$a/b = (1 + \sqrt{5})/2$$

⁸⁵ MAS-GUINDAL, Antonio José (2011): *Mecánica de las estructuras antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban*. Ed. Munilla-Lería ISBN: 978-84-89150-90-4. Pág92.

En el último cuarto del siglo XIX y primero del XX algunos ingenieros analizaban las cúpulas de fábrica como membrana en la parte superior, dejando después que las cargas siguieran su camino por el interior de la fábrica.

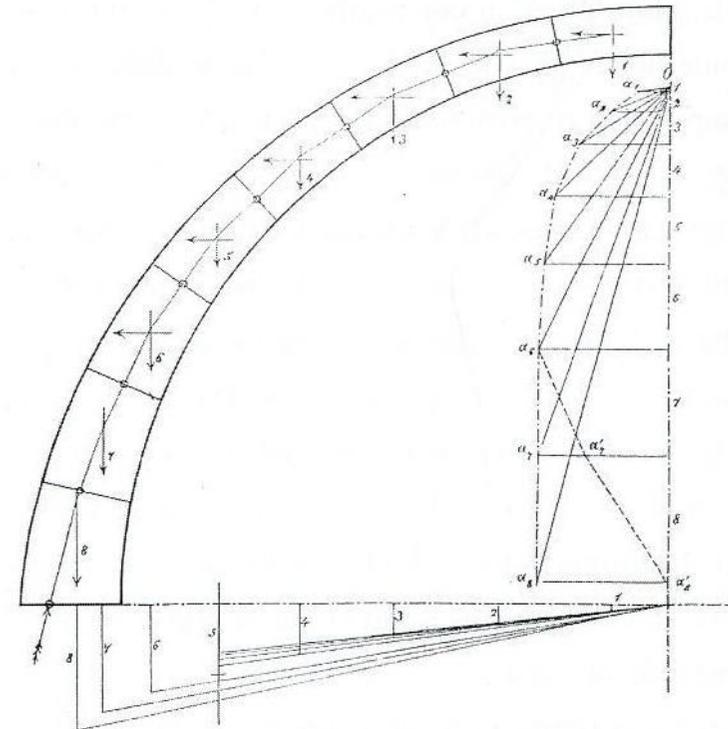


Figura 9.63. Cúpula de fábrica. En la parte superior se ha considerado un estado de membrana en la superficie media con esfuerzos de compresión según los anillos paralelos. A partir del punto en que aparecen tracciones, la fábrica no puede resistirlas, las cargas se transmiten según el funicular de las cargas verticales, como en los arcos. (Föppl, 1881). (HUERTA, (2004) pág. 442).

Así que una vez entendido el comportamiento de la cúpula como membrana se va a aplicar este método al estudio de la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Como se ha visto, en las cúpulas semiesféricas con comportamiento semejante a una membrana, existe una zona a compresión en la parte superior, donde los esfuerzos quedan contenidos dentro de la superficie media de la cáscara (Heyman 1977). Por otro lado existe, en la parte inferior de la cúpula, una zona de tracción que tiene que ser equilibrada de alguna manera.

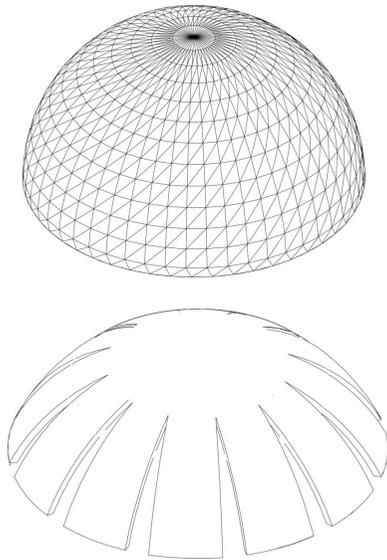


Figura 9.64. Deformación de la cúpula como membrana. Elaboración propia.

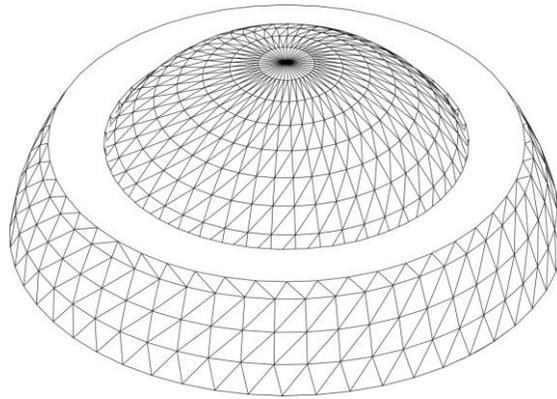


Figura 9.65. Anillos rodeando la cúpula para contrarrestar las tracciones con el peso propio de los anillos que zunchan la cúpula. Elaboración propia.

Por un lado o se contrarresta con peso vertical, como es el caso de la iglesia de la Encarnación de Montefrío u otra manera de controlar las tracciones es del modo que lo solucionaba Rafael Guastavino Moreno (1842-1908). Es probable que leyera a Rankine (1858), Eddy (1878), Dunn (1904) y decidiera aplicar el método al análisis de cúpulas tabicadas. Pretendía estimar el valor de las tensiones de tracción para calcular y disponer refuerzos de hierro forjado (recordamos que el hierro ya fue usado en San Pedro en su diseño). Para Guastavino hay dos zonas críticas: en los óculos cuando existe linterna y en la base (por debajo de los 52° desde la clave en cúpulas hemisféricas cerradas). El método de Dunn permite determinar estas zonas y de esta manera colocar los refuerzos.

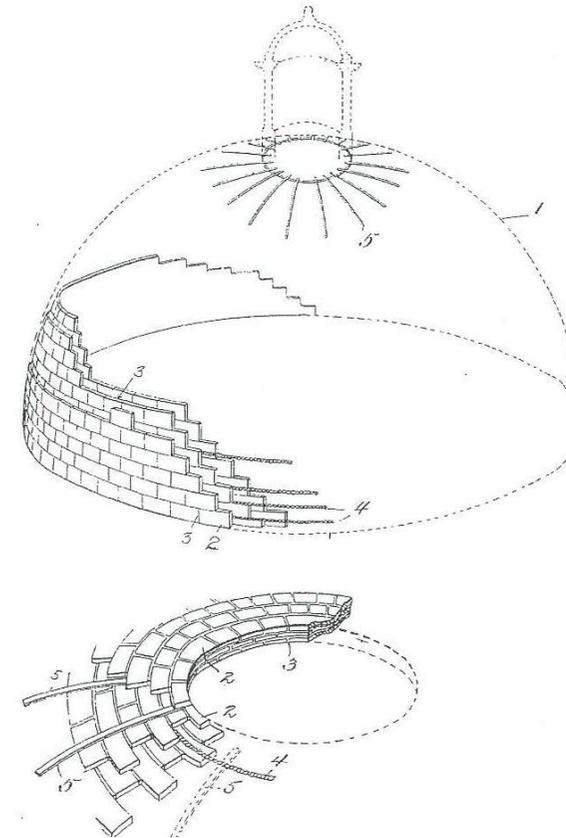


Figura 9.66. Disposición de refuerzos metálicos en las bóvedas tabicadas. (Patente de Guastavino hijo de 1910)⁸⁶.

Guastavino Expósito (Hijo) realizó este tipo de análisis para muchas cúpulas. El dato de que a partir del punto de aparición de las tracciones el empuje se mantenía constante (en una cúpula construida en fábrica sin refuerzos), proporcionó la idea para otra solución de proyecto de cúpulas sin tracciones.

⁸⁶ GUASTAVINO, Rafael (2006): *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN-10: 84-7790-429-4. Pág. xliv

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

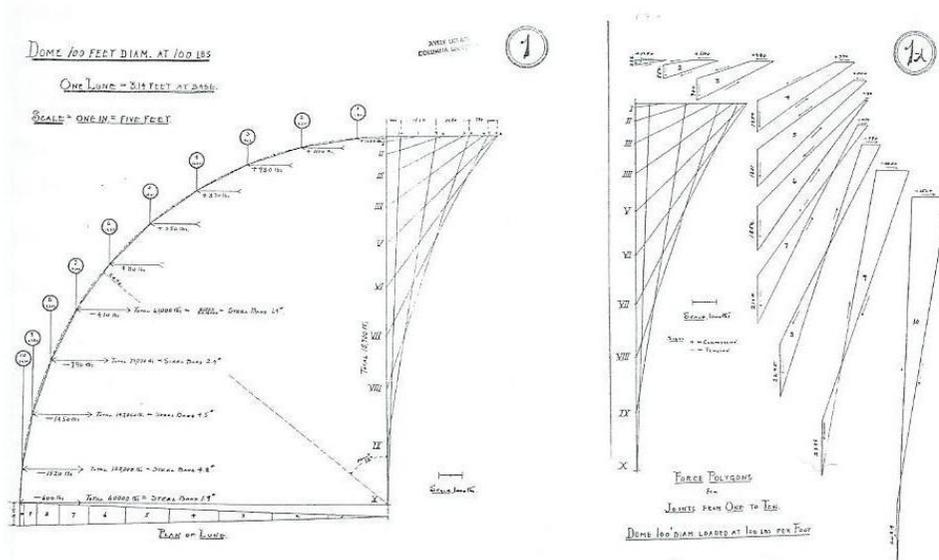


Figura 9.67. Análisis gráfico de una delgada cúpula con una luz de 100 pies (30m) (Avery Library, Universidad de Columbia)⁸⁷.

Este concepto lo llevó hasta el límite construyendo la cúpula ideal teniendo en cuenta la teoría anterior. Así, la cúpula tiene una única forma geométrica sencilla en la zona superior y sólo se desvía de ella cuando es necesario, en la zona de la base.

La superficie media de la cúpula soportará los esfuerzos de compresión y aquellos esfuerzos de tracción, que sucederán en el ángulo 52º, serán contrarrestados por el peso de los anillos que circunda la cúpula.

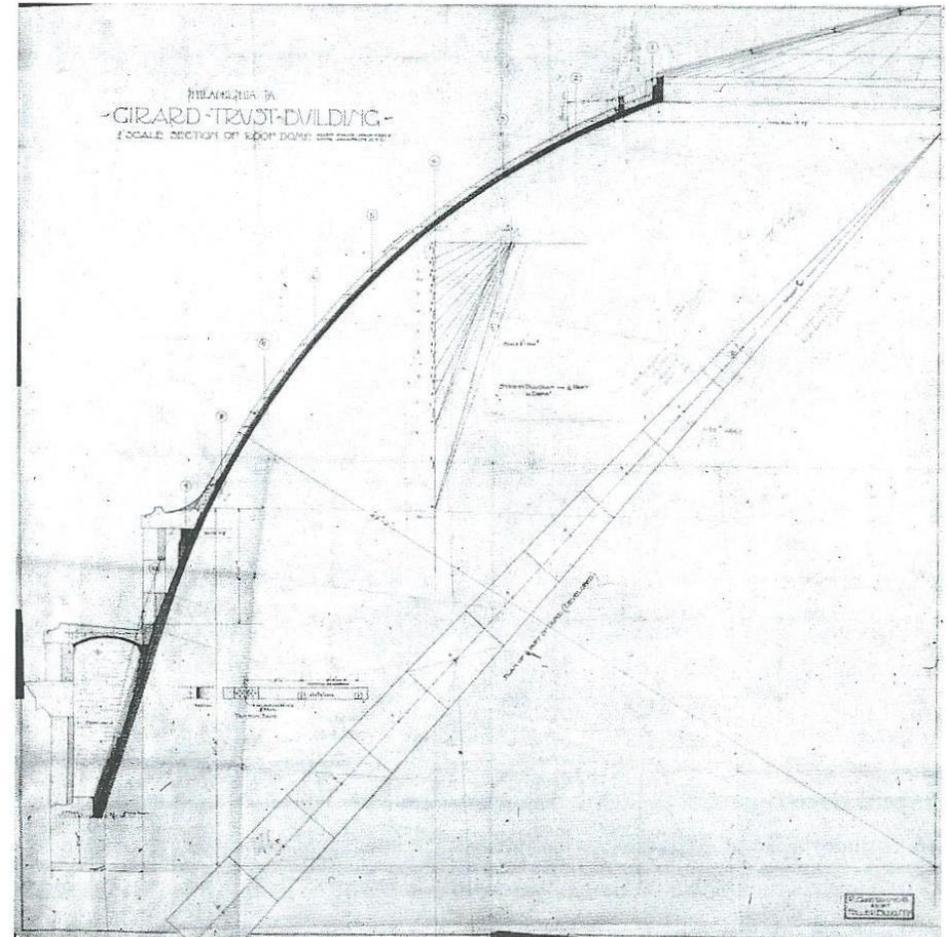


Figura 9.68. Proyecto de una cúpula libre de tracciones. Nótese el cambio de curvatura por debajo del punto de tensión cero. A partir de este punto la componente horizontal del empuje permanece constante, como se aprecia en el polígono de fuerzas. Cúpula de Girard Trust Building 1905-1907; 101 pies de luz (31m) (Avery Library, Universidad de Columbia).⁸⁸

⁸⁷ GUASTAVINO, Rafael (2006): *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN-10: 84-7790-429-4. Pág. xlv

⁸⁸ GUASTAVINO, Rafael (2006): *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN-10: 84-7790-429-4. Pág. xlvi

9.7. Estudio de la línea de empujes en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Análisis de Membrana.

La aplicación del método gráfico para el estudio de la cúpula como membrana ha sido el siguiente:

Tal y como se explica, los esfuerzos internos en una cúpula semiesférica interpretado como membrana quedan aplicados de forma tangencial a lo largo de su superficie media.

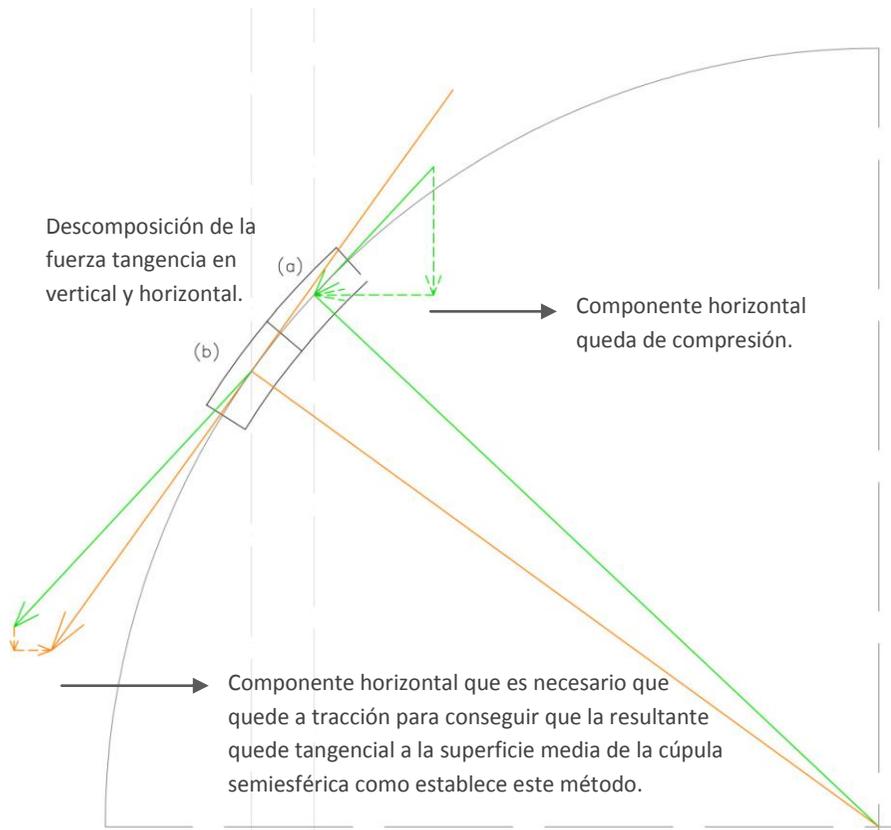


Figura 9.69. Dovelas (a) y (b) vista en sección. Elaboración propia.

Vista en planta la dovela (a).

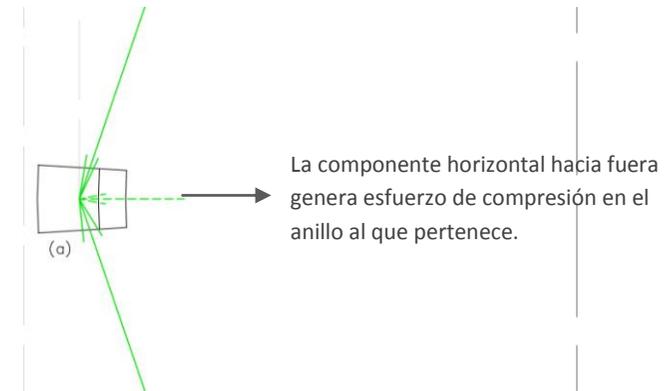


Figura 9.70. Dovela (a) a compresión. Vista en Planta. Elaboración propia.

Vista en planta la dovela (b).

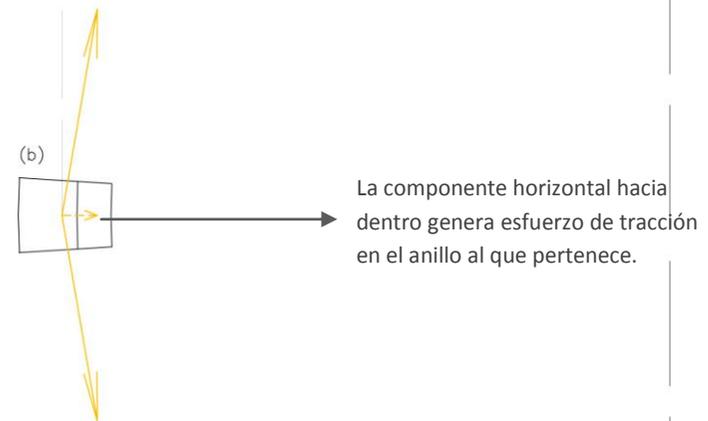


Figura 9.71. Dovela (b) a tracción. Vista en Planta. Elaboración propia.

En un archivo de Autocad se levanta en 3D el gajo a estudiar, diferenciando la parte de la cúpula a estudiar como membrana y los pesos de contrarresto que servirán para contener la línea de empujes dentro de la fábrica en la parte de la cúpula que trabaja a tracción.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

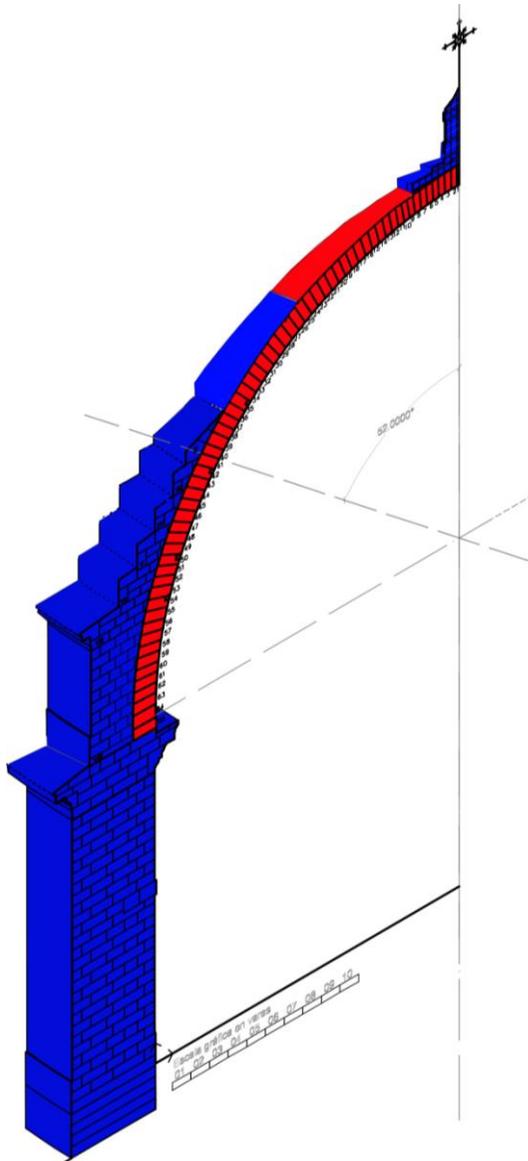


Figura 9.72. Cúpula como membrana. Elaboración propia.

Se ha obtenido la descomposición siguiente:

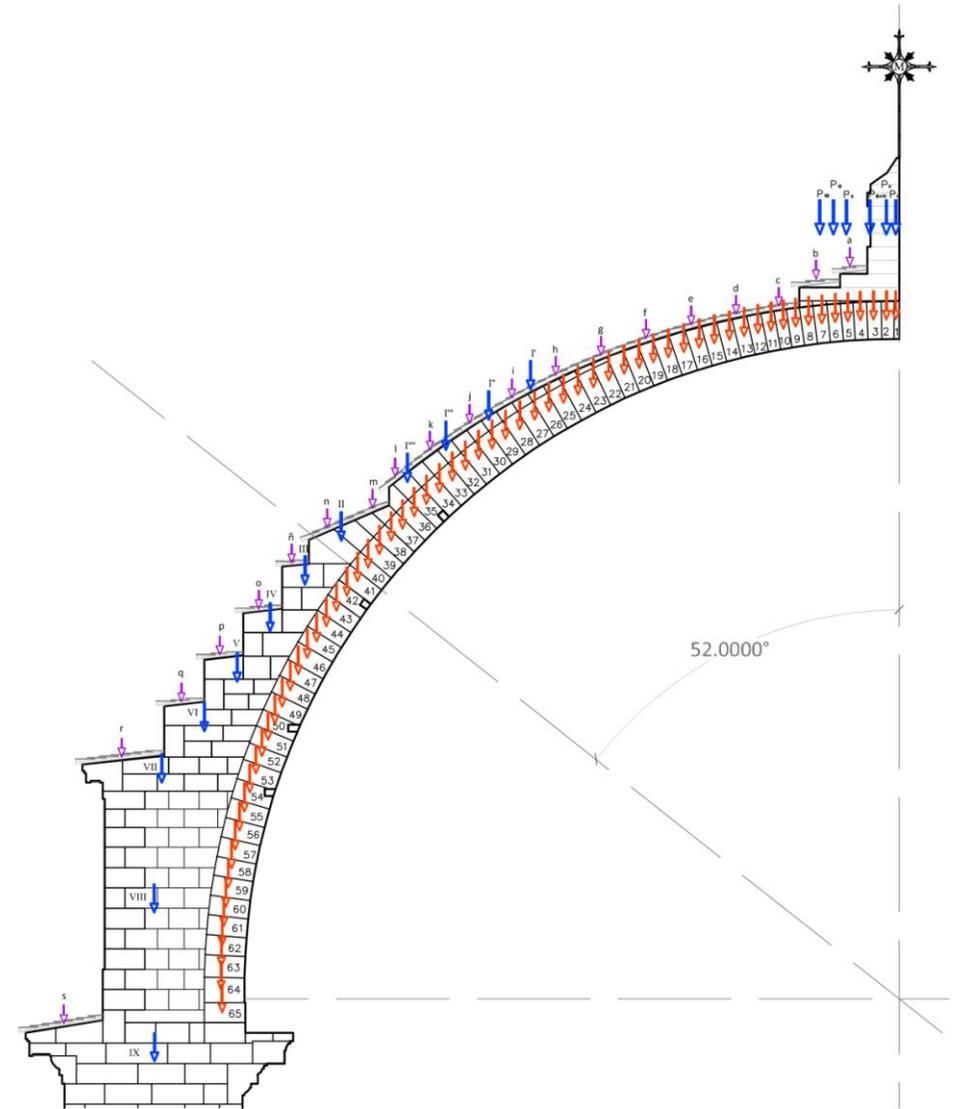


Figura 9.73. Descomposición de cargas en la cúpula interpretada como membrana.

Elaboración propia.

En una tabla Excel se ha registrado el peso y la posición del c.d.g. de cada pieza:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Dovela	Densidad (KN/m³)	V(m³)	P(KN)	Centro de Gravedad		
				Xg	Yg	Zg
1	20,40	0,0006	0,012	13,869	0,005	27,983
P ^I	20,40	0,0023	0,047	13,869	0,005	29,865
2	20,40	0,0067	0,137	13,672	0,017	27,985
P ^{II}	20,40	0,0239	0,488	13,668	0,017	29,731
3	20,40	0,0158	0,322	13,397	0,034	27,979
P ^{III} +P ^{IV}	20,40	0,0621	1,267	13,315	0,039	29,282
4	20,40	0,0230	0,469	13,114	0,052	27,967
a	20,00	0,0240	0,480	12,890	0,053	29,112
5	20,40	0,0286	0,583	12,846	0,069	27,951
P ^V	20,40	0,0235	0,479	12,815	0,071	28,645
6	20,40	0,0377	0,769	12,578	0,086	27,930
P ^{VI}	20,40	0,0171	0,349	12,540	0,088	28,491
7	20,40	0,0481	0,981	12,295	0,104	27,903
P ^{VII}	20,40	0,0236	0,481	12,251	0,106	28,478
b	20,00	0,0252	0,504	12,172	0,116	28,841
8	20,40	0,0557	1,136	12,009	0,122	27,870
P ^{VIII}	20,40	0,0295	0,602	11,956	0,125	28,461
9	20,40	0,0608	1,240	11,733	0,139	27,833
10	20,40	0,0640	1,306	11,474	0,155	27,794
c	20,00	0,0201	0,401	11,377	0,163	28,270
11	20,40	0,0765	1,561	11,213	0,172	27,750
12	20,40	0,0922	1,881	10,933	0,189	27,697
13	20,40	0,1054	2,150	10,638	0,208	27,636
d	20,00	0,0321	0,642	10,469	0,210	28,107
14	20,40	0,1269	2,589	10,326	0,228	27,565
15	20,40	0,1371	2,797	10,007	0,248	27,485
16	20,40	0,1568	3,199	9,685	0,268	27,397
e	20,00	0,0634	1,268	9,515	0,279	27,879
17	20,40	0,1754	3,578	9,354	0,289	27,298
18	20,40	0,1875	3,825	9,025	0,309	27,192
19	20,40	0,1909	3,894	8,711	0,329	27,084
f	20,00	0,0915	1,830	8,554	0,338	27,591
20	20,40	0,2132	4,349	8,404	0,348	26,970
21	20,40	0,2404	4,904	8,085	0,369	26,844
22	20,40	0,2617	5,339	7,761	0,389	26,707
g	20,00	0,0939	1,878	7,594	0,399	27,240
23	20,40	0,2883	5,881	7,433	0,410	26,560
24	20,40	0,3054	6,230	7,108	0,430	26,404
25	20,40	0,3220	6,569	6,792	0,450	26,233
h	20,00	0,0939	1,878	6,634	0,461	26,821
26	20,40	0,3239	6,608	6,486	0,469	26,059
27	20,40	0,3605	7,354	6,180	0,488	25,875
I'	20,40	0,0404	0,824	6,099	0,493	26,420
28	20,40	0,3864	7,883	5,867	0,508	25,675
i	20,00	0,1212	2,424	5,700	0,500	26,343
29	20,40	0,3784	7,719	5,563	0,527	25,472
30	20,40	0,3875	7,905	5,279	0,545	25,265
I''	20,40	0,1203	2,454	5,204	0,550	25,881
31	20,40	0,4274	8,719	4,989	0,563	25,052
j	20,00	0,1212	2,424	4,797	0,576	25,810
32	20,40	0,4143	8,452	4,710	0,581	24,827
33	20,40	0,4659	9,504	4,429	0,599	24,597

Dovela	Densidad (KN/m³)	V(m³)	P(KN)	Centro de Gravedad		
				Xg	Yg	Zg
I'''	20,40	0,2397	4,890	4,292	0,607	25,244
34	20,40	0,4584	9,351	4,154	0,616	24,351
k	20,00	0,1212	2,424	3,954	0,630	25,239
35	20,40	0,4964	10,127	3,880	0,633	24,103
36	20,40	0,4870	9,935	3,618	0,650	23,842
I''''	20,40	0,3387	6,909	3,473	0,659	24,571
37	20,40	0,4856	9,906	3,369	0,665	23,588
l	20,00	0,1212	2,424	3,213	0,675	24,677
38	20,40	0,4902	10,000	3,132	0,680	23,333
m	20,00	0,1193	2,385	2,731	0,697	24,026
39	20,40	0,5957	12,152	2,882	0,696	23,048
40	20,40	0,5018	10,237	2,641	0,711	22,763
41	20,40	0,5808	11,848	2,414	0,725	22,479
42	20,40	0,5922	12,081	2,187	0,740	22,169
II	20,40	1,2133	24,751	2,066	0,747	23,338
43	20,40	0,6037	12,315	1,964	0,754	21,857
n	20,00	0,1193	2,385	1,766	0,760	23,613
44	20,40	0,6222	12,693	1,749	0,767	21,535
45	20,40	0,6110	12,464	1,546	0,780	21,211
46	20,40	0,6967	14,213	1,343	0,793	20,868
III	20,40	1,3049	26,620	1,297	0,796	22,416
47	20,40	0,6239	12,728	1,152	0,805	20,521
ñ	20,00	0,0633	1,266	1,012	0,810	22,868
48	20,40	0,6423	13,103	0,980	0,816	20,187
49	20,40	0,6804	13,880	0,812	0,826	19,839
50	20,40	0,6443	13,144	0,655	0,836	19,490
IV	20,40	1,6873	34,421	0,555	0,842	21,425
51	20,40	0,6657	13,580	0,511	0,845	19,145
o	20,00	0,0957	1,914	0,312	0,855	21,847
52	20,40	0,6373	13,001	0,379	0,853	18,802
53	20,40	0,7591	15,486	0,248	0,862	18,433
54	20,40	0,7481	15,261	0,120	0,870	18,036
55	20,40	0,7737	15,783	0,004	0,877	17,634
56	20,40	0,7383	15,061	-0,099	0,883	17,235
V	20,40	2,5529	52,079	-0,149	0,887	20,372
57	20,40	0,7725	15,759	-0,190	0,889	16,836
58	20,40	0,7296	14,884	-0,268	0,894	16,439
59	20,40	0,7866	16,047	-0,334	0,898	16,039
60	20,40	0,7490	15,280	-0,390	0,902	15,633
61	20,40	0,7834	15,981	-0,433	0,904	15,228
62	20,40	0,7765	15,841	-0,465	0,906	14,816
63	20,40	0,8809	17,970	-0,485	0,908	14,378
64	20,40	0,9972	20,343	-0,488	0,908	13,882
65	20,40	0,8201	16,730	-0,469	0,907	13,405
p	20,00	0,1101	2,202	-0,516	0,926	20,935
VI	20,40	3,3242	67,814	-0,848	0,931	19,328
q	20,00	0,1254	2,508	-1,333	0,941	19,943
VII	20,40	5,8008	118,336	-1,748	0,987	18,248
IX	20,40	15,4758	315,706	-1,903	0,997	12,378
VIII	20,40	18,6436	380,329	-1,917	0,998	15,509
x	20,40	87,5779	1786,589	-1,963	1,006	5,691
r	20,00	0,2946	5,892	-2,603	1,023	18,785
s	20,00	0,3264	6,528	-3,839	1,107	13,173

Tabla 9.3. Tabla Excel con los resultados obtenidos del modelo 3D en Autocad.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

La resultante de las acciones ha de quedar tangente a la superficie media de la cúpula, como establece este método, lo que provocará tracciones que se han de resolver.

Para construir el polígono de fuerzas se coloca en la misma vertical cada uno de los pesos de las dovelas a estudiar. Sabiendo que el esfuerzo resultante para cada dovela debe tener la dirección de la tangente a su superficie, se observa que para obtener esta tangente es necesaria la aparición de una fuerza horizontal.

Esta fuerza horizontal genera las compresiones, cuando la tangente a la superficie se mantiene poco inclinada, o las tracciones, cuando la tangente a la superficie queda con mayor inclinación, en el anillo correspondiente.

La figura 74 nos deja intuir que mientras estamos en el tramo de la cúpula que forma menos de 52° con respecto a la vertical, la tangente a la superficie media de la cúpula tiene una cierta inclinación, que si la comparamos con el método de los cortes es mucho mayor, por lo que se puede intuir que junto con el peso actuante de las dovelas existe una acción horizontal que mantenga la resultante tangente a la superficie media. De no ser así obtendríamos resultantes semejantes a las usadas en el método de los cortes, donde la resultante no se mantenía en el c.d.g. de la dovela sino que se desplazaba hacia el trasdós entre las dovelas 27-28, cosa que aquí no ocurre por el esfuerzo anillo que estamos considerando.

Por otro lado cuando nos encontramos en el tramo de la cúpula que forma más de 52° con respecto de la vertical, la tangente a la superficie media de la cúpula tiene una inclinación muy pronunciada que no es posible conseguirla con el peso de las dovelas. Intuitivamente se puede ver que sería necesaria una fuerza horizontal hacia dentro que mantuviera la resultante tangente a la superficie media. Pero una fuerza hacia dentro supone una tracción en el anillo. Es por esto que para contrarrestar esta tracción se maciza el trasdós para que sirva de contrarresto. Con el trasdós macizado la línea de empujes no tiene por que mantenerse tangente a la superficie media y se va desplazando hacia el trasdós como veremos en la resultante final de la línea de empujes por el método de la membrana.

A continuación se estudiará la construcción del polígono de fuerzas que estará compuesto por resultantes tangentes a la superficie media de la cúpula hasta la posición de los 52° respecto de la horizontal, y resultantes con inclinación amoldada a las cargas verticales del contrarresto actuantes.

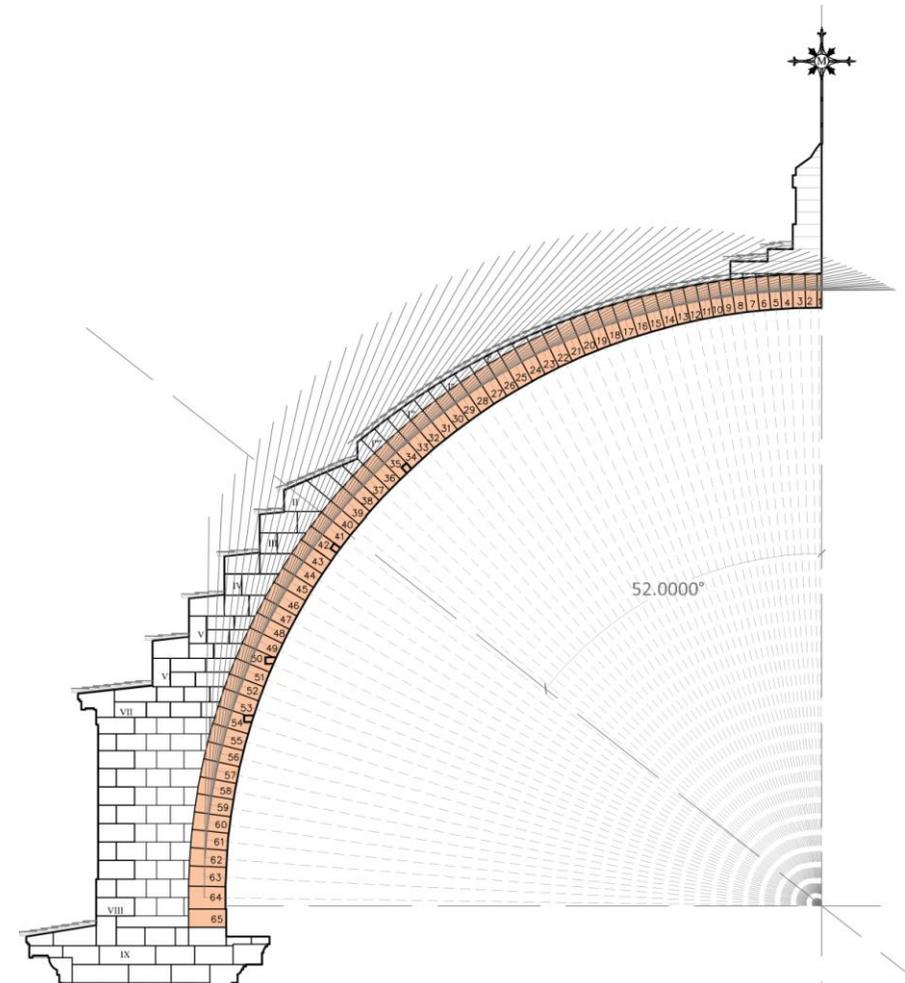


Figura 9.74. El método de la membrana establece que la resultante de las acciones ha de quedar aplicada tangente a la superficie media de la cúpula semiesférica. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO, GRANADA.

El esquema del polígono de fuerzas se construye colocando en vertical el peso de cada pieza que interviene. En rojo están los pesos de las dovelas que componen la cúpula semiesférica como membrana. En azul está representado el peso del pináculo en la parte superior y el peso de los contrarrestos que están nombrados con números romanos. En morado están representados los pesos del tablero cerámico de cubrición.

Como se puede observar desde la dovela 1 a la 40, para que las resultantes queden tangenciales a la superficie media de la cúpula es necesario que aparezca una componente horizontal sumada vectorialmente con la componente vertical de los pesos que quedan por encima de cada dovela.

Esta componente horizontal, entre las dovelas 1-40, queda dibujada en el polígono de fuerzas hacia fuera. Una fuerza horizontal dibujada hacia fuera significa un esfuerzo de compresión en el anillo.

Es a partir de la dovela 40, donde se rebasa el ángulo con la vertical de 52° , cuando para obtener una resultante vertical se hace necesario una componente horizontal hacia dentro como describe Dunn (1904) en su análisis gráfico de la membrana de una cáscara semiesférica (ver apartado 9.6) lo que significa un esfuerzo de tracción en el anillo.

A partir de la dovela 40 se observa el cambio de trabajo de compresión a tracción. Por lo que a partir de ésta, la fábrica no puede resistir las tracciones y las cargas se transmiten según el funicular de las cargas verticales mediante el polígono antifunicular como se había utilizado en el método de los cortes. (ver figura 63 Föpp 1881).

A partir de la dovela 40 la resultante ya no será tangente a la superficie media de la cúpula y por lo tanto con la resultante de esta dovela 40 actuarán el resto de los pesos del contrarresto para corregir la inclinación y conseguir que la línea de empujes pase por la sección resistente.

La línea de empujes definitiva queda como se muestra en la figura 76.

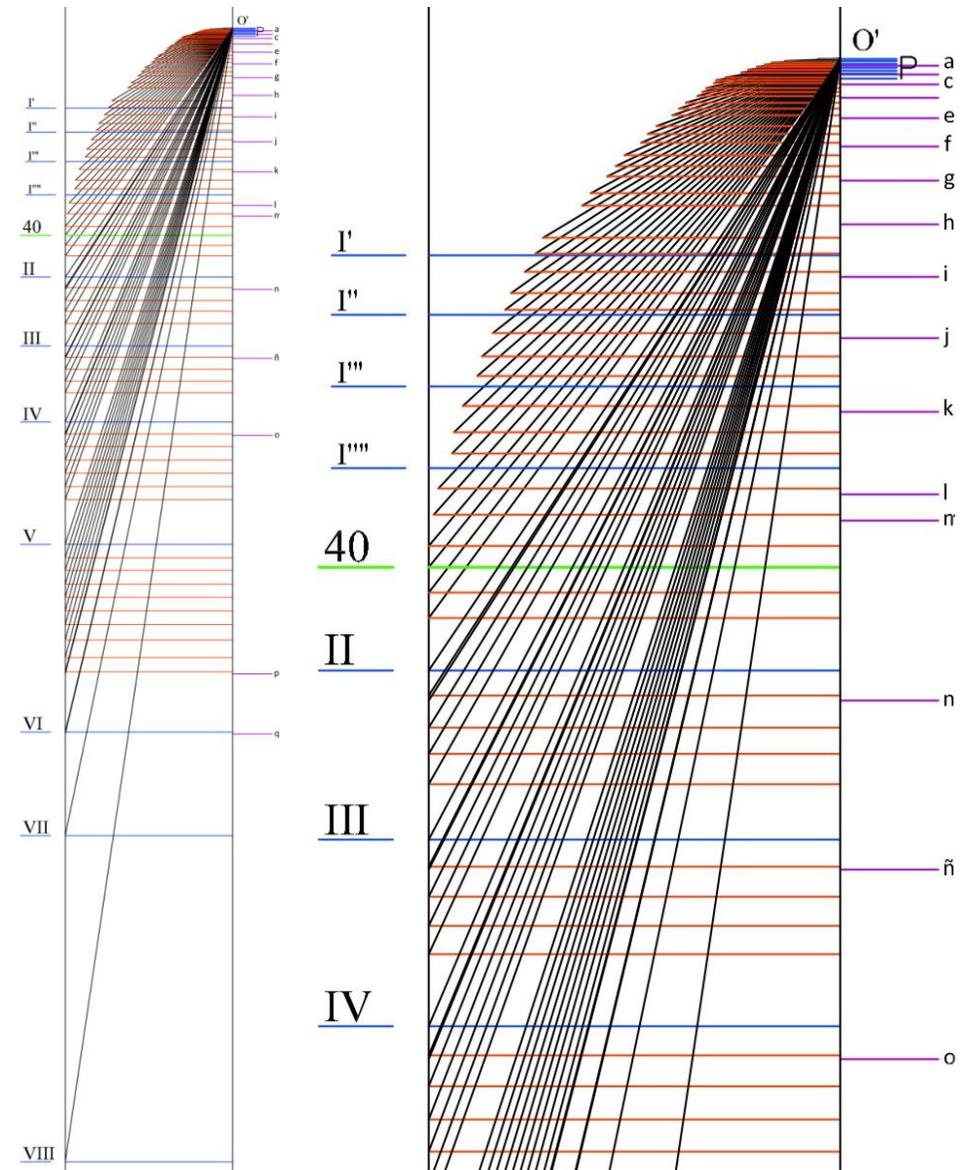


Figura 9.75. Polígono de fuerzas. Elaboración propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

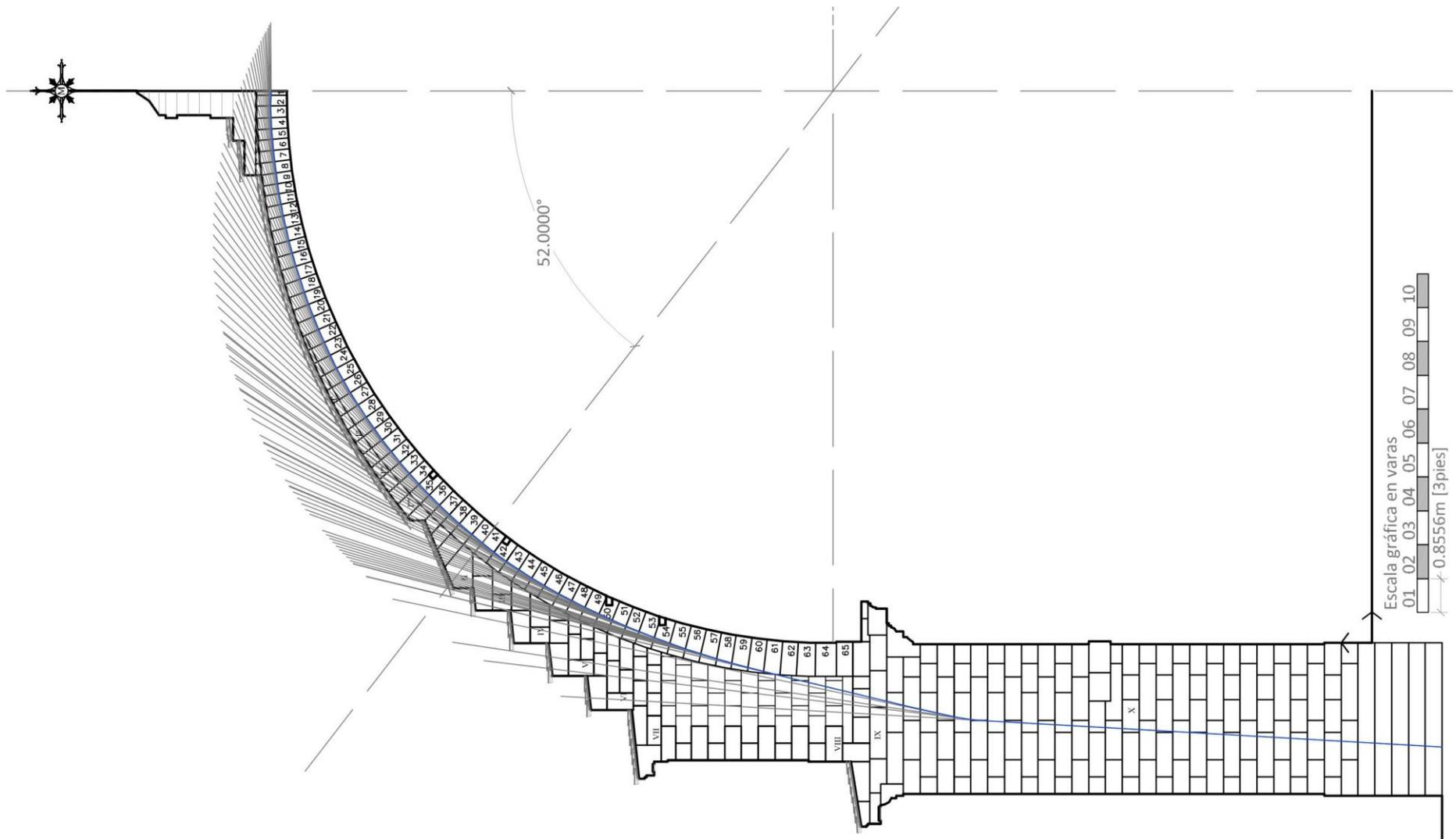


Figura 9.76. Línea de empujes para la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío considerando la cúpula como membrana. Elaboración propia.

9.8. Conclusiones del estudio de la línea de empujes en la cúpula de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío.

Después de aplicar las condiciones de estabilidad, que el cálculo científico establece a través del análisis límite, queda confirmado que la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío posee una línea de empujes contenida en el contorno de su sección lo que se cumple el primer teorema de la seguridad.

Se ha estudiado la cúpula por medio de los dos métodos establecidos:

En el apartado 9.5 se ha aplicado la asimilación de la cúpula a arcos.

En el apartado 9.8 se ha aplicado la interpretación de la cúpula como membrana.

9.8.1. Estudio de la cúpula haciéndola semejante a los arcos.

El método de los cortes considera la cúpula como una estructura formada por un arco que genera la cúpula por revolución de éste respecto del eje de simetría.

En este método se considera como las acciones sobre el corte de la cúpula (arco), las cargas verticales de los pesos que componen las dovelas (entendidas desde la clave hasta el arranque de la cúpula, esto significa que se entiende como dovelas tanto en la parte superior como la zona con mayor espesor desde el arranque hasta la imposta) así como las cargas verticales del tablero de cubrición cerámico. En este método no existen fuerzas horizontales, solo la fuerza del empuje aplicada en la clave y a partir de ahí el peso vertical de las dovelas es el que ayuda para obtener resultantes, de la suma de estas acciones, cada vez con mayor inclinación a modo de polígono antifunicular.

El estudio de la cúpula por el método de los cortes nos confirma que existe una línea de empujes contenida en el interior de la cúpula lo que verifica el teorema de la seguridad y las conclusiones a las que se llega son:

1.- Vemos en las primeras hipótesis, que cuando la línea de empujes está muy cerca del trasdós en la parte superior de la cúpula, esta línea, se encuentra relativamente alejada del intradós del arranque de la cúpula.

2.- Del mismo modo se puede ver que cuando la línea de empuje se va retirando del trasdós en la parte superior de la cúpula, esta línea se va acercando al intradós del arranque de la cúpula.

3.- En la hipótesis 5 se encuentra una línea de empujes que se mantiene alejada en la proporción de 5/3 tanto en la clave como en el trasdós en la zona superior y también en el intradós en la parte inferior de la cúpula consiguiendo un coeficiente de seguridad de 1.66 que coincide con el coeficiente obtenido en un ejercicio propuesto en la bibliografía de Mas-Guindal para una cúpula teórica diseñada por Carlos Fontana (1638-1714)⁸⁹. Hay que recordar que Carlo Fontana recoge información sobre las proporciones geométricas de cúpulas históricas que siguen en pie y a parte de las proporciones que registra de arquitectos a lo largo de la historia, él mismo propone unas proporciones teóricas para la construcción de cúpulas de forma segura.

Ventura Rodríguez se basa en estas proporciones geométricas para emitir un informe favorable en aquellos proyectos que debían ser revisados por la Cámara de Castilla. Y de esta manera la cúpula de la iglesia de la Encarnación consiguió tener un informe favorable⁹⁰.

4.- De las apreciaciones de las hipótesis, donde se ha estudiado el comportamiento de la cúpula bajo el peso propio más el tablero cerámico de tejas, se deduce que no es

⁸⁹ MAS-GUINDAL, Antonio José (2011): *Mecánica de las estructuras antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban*. Ed. Munilla-Lería ISBN: 978-84-89150-90-4. Pág210.

⁹⁰ Ver documentación Anexa II.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

posible que se produzcan las cuatro rótulas que serían necesarias para que se produjera el colapso entendido como lo plantea el profesor Heyman.

Así, se puede concluir que el descenso que sufre la cúpula en la clave, recogido en el capítulo de la traza del templo, es debido al propio del comportamiento de una cúpula. Este descenso no pone en riesgo la seguridad ya que el espesor de la cúpula es superior al espesor límite. El espesor límite sería aquel donde la línea de empujes pasa tangente de forma simultánea por en el trasdós superior y por en el intradós inferior, dejando entrever la posición de las posibles rótulas.

De esta forma queda validado el cálculo tradicional llevado a cabo con las reglas de Fontana (en concreto aquellas que recoge de las obras de Palladio) para el proyecto de la iglesia de la Encarnación de Montefrío. Las reglas de Fontana para el proyecto de cúpulas se ajustan al método de los cortes desarrollado por el profesor Heyman dentro del análisis límite actual.

No sabemos si el arquitecto Domingo Lois de Monteagudo tenía previsto los efectos de deformación a la hora de proyectar la iglesia. Lo que si sabemos es que respetó y tomó, como herramienta de proyección, las proporciones que Fontana propone en su regla para el proyecto de cúpulas. Hasta el momento esta regla se basaba en el cálculo tradicional, en el conocimiento que aporta el estudio de las proporciones de cúpulas que se han mantenido en pie a lo largo de los años.

9.8.2. Estudio de la cúpula interpretada como membrana.

Este método considera la cúpula como una estructura espacial. La diferencia de este método con el anterior es que en el método de la membrana las acciones sobre la cúpula (peso propio) serán transmitidas como fuerzas tangenciales a la superficie media de la cúpula semiesférica. La consideración de las acciones sobre la cúpula como fuerzas tangenciales sobre la superficie media genera una descomposición de fuerzas verticales (peso propio del casquete que queda por encima del punto de la superficie media a estudiar) y fuerzas horizontales.

Las fuerzas tangenciales se transmiten a lo largo de los meridianos, pero las fuerzas horizontales generadas por las tangenciales se transmiten a lo largo de los paralelos, es decir, por anillos.

Las fuerzas tangenciales transmitidas por los meridianos serán siempre de compresión.

Las fuerzas horizontales podrán ser de compresión y tracción. Se produce un cambio de anillo sometido a compresión a anillo sometido a tracción ya que la idea con la que trabaja este método es la mantener la resultante de fuerzas tangente a la superficie media de la cúpula semiesférica así que existe un punto donde para mantener la resultante tangente a la superficie media será necesario una componente horizontal de tracción.

Las fuerzas horizontales de compresión no suponen mayor problema ya que el material tiene capacidad de resistirlas, pero las fuerzas horizontales de tracción tienen que ser contrarrestadas ya que el material no puede resistirlas.

Este método aplicado al estudio de la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío es el más indicado ya que esta cúpula es semiesférica y al no tener linterna se comporta como una cáscara-membrana.

De la aplicación de este método se concluye:

1.- La línea de empujes queda en el interior de la sección de la cúpula, pasando por la superficie media de la cáscara considerada como sección estructural, cuando en la descomposición de fuerzas la componente horizontal queda de compresión. Es decir, a lo largo del tramo de la cúpula que forma un ángulo en torno a 52° respecto de la vertical.

2.- A partir de este ángulo la descomposición de fuerzas genera una componente horizontal de tracción por lo que al no poder resistirla el material se tiene que buscar una solución para poder contrarrestarla. En el caso de la iglesia de Montefrío la solución fue la de incorporar un aumento del espesor. Este aumento del espesor

zuncha la zona de la membrana de la cúpula que de otra manera terminaría por agrietarse y abrirse.

3.- De esta manera la línea de empujes queda dentro del espesor de la nueva sección de la cúpula y se transmite por el tambor hasta el suelo con seguridad.

9.9. Posibles líneas de investigación

Una vez comprobada la seguridad de la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío mediante la línea de empujes que establece el análisis límite para fábricas del profesor Heyman, quedaría por estudiar la seguridad del tambor y la cimentación.

Otro punto a desarrollar es el estudio de las deformaciones que se han analizado en el capítulo de la traza del templo.

La toma de datos “in situ” revela que existen deformaciones de la cúpula real respecto de una cúpula ideal totalmente semiesférica y que toman especial significado ahora que con la línea de empuje, por el método de los cortes, se ha detectado la posición de las zonas de tangencia en el trasdós y en el intradós respecto del espesor límite.

A semejanza del estudio de deformación para la cúpula de Santa Sofía se propone una posible línea de investigación donde se proceda al análisis de los datos geométricos obtenidos y su correspondencia con los datos estructurales estudiados en este trabajo.

A parte de la deformación sufrida en la cúpula por características propias de la construcción y material se puede plantear una hipótesis de deformación debida a las tensiones sufridas a lo largo de sus años de vida.

Por otro lado se propone el estudio del comportamiento estructural de la cúpula por aplicación de métodos numéricos.

INDICE DE FIGURAS

Figura 9.1. Línea de empujes en un macizo de fábrica: Exposición de Moseley. La línea de empujes (línea de puntos) es el lugar geométrico del punto de paso de la resultante por su sistema de planos de corte dados. Estos planos de sección pueden corresponder a juntas reales o imaginadas. Moseley llamó a esta curva “Line of Resistance” (línea de reacciones) y a su envolvente, que define la dirección de los empujes, “Line of Pressure” (línea de presiones). (Moseley, 1843) (HUERTA 2004, pág 37).....1

Figura 9.2. Arco etrusco de dovelas de piedra. (Durm 1885). (HUERTA 2004, pág 39).....2

Figura 9.3. Equilibrio de una arco simétrico. (Snell, 1846) (HUERTA 2004, pág. 41).2

Figura 9.4. Posibles líneas de empujes en el arco. Para cada centro de empuje elegido en la clave, es posible dibujar infinitas líneas de empujes dentro de la fábrica.3

Figura 9.5. Ensayo para “demostrar la existencia en la práctica de la línea de empujes” propuesto por Barlow en 1846. (HUERTA, (2004) pág.51).....4

Figura 9.6. Modelos de arcos con dovelas de juntas convexas. (Barlow 1846 y Jenkis 1876). El punto de contacto de las dovelas dibuja la línea de empujes. (a) El modelo cambia su forma al descimbrar dada la no coincidencia entre el perfil y la línea de empujes, como se explica en (b); (c) al cambiar las cargas, cambia la forma de la línea de empujes. (HUERTA, (2004) pág.52).5

Figura 9.7. (a) Analogía de la cadena de Hooke para el análisis de arcos. Un cable trabaja siempre a tracción; si se invierte, las tracciones se convierten en compresiones, y la catenaria invertida es, según Hooke, la figura de un arco perfecto (Poleni 1748, en la cúpula de San Pedro). (b) Arco de fábrica en equilibrio con una catenaria en su interior (Heyman 1999a) (HUERTA, (2004) pág.54).5

Figura 9.8. Módulo de elasticidad ($*10^5 \text{kg/cm}^2$) de una fábrica a partir de los de sus componentes. Resultados del estudio realizado por los ingenieros austriacos en 18956

Figura 9.9. Definición del coeficiente geométrico de seguridad, (a) Arco de medio punto estable, como lo demuestra la línea de empujes dibujada en su interior; (b) Arco límite con el mínimo espesor que permite dibujar una línea de empujes en su interior; (c) Mecanismo de colapso del arco límite. El coeficiente geométrico de seguridad del arco se obtiene dividiendo su espesor por el del arco límite. (Heyman 1969). (HUERTA, (2004) pág.93).9

Figura 9.10. Regla del tercio central. (MAS-GUINDAL, 2011. Pág.53)9

Figura 9.11. Agrietamientos típicos de un arco de fábrica. (a) Pequeña separación de los apoyos; el empuje se hace mínimo. (b) Pequeño acercamiento de los apoyos, el empuje se hace máximo. (Heyman 1999a). (HUERTA, (2004) pág.76). 10

Figura 9.12. Estabilidad de cúpulas semiesféricas y poligonales. (a) la cúpula semiesférica es estable en todas las etapas intermedias de la construcción siempre que se ejecute realizando anillo completos, ya que el último anillo actúa como una clave; (b) la cúpula poligonal es estable si es capaz de contener dentro de su espesor un anillo circular. (Mainstone, 1977). 11

Figura 9.13. Diferencia entre un arco y una cúpula. (Dunn 1908) 12

Figura 9.14. (a) Agrietamiento de una cúpula de fábrica por un pequeño cedimiento uniforme del sistema de contrarresto. (b) Línea de empujes correspondiente; nótese que se hace tangente antes de llegar a la clave, permaneciendo sin agrietar el casquete superior. (Heyman 1988). (HUERTA, (2004) pág.447). 12

Figura 9.15. Estudio de un cedimiento simétrico del sistema de contrarresto en la cúpula de Santa Sofía. (a) Dibujo de la línea de empuje mínimo que determina la posición de las rótulas del mecanismo; (b) representación del movimiento correspondiente, se puede apreciar una cierta convexidad hacia abajo en la zona de la primera rótula; (c) relación geométrica ante la apertura radial δh y el descenso vertical δv del casquete de la clave. (HUERTA, (2004) pág.448). 13

Figura 9.16. (a) Espesor límite de una cúpula semiesférica; la superficie de empujes está contenida justo dentro del dominio definido por las superficies de intradós y trasdós. Nótese que, a diferencia de los arcos, la línea de empujes no toca el borde en la clave. (b) Mecanismo de colapso asociado; el casquete por encima de P permanece sin agrietar. (Heyman 1977)..... 13

Figura 9.17. Estudio de la Cúpula de San Pedro de Roma. Poleni (1748)..... 14

Figura 9.18. Regla geométrica para el perfil de las dos cáscaras de la cúpula de San Pedro. Fontana dice haber hallado esta traza grabada en el pavimento de la Basílica de San Paolo en Roma. Nótese que también se indica la situación de las cadenas de hierro. Fontana (1694). (HUERTA, (2004) pág.269)..... 15

Figura 9.19. Línea de empujes en los nervios diagonales, que soportan todo el peso de linterna, y línea de empujes en la rebanada central del paño. (Parsons, 1939). (HUERTA, (2004) pág.453)..... 16

Figura 9.20. Cúpula de Santa María del Fiore, en Florencia. Sección constructiva de la cúpula, según Durm (1885). (HUERTA, (2004) pág.453)..... 16

Figura 9.21. Análisis de equilibrio de la cúpula del Gol Gumbaz. (HUERTA, (2004) pág.452). 17

Figura 9.22. Planta y sección que permiten ver el sistema de contrarresto: son las pechinas interiores voladas y las torres las que equilibran el empuje de la cúpula. 17

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Figura 9.23. Formas catenarias de arcos (izquierda) y cúpulas. Nótese que en el segundo caso la forma se acerca mucho más a la circular y en las dos figuras se ha realizado esta comparación, con y sin peralte. (Ungewitter, 1890) (HUERTA, (2004) pág. 444)	17	Figura 9.39. Hipótesis 3. Elaboración propia.	29
Figura 9.24. Análisis gráfico de una cúpula de revolución, que sigue la regla de Fontana, por el método de los cortes. La cúpula se ha dividido en gajos y cada gajo en “dovelas” cortando por los planos 1,2,3, etc. Se ha dividido el antifunicular de los pesos de las dovelas en línea gruesa; los puntos de la línea de empujes (a, b, c, etc.) se obtienen de la intersección de los lados del polígono con los planos correspondientes. (HUERTA, (2004) pág. 445).....	18	Figura 9.40. Polígono antifunicular para la hipótesis 3. Elaboración propia.	30
Figura 9.25. Verificación de la regla de Fontana (1694) para cúpulas. (a) línea de empuje mínimo; (b) dibujo original, en sección y planta, de la regla. (HUERTA, (2004) pág.461).	18	Figura 9.41. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 3.	30
Figura 9.26. Gajo a estudiar. Iglesia de la Encarnación de Montefrío. Elaboración propia.	19	Figura 9.42. Hipótesis 3. Elaboración propia.	31
Figura 27. Arco trasdosado con un relleno. (a) Dos sistemas de planos de corte. El sistema de planos de corte verticales para arco y relleno simplifica notablemente los cálculos. (b) Cálculo del empuje en una cierta junta normal al intradós, a partir del empuje para planos de corte verticales. (Föppl, 1903) (HUERTA, (2004) pág.57,59).....	20	Figura 9.43. Hipótesis 4. Elaboración propia.	32
Figura 9.28. Descomposición en dovelas y peso propio en cada c.d.g. Elaboración propia.	20	Figura 9.44. Polígono antifunicular para la hipótesis 4. Elaboración propia.	33
Figura 9.29. Pesos de las dovelas y de las piezas cerámicas que forman el tablero de cubrición. Elaboración propia.	22	Figura 9.45. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 4.	33
Figura 9.30. Distintos valores para el Empuje y la Reacción con el mismo Peso total de las dovelas. Elaboración propia.	22	Figura 9.46. Hipótesis 4. Elaboración propia.	34
Figura 9.31. Hipótesis 1. Elaboración propia.	23	Figura 9.47. Hipótesis 5. Elaboración propia.	35
Figura 9.32. Polígono antifunicular para la hipótesis 1. Elaboración propia.	24	Figura 9.48. Polígono antifunicular para la hipótesis 5. Elaboración propia.	36
Figura 9.33. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 1.	24	Figura 9.49. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 5. Elaboración propia.....	36
Figura 9.34. Hipótesis 1. Elaboración propia.	25	Figura 9.50. Hipótesis 5. Elaboración propia.	37
Figura 35. Hipótesis 2. Elaboración propia.	26	Figura 9.51. Angulo de rozamiento que impide el fallo por deslizamiento está por debajo de 30-35º (HUERTA, 2004, 65, 118). Elaboración propia.	38
Figura 36. Polígono antifunicular para la hipótesis 2. Elaboración propia.	27	Figura 9.52. Fase constructiva. Construcción de dovelas en horizontal. Elaboración propia.	39
Figura 9.37. Esquema de la composición de la línea de empujes para la hipótesis 2.	27	Figura 9.53. Fase constructiva. Elaboración propia.	39
Figura 9.38. Hipótesis 2. Elaboración propia.	28	Figura 9.54. Cúpula de revolución. Elaboración propia.	40
		Figura 9.55. Deformación de la cúpula. La tracción hace que se abra en gajos.	40
		Figura 9.56. Elemento de la cúpula sometido a compresión anular. Elaboración propia.	41
		Figura 9.57. Elemento de la cúpula sometido a tracción anular. Elaboración propia.	41
		Figura 9.58. Análisis gráfico de membrana de una cáscara semiesférica. Dunn (1904).	42
		Figura 9.59. Elemento perteneciente a la zona de añillos sometidos a compresión.	42

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Figura 9.60. Análisis gráfico de membrana de una cáscara semiesférica. Dunn (1904) 43

Figura 9.61. Elemento perteneciente a la zona de anillos sometidos a tracción..... 43

Figura 9.62. Gráfica de esfuerzos. $P_v=N\phi$. $P_h=N\theta$. Fórmulas solo utilizadas para una cúpula totalmente semiesférica sometida sólo a su propio peso..... 44

Figura 9.63. Cúpula de fábrica. En la parte superior se ha considerado un estado de membrana en la superficie media con esfuerzos de compresión según los anillos paralelos. A partir del punto en que aparecen tracciones, la fábrica no puede resistirlas, las cargas se transmiten según el funicular de las cargas verticales, como en los arcos. (Föppl, 1881). (HUERTA, (2004) pág. 442). 44

Figura 9.64. Deformación de la cúpula como membrana. Elaboración propia. 45

Figura 9.65. Anillos rodeando la cúpula para contrarrestar las tracciones con el peso propio de los anillos que zunchan la cúpula. Elaboración propia. 45

Figura 9.66. Disposición de refuerzos metálicos en las bóvedas tabicadas..... 45

Figura 9.67. Análisis gráfico de una delgada cúpula con una luz de 100 pies (30m) 46

Figura 9.68. Proyecto de una cúpula libre de tracciones. Nótese el cambio de curvatura por debajo del punto de tensión cero. A partir de este punto la componente horizontal del empuje permanece constante, como se aprecia en el polígono de fuerzas. Cúpula de Girard Trust Building 1905-1907; 101 pies de luz (31m) (Avery Library, Universidad de Columbia). 46

Figura 9.69. Dovelas (a) y (b) vista en sección. Elaboración propia..... 47

Figura 9.70. Dovela (a) a compresión. Vista en Planta. Elaboración propia. 47

Figura 9.71. Dovela (b) a tracción. Vista en Planta. Elaboración propia. 47

Figura 9.72. Cúpula como membrana. Elaboración propia. 48

Figura 9.73. Descomposición de cargas en la cúpula interpretada como membrana. 48

Figura 9.74. El método de la membrana establece que la resultante de las acciones ha de quedar aplicada tangente a la superficie media de la cúpula semiesférica. Elaboración propia. 50

Figura 9.75. Polígono de fuerzas. Elaboración propia. 51

Figura 9.76. Línea de empujes para la cúpula de la iglesia de la Encarnación de Montefrío considerando la cúpula como membrana. Elaboración propia. 52

INDICE DE TABLAS

Tabla 9.1. Resultado de los distintos pesos de la dovelas y de los sectores de tejas considerados para el análisis límite de la cúpula de la iglesia. 21

Tabla 9.2. Resultados de la fase constructiva. 39

Tabla 9.3. Tabla Excel con los resultados obtenidos del modelo 3D en Autocad..... 49

» ≡ Anexo I. Dossier de cúpulas citadas

Panteón de Agripa.....	2	Catedral de San Pablo.	12
Santa Sofía.....	3	Santuario de Loyola.....	13
Cúpula de La Roca.	4	San Francisco el Grande.	14
Cúpula de Santa María de Fiore.	5	Iglesia de Saint Genevieve. Panteón de París.	15
Basílica San Pedro del Vaticano.....	6	Parroquia de San Joaquín, Escolapios.....	16
Iglesia Il Gesù.....	7	Capitolio.	17
Iglesia de San Justo y Pastor.....	8	Nuestra Señora de la Asunción.	18
Monasterio del Escorial.....	9	Global Vipassana Pagoda	19
Colegio del Cardenal Monforte.....	10		
Gol Gumbaz.	11		

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO, GRANADA.

- ◆ Piedra
- ◆ Hormigón
- ◆ Ladrillo
- ◆ Madera
- ◆ Hierro fundido



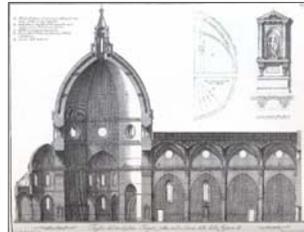
◆ Panteón de Agripa
118-125
Ø 43.20m.



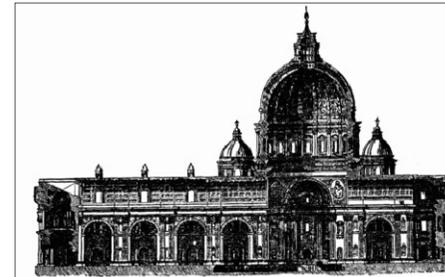
◆ Santa Sofía
415-537
Ø 31m.



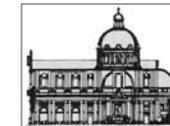
◆ Cúpula de la Roca
687-692
Ø 20m.



◆ Santa María de Fiore
1420-1436
Ø 41m.



◆ San Pedro del Vaticano
1506-1590
Ø 42.59m.



◆ Iglesia Il Gesù
1568
Ø 17.5m.



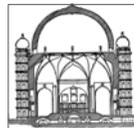
◆ San Justo y Pastor
1574
Ø 10m.



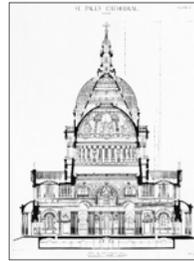
◆ Monasterio del Escorial
1575-1586
Ø 17m.



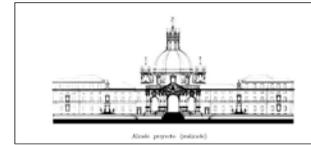
◆ Colegio del Cardenal Monforte
1593-1613 Ø 10.16m.



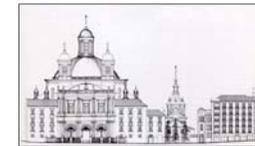
◆ Gol Gumbaz
1626-1656
Ø 37.2m.



◆ Catedral de San Pablo
1676-1710
Ø 34m.



◆ Santuario de Loyola
1719-1766
Ø 20m.



◆ San Francisco el Grande
1761-1784
Ø 33m.



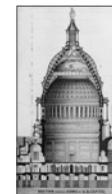
◆ Panteón de París
1764-1790
Ø 27m.



◆ San Joaquín
1767-1773
Ø 24.5m.



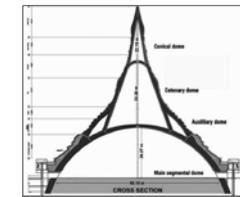
◆ Iglesia de la Encarnación
1767-1773
Ø 28m.



◆ Capitolio
1818-1824
Ø 29m.



◆ Nuestra Señora de la Asunción
1833-1860
Ø 37.2m.



◆ Global Vipassana Pagoda
2000-2008
Ø 85.15m.

Panteón de Agripa.

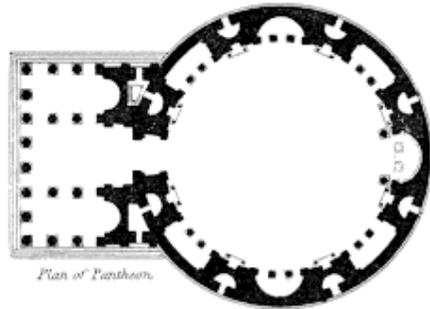


Fig.1: Planta.

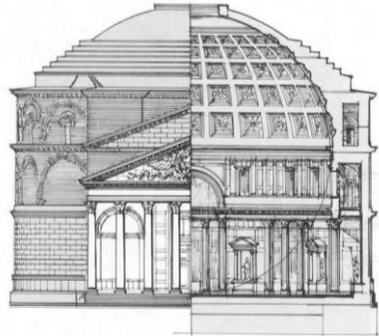


Fig.2: Alzado/Sección.

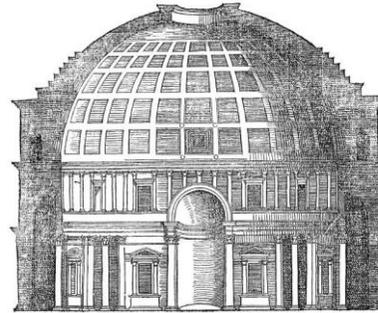


Fig.3: Sección.

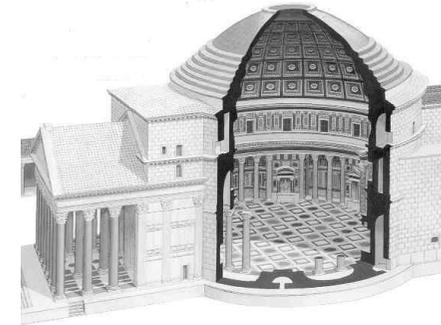


Fig.4: Perspectiva-Sección.

Arquitecto: Apolodoro de Damasco.

Año: 118-125.

Material: Hormigón aligerado utilizando piedra pómez como árido. El grueso anillo murario es de opera latericia (hormigón con ladrillo).

Diámetro de la cúpula: 43,20 m.

Ubicación: Roma, Italia.

Estructura: El espacio interno de la rotonda está construido por un cilindro cubierto por una semiesfera. El cilindro tiene una altura igual al radio, por lo que se puede inscribir una esfera completa en el espacio interior.

La cúpula se apoya de manera estática sobre el cilindro que posee un radio de 21,60m, la misma dimensión que el cilindro y su altura. El espesor del muro cilíndrico es de 6 metros y está sostenido por un anillo de cimentación de 7,30 metros de espesor. Este muro encierra un festoneado de bóvedas y arcos de ladrillo que trasladan el peso del hormigón a los puntos de mayor resistencia. Una vez terminado debió de ser reforzado por el este y el sur con edificios anejos.

La cúpula utiliza un sistema dividido en paralelos y meridianos, como muestra la forma de los casetones, donde mediante anillos concéntricos se produce un sistema constructivo autoportante, ya que al realizar todo un anillo poniendo la última "clave", se puede desmontar el andamiaje y proceder a hacer el siguiente anillo.

Para aligerar su peso y asegurar su sujeción se hizo recaer todo el peso sobre 6 gruesos pilares que se ocultan dentro del muro cilíndrico y que recogen el peso de tal forma que entre ellos se abren los espacios que servirían como capillas. Se utilizaron materiales muy ligeros para su ejecución, las tres líneas de imposta, visibles por el exterior del cilindro, delimitan los tres sectores superpuestos que constituyen el verdadero muro, en ellos los materiales de relleno se van aligerando de abajo hacia arriba.¹

Bibliografía: (1; Fig.1, 2 y 3) http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Pante%C3%B3n_de_Agripa

Santa Sofía.

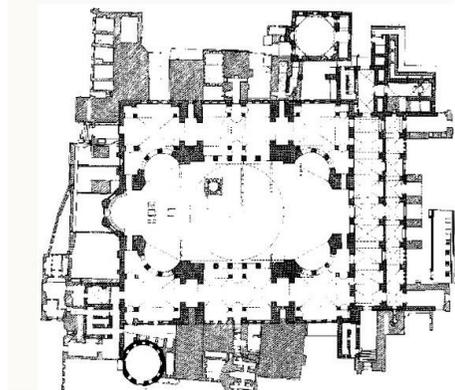


Fig.5: Planta.

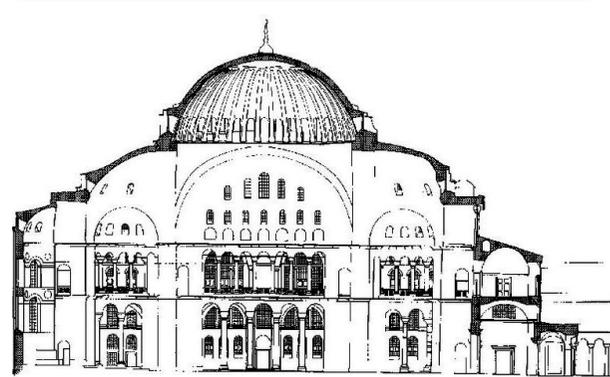


Fig.6: Sección longitudinal.

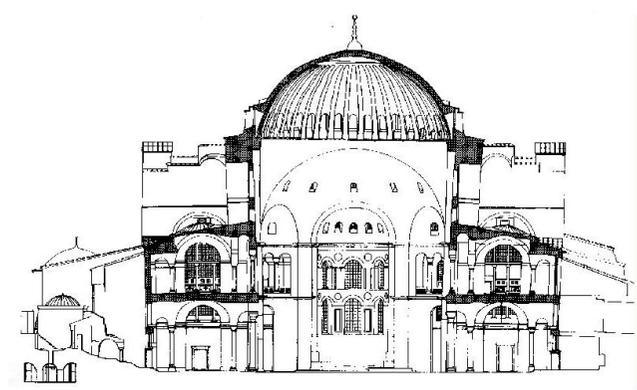


Fig.7: Sección transversal.

Arquitecto: Ruffino.

Arquitecto de la Reforma: Antemio de Tralles y Isidoro de Mileto.

Año: 415; Remodelado en 532-537.

Material: La cúpula central está construida con ladrillos puestos de canto y gruesos lechos de mortero para conseguir mayor ligereza.

Diámetro de la cúpula: 31 m.

Ubicación: Estambul, Turquía.

Estructura: Famosa por su enorme cúpula, está considerada como el epítome de la arquitectura bizantina, y se dice de ella que «cambió la historia de la arquitectura.² La cúpula descansa sobre dos grandes medias cúpulas o exedras, una en la cabecera, hacia el este, y la otra en el lado opuesto, hacia el oeste. A su vez estas dos exedras descansan sobre otras dos más pequeñas y abiertas en los ángulos que logran remarcar el eje longitudinal, determinado por el nártex a la entrada, la primera exedra que cubre el primer tramo, la cúpula que cubre el tramo central, la otra exedra y el ábside en la cabecera. De este modo se configura una concepción ovalada de la planta, más móvil, y también se refuerza el sentido de centralización dadas las dimensiones de la cúpula y el efecto centralizador que crea la centralización de la luz.

La cúpula gallonada se articula con cuarenta nervios y cuarenta plementos que se apoyan sobre cuatro pechinas. Carece de tambor gracias al peculiar sistema de soportes.

El peso de la cúpula se reparte en un sistema concatenado y encadenado, a través de las exedras, afianzándose por medio de los soportes estáticos que representan los cuatro grandes pilares centrales y que a su vez, transmiten el peso de la cubierta por medio de arcos transversales a los contrafuertes exteriores, también de considerables dimensiones y tremenda apariencia. Así, los recursos de contrarresto de las presiones ejercidas por la cúpula central son el juego de medias cúpulas, las bóvedas de arista de las naves laterales, los pilares angulares, los gruesos muros laterales y los contrafuertes o estribos exteriores, además de la utilización de material ligero (cerámica) que permite reducir el peso de las cúpulas.³

Bibliografía: (2) http://es.wikipedia.org/wiki/Santa_Sof%C3%ADa; (Fig.5, 6 y 7) http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Santa_Sof%C3%ADa

Cúpula de La Roca.

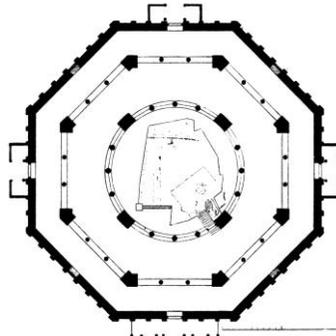


Fig.8: Planta.

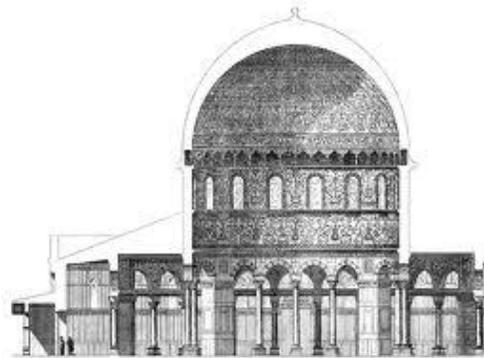


Fig.9: Planta.

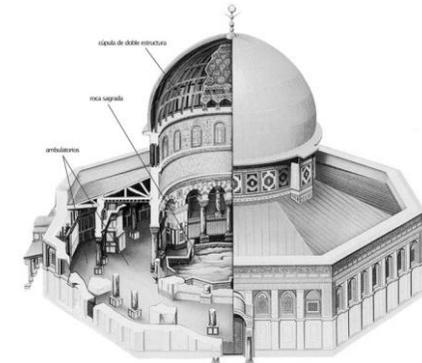


Fig.10: Planta.

Arquitecto: Los nombres de los dos ingenieros a cargo del proyecto se dan como Yazid Ibn Salam de Jerusalén y Raja Ibn Haywah de Baysan.³

Año: 687-692.

Material: Madera.

Diámetro de la cúpula: 20 m diámetro; 25 m altura.

Ubicación: Jerusalén. Israel.

Estructura: Su técnica constructiva con las cúpulas de madera, los arcos sobre pilares y columnas, la mampostería de piedra y ladrillo, y su cuidado sistema de proporciones derivan de las iglesias bizantinas.

Es un edificio dotado de rigurosa simetría central, con perímetro octogonal y cúpula de madera de planta circular, entre los que, gracias a una bien articulada arquería ochavada, se organizan dos naves concéntricas, en torno al círculo que alberga la Roca. La arquería que sustenta el tambor de la cúpula y la intermedia ofrecen una inteligente alternancia de pilares y columnas, procedentes éstas de edificios romanos y bizantinos, aunque integrados en una organización tan novedosa en lo estructural como clásica en su decoración, pues los arcos aparecen atirantados con unos arquivoltas de madera recubiertos de metal damasquinado. Las naves del tawaf llevan techo plano, en contraste con la cúpula interior, que está separada de la cubierta.

La estructura es básicamente octogonal. Se compone de una cúpula de madera que está montado en un tambor de elevación que consiste en un círculo de 16 muelles y columnas. Alrededor de este círculo es una arcada octogonal de 24 pilares y columnas.⁴

Bibliografía: 3) http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_103816.html ; 4) <http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/monumentos/1172.htm>

(Fig.8) <http://sdelbiombo.blogia.com/2008/090302-la-cupula-de-la-roca-segunda-parte--el-edificio-islamico.php>

(Fig.9) http://en.wikipedia.org/wiki/Dome_of_the_Rock

(Fig.10) <http://megaconstrucciones.net/?construccion=cupula-roca#ixzz2kLSeu3vP>

Cúpula de Santa María de Fiore.

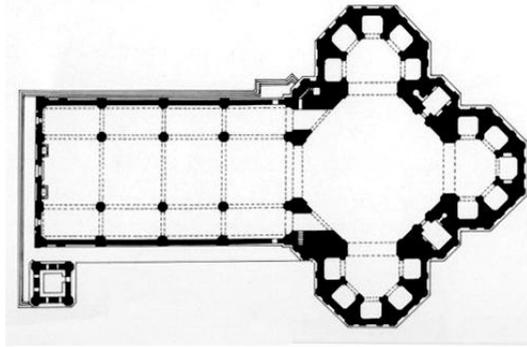


Fig. 11: Planta.

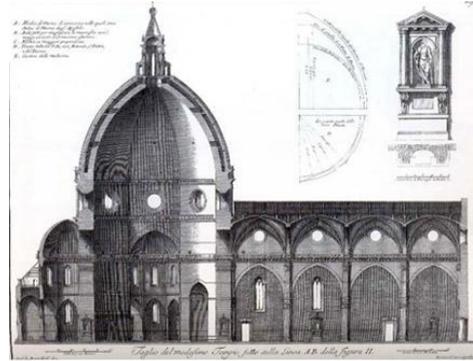


Fig. 12: Sección.

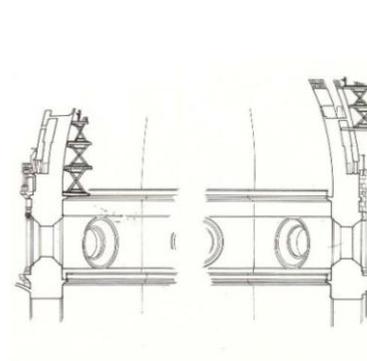


Fig. 13: Primera etapa de andamios.

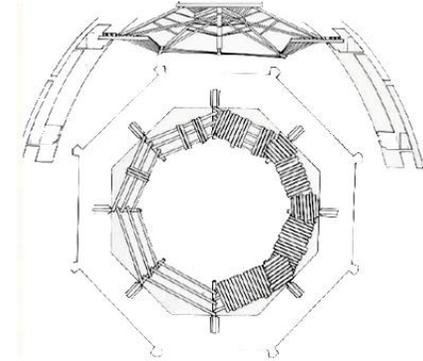


Fig. 14: Andamios cierre de cúpula.

Arquitecto: Filippo Brunelleschi.

Año: 1420-1436.

Material: Ladrillo, piedra y mármol. La cúpula cuenta también con tirantes de madera y anclajes metálicos.

Diámetro de la cúpula: Diámetro interior: 41 m; Diámetro exterior: 45'5m.

Ubicación: Florencia, Italia.

Estructura: Cúpula de albañilería más grande del mundo. Primera cúpula octogonal que se construyó sin cimbra de madera. Se trata de una cúpula apuntada y rematada por una gran linterna, con una estructura realizada con ladrillos, sobre una base octogonal y compuesta de dos cascarones paralelos. Como la capa interior, al tener un radio menor, se cierra antes, la anchura de la segunda capa aumenta con la altura. La diferencia de radios de curvatura contribuye a que las fuerzas se distribuyan siguiendo una curva llamada de pétalo de flor, con un punto de máximo tensión en el cual se colocó un anillo de refuerzo con vigas de madera para soportar las tensiones.

Entre ambas capas se encuentra la capa de aire con los nervios y anillos que forman la estructura de la cúpula. Esta capa vacía permite aligerar casi en un tercio el peso total de la cúpula, así como la existencia de dos galerías que permiten acceder a la linterna. La combinación de las tres capas y la forma apuntada permite una reducción de peso de casi un 45 % respecto a una cúpula semiesférica. Desde el punto de vista mecánico y dinámico capas actúan como una sola.

La cúpula está formada por 24 nervios de ladrillos dispuestos en forma de espina de pez y parten de un anillo de piedra y ladrillo en la base de la cúpula, el cual recoge sus esfuerzos y los transmite al tambor. Paralelamente al anillo de la base, hay once anillos formados por arcos de ladrillo entre nervio y nervio, que distribuyen las fuerzas tangenciales de manera uniforme y transmiten el peso de las estructuras a los nervios.

Los ocho nervios de piedra y mármol que se ven en el exterior son decorativos y no cumplen ninguna función estructural, ya que los nervios que aguantan la cúpula no se ven ni desde fuera de la catedral ni desde dentro.⁵

Bibliografía: (5, Fig.1, 2 y 3) http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Santa_Maria_del_Fiore

Basílica San Pedro del Vaticano.

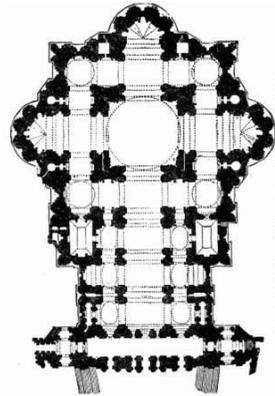


Fig.15: Planta.

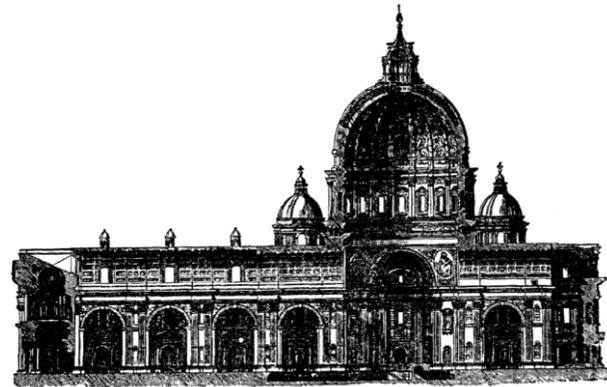


Fig.16: Sección.

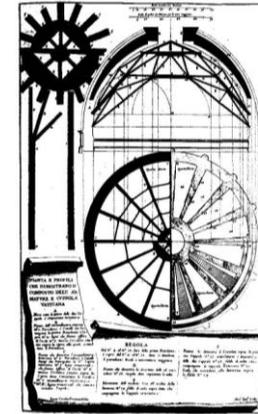


Fig.17: Cimbra cúpula.

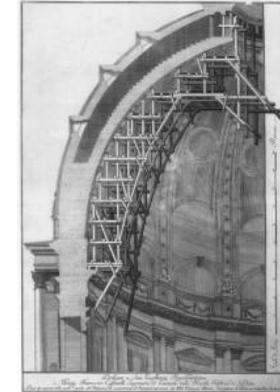


Fig.18: Sección cúpula.

Arquitecto: Bramante; Miguel Ángel; Giacomo della Porta y Domenico.

Año: Tres etapas: 1506-1514 Bramante; 1546-1564 Miguel Ángel; 1588-1590 Giacomo della Porta y Domenico.

Material: Ladrillo.

Diámetro de la cúpula: diámetro de la cúpula es de 42.59 m.

Ubicación: Ciudad del Vaticano.

Estructura: La cúpula consiste en una doble bóveda construida entre dieciséis costillas y coronada por una linterna. La sección de la cúpula se desdobra en dos cáscaras aproximadamente a un tercio del arranque. El perfil de las costillas entre las que se construyeron es más ancho en su encuentro con la linterna, es decir, en ese punto las cáscaras adquieren su mayor separación. La interior tiene un espesor aproximado de 1.38m, y su sección presenta gradas para poder ascender a la linterna a través del espacio que queda entre ambas cáscaras. La exterior, con 0.93m está perforada en cada uno de sus gajos por tres huecos, que permiten la iluminación y la ventilación de ese espacio.

Tanto las costillas como las cáscaras son de ladrillo, éstas últimas con un aparejo de espina de pez, a 450, de clara influencia romana y bizantina. Parece ser que se construyeron arcos de descarga en el arranque de la cúpula, entre las costillas y sobre las ventanas del tambor. Las costillas presentan una serie de resaltes, que reducen su espesor en forma telescópica, y que sirvieron de apoyo en la construcción de las cáscaras, sobresaliendo al exterior de la cúpula, revestida de plomo, con un espesor en el arranque de 2.53m.

Carlo Fontana indica que primero se levantaron las costillas y después, las cáscaras intermedias, con la ayuda de dieciséis cimbras de madera apoyadas sobre el ático del tambor. Después, utilizando todo el cimbrado y las propias costillas, se construyeron las cáscaras.⁶

Bibliografía: (6) http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC2_037.pdf <http://historiarte-bach.blogspot.com.es/2013/02/cupula-de-san-pedro-del-vaticano.html>. (Fig.15, 16) <http://tom-historiadelarte.blogspot.com.es/2009/02/la-basilica-de-san-pedro-del-vaticano.html>. (Fig.17) LÓPEZ, Gema M, (1998): *La estabilidad de la cúpula de S. Pedro: el informe de los tres matemáticos*. Universidad de la Coruña. II Congreso nacional de historia de la construcción, 1998: 285-294 ISBN: 84-89977-44-5, <http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/10583/1/HC%2037.pdf>. (Fig.18) <http://blog.thaumatoigraphy.net/category/tute-examples/architects/> <http://blog.thaumatoigraphy.net/tag/drawings/>

Iglesia Il Gesù.

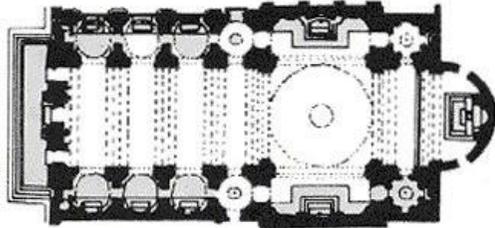


Fig.19: Planta.

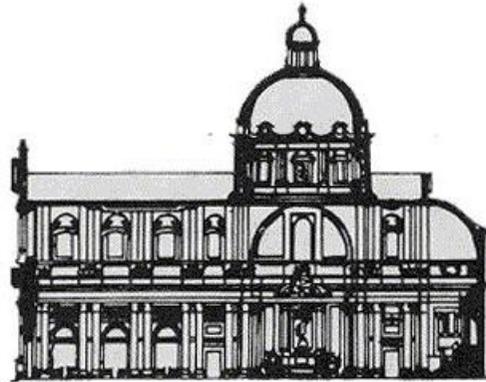


Fig.20: Sección.

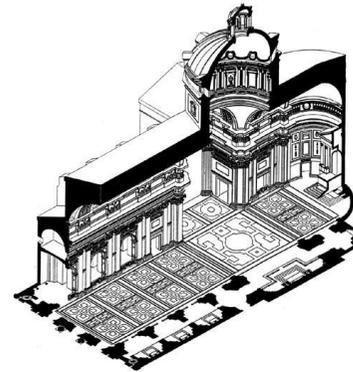


Fig.21: Perspectiva-Sección

Arquitecto: Giacomo Barozzi da Vignola y Jacopo Vignola.

Año: 1568.

Material: Piedra.

Díámetro de la cúpula: 17.5m.

Ubicación: Roma, Italia.

Estructura: La cúpula del crucero ilumina el presbiterio y atrae el eje direccional de la nave se apoya en pechinas que parten de cuatro pilares no achaflanados y un alto tambor, cilíndrico al interior, ochavado externamente, con cuatro luminosas ventanas.⁷ La cúpula actual no es la original, proyectada con gran solemnidad por Paolo Valeriano, porque se derrumbó en el terremoto de 1688.⁸

Bibliografía:

(7) <http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/monumentos/1004.htm>

(8) <http://www.arquba.com/monografias-de-arquitectura/la-iglesia-de-gesu-2/>

(Fig.19 y 20) <http://kerchak.com/arte-barroco/>

(Fig 21) <http://loslugarestienenmemoria.blogspot.com.es/2012/04/la-historia-de-una-tipologia.html>

Iglesia de San Justo y Pastor.

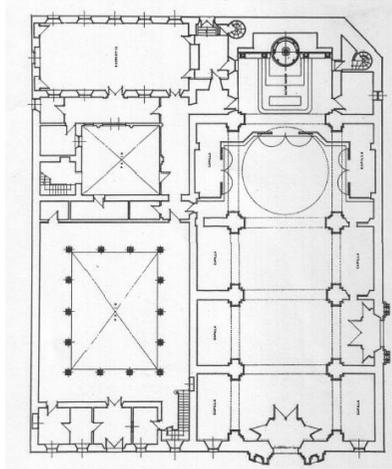


Fig.22: Planta.

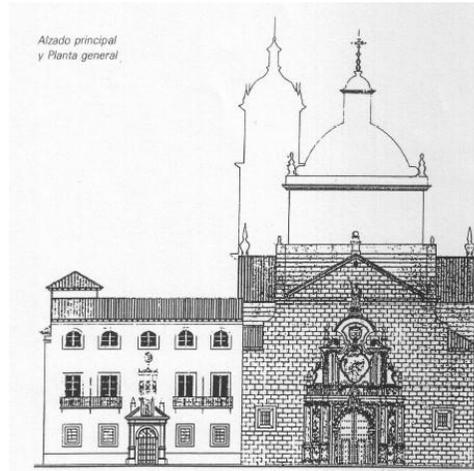


Fig.23: Alzado.

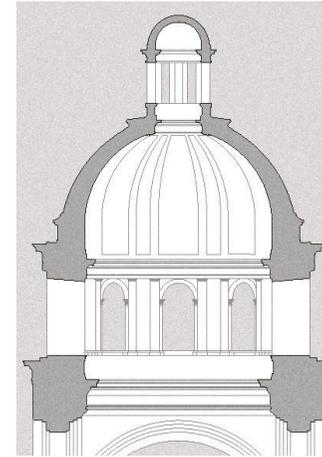


Fig.24: Sección cúpula.

Arquitecto: Pedro Sánchez.

Año: 1574.

Material: Piedra.

Diámetro de la cúpula: Diámetro interno 10m; Diámetro externo 12m.

Ubicación: Granada. España.

Estructura: Gran cúpula semiesférica, rematada por crestería de balaustrada con jarrones y con dieciséis imponentes costillas que recorren la cúpula desde su anillo superior hasta conectar con la crestería de balaustrada. Según Gómez Moreno, Pedro Sánchez, al que se atribuye el trazado de esta cúpula, se inspiró seguramente en El Escorial, debido al grandísimo parecido entre ambas.⁹

Bibliografía: (9, Fig.22, 23 y 24)) RAMÍREZ MOLINA, María de Tíscar. (2012): Análisis estructural de la cúpula de la Iglesia de San Justo y Pastor de Granada. Trabajo Fin de Máster. Granada.

Monasterio del Escorial

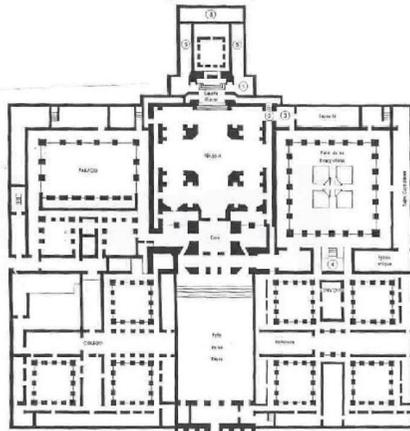


Fig.25: Planta.

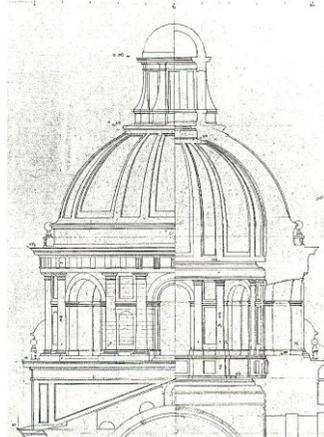


Fig.26: Sección cúpula.



Fig.27: Sección.

Arquitecto: Juan Bautista de Toledo, aunque posteriormente intervinieron Juan de Herrera, Juan de Minjares, Giovanni Battista Castello El Bergamasco y Francisco de Mora.

Año: 1575-1586.

Material: Sillería de granito.

Diámetro de la cúpula: 17m.

Ubicación: San Lorenzo de El Escorial. Madrid. España.

Estructura: La grandeza de la cúpula queda bien resaltada por ser toda de piedra de granito gris vista y por su perfecta labra, que contrasta con el resto de las bóvedas de la Basílica.¹⁰

Bibliografía:

(10) http://www.fundacioniberdrola.org/webfund/gc/prod/en_US/contenidos/docs/basilica_escorial.pdf

(Fig.25) <http://realsitiodelescorial.wordpress.com/category/monasterio-del-escorial/>

(Fig.26) CANO DE GARDOQUI GARCIA, JOSE LUIS, 1994. "La construcción del Monasterio de El Escorial: historia de una empresa arquitectónica". Universidad de Valladolid, Facultad de Derecho. Sección sección y alzado de la cúpula y tambor, lamina XXXV.

(Fig.27) CANO DE GARDOQUI GARCIA, JOSE LUIS, 1994. "La construcción del Monasterio de El Escorial: historia de una empresa arquitectónica". Universidad de Valladolid, Facultad de Derecho. Sección esteoeste, por la casa del rey, la basílica y el atrio, plano 5.

http://es.wikipedia.org/wiki/Bas%C3%ADlica_de_El_Escorial

Colegio del Cardenal Monforte.

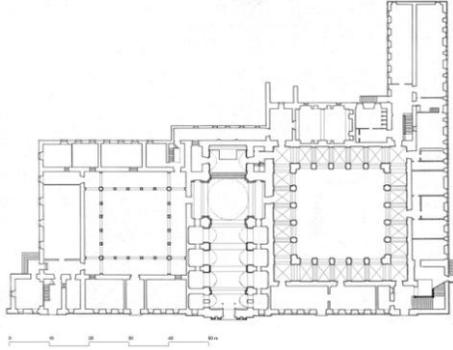


Fig.28: Planta.

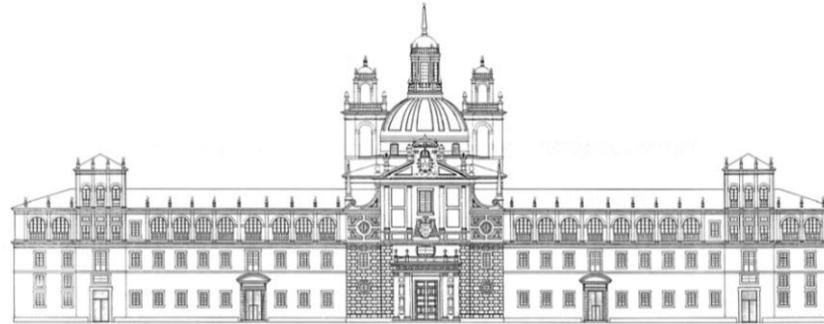


Fig.29 Alzado.

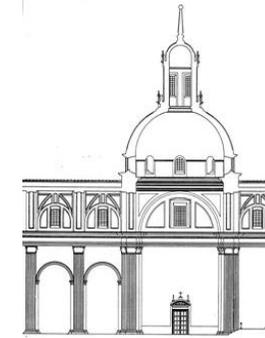


Fig.30: Sección cúpula.

Arquitecto: Andrés Ruiz y Juan de Tolosa.

Año: Comienzo de la obra en 1593; cúpula se terminó en 1613.

Material: Piedra, granito.

Diámetro de la cúpula: diámetro interior: 10,16 m; diámetro exterior: 11,85 m.

Ubicación: Monforte de Lemos, Lugo. España.

Estructura: Cúpula trasdosada reforzada con ocho nervios dobles, que se proyectan hacia el interior y exterior. La cúpula de media naranja está sostenida por cuatro arcos torales.¹¹

Bibliografía:

(11) GUERRA PESTONIT, Rosa Ana(2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, construcción y mecánica*. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

(Fig.28 y 29) GUERRA PESTONIT, Rosa Ana(2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, construcción y mecánica* . Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Planta e alzado del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Levantamiento de Meijide de 1984, escala del original 1:200.

(Fig.30) <http://www.udc.es/dep/com/gallego/monforte/monfo3y.htm>

Gol Gumbaz.

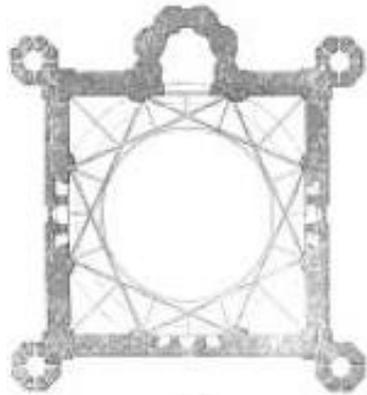


Fig.31: Planta

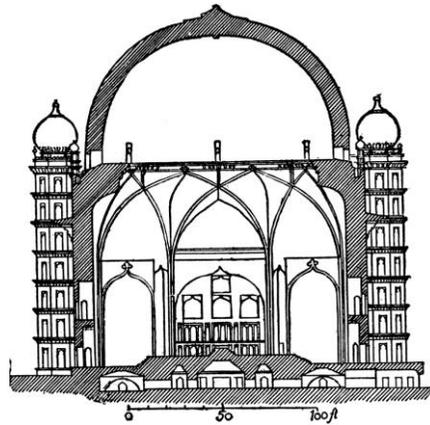


Fig.32: Sección.

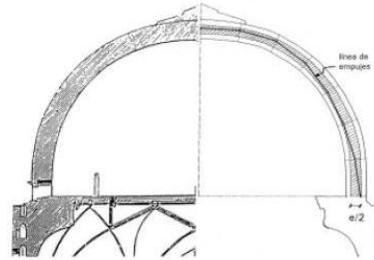


Fig.33: Análisis de equilibrio de la cúpula del Gol Gumbaz.

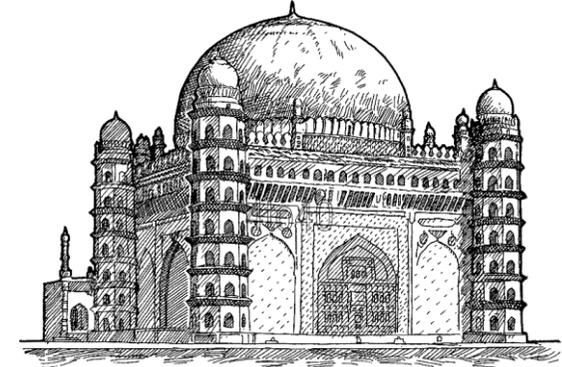


Fig.34: Perspectiva.

Arquitecto: Yaqut of Dabul.

Año: 1626 -1656.

Material: Ladrillo¹¹.

Diámetro de la cúpula: 44m de diámetro externo; diámetro interno 37.2m.

Ubicación: Bijapur, India.

Estructura: La estructura se compone de un cubo, 47,5 metros en cada lado, cubierta por una cúpula de 44 m de diámetro externo. "Ocho arcos de intersección creada por dos cuadrados rotados que crean entrelazados pechinas "apoyan la cúpula. En cada una de las cuatro esquinas del cubo, es una torre octogonal de la cúpula coronado de siete pisos de altura con una escalera interior. En la planta superior de cada uno se abre a una galería de ronda que rodea la cúpula. Dentro de la sala mausoleo, es un podio cuadrado con pasos en cada lado. En el centro de la tribuna, un cenotafio de losa en el suelo marca la tumba real más adelante, "el único caso de esta práctica" en la arquitectura de la dinastía de Adil Shahi . En el centro de la parte norte, "una gran bahía semi-octogonal" sobresale. Con una superficie de 1.700 m² (18,000 pies cuadrados), el mausoleo tiene una de las mayores plazas de una sola cámara en el mundo. Corriendo por el interior de la cúpula es la "galería de los suspiros", donde incluso el sonido más suave que se puede escuchar en el otro lado del mausoleo, debido a la acústica del espacio.¹² El espesor de la bóveda varía de 3,05 m cerca de la base de 2,74m cerca de la parte superior.¹³

La cúpula se apoya en un sistema de pechina único. Es un sistema de arcos entrecruzados que no se utilizan en ningún otro lugar en la India. El único otro caso conocido fue en la Gran Mezquita de Córdoba. La cúpula está construida con hiladas horizontales de ladrillo con una sección plana en su corona. Se consolidó con cal y alcanza un espesor de 12 pies (3,5 metros)¹⁴

Bibliografía: (11) STUART, Tappin (2003): The structural development of masonry domes in India. Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20th-24th January 2003, ed. S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, ETSAM, A. E. Benvuenuto, COAM, F. Dragados, 2003 (12) http://centrodeartigos.com/articulos-noticias-consejos/article_149083.html; (13) http://asi.nic.in/asi_monu_tktd_karnataka_golgumbaz.asp (14) http://archnet.org/library/sites/one-site.jsp?site_id=7616 (Fig.31, 32 y 33) FERGUSSON, James.(1859). *The Illustrated Handbook of Architecture*. London: John Murray. (Fig.34) http://www.4to40.com/coloring_book/trace.asp?p=Gol_Gumbad&k=Gol_Gumbaz

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Santuario de Loyola.

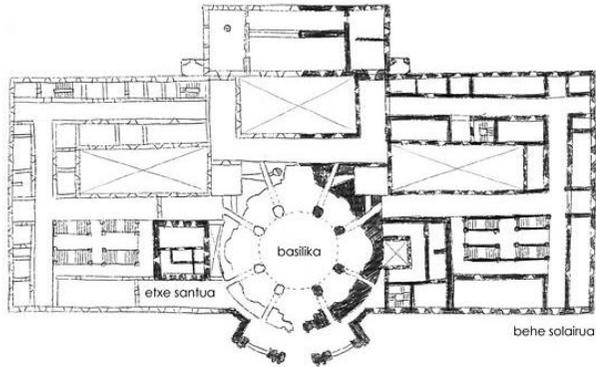


Fig.38: Planta

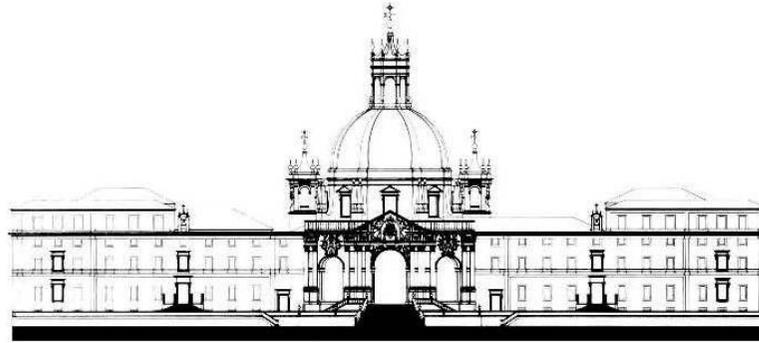


Fig.39: Alzado.

Arquitecto: Carlo Fontana.

Año: 1719-1733: Dirige las obras el Maestro Sebastián de Lecuna, hasta su muerte, en 1733. Logra construir el tambor y buena parte de la cúpula. 1733-1766: Dirige las obras el Maestro Ignacio de Ibero, quien cierra la cúpula de la iglesia, levanta su linterna y diseña su Altar Mayor.

Material: Hay una cúpula externa, hecha de piedra caliza, y otra interna de arenisca, mucho más blanda y fácil de trabajar. Entre ambas hay una separación de medio metro.

Diámetro de la cúpula: La cúpula tiene un diámetro de 20 m y una altura de 50 m.

Ubicación: Guipúzcoa. España.

Estructura: La estructura de la cúpula es doble. Hay una cúpula externa, hecha de piedra caliza, y otra interna de arenisca, mucho más blanda y fácil de trabajar. Entre ambas hay una separación de medio metro.¹⁶

Bibliografía:

(16) ASTRAIN, Luis, et al (2000): *La cúpula de la Basílica de Loiola en Azpeitia, Gipuzkoa*. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Sevilla: eds. A.Graciani

http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC3_007_Astrain%20L.pdf ;

http://es.wikipedia.org/wiki/Santuario_de_Loyola

(Fig.38) http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loiola_santutegia_Fatxada_eta_Solairua.jpg

(Fig.39) LINAZASORO, José Ignacio (1982): *Proyecto de Ordenación del área del Santuario de Loyola*. <http://www.euskomedia.org/PDFAnIt/riev/31/3104650479.pdf>

San Francisco el Grande.

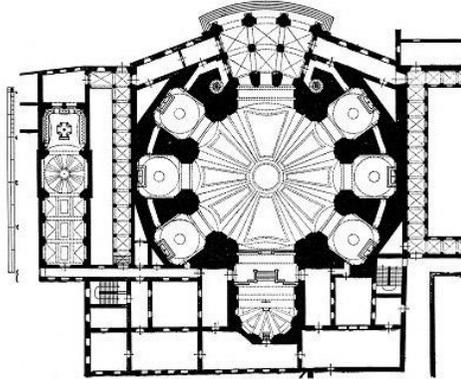


Fig.40: Planta.

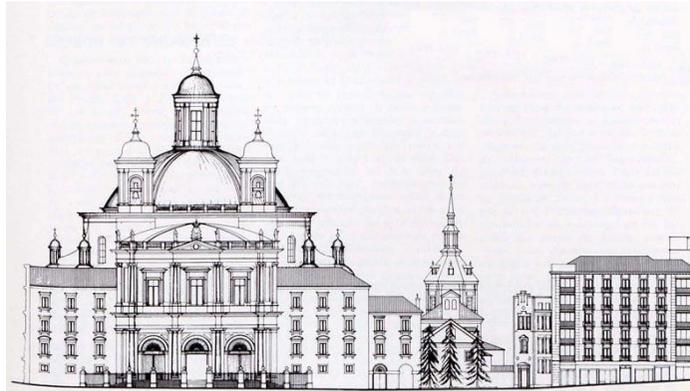


Fig.41: Alzado.

Arquitecto: Fray Francisco Cabezas, según algunos investigadores había sido redactado por José de Hermsilla. Empezada la construcción, la Academia de Bellas Artes hizo notar que los pilares y muros no tenían suficiente solidez para soportar la cúpula, por lo que surgieron problemas que paralizaron las obras. Carlos III encargó su continuación a Francisco Sabatini, que prescindió de los elementos decorativos de Cabezas y reforzó los muros. Este último también construyó el convento. La bóveda y fachada fueron terminadas por Miguel Fernández.¹⁷

Año: 1761–1784.

Material: Ladrillo.

Diámetro de la cúpula: 33 m de diámetro y 58 m de altura (72 m desde el suelo).

Ubicación: Madrid, España.

Estructura: El edificio destaca por su cúpula, considerada como la tercera de planta circular de mayor diámetro de la cristiandad; En lo que respecta a las cúpulas de planta circular, es la tercera de mayor diámetro de la cristiandad, por detrás de la del Panteón de Agripa (43,4 m) y de la de San Pedro del Vaticano (42,5 m), ambas en Roma (Italia).⁷ Si se consideran también otro tipo de cúpulas, es la cuarta de mayor tamaño, por detrás de la cúpula de Santa María del Fiore (42 m), en Florencia (Italia), de planta octogonal y facetada en ocho caras.

Supera en diámetro a las cúpulas de Santa Sofía (31,8 m), en Estambul (Turquía); de la Catedral de San Pablo (30,8 m), en Londres (Reino Unido); y de Los Inválidos (24 m), en París (Francia).

Los problemas técnicos surgidos durante la construcción obligaron a adoptar una solución de escasa elevación para la cúpula, en la línea del modelo empleado en el Panteón de Agripa. Está realizada en ladrillo macizo, fabricado a pie de obra, en una sola hoja. En su arranque, la hoja presenta un grosor de tres metros, que va descendiendo hasta la coronación, donde el espesor es inferior al metro.

El domo está coronado por una linterna circular, con chapitel y cruz de hierro forjado sobre la flecha.¹⁸

Bibliografía:(17)<http://www.memoriademadrid.es/buscar.php?accion=VerFicha&id=51915>(18)[http://es.wikipedia.org/wiki/Real_Bas%C3%ADlica_de_San_Francisco_el_Grande_\(Madrid\)#C3.BA.pula](http://es.wikipedia.org/wiki/Real_Bas%C3%ADlica_de_San_Francisco_el_Grande_(Madrid)#C3.BA.pula) (Fig.40) <http://otramiradaintomadrid.com/2010/03/san-francisco-el-grande-la-tercera-cupula-de-occidente/> (Fig.41) <http://historias-matritenses.blogspot.com.es/2012/04/la-gran-via-de-san-francisco-la.html>

Iglesia de Saint Genevieve. Panteón de París.

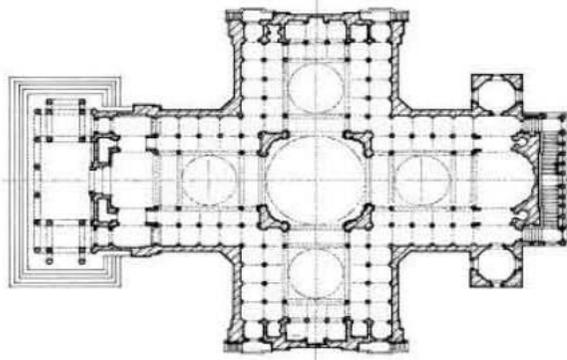


Fig.42: Planta.

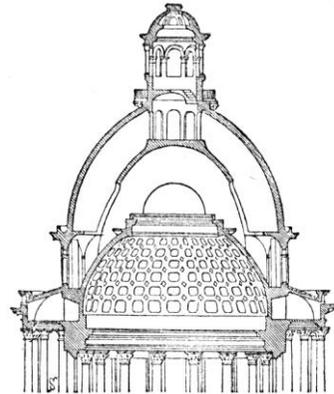


Fig.43: Sección cúpula.



Fig.44: Alzado.

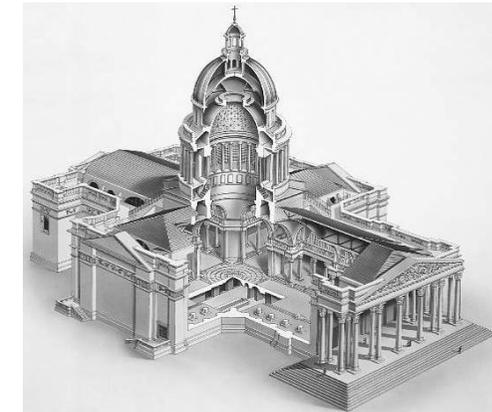


Fig.45: Perspectiva seccionada .

Arquitecto: Jacques-Germain Soufflot y sus precesores Brébion y Jean-Baptiste Rondelet.

Año: 1764-1790.

Material: Ladrillo.

Diámetro de la cúpula: 27m.

Ubicación: París, Francia.

Estructura: La cúpula consiste en un círculo de columnas que soportan la parte posterior de la bóveda y que emulan la catedral de Saint Paul en Londres. La estructura de la cúpula, debido a su magnitud, se encuentra reforzada con una malla de hierro. La forma de la cúpula sufrió algunas transformaciones, pero su forma definitiva se obtendría en 1777, tras cinco proyectos sucesivos.¹⁸

Bibliografía:

- (18) PELÑALVER, Germán (2012). *El panteón de Paris Templo de la Nación*. Universidad de Valencia: Mupart. <http://mupart.uv.es/ajax/file/oid/463/fid/776/patrimonio.pdf> <http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/obras/16565.htm>
 (Fig.42) PELÑALVER, Germán (2012). *El panteón de Paris Templo de la Nación*. Universidad de Valencia: Mupart. <http://mupart.uv.es/ajax/file/oid/463/fid/776/patrimonio.pdf>
 (Fig.43) <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coupe-Panth%C3%A9on-Coupoles-Paris-France-1881.jpg>
 (Fig.44) http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panth%C3%A9on_Soufflot_-_%C3%A9levation_principale.png
 (Fig.45) <http://mirror.enha.kr/wiki/%ED%8C%A1%ED%85%8C%EC%98%B9>

Parroquia de San Joaquín, Escolapios.

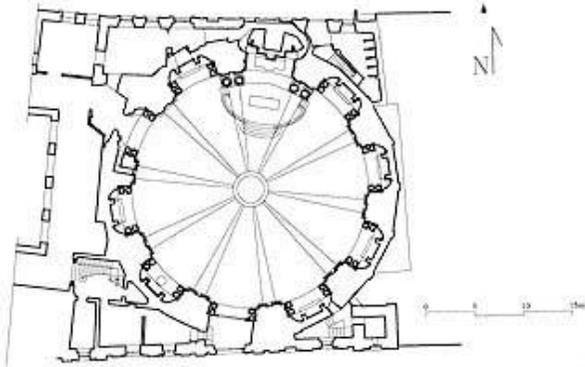


Fig.46: Planta.

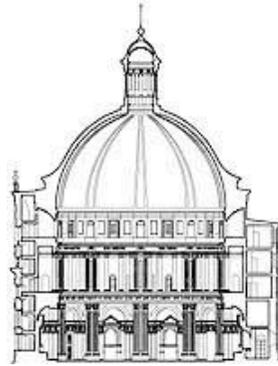


Fig.47: Sección cúpula.

Arquitecto: Antonio Gilibert.

Año: 1767-1773.

Material: Ladrillo.

Diámetro de la cúpula: 24.5 m.

Ubicación: Valencia. España

Estructura: De la cornisa del tercer cuerpo arranca la cúpula semiesférica marcada con su intradós por veinte nervios pareados. Sobre el anillo superior de la cúpula se eleva la linterna dividida en diez segmentos con ventanas. Exteriormente la cúpula presenta en su base un perfil alabeado apoyando sobre tambor circular de escasa altura. Tanto la cúpula como la linterna se cubren con teja azul resaltando los nervios con teja blanca. Esta cúpula es una de las más grandes de Europa, con 24,5 m de diámetro.¹⁹

La cúpula de la iglesia de los padres Escolapios, la más grande de España y una de las más imponentes de Europa, tiene problemas en la cubierta y gigantescas grietas en la estructura.²⁰

Se trata de una gran iglesia circular que imita modelos de la Antigüedad romana, coronada por una cúpula de grandes dimensiones (40 metros de altura por 24'5 de diámetro) y rematada por una linterna. El interior destaca por su aspecto clásico, con gigantescas pilastras y varios balcones sustentados por columnas corintias.²¹

Bibliografía:

(Fig.46 y 47) http://www.via-arquitectura.net/01_prem/01p-048.htm

(19) [http://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia_de_las_Escuelas_P%C3%ADas_\(Valencia\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia_de_las_Escuelas_P%C3%ADas_(Valencia))

(20) <http://www.revistaeclesia.com/problemas-en-la-cupula-de-la-iglesia-de-los-escolapios-de-valencia/>

(21) http://www.valencia.es/ayuntamiento/infocidad_accesible.nsf/vDocumentosWebListado/6C98FD59CB5102DAC12572C20023DA33?OpenDocument&bdOrigen=&idapoyo=&nivel=3&lang=

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

Capitolio.

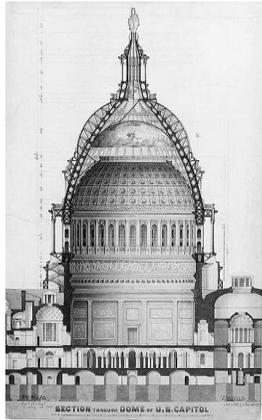


Fig.48: Sección cúpula.



Fig.49: Sección constructiva.



Fig.50: Sección constructiva de la zona del peristilo.



Fig.51: Vista del interior de la cúpula.



Fig.52: Sección con andamios.

Arquitecto: Thomas U. Walter Thomas U. Walter y August Schoenborn.

Año: 1818 – 1824.

Material: Hierro fundido.

Diámetro de la cúpula: 29 m.

Ubicación: Washington, EEUU.

Estructura: Un aspecto importante que condicionó el diseño de la cúpula fue el empleo del hierro como material de construcción integral. Sería la primera cúpula que se construirá con este material y no sólo estructuralmente sino también para el revestimiento tanto interior como exterior. Esta característica innovadora supuso la resolución integral mediante paneles de acero fundido para el recubrimiento, que estarán la mayor parte atornillados aunque también se empleará el roblonado, y el empleo de perfiles laminados para los elementos estructurales que serán de fundición a excepción del anillo de arranque, que debía de soportar mayores esfuerzos de tracción y que se realizará en acero forjado. Este novedoso sistema constructivo hará que Walter tenga que resolver los problemas de dilatación del recubrimiento mediante la holgura de los paneles y el empleo de resina, además de dotar de ventilación al interior.

Por último, es conveniente indicar que Walter durante el diseño y trazado también trazaba la manera de su construcción. Para ello planteó un andamio triangular situado en el centro de la cúpula, ya que sería el punto que podría dejar libre hasta su finalización, y que además ayudaría estratégicamente para las operaciones de derrumbe y colocación del material con una grúa propulsada, utilizando en este caso cable trenzado empleado en los puentes colgantes. En este sentido se incluiría dentro de la tradición del diseño de los elementos auxiliares necesarios para la construcción.²²

Bibliografía: (Fig.48)<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ThomasWalterDomeUSCapitol.jpg> (22; Fig.49, 50, 51 y 52)<http://hypothesis-architecture.blogspot.com.es/2012/08/la-transversalidad-democratica-la.html>

Nuestra Señora de la Asunción.



Fig.53: Alzado.

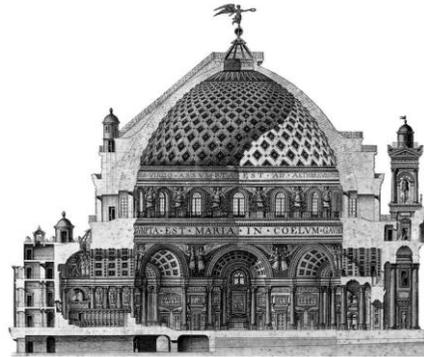


Fig.54: Sección cúpula.

Arquitecto: Giorgio Grognet de Vassé

Año: 1833-1860.

Material: Ladrillo.

Diámetro de la cúpula: 37.2 m.

Ubicación: Mosta, Malta.

Estructura: Es el cuarto mayor cúpula sin apoyo en el mundo y la tercera más grande de Europa. La enorme cúpula de la Rotonda se afirma que es la cúpula de la iglesia tercera mayor en Europa - sólo superada por la Basílica de San Pedro en Roma y la Iglesia de Santa Sofía en Estambul. Su diseño se basa estrechamente en la cúpula del Panteón de Roma.²³ Los muros tienen 9 metros de ancho.

Bibliografía:

(23) <http://www.sacred-destinations.com/malta/mosta-rotunda-church-of-st-mary>

(Fig.53) http://history_mosta.webs.com/history2.htm

(Fig.54) <http://www.oneweekholiday.com/malta/mosta-mgarr/mosta-rotunda/>

Global Vipassana Pagoda

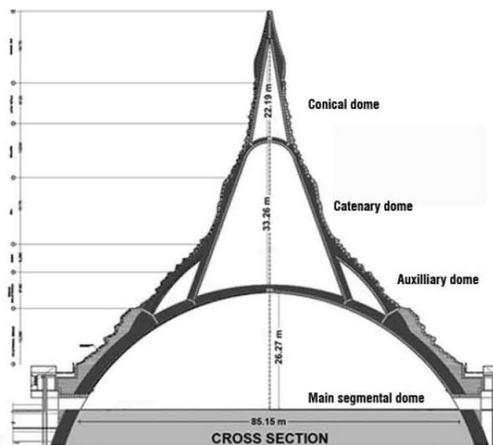


Fig.55: Sección estructural.

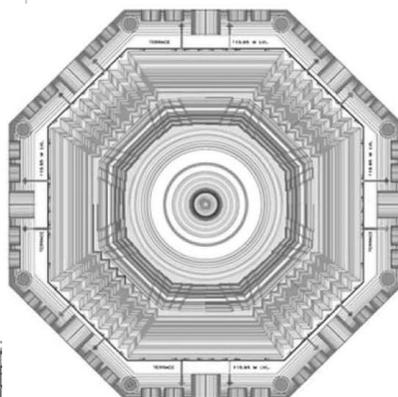


Fig.56: Planta cubierta.

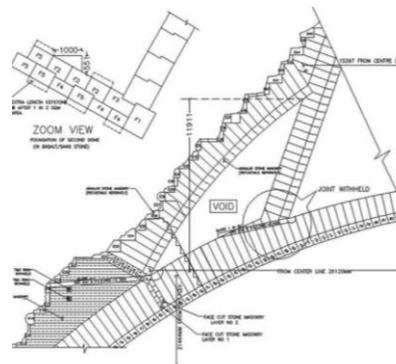


Fig.57: Sección de la cúpula auxiliar.

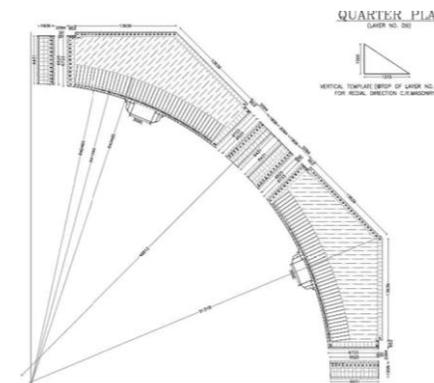


Fig.58: Plano de cimentación.

Arquitecto: Prvez Dumasia.

Año: 2000-2008.

Material: Piedra. La base de la cúpula compuesta por basalto, mientras que la cúpula está hecha de piedra arenisca. Los bloques individuales de piedra arenisca pesan 600-700 kg cada uno.

Diámetro de la cúpula: Diámetro interior 85.15m.

Ubicación: Mumbai, India.

Estructura: El centro de la Vipassana Pagoda Global contiene la cúpula de piedra más grande del mundo construida sin pilares de apoyo. La altura de la cúpula es de aproximadamente 29 metros, mientras que la altura del edificio es de 96,12 metros, que es el doble del tamaño del anterior monumento más grande de piedra hueca en el mundo. Diámetro exterior de la sección más grande de la cúpula es 97.46m y las secciones más cortas es 94.82m. El interior de la pagoda es hueco y sirve como una gran sala de meditación con una superficie de más de 6.000 m².

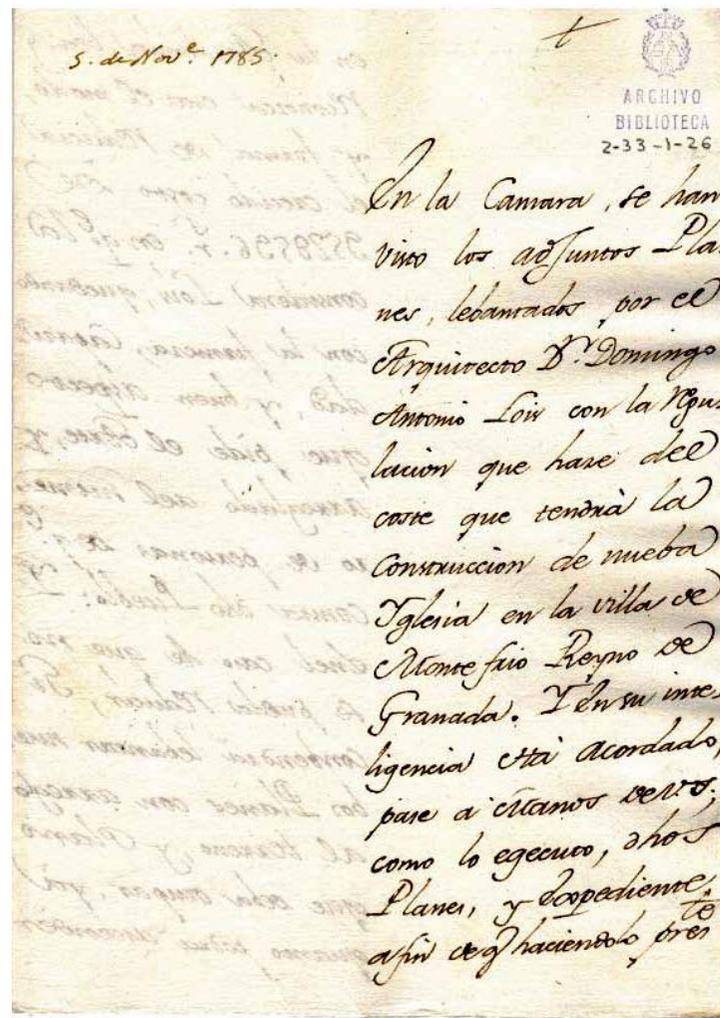
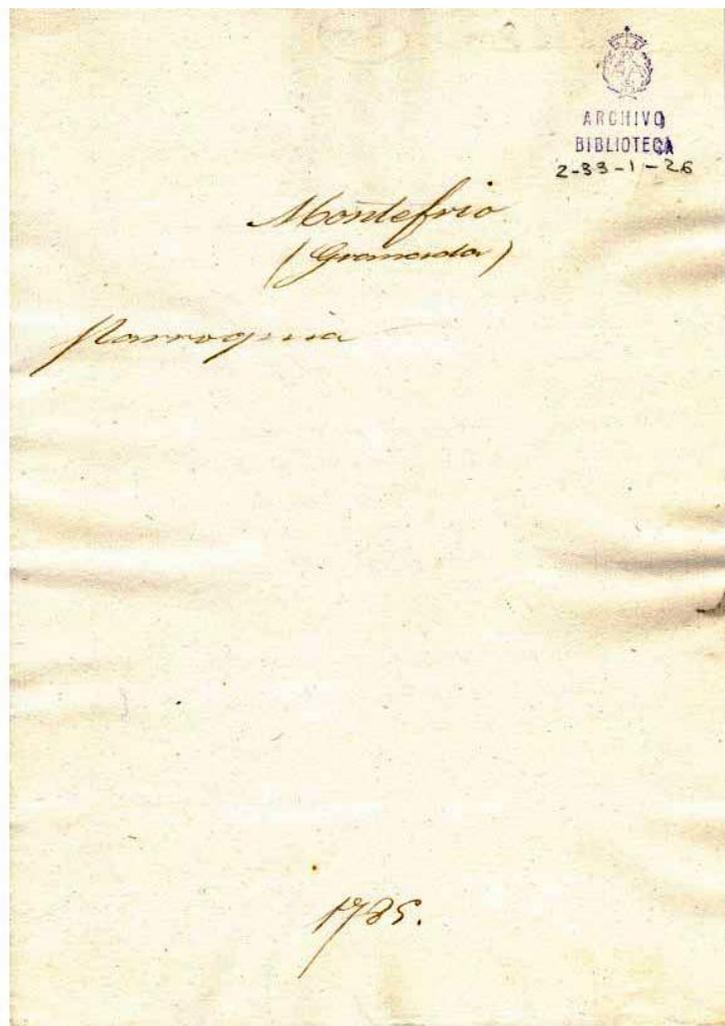
La planificación de la construcción de la Vipassana Pagoda Global se inició en 1997, mientras que el trabajo actual del edificio comenzó en 2000. La pagoda se compone de tres sub-cúpulas. La primera y la más grande cúpula fue terminada en octubre de 2006, cuando las reliquias óseas de Gautama Buda estaban consagradas en la piedra de bloqueo central de la cúpula. La segunda y tercera cúpulas se sientan encima de la primera cúpula. La construcción de la tercera cúpula fue terminada estructuralmente el 21 de noviembre de 2008.²⁴

Bibliografía:

(24) <http://www.globalpagoda.org/construction-and-development> (Fig.55, 56, 57 y 58) http://www.earth-auroville.com/maintenance/uploaded_pics/02-global-vipassana-pagoda.pdf

» **≡ Anexo II. Documentos de Archivos**

Anexo II. A - Documento de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.....	1
Anexo II. B - Contrato de compra de cuatro casas para en su lugar construir la iglesia de la Encarnación de Montefrío.....	4
Anexo II. C - Contrato subasta de la piedra.....	6
Anexo II. D - Porte de la piedra	8
Anexo II. E - Subasta de la obra de herrería.....	11



en la Academia, sea, y
 Reconozca esta el modo,
 y forma de Reducir
 el dicho curso de
 3528596. r. en q. la
 considera Lou, quedando
 con la fama, Capaci-
 dad, y buen aspecto
 que pide el Arte, y
 arreglado del numero
 de personas de q.
 consta dho Pueblo: Y
 en el caso de que no
 se pueda Reducir, si
 contendria levantar nue-
 vos Planes con arreglo
 al terreno, y Plano
 que seba ocupar, ya
 quanto podria arrendar

el como de una y otra
 forma, y si seca mas
 util se haga la obra
 por Aliento, o Admi-
 nistracion; con todo lo
 demas q. ala Acade-
 mia se la ofierca, y
 parezca.
 Dios que. A. V. S.
 nu. 5. a. como se veo.
 Ma. 2. de Novbre
 de 1785.
 Juan Fran de Latorre

 P. D. N. Antonio Pons.

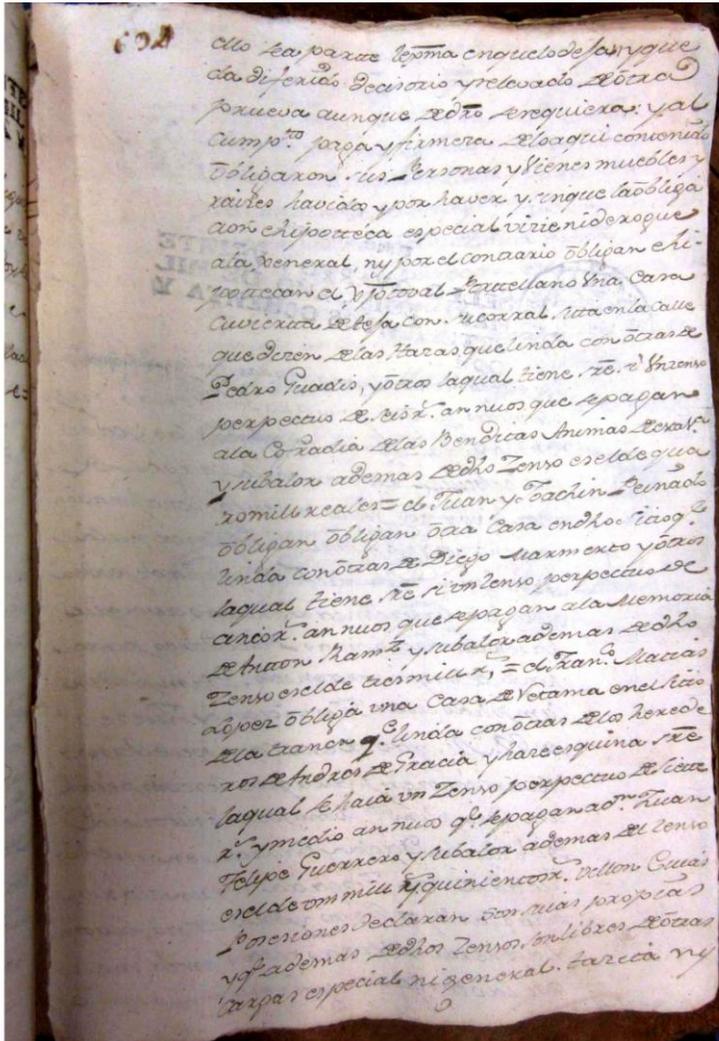
Copia

5 de Nov.º de 1785

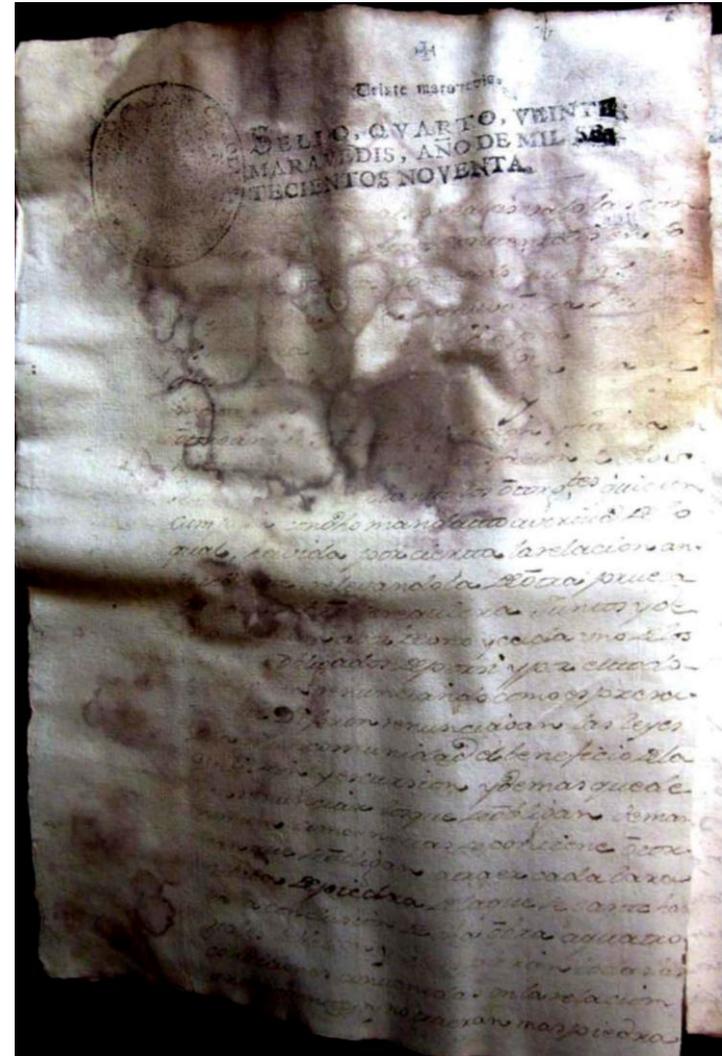
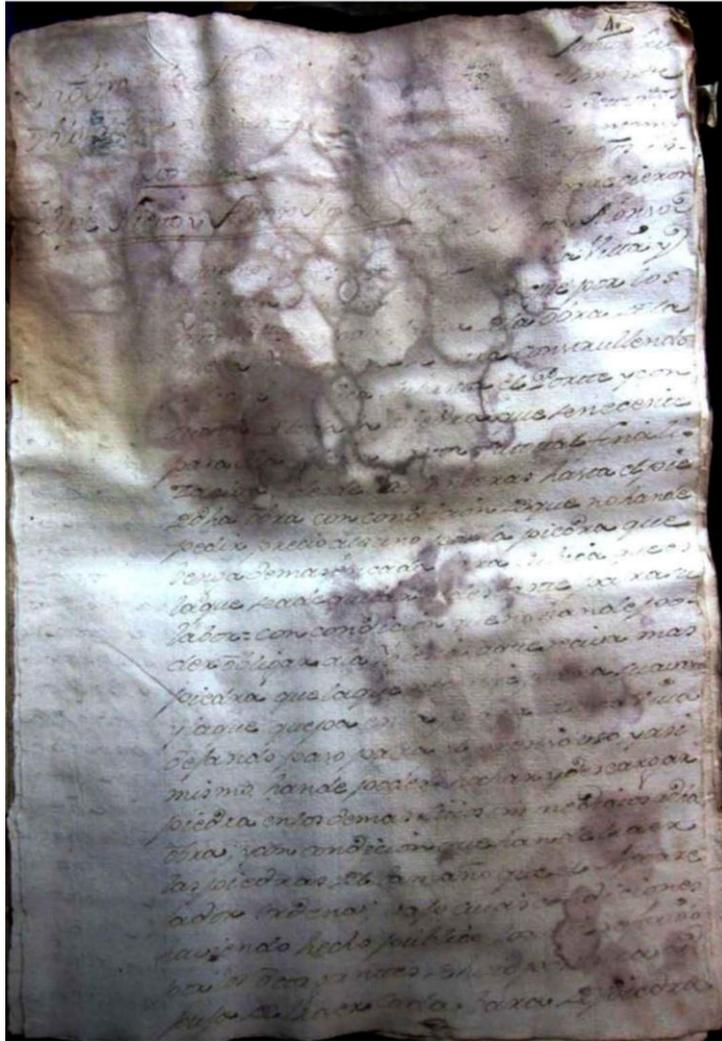
ARCHIVO
BIBLIOTECA 2-33-1-26

Se han mandado examinar por la Acad. los dibujos que de Or.º de la Camara me remitió V.º en 9 de Nov.º anterior, para la construc.º de una Igl.ª en la Villa de Montefrío, Reyno de Granada, executados por D. Domingo Lois Monteaquedo, y regulado su costo en 952 @ 596 r.º No ha parecido factible reducir dicho costo à menor cantidad, si bien se sea la Igl.ª como manifiestan los dibujos, y en vista de la regul.ºn del Arquít.º sino fuere posible, ò la Camara no tuviere por conve.º que se gaste el expres.º caudal podria mandar hacer otros dibujos al mismo Lois que conoce el terreno, y vecind.º de Montefrío, previniendole lo que se haya de expender en la obra. En quanto à la regul.ºn del costo no es posible hacerla sin pres.º de los nuevos planes, y sin la exper.º que Lois tiene adquir.ºa en el Reyno de Gran.ºa donde la Cam.ª le ha nombrado para diferentes obras. La Acad.ª siempre prefiere una buena admin.ºn à los asientos, y me dirigi.º las fabricas por de buena conducta y habil.º en cuyo concepto tiene à Lois, y intervenga en los gastos. Es qto debo dexar à V.º de orden de la Acad.ª p.ºa que se sirva hacerlo pres.º à la Cam.ª - D.º g.ºe à V.º m.º de V.º Madrid 5 de Nov.º de 1785. Ant.º Ponre J.º D.º Juan Jz.º Lastiri

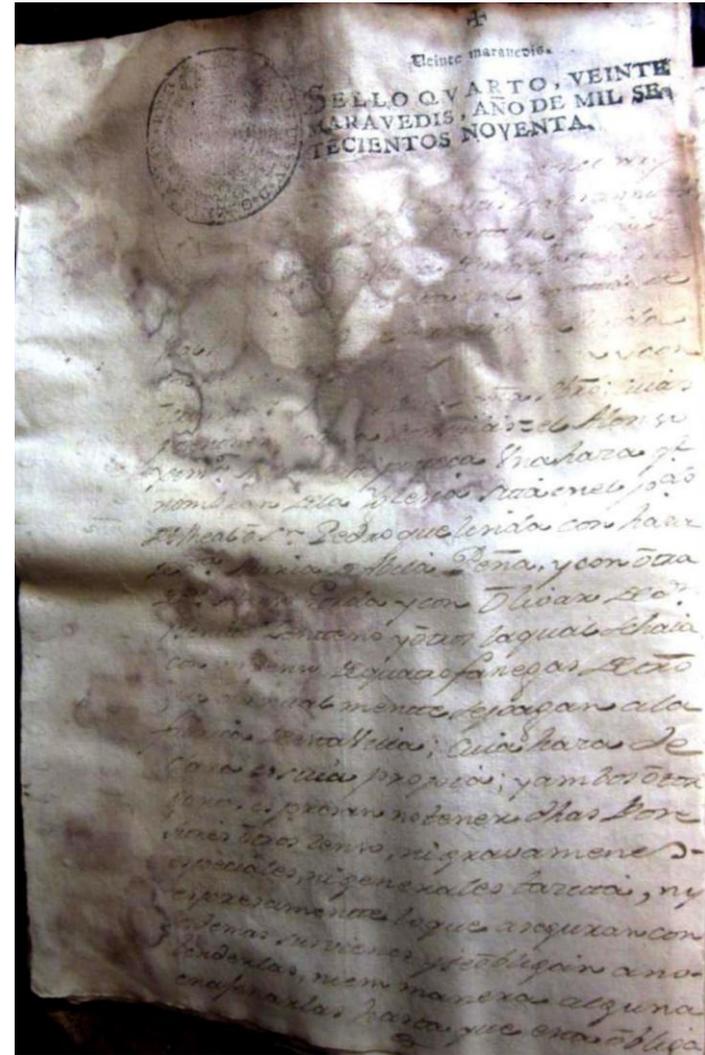
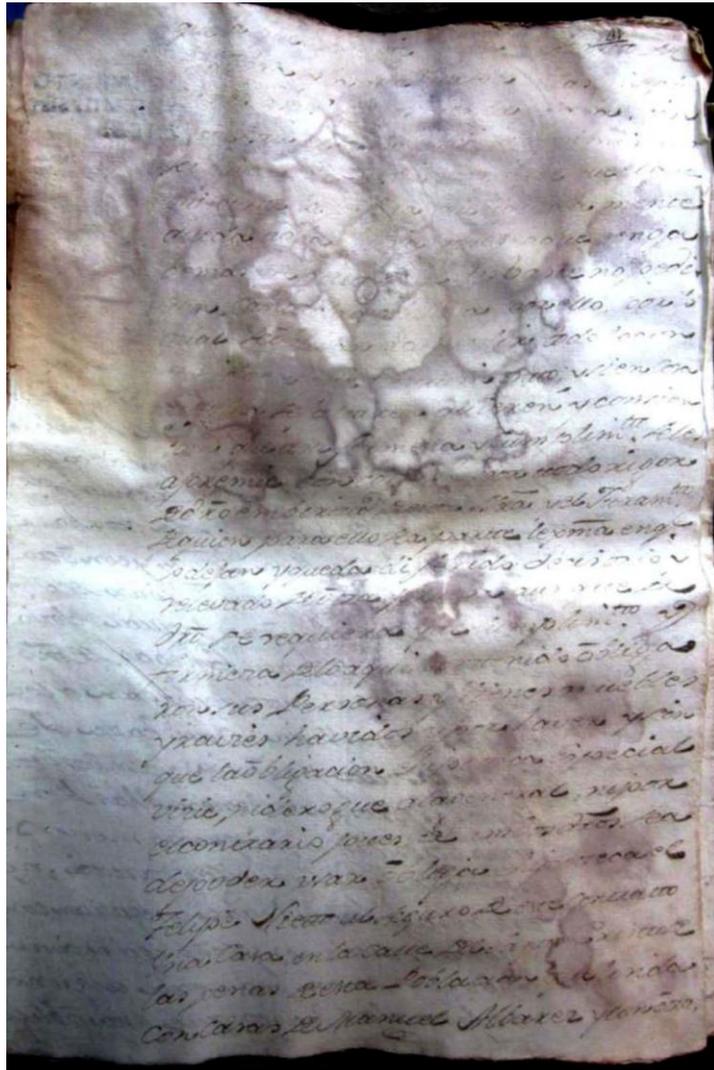
ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.



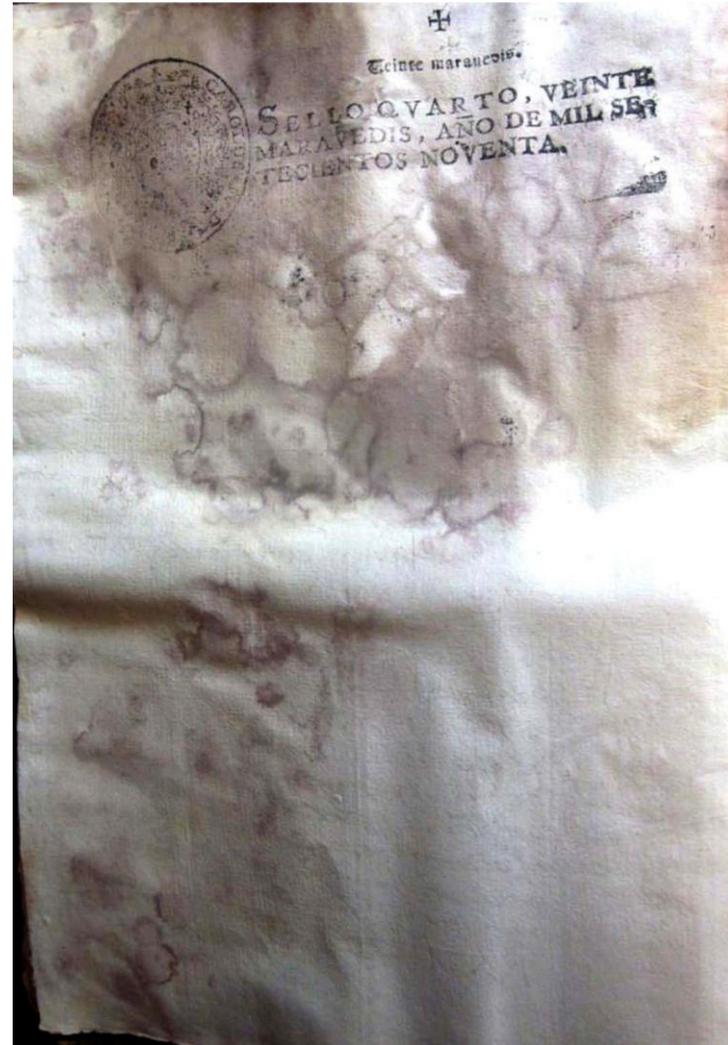
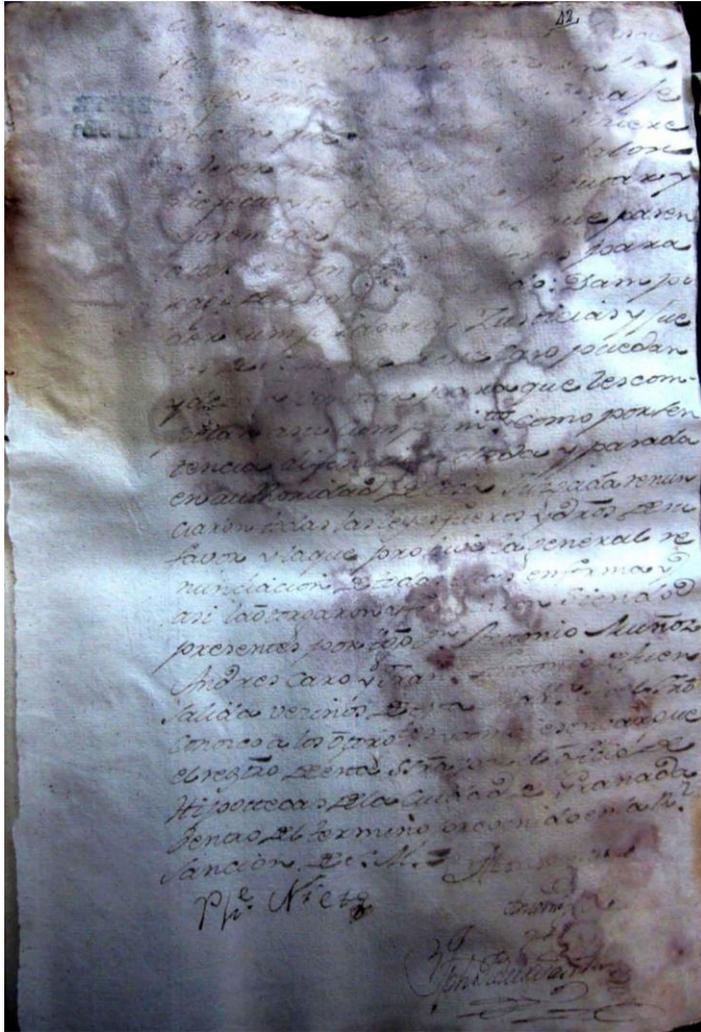
ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.



ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.



ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.



“Subasta de la obra de herrería de la nueva Iglesia”. Transcripción de documentos por Gerardo Pérez Avilés. Abril, 2013.

“A 3 1.1. Los Intendentes y Aparejador de la nueva Iglesia de esta Vª obligación fianza..... Contra Tomas y Juan Moreno y consortes.

“En la Villa de Montefrío en ocho días del mes de Abril de mill setecientos noventa y quatro años. Antemy el Esno publico y tgos infrascriptos parecieron Tomas Moreno Juan Moreno y Maria Antonia Moreno Juan Moreno y Maria Antonia Lopes su Muger vecs de ella y dijeron qe por los Intendentes y Aparejador dela obra de la nueva Iglesia quese esta fabricando en esta dha villa se hasacado asubasta la obra de herreria detodas clases quese nesecite hasta la conclusion y total finalizazon dela enunciada Iglesia y habiendo hecho varias posturas y pujas diferentes personas ultimamte los dhos Intendentes remataron la citada obra de hierro en los nominados Tomas y Juan Moreno en los siguientes terminos: Que los susodhos habian de obligarse a labrar cada arroba de hierro de cadenas grandes y chicas grapas y gatillos de todas clases a precio de nueve rls y tres quartillos cada una siendo de su cuenta la merma que tenga el hierro que se les ha de entregar para este fin, de cuenta de la masa (coste global) de la Iglesia, cobrándoles dichas mermas al precio que le hubiese costado a dicha masa: Y la libra de hierro de diez y seis onzas poniendo dicho material los otorgantes (adjudicatarios) y trabajado en rejas balcones antepechos rectos y”

Los intendentes y aparejador de la nueva Iglesia de esta Villa. Obligación y fianza, contra Tomás y Juan Moreno y consortes.

En la Villa de Montefrío, a ocho días del mes de abril de mil setecientos noventa y cuatro años. Ante mí el Escribano público y testigos infrascriptos, parecieron (comparecieron) Tomás Moreno y Juan Moreno y María Antonia López, su mujer,

vecinos de ella y dijeron que por los Intendentes y Aparejador de la obra de la nueva Iglesia que se está fabricando (construyendo) en esta dicha Villa, se ha sacado a subasta la obra de herrería de todas clases que se necesiten hasta la conclusión y total finalización de la enunciada (citada) Iglesia y habiendo hecho varias posturas y pujas diferentes personas, últimamente los dichos Intendentes remataron (adjudicaron) la citada obra de hierro en los nominados Tomás y Juan Moreno en los siguientes términos: que los susodichos habían de obligarse a labrar (trabajar) cada arroba de hierro de cadenas grandes y chicas, grapas y gatillos de todas clases a precio de nueve reales y tres cuartillos cada una, siendo de su cuenta la merma que tenga el hierro que se les ha de entregar para este fin, de cuenta de la masa (coste global) de la Iglesia, cobrándoles dichas mermas al precio que le hubiese costado a dicha masa: Y la libra de hierro de diez y seis onzas poniendo dicho material los otorgantes (adjudicatarios) y trabajado en rejas, balcones, antepechos rectos y

“3 1.2.: obliquos según se ofresca y seles mande haser la andedar a dos rls cada una: Y la libra de higual peso poniendo asimismo el hierro y trabajado en las barandas interiores de la Iglesia Mazorquedo limado y arreglado al dibujo que se les diere lo handedar a tres rls y medio cada una, e igualmte la libra de hierro poniendolo tambien y trabajado en el antepecho del caracol lo andedar a dos rls y tres quartillos cada una: en cullos terminos les hasido rematada dha obra y manufactura y para su seguridad y firmeza y cumplimto se les ha ordenado por dhos Intendentes otorguen la obligacon competente con las hipotecas condusentes adho seguro lo que comotan justo quieren ejecutar y reduciendolo ala debida ejecuzon y presedida la lizensia azeptazon y obligzon quede Marido a Muger por dro se requiera todos tres juntos deman comun abez de uno y cada uno de los susodhos obligados deporsi y por el todo in solidum srê que renuncian las leyes de la Man.....”

oblicuos según se ofrezca y se les mande hacerla han de dar a dos reales cada una: Y la libra de igual peso, poniendo (colocando) asimismo el hierro y trabajado en las barandas interiores de la Iglesia, mazorqueado, limado y arreglado al dibujo que se les diere, lo han de dar a tres reales y medio cada una, e igualmente la libra de hierro, poniéndolo también, y trabajado en el antepecho del caracol, lo han de dar a dos reales y tres cuartillos cada una: en cuyos términos les ha sido rematada (adjudicada) dicha obra y manufactura y para su seguridad, firmeza y cumplimiento (como) se les ha ordenado por dichos Intendentes otorguen (cumplan) la obligación competente (de acuerdo) con las hipotecas conducentes a dicho seguro (garantía) lo que como tan justo (legalmente han de) quieren ejecutar y reduciéndolo a la debida ejecución y precedida la licencia, aceptación y obligación que de Marido a Mujer por derecho se requiera a todos los tres juntos de mancomún, a la vez de uno y cada uno (individualmente) de los susodichos de por sí y por el todo en solidario sobre que renuncian a las Leyes de la Man.....

“A 3 2.1.: comunidad el veneficio de la dibición y “es/c...r/ción” y deemas que deben renunciar los que se obligan de mancomun como en ellas se contiene otorgan que se obligan â labrar y manufacturar cada arroba de hierro de cadenas grandes y chicas grapas y gatillos a nueve rls y tres quartillos cadauna siendo de su cargo las mermas que resultaren del hierro que se les entregue pagando la arroba de ellas al precio que la Iglesia lo ubiese comprado: la libreta de hierro trabajado y puesto de su cuenta en rejas y Balcones y Antepechos rectos y oblicuos â dos rls: la misma libreta de hierro puesto y trabajado â dos rls y tres quartillos del que fuere nesesario para el antepecho del caracol: y la misma libreta de hierro puesto y labrado para barandas interiores de la Iglesia Mazorquizado limado y arreglado al dibujo que se les diere â tres rls y medio: todo lo qual cumpliran y ejecutaran inviolablemente oserbando las condisiones que por la intervenció de d^{ha} obra se les ha impuesto y

son las siguientes:.....Es condizion que en qualesquier tiempo hora y ocazon que por los Intendentes y Aparejador del d^{ha} Iglesia se les mande trabajar.....”

Comunidad el beneficio de la división y “¿es/c...r/ción?” y demás que deben renunciar los que se obligan de mancomún, como en ellas se contiene otorgan (aceptan) que se obligan a labrar y manufacturar cada arroba de hierro de cadenas grandes y chicas, grapas y gatillos a nueve reales y tres cuartillos cada una, siendo de su cargo las mermas que resultaren del hierro que se les entregue, pagando la arroba de ellas al precio que la Iglesia lo hubiese comprado: la libreta²⁹ de hierro trabajado y puesto de su cuenta en las rejas, balcones y antepechos rectos y oblicuos a dos reales: la misma libreta de hierro trabajado a dos reales y tres cuartillos del que fuese necesario para el antepecho del caracol: y la misma libreta de hierro puesto y labrado para barandas interiores de la Iglesia. Mazorquizado, limado y arreglado al dibujo que se les diere a tres reales y medio: todo lo cual cumplirán y ejecutarán inviolablemente, observando las condiciones que por la intervención de dicha obra se les ha impuesto y son las siguientes.....Es condición que en cualesquier tiempo, hora y ocasión que por los Intendentes y Aparejador de la dicha Iglesia se les mande trabajar.....

“3 2.2.: â los otorgantes alguna cosa de hierro para ella hasta su conclusión inmediate lo ande ejecutar sin poner reparo alguno pues delo contrario tendran adbitrio d^{hos} Intendentes y Aparejador para mandarlo haser aqualesquiera otra persona y pagarle su costo de cuenta de los otorgantes.....

Es condizon quenohande poder pedir cantidad alguna acuenta de su trabajo, pues cualesquiera pieza que conclullan la an de presentar a la

²⁹. Libreta, unidad del peso menor que la libra-

Junta de dha obra p^a que por esta se apruebe y entregue su valor segun lo estipulado: y caso de no estar a su gusto se la han de volver a llevar y trabajarla de nuevo hasta que quede a satisfazon de la dha Junta.. Es condizon que los otorgantes no han de poder pedir aumento de precio en que queda tratada la obra de hierro qe se ha insinuado y se necesita para la fabrica de dha Iglesia aunque presten para ello tener mucha perdida o seguirseles otro perjuicio pues caso que lo intenten no ha de ser.....”

a los otorgantes (adjudicatarios) alguna cosa de hierro para ella hasta su conclusión, inmediatamente lo han de ejecutar sin poner reparo alguno, pues de lo contrario tendrán arbitrio (libertad) dichos Intendentes y Aparejador para mandarlo hacer a cualquiera otra persona y pagarle su costo de cuenta de los otorgantes.....

Es condición que no han de poder pedir cantidad alguna a cuenta de su trabajo, pues cualquier pieza que concluyan la han de presentar a la Junta de dicha obra, para que por ésta se apruebe y entregue su valor según lo estipulado: y caso de no estar a su gusto se la han de volver a llevar y trabajarla de nuevo hasta que quede a satisfacción de la dicha Junta.....

Es condición que los otorgantes no han de poder pedir aumento del precio en que queda tratada la obra de hierro que se ha insinuado (contratado/citado) y se necesita para la construcción de dicha Iglesia y pretexten para ello tener mucha pérdida o seguirseles otro perjuicio, pues caso que lo intenten no ha de ser.....

“A3.3.1 oída su solisitud en tribunal alguno. Es condicion que los otorgantes han de trabajar todas las piezas de hierro que se necesitan para dha obra en los terminos y por los precios que quedan tratados y con

arreglo a las ordenes y modelos que se les dieren por el Maestro maior Intendentes o Aparejador de dha obra sin que puedan alegar ser muy dificultosas y costosas pues caso que no las ejecuten se han de hacer a su costa por cualquier otro maestro..... Y con dhas condiciones quedan obligados al total cumplimiento de todo lo antes referido al que se les ha de poder ejecutar y apremiar con costas y por todo rigor de drô en virtud de esta Escritura y el Juramento de la parte de dhas interbentores en que lo dejan y queda diferido decisorio y relevado de otra prueba aunque de drô se requiera acual oserbancia obligaron los barones sus personas estos y la Maria Antonia Lopez sus vienes y rentas muebles y raices habidos y por haber; Y sin que la obligacon e hipoteca especial vicie ny derogue ala gra! ny.....oída su solisitud en tribunal alguno.....”

Es condición que los otorgantes han de trabajar todas las piezas de hierro que se necesitan para dicha obra en los términos y por los precios que quedan tratados y con arreglo a las órdenes y modelos que se les dieren por el Maestro mayor, Intendentes o Aparejador de dicha obra sin que puedan alegar ser muy dificultosas y costosas, pues caso que no las ejecuten se han de hacer a su costa por cualquier otro Maestro.....

Y con dichas condiciones quedan obligados al total cumplimiento de todo lo antes referido, al que se les ha de poder ejecutar y apremiar con costas y por (con) todo (el/ala) rigor (fuerza) de(l) derecho en virtud de esta Escritura y el Juramento de la parte de dichos Interventores en que lo dejan y queda diferido (contrastado), decisorio (decidido) y relevado (exento) de otra prueba, aunque de derecho se le requiera (le ampare) a cuya observancia obligaron los varones sus personas, éstos y la María Antonia López, sus bienes y rentas, muebles y raíces

habidos y por haber: Y sin que la obligación e hipoteca especial vicie ni derogue a la general ni.....

“3 3.2 por el contrario el Juan Moreno y la d^{ha} su muger se obligan ehipotecan a seguro delo que en esta Es^{ra} se contiene una casa de dos cuerpos consu corral en la calle de las Marquesas de esta V^a que linda con casas de Ant^o Zerbera con las de Maria Cantero s^{r^e} la qual se haia impuesto y situado el prⁱⁿ de un Zensu abierto y al redimir de quatrocientos rls a favor del Patronato que en esta Villa fundo Pedro Rodrigo Morenilla; y una haza de fanega y media de tierra calma en el sitio dela olla de Bega ruedo de esta Villa que linda con tierra de D^a Maria Garcia Pareja con las de Ana del Cid y otros: cuias fincas declaran ser sullas propias habidas y adquiridas con justo y leg^{mo} titulo y queamas del Zensu que queda citado son libres no obligadas ny hipotecadas a otro alguno ny agrabamen especial ny gr^{al} tacita ny expresam^{te} lo que aseguran con lo demas sus vienes y se obligan a no venderlas ny enajenarlas a no ser con el cargo de esta hipoteca siendo lo que.....”

por el contrario, el Juan Moreno y la dicha su mujer se obligan e hipotecan al seguro (tenor) de lo que en esta Escritura se contiene: una casa de dos cuerpos, con su corral, en la calle de las Marquesas, de esta Villa, que linda con casas de Antonio Cervera, con las de María Cantero, sobre la cual se haya impuesto y situado el principal de un censo abierto y al redimir de cuatrocientos reales a favor del Patronato que en esta Villa fundó Pedro Rodrigo Morenilla; y una haza de fanega y media de tierra calma en el sitio de la Hoya de Vega, ruedo de esta Villa, que linda con tierra de D^a María García Pareja, con las de Ana del Cid y otros; cuyas fincas declaran ser suyas propias, habidas y adquiridas con justo y legítimo título, que además del Censo que queda citad, son libres, no obligadas ni hipotecadas a otro alguno ni gravamen especial ni general, tácita ni

expresamente, lo que aseguran con lo demás sus bienes y se obligan a no venderlas ni enajenarlas a no ser con el cargo de esta hipoteca, siendo lo que.....

“3 4.1 en contrario se hisiere en si nulo y deningun efecto y se ha de poder ejecutar y apremiar en ellas aunquepasen a tersero o mas poseedores para pago delo aquí contenido y con poderio de Justicias y renunciación de leyes fueros y derechos desu favor y la gr^{al} enforma y en particular la Maria Antonia Lopez renuncio a las Leyes del Emperador Justiniano el ausilio del Senado consulto “Boloniano” nueva constitución las de Toro³⁰ Madrid Partida y demas que hablan en favor delas mugeres delas quales y desu efecto fue apercebida pormy el Es^{no} y como sabedora de ella las renuncio doy fee y jura por Dios ntro Señor y auna señal de cruz segúndr^o haber por firme esta Es^{ra} y que no la contradira por razon de su Dote harras ny otro dr^o quela corresponda ny que para su atorgam^{to} no hasido inducida ny atemorizada porsu marido ny otra persona en su nombre, pues lo hase de su libre voluntad y del Juram^{to}”

en contrario se hiciere, en sí nulo y de ningún efecto y se ha de poder ejecutar y apremiar en ellas aunque pasen a tercero o más poseedores para pago de lo aquí contenido y con poderío de Justicias y renunciación de Leyes, fueros y derechos de su favor y la general en forma y en particular la María Antonia López renunció las Leyes del Emperador Justiniano, el Auxilio del Senado, consulto “Boloniano”, nueva Constitución las de “toro” Madrid, Partida y demás que hablan en favor de las mujeres de las cuales y de sus efectos fue apercebida (advertida) por mí, el Escribano, y como sabedora de ellas las renunció. Doy fe y jura por Dios Nuestro

³⁰ Leyes de Toro, 1505. Recopilación de la legislación realizada por los Reyes Católicos, promulgada el 7 de marzo de 1505, reinando Juana I de Castilla

Señor y a una señal de Cruz, según derecho, haber por sí, firme esta Escritura y que no la contradirá por razón de su Dote, arras ni otro derecho que la corresponda ni que para su otorgamiento (consentimiento/firma) no ha sido inducida ni atemorizada (amenazada/obligada) por su marido ni otra persona en su nombre, pues lo hace de su libre voluntad y del juramento.....

“3 4.2 hecho no pedira absolución ny relajacon a Su Santidad ny otro Juez ny Prelado que se lo pueda y deba conseder y si consedido le fuere asu pedimo o de propio motu de ella no “asu/usa” pena de perjura y de caer en caso de menos baler y declara que en contrario de lo dho no tiene hecha ni hara protesta nyreclamacon alguna y si aparesiere haberla hecho o la hiciere desdeluego la reboca para que no haga fee enjuicio ny fuera del y según dho es lo otorgaron y firmaron losquesupieron y por laqe dijo no saber lo hara a su ruego un tqo qe lo fueron presentes Dn Alfonso Zenteno Presbítero D, Josef Guerrero y Antonio Lujan vecs de esta dha Villa eyo el Esno doy fe e conosco a los otorgtes, y como les encargué el registro de la copia de esta Esra por el oficio de hipotecas de la ciudad de Granada dentro del termino prebenido en la RI Pragmática de S. M.”

hecho no pedirá absolución ni relajación (atenuación) a Su Santidad ni otro Juez ni Prelado que se lo pueda y deba conceder a su petición o de” motu proprio” de ella, no “a su/usa” pena de perjury, y de caer, en caso de menos valer, y declara en contrario de lo dicho no tiene hecha ni hará protesta ni reclamación alguna y si apareciere, desde luego la revoca para que no haga fe en juicio ni fuera de él y según derecho lo otorgaron y firmaron los que supieron y por la que dijo no saber lo hará a su ruego un testigo que lo fueron presentes, Dn Alfonso Centeno, Presbítero; Dn José Guerrero y Antonio Luján, vecinos de esta dicha Villa y yo el Escribano, Doy fe y conozco a los otorgantes y como les encargué el registro de la

copia de esta Escritura por el oficio de hipotecas de la ciudad de Granada, dentro del término previsto en la Real Pragmática de S. M

Firmas de...

otorgantes: Thomas Moreno; Juan Moreno.

Testigos: Antonio Luján y Vega

Escribano: Antonio Fernández Arias.

» » ≡ Bibliografía.

- ALMAGRO, Antonio (2004): *Levantamiento Arquitectónico*. Universidad de Granada: digital.csic.es/bitstream/10261/19802/1/Levantamiento.pdf
- ARENAS, Antonio (2005): *El poniente granadino. Granada en tus manos. Nº4*. Granada: Ideal: Diputación de Granada. http://www.granadanatural.com/ficha_paisajes.php?cod=147
- BLANCO, Juan Luis (1995-96): *La cultura de Ventura Rodríguez y la biblioteca de su sobrino Manuel Martín Rodríguez*. CSIC. Base de Datos ISOC. Anuario del Departamento de Historia y Teoría del Arte. ISSN: 1130-5517 nº7-8 págs.181-222.
- CAMACHO MARTÍNEZ, Rosario (2005): *A propósito de Ventura Rodríguez y la Iglesia de San Felipe Neri de Málaga*. CSIC. Base de Datos ISOC. Universidad de Málaga. Atrio. Revista de Historia del Arte. ISSN: 0214-8293 pág,105-112
- CÁNOCAS DEL CASTILLO, Soledad (1989): *Artistas españoles en la Academia de San Luca de Roma. 1740-1808*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1989. Nº 68 págs. 153-210 pág.162
- CARDELL, Carolina (2003): *Cristalización de sales en calcarenitas: aplicación al monasterio de San Jerónimo de Granada*. Universidad de Granada. Departamento de Mineralogía y Petrología. <http://digibug.ugr.es/handle/10481/26083>
- CERVERA, Luis (1982): *Ventura Rodríguez, maestro mayor de obras de Madrid y de sus fuentes y viajes de agua*. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Primer semestre de 1982. Número 54 pág.33-78
- CERVERA, Luis (1985): *El arquitecto Gallego Domingo Antonio Lois de Monteagudo (1723-1786) y su "Libro de Barios adornos"*. Ed. La Coruña: Fundación Pedro Barrie de la Maza, 1985 ISBN: 84-85728-20-4
- CÓRDOBA, Anabel (2013): *Monografía de Investigación. Trabajo Fin de Carrera. Iglesia de la Encarnación. Montefrío (Granada)*. Trabajo Fin de Carrera dirigido por D. Mariano Martín García, Universidad de Granada E.T.S.I.E. nº Bibliográfico: b22792442 nº Ejemplar: i23338945
- CRUZ, María y KURTZ, William (1994-1995): *La iglesia de San Gabriel-La Concepción de Badajoz, supuesta de Ventura Rodríguez*. Universidad de Extremadura. Norba-Arte. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0213-2214 nº 14-15 pág. 195-218
- EISMAN, Carmen (1989): *Diego de Siloe y la Iglesia de la "Villa" de Montefrío*. Granada: CSIC. Base de Datos ISOC. Cuadernos de Arte de la Universidad de Granada. ISSN: 0210-962X pág.39-49
- ESTEBAN, Juan Francisco (1987): *Ventura Rodríguez al servicio de una idea. La Santa Capilla de la Virgen del Pilar de Zaragoza*. Artigrama. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0213-1498 pág. 157-206
- FERNÁNDEZ, José (1996): *Geometría y función estructural en cantería. La cantería y la estereotomía de la piedra en el aprendizaje del arte de construir y otras consideraciones*. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, 19-21 septiembre 1996, eds. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Madrid: I. Juan de Herrera, CEHOPU, 1996
- GLOBAL VIPASSANA FOUNDATION (2009): *Global Vipassana Pagoda. The biggest dome in the world: 85,15m diameter*. http://www.earth-auroville.com/maintenance/uploaded_pics/02-global-vipassana-pagoda.pdf
- GÓMEZ, Jesús Juan (1985): *El Neoclásico y la Iglesia de Santa Fe*. Departamento de Actividades Culturales de Caja Rural. Granada. Depósito Legal GR. 725-1985.
- GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1987): *La transición del Renacimiento al Barroco en la arquitectura religiosa granadina (1560-1650)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433806262 <http://hdl.handle.net/10481/6043>

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

- GÓMEZ-MORENO, José Manuel (1989): *Las Iglesias de las siete villas*. Fundación Rodríguez-Acosta, 1989 ISBN 8440444842
- GR ARQUITECTOS (2012) *Plan General de Ordenación Urbana de Montefrío*. Ayuntamiento de Montefrío.
- GUASTAVINO, Rafael (2006): *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN-10: 84-7790-429-4
- GUERRA, Rosa Ana (2012): *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Geometría, Construcción y Mecánica*. Tesis dirigida por Santiago Huerta Fernández. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Politécnica de Madrid. http://webspersoais.usc.es/export/sites/default/persoais/rosana.guerra/de-scargas/GUERRA_2012_Tesis_Parte1.pdf
- GUILLEN, Esperanza (1988): *Arquitectura religiosa en el Arzobispado de Granada. De la ilustración al historicismo (1773-1868)*. Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, 1988 ISBN: 8433808222 <http://hdl.handle.net/10481/6063>
- GUILLEN, Esperanza (1989): *La fortuna de un arquitecto pensionado en Roma: Domingo Lois Monteagudo*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X pág. 179-205
- GUILLÉN, Esperanza (2001): *Granada. Guías de Historia y Arte. Montefrío*. Granada: Diputación Provincial de Granada ISBN: 8478072918
- HEYMAN, Jacques (1995): *Teoría y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. ISBN 8477902135
- HEYMAN, Jacques (1999): *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-89877-73-9
- HUERTA, Santiago (1990): *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*. Tesis dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Archivo Digital UPM <http://oa.upm.es/549/>
- HUERTA, Santiago (2004): *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 84-9728-129-2
- HUERTA, Santiago; AROCA, Ricardo (1990): *Cúpulas de fábrica. Un estudio de sus dimensiones y semejanzas*. Biblioteca Politécnica Madrid. Archivo Digital UPM. Departamento Estructuras de Edificación. ID del e-print: 1470. <http://oa.upm.es/1470/>
- JIMÉNEZ BAENA, Javier Felipe (2008): *Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado*. Trabajo para la asignatura Historia de la Construcción E.U. de Arquitectura Técnica. Universidad de Granada. <http://www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf>
- JIMENEZ, Javier Felipe (2008): *Iglesia de la Encarnación. Montefrío. Antecedentes, construcción y estado*. <http://www.forummontefrío.es/montefrío/archivos/iencarnacion.pdf>.
- LETELLIER, Robin; SCHMID, Werner; LEBLANC, François (2007): *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places*. The Getty Conservation Institute. http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/recordim.html
- LLAGUNO Y AMIROLA, Eugenio (1829): *Noticias de los Arquitectos y Arquitectura de España desde su Restauración*. De Orden de S. M., Madrid en la imprenta Real. Año de 1829. TOMO IV pág. 288. http://books.google.es/books?id=nLcGAAAAQAAJ&printsec=frontcover&dq=Noticias+de+Arquitectos+y+de+Arquitectura+de+Espa%C3%B1a+desde+su+restauraci%C3%B3n+tomo+IV&hl=es&sa=X&ei=idBNUs_aJpHNsgbe-oCgBg&ved=0CDQ6AEwAA#v=onepage&q=Noticias%20de%20Arquitectos%20y%20de%20Arquitectura%20de%20Espa%C3%B1a%20desde%20su%20restauraci%C3%B3n%20tomo%20IV&f=false

- LÓPEZ, Ana (2009): *La cúpula de El Escorial: geometría, estereotomía y estabilidad*. Actas del Secto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Valencia, 21-24 octubre 2009. Eds. S. Huerta, R. Marín, R. Soler, A. Zaragoza. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2009
- LÓPEZ, Gema M. (1998): *La estabilidad de la cúpula de S. Pedro: el informe de los tres matemáticos*. Universidad de la Coruña. II Congreso nacional de historia de la construcción, 1998: 285-294 ISBN: 84-89977-44-5, <http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/10583/1/HC%2037.pdf>
- LÓPEZ, Gema M. (2006): *Poleni's Manuscripts about the Dome of Saint Peter's*. Second International Congress on Construction History, Queen's College, Cambridge University; 29/03-02/04/2006 <http://www.arct.cam.ac.uk/Downloads/ichs/vol-2-1957-1980-lopez.pdf>
- LORGNA, Anton María (1782): *Saggi di statica e meccanica applicate, 1782*. <https://archive.org/details/saggidistaticae00lorggoog>
- MADDOZ, Pascual (1846-1850): *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar. Vols 10-11. Madrid. 1846-1850. Establecimiento tipográfico de P. Madoz y L. Sagasti. Número de control: BVA20030146035*. <http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/consulta/registro.cmd?id=6353#infoejemplares>
- MADRID ÁLVAREZ, Vidal de la (2009): *El arquitecto Ventura Rodríguez y Covadonga: la accidentada historia de un proyecto frustrado*. CSIC. Base de Datos ISOC. Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia. ISSN: 0212-5099 pág,167-192
- MADRID, Vidal de la (2009): *El arquitecto Ventura Rodríguez y Covadonga: la accidentada historia de un proyecto frustrado*. Universidad Oviedo. Liño. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0211-2574 nº 15 pág. 199-220
- MAS-GUINDAL, Antonio José (2011): *Mecánica de las estructuras antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban*. Ed. Munilla-Lería ISBN: 978-84-89150-90-4
- MONTES BARDO, Joaquín (1996): *El Sagrario de Jaén: Una Capilla Ilustrada*. CSIC. Base de Datos ISOC. Espacio, Tiempo y Forma. Serie VII: Historia del Arte. ISSN: 1130-4715 nº 9 pág. 127-155
- MONTES, Carlos (2003): *Ventura Rodríguez y la capilla de San Pedro de Alcántara*. CSIC. Base de Datos ISOC. EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica. Universidad de Valladolid. ISSN: 1133-6137 nº7-8 págs.11-23
- PEDREGOSA MEGÍAS, Rafael J. (2012): *La evolución de una villa nazarí de frontera: Montefrío. Antecedentes, configuración y transformación tras la conquista castellana*. Revista: CEHGR · núm,24 · 2012 · págs 73-103 ISS: 2253-9263
- PEINADO, Rafael Gerardo (1981): *Oviedo. Financiación de la Guerra y Señorialización del Reinado de Granada. Montefrío y la Casa de Aguilar*. CSIC. Base de Datos ISOC. Liño. Universidad de Oviedo, España. ISSN: 0211-2574 pág.199-220 pág. 171
- PITROU, Robert (1879-1963): *Recueil de différents projets d'architecture de charpente et autres concernant la construction des ponts (1756) - Pitrou, Robert (1879-1963)* Bibliotecas de Museos. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. http://bvpb.mcu.es/museos/es/consulta/busqueda_referencia.cmd?posicion=1&idValor=352500&forma=ficha&id=174
- RABASA, Enrique (2000): *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Ediciones Akal, S.A., 2000 ISBN: 84-460-1542-0
- RAMÍREZ, Tiscas; SUÁREZ Javier (2012): *Análisis estructural de la cúpula de la Iglesia de San Justo y Pastor de Granada*. Trabajo Fin de Master de Estructuras de la Universidad de Granada.
- REESE, Thomas (1976): *The architecture of Ventura Rodríguez*. Garland. New York. ISBN: 0-8240-2004-9

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

- REESE, Thomas Ford (1975): *Ventura Rodríguez en Vélez de Benaudalla y Larrabezúa*. Cuaderno de Arte de la Universidad de Granada XII. Granada (1975), 23-30
- RUIZ, Juan Pedro (2008): Mapa del Reino Nazarita de Granada. http://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_granada
- TAPPIN, Stuart (2003): *The structural development of masonry domes in India*. Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20th-24th January 2003, ed. S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, ETSAM, A.E. Benvenuto, COAM, F. Dragados, 2003.
- THUNNISSEN, Henri J.W. (1950, traducido en 2012): *Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura. "Gewelven. Constructie en toepassing in de historische en hedendaagse bouwkunst"*. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. ISBN: 978-84-9728-425-7
- TORRES, José María (1996): *Un proyecto de Domingo Antonio Lois de Monteagudo revisado por Ventura Rodríguez: La Iglesia de Alomartes (Granada)*. Academia. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 0567-560X nº 82 pág. 333-357
- UROSEVIC, M.; SEBASTIAN PARDO, E.; RUIZ AGUDO, E. Y CARDELL, C. (2011): *Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/215>
- VIGO, Alfredo (1989): *Domingo Lois Monteagudo y la Capilla de la Comunión de la Catedral Compostelana (1764-1783)*. Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología. Base de Datos CSIC. ISOC. ISSN: 2010-9573 pág. 450-466.

Recursos electrónicos.

- Consejería de medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Mapa Geológico de Andalucía. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=c1bc9cd553ff9210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=cff5d61d8470f210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es#subapartado91bc9cd553ff9210VgnVCM2000000624e50a
- GR ARQUITECTOS (2012): *Plan General de Ordenación Urbana*. Ayuntamiento de Montefrío. <http://www.montefrío.org/paginas/pgou.htm>
- GR ARQUITECTOS (2012): *Plan General de Ordenación Urbana*. Ayuntamiento de Montefrío. Ficha de catalogación: <http://www.montefrío.org/impresos/tv2211.pdf>
- Instituto Geográfico Nacional [http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoDetalleMapasSismicos.do?mapa=peligrosidadaceleraciones_peq.jpg&titulo=Mapa%20de%20peligrosidad%20s%EDsmica%20de%20Espana%F1a%20\(en%20valores%20de%20aceleracion%F3n\)&leyenda=no&mapabig=peligrosidadaceleraciones.jpg](http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoDetalleMapasSismicos.do?mapa=peligrosidadaceleraciones_peq.jpg&titulo=Mapa%20de%20peligrosidad%20s%EDsmica%20de%20Espana%F1a%20(en%20valores%20de%20aceleracion%F3n)&leyenda=no&mapabig=peligrosidadaceleraciones.jpg)
- Instituto Geológico y Minero de España (1973) E: 1/200.000. http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/datos/Geotecnico_200/jpg/editado_geotecnico200_83.jpg
- Instituto Geológico y Minero de España, (1985) E: 1/50.000. <http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50digital.asp?haja=1008&bis>
- Instituto Nacional de Estadística. http://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaAvanzada&entidad_amb=no&codProv=18&codMuni=135&codEC=0&codES=0&codNUC=0&L=0

- Señoríos del Reino de Granada.
[http://es.wikipedia.org/wiki/Reino_de_Granada_\(Corona_de_Castilla\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Reino_de_Granada_(Corona_de_Castilla))
- Sistema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas
<http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>
- Terremotos históricos del sur de España.
<http://www.ugr.es/~iag/divulgacion/boletines/b1.html>
- <http://www.globalpagoda.org/building-the-pagoda>
- http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Pante%C3%B3n_de_Agripa
- http://es.wikipedia.org/wiki/Santa_Sof%C3%ADa
- http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Santa_Sof%C3%ADa
- http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_103816.html
- <http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/monumentos/1172.htm>
- <http://sdelbiombo.blogia.com/2008/090302-la-cupula-de-la-roca-segunda-parte-.el-edificio-islamico.php>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Dome_of_the_Rock
- <http://megaconstrucciones.net/?construccion=cupula-roca#ixzz2kLSeu3vP>
- http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Santa_Maria_del_Fiore
- http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC2_037.pdf <http://historiarte-bach.blogspot.com.es/2013/02/cupula-de-san-pedro-del-vaticano.html>
- <http://tomhistoriadelarte.blogspot.com.es/2009/02/la-basilica-de-san-pedro-del-vaticano.html>
- <http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/10583/1/HC%2037.pdf>
- <http://blog.thaumatography.net/category/tuteexamples/architects/>
- <http://blog.thaumatography.net/tag/drawings/>
- <http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/monumentos/1004.htm>
- <http://www.arquba.com/monografias-de-arquitectura/la-iglesia-de-gesu-2/>
- <http://www.arquba.com/monografias-de-arquitectura/la-iglesia-de-gesu-2/>
- <http://kerchak.com/arte-barroco/>
- <http://loslugarestienenmemoria.blogspot.com.es/2012/04/la-historia-de-una-tipologia.html>
- http://www.fundacioniberdrola.org/webfund/gc/prod/en_US/contenidos/docs/basilica_escorial.pdf
- <http://realsitiodelescorial.wordpress.com/category/monasterio-del-escorial/>
- CANO DE GARDOQUI GARCIA, JOSE LUIS, 1994. "*La construcción del Monasterio de El Escorial: historia de una empresa arquitectónica*". Universidad de Valladolid, Facultad de Derecho. Sección sección yalzado de la cupula y tambor, lamina XXXV.
- CANO DE GARDOQUI GARCIA, JOSE LUIS, 1994. "*La construcción del Monasterio de El Escorial: historia de una empresa arquitectónica*". Universidad de Valladolid, Facultad de Derecho. Sección esteoeste, por la casa del rey, la basilica y el atrio, plano 5.
- http://es.wikipedia.org/wiki/Bas%C3%ADlica_de_El_Escorial
- <http://www.udc.es/dep/com/gallego/monforte/monfo3y.htm>
- http://centrodeartigos.com/articulos-noticias-consejos/article_149083.html;
- http://asi.nic.in/asi_monu_tktd_karnataka_golgumbaz.asp
- http://archnet.org/library/sites/one-site.jsp?site_id=7616
- FERGUSSON, James.(1859). *The Illustrated Handbook of Architecture*. London: John Murray.
- http://www.4to40.com/coloring_book/trace.asp?p=Gol_Gumbad&k=Gol_Gumbaz
- http://en.wikipedia.org/wiki/St_Paul's_Cathedral.
- <http://saigonvs.wordpress.com/2011/10/03/st-pauls-cathedral-london/>
- ASTRAIN, Luis, et al (2000): *La cúpula de la Basílica de Loiola en Azpeitia, Gipuzkoa*. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Sevilla: eds. A.Graciani
- http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC3_007_Astrain%20L.pdf
- http://es.wikipedia.org/wiki/Santuario_de_Loyola
- http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loiola_santutegia_Fatxada_eta_So_lairua.jpg

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LA ENCARNACIÓN DE MONTEFRÍO. GRANADA.

- LINAZASORO, José Ignacio (1982): *Proyecto de Ordenación del área del Santuario de Loyola*.
<http://www.euskomedia.org/PDFAnlt/riev/31/3104650479.pdf>
- [http://www.memoriademadrid.es/busador.php?accion=VerFicha&id=51915\(18\)http://es.wikipedia.org/wiki/Real_Bas%C3%ADlica_de_San_Francisco_el_Grande_\(Madrid\)#C.C3.BAputa](http://www.memoriademadrid.es/busador.php?accion=VerFicha&id=51915(18)http://es.wikipedia.org/wiki/Real_Bas%C3%ADlica_de_San_Francisco_el_Grande_(Madrid)#C.C3.BAputa)
- <http://otramiradaintomadrid.com/2010/03/san-francisco-el-grande-la-tercera-cupula-de-occidente/>
- <http://historias-matritenses.blogspot.com.es/2012/04/la-gran-via-de-san-francisco-la.html>
- PELÑALVER, Germán (2012). *El panteón de Paris Templo de la Nación*. Universidad de Valencia: Mupart.
- <http://mupart.uv.es/ajax/file/oid/463/fid/776/patrimonio.pdf>
<http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/obras/16565.htm>
- PELÑALVER, Germán (2012). *El panteón de Paris Templo de la Nación*. Universidad de Valencia: Mupart.
<http://mupart.uv.es/ajax/file/oid/463/fid/776/patrimonio.pdf>
- <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coupe-Panth%C3%A9on-Coupoles-Paris-France-1881.jpg>
- http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panth%C3%A9on_Soufflot_-_%C3%A9levation_principale.png
- <http://mirror.enha.kr/wiki/%ED%8C%A1%ED%85%8C%EC%98%B9>
- http://www.via-arquitectura.net/01_prem/01p-048.htm
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia_de_las_Escuelas_P%C3%ADas_\(Valencia\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Iglesia_de_las_Escuelas_P%C3%ADas_(Valencia))
- <http://www.revistaeclesia.com/problemas-en-la-cupula-de-la-iglesia-de-los-escolapios-de-valencia/>
- http://www.valencia.es/ayuntamiento/infocuidad_accesible.nsf/vDocumentosWebListado/6C98FD59CB5102DAC12572C20023DA33?OpenDocument&bdOrigen=&idapoyo=&nivel=3&lang=
- <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ThomasWalterDomeUSCapitol.jpg>
- <http://hypothesis-architecture.blogspot.com.es/2012/08/la-transversalidad-democratica-la.html>
- <http://www.sacred-destinations.com/malta/mosta-rotunda-church-of-st-mary>
- http://history_mosta.webs.com/history2.htm
- <http://www.oneweekholiday.com/malta/mosta-mgarr/mosta-rotunda/>
- <http://www.globalpagoda.org/construction-and-development>
- http://www.earth-auroville.com/maintenance/uploaded_pics/02-global-vipassana-pagoda.pdf

