

**MÁSTER DE ESTRUCTURAS DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA
CA 2011/12**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

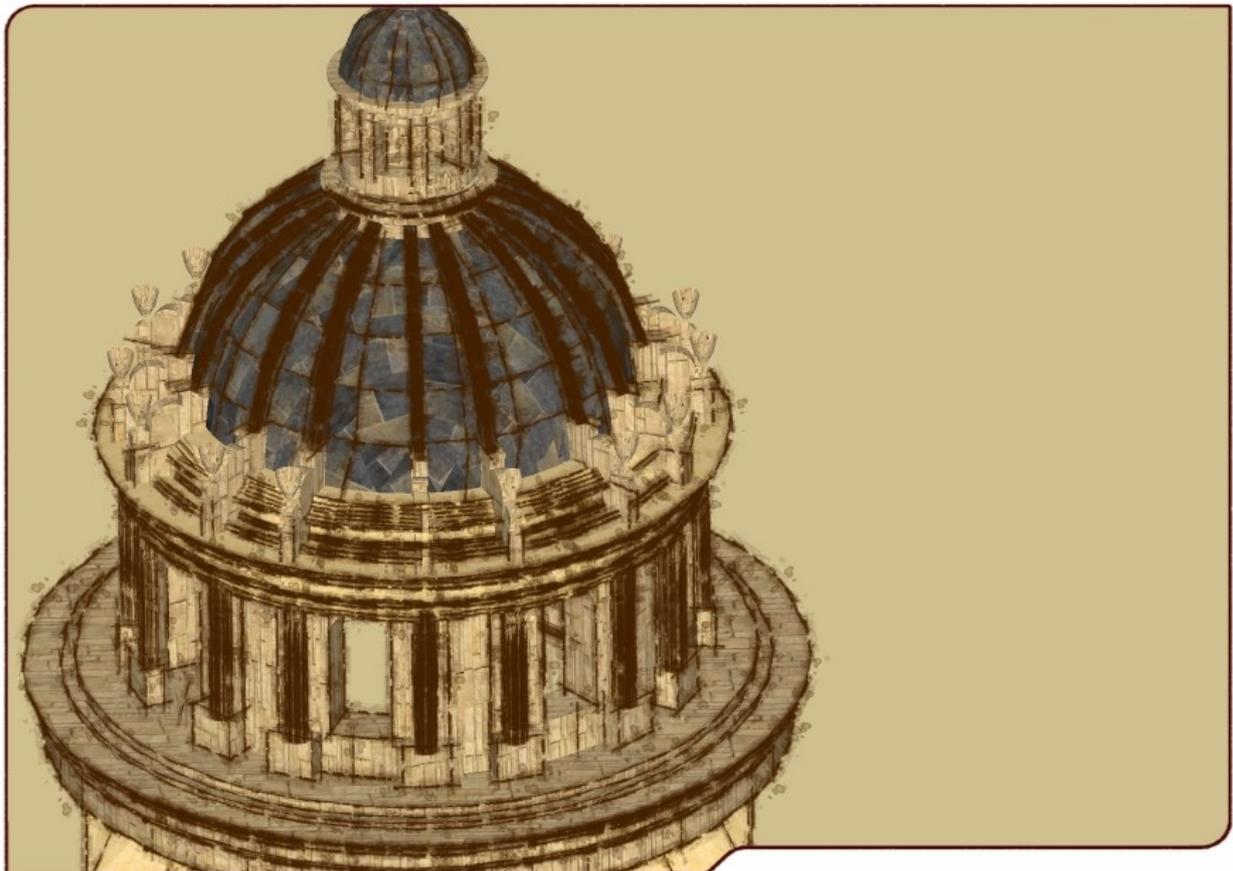
**TÍTULO: "ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA
IGLESIA DE SAN JUSTO Y PASTOR DE GRANADA"**

AUTORA: MARÍA DE TÍSCAR RAMÍREZ MOLINA

Arquitecto

DIRECTOR: JAVIER SUÁREZ MEDINA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



SEPTIEMBRE 2012

Índice de contenido

0. INTRODUCCIÓN.....	4
1. CONTEXTO HISTÓRICO.....	6
1.1. Los domicilios de los Jesuitas.....	8
1.2. Estilo jesuítico y Modo Nostro. Evolución de la arquitectura de la Compañía de Jesús.....	10
1.3. Los constructores, los teóricos y los patronos.....	15
1.4. Iglesias y Colegios de los Jesuitas españoles.....	16
2. TRAZA DEL TEMPLO.....	34
2.1 Documentación de archivo y bibliográfica.....	34
2.2 Primeras hipótesis sobre la traza.....	37
2.3 Mediciones in situ: cinta métrica y láser.....	40
2.4 Sistema de digitalización arquitectónica 3D.....	43
2.7 Modelización geométrica.....	51
2.8 Deformación de la cúpulas.....	58
2.9 Estereotomía.....	63
2.10 Inspección ocular de los materiales constructivos.....	66
2.11 Hipótesis sobre el proceso constructivo.....	70
3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	74
3.1 Estado del arte.....	74
3.2 Justificación del modelo de análisis estructural elegido.....	76
3.3 El arco de fábrica.....	77
3.4 Ensayos de Barlow	81
3.5 El teorema de la seguridad . Equilibrio.....	83
3.6 El teorema de la inseguridad. Rotura.....	85
3.7 La cúpula.....	86
3.8 Análisis límite.....	87
4. HIPÓTESIS Y RESULTADOS.....	91
5. CONCLUSIONES.....	104
5.1 Análisis de resultados.....	104
5.2 Futuras líneas de investigación.....	107
ANEXO A.....	109
ANEXO B.....	121
ANEXO C.....	133
REFERENCIAS.....	143

TRABAJO FIN DE MÁSTER.

TÍTULO: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DE LA IGLESIA DE LOS SANTOS JUSTO Y PASTOR DE GRANADA.

AUTORA: Tíscar Ramírez

DIRECTOR: Javier Suárez

0. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio del comportamiento estructural de la cúpula de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor de Granada, y la evaluación cuantitativa de su seguridad, mediante la metodología desarrollada por el profesor J. Heyman, a partir de la aplicación a estructuras de fábrica, de los teoremas del análisis límite y de la teoría plástica.

El estudio incluye el estudio arquitectónico y el análisis geométrico del elemento estructural. Se trata de una cúpula de media naranja sobre tambor y con remate de linterna, construida en fábrica de piedra, durante la tercera fase de levantamiento del templo jesuita, en el siglo XVII. Esta cúpula jesuita perteneciente a la época renacentista constituye un elemento singular dentro de todo el conjunto eclesiástico, tal como se observa en la figura 1.



Figura 1. Vista de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor desde la plaza de la Encarnación. ¹

¹ Imagen tomada de la Colección Acordes, tomo 3 "*Iglesia de los Santos Justo y Pastor*".

Teniendo en cuenta que el principal problema estructural de una cúpula que sobresale del resto del edificio sobre un tambor, es que carece de contrarresto a los empujes horizontales que se producen en el apoyo, su condición de estabilidad está principalmente definida por el diseño de la sección, sus espesores y relaciones proporcionales. Mediante el análisis de la geometría y proporción de los dibujos y el estudio de la estabilidad a través del método gráfico de los cortes sobre las distintas trazas y sobre un levantamiento realizado de la cúpula del crucero, se pretende establecer los aspectos estructurales que pueden haberse considerado en su diseño.

En la primera parte del trabajo se presenta un estudio documental y bibliográfico de la evolución histórica de la arquitectura religiosa de los jesuitas. A partir de la documentación gráfica conservada, y de campañas de medición realizadas in situ, incluyendo medición con tecnología láser y digitalización tridimensional, se procede al análisis de la geometría de la cúpula. Se realiza la caracterización petrográfica, mineralógica y mecánica del material a partir de resultados de ensayos publicados. Se analiza la estereotomía de la obra, y se hacen hipótesis sobre el proceso constructivo. Finalmente, se realiza el análisis de estabilidad, determinando niveles cuantitativos de seguridad y sacando conclusiones.

CAPÍTULO 1

1. CONTEXTO HISTÓRICO

Los jesuitas se introdujeron en España en el año 1541, y para la fecha de 1554 hubo de procederse a la división en provincias religiosas distintas, las de Castilla, Aragón y Andalucía, para posibilitar un adecuado gobierno de la Compañía². En 1553, un año antes de que San Ignacio de Loyola, fundador de la Compañía, decidiera dividir España en estas tres provincias, tuvo lugar la primera fundación de la Compañía de Jesús en tierras andaluzas, la que correspondió al Colegio de Santa

2 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 9.

Catalina de Córdoba. A partir de esa fecha y a lo largo la segunda mitad del siglo XVI los jesuitas llegaron a realizar un total de dieciocho fundaciones en la provincia andaluza, de las cuáles, en el año 1554 fue instaurada la de Granada.

El conjunto de edificios construidos por la Compañía de Jesús ha suscitado un desigual interés entre los investigadores de la historia de la arquitectura, por lo que de la mayor parte de ellos existen escasas e imprecisas noticias, siendo sólo de un reducido número sobre los que se cuenta con información documental suficiente como para poder conocer los principales hitos de sus procesos constructivos, así como los nombres de sus creadores y de los maestros que intervinieron en sus obras.

No obstante, existen trabajos de carácter global sobre la arquitectura jesuítica, de los que puede reseñarse como el libro "La arquitectura de los jesuitas" o "Arquitectura y arquitectos en la Provincia jesuítica de Andalucía" aparecido en Córdoba en 2004, con ocasión del 450 aniversario de la fundación de la Provincia de Andalucía de la Compañía, ambos redactados por Alfonso Rodríguez G. de Ceballos. Este trabajo viene a incidir y a completar importantes aportaciones realizadas previamente por el mismo investigador en diferentes estudios generales sobre uno de los edificios incluidos en la arquitectura jesuítica, la Iglesia de los Santos Justo y Pastor de Granada, que perteneció a esta Compañía. Su numerosa e importante producción sobre el tema lo ha convertido en el gran especialista español sobre la materia. De sus múltiples escritos cabe ahora destacar en relación con las fundaciones andaluzas su monografía sobre Bartolomé de Bustamante y los artículos sobre Pedro Sánchez, así como otras publicaciones que sin estar limitadas a dicha área geográfica, inciden sobre establecimientos allí localizados o sobre problemas genéricos y aplicables a cualquier empresa constructiva de los jesuitas.³ También se incluirán referencias a otros textos de menor envergadura, que aportaran información complementaria y contraste de estudios realizados.

En el caso granadino, cabe destacar la obra del profesor José Manuel Gómez-Moreno Calera, que se considera como el primer gran libro dedicado a la arquitectura eclesiástica de la Diócesis de Granada y Guadix-Baza⁴, publicado bajo el auspicio de la Universidad de Granada en 1989.

Sobre este colegio granadino versó la tesis doctoral defendida por Córdoba Salmerón en 2005⁵, la cual conoció una primera edición digital en dicho año, apareciendo a partir de la misma una

3 Véase RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., "*Bartolomé de Bustamante y los orígenes de la arquitectura jesuítica en España*", Roma, Institutum Historicum Societatis Iesu, 1967 ; RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., "*El arquitecto Hermano Pedro Sánchez*", *Archivo Español de Arte*, 169, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro de Estudios Históricos, 1970, pp. 51-81.

4 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "*La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento*", (1560/1650), Granada.

5 Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005.

versión impresa. Su texto presta especial atención a la inserción urbana del colegio, a la labor de mecenazgo de Bartolomé Veneroso, a la realización de los retablos y la decoración de pinturas, al culto a las reliquias y a las fiestas de beatificación y canonización que tuvieron por escenario el templo. En relación con la arquitectura del conjunto, el texto viene a repetir lo ya conocido sobre el mismo, insistiendo sobre la negativa opinión que en relación con la iglesia expresó Valeriani tras su visita de inspección de 1578. Entre las aportaciones cabe mencionar la confirmación de la fecha de construcción de la portada lateral en 1596 y la datación del pavimento en 1742, así como la hipótesis de que la sacristía fuese construida por el hermano Pedro Sánchez, o por el también hermano Alonso Romero, maestro de cantería⁶, que colaboró con el anterior en las obras de la capilla mayor y crucero. En la actualidad el templo se encuentra bajo la advocación de los Santos Justo y Pastor.

1.1. Los domicilios de los Jesuitas.

A pesar de que no contó al principio con el apoyo decisivo de la corona, la expansión de la Compañía por ciudades y pueblos de toda la geografía hispana se debió a muchas causas, de entre las cuáles, la principal fue el prestigio que alcanzó la compañía a través de la enseñanza⁷. La certera visión de los jesuitas les llevó a implantar colegios en todos aquellos lugares donde no había enseñanza alguna esparcidos por todos los rincones de España, que fueron la base de su éxito, siendo solicitados ávidamente por propietarios y rentistas rurales.

De este modo, y como muestra de la importancia que tuvo esta tipología dentro de la comunidad jesuítica, cabe resaltar que la mayoría de las casas establecidas en Andalucía, cuyo número ascendía a treinta y nueve, solamente treinta cuatro de ellas ya eran colegios, sobre todo dedicados a la primaria y secundaria, es decir, en las primeras letras y humanidades⁸. En las capitales y ciudades más pobladas se impartía el ciclo completo de enseñanza, que abarcaba desde gramática, humanidades, retórica, conciencia y teología moral, hasta las artes o filosofía escolástica, teología dogmática y moral, y sagrada escritura, como fue en el caso de las ciudades de Sevilla, Granada, Córdoba, Málaga y Cádiz.⁹

Cuando se erigía un Colegio grande en una ciudad de importancia, dotado de todos los órganos necesarios para desarrollar el ciclo completo de la enseñanza, el edificio se desdoblaba en dos sectores hasta cierto punto independientes. En el primero estaba la residencia de los profesores con

6 GÓMEZ MORENO, MANUEL (1982). "*Guía de Granada*". Archivo de la Diputación de Granada, pp 383.

7 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 11.

8 RODRÍGUEZ GUTÍERREZ DE CEBALLOS, ALFONSO. "*Arquitectura y arquitectos en la provincia jesuítica de Andalucía*". En *El arte de la Compañía de Jesús en Andalucía (1554-2004)*. Córdoba, 2004, pp 58.

9 Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 58.

los aposentos, el comedor, la biblioteca, etc..., todo ello en torno a un patio o claustro llamado principal o regular, por estar sometido a la clausura canónica. En el segundo se ubicaba las habitaciones de los alumnos, las aulas ordinarias, las extraordinarias llamadas generales donde se celebraban las disputas escolásticas y otros actos académicos, la biblioteca asignada a los estudiantes, el comedor, etc..., todo ello dispuesto alrededor de un patio llamado ordinariamente de los estudios. Los dos sectores, aunque independientes y a veces con entradas y porterías distintas, se aglutinaba flexiblemente teniendo como enlace la iglesia pública, que era la que centraba la construcción . Por último, un tercer sector, cuyas dimensiones eran variables, era el jardín y la huerta de la que se abastecía el conjunto, donde se colocaban la cocina, despensa, bodega, caballerías, horno, etc...¹⁰ En la edificación de todos estos ámbitos de residencia se cuidó siempre su solidez, salubridad y durabilidad, procurando que respondieran a la austeridad y sencillez de la vida religiosa. Un ejemplo de esta configuración arquitectónica lo representa el Real Colegio del Espíritu Santo de Salamanca, cuyo plano general se muestra en la figura 2.

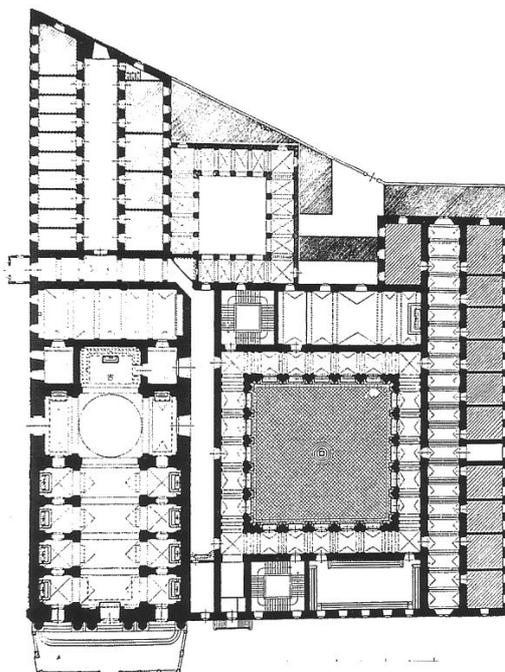


Figura 2. Plano general del Real Colegio del Espíritu Santo de Salamanca, actualmente Universidad Pontificia. Dibujo de O. Shubert¹¹.

10 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 18; CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII, Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 84.

11 Imagen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 17. Este edificio fue el más amplio y uno de los más monumentales que tuvieron los jesuitas en España, según indica Rodríguez G. De Ceballos. Fundado por los reyes Felipe III y Margarita de Austria para la formación intelectual de los escolares de la Compañía, su construcción se dilató por más ciento cincuenta años.

En relación con los fundadores y patronos de las casas y colegios jesuitas, aún siendo evidente el destacado papel desempeñado por miembros de la alta nobleza, también debe considerarse la extraordinaria labor desarrollada por obispos, canónigos y prebendados, tanto a la hora de financiar las fundaciones, como en el momento de facilitarlas y propiciarlas, así como el papel jugado por los municipios, interesados en lograr el establecimiento de colegios en los que se impartiera la enseñanza pública, sin olvidar la actuación como fundadores de miembros de la administración de justicia, escribanos e integrantes de los cabildos municipales¹².

1.2. Estilo jesuítico y *Modo Nostro*. Evolución de la arquitectura de la Compañía de Jesús.

La Compañía de Jesús hizo su aparición en el siglo XVI y sus primeros edificios hubieron de acomodarse a los principios estéticos del Renacimiento¹³. Las constituciones de la Compañía de Jesús no se refirieron nunca a iglesias y edificios con un estilo privativo de los jesuitas, ofreciendo reglas e indicaciones precisas para construirlos.

Uno de los aspectos especialmente importante es el dedicado a los artífices de las fundaciones jesuíticas y al papel que en las mismas desempeñaron los hermanos coadjutores, debido a la inexistencia de un estilo propio de la Compañía. La inclusión de los hermanos jesuitas en el levantamiento de sus propias construcciones se debió fundamentalmente por razones económicas y no a la mayor facilidad que pudieran tener para interpretar y poner en práctica las escasas normas, de carácter práctico y operativo más que artístico, que planteaba la legislación a la hora de la construcción de las casas e iglesias. De este modo, dos años después de la muerte del fundador de la Compañía, la primera Congregación General abordó en 1548 el problema de las construcciones. El párrafo 38 decía "*Impóngase a los edificios de las casas y colegios el modo que nos es propio*¹⁴ de manera que sean útiles, sanos y fuertes, para habitar y para el ejercicio de nuestros ministerios los cuales, sin embargo, seamos conscientes de nuestra pobreza, por lo que no deberán ser suntuosos ni curiosos". Con los términos sanos, fuertes y útiles se quería crear una tipología funcional, y no un estilo artístico determinado. En el aspecto de que no fuesen suntuosos ni curiosos se estaba criticando al clasicismo y al manierismo renacentista, propio de la curiosidad en la sutileza de la estructura y la decoración¹⁵.

12 Referencias tomas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., "*Arquitectura y arquitectos en la Provincia jesuítica de Andalucía*", op. cit., pp. 59-63.

13 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 21.

14 O también "*modo nostro*".

15 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 22-23

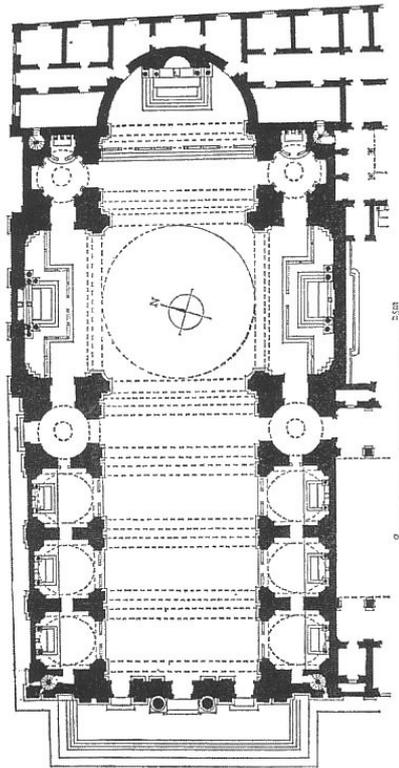


Figura 3. Planta de la iglesia del Gesù en Roma, de J. Barrozi da Vignola. Modelo del "modo" jesuítico¹⁶.

Esta referencia del *modo nostro*, término introducido a partir de la Congregación General de 1548, no es una idea admitida por ningún historiador de la cultura y del arte¹⁷, a pesar de que en la realización de sus edificios prefirieron artífices de la propia Compañía a arquitectos, maestros de cantería, oficiales de albañilería y carpintería, junto a otros oficios, pues ellos serían los que estaban más capacitados para entender, interpretar y poner en práctica aquellas pocas normas, de carácter práctico y operativos más que artística, que la legislación de la orden había impuesto en la realización de sus templos y casas religiosas¹⁸, aunque en los estudios de los jesuitas no se contemplara el estudio de estas artes¹⁹.

En las Constituciones dadas por San Ignacio para el orden de la Compañía de Jesús, no se hará referencia precisa a la forma de las iglesias y edificios, donde lo único por lo que se preocupó fue de que las construcciones expresaran la austeridad y la sencillez con que debían vivir²⁰. Aunque se abordó el problema en la primera Congregación general de 1548, no será hasta la segunda cuando se adopten medidas al respecto.

16 Imagen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas", 2002, pp 22.

17 Referencias tomas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., "Arquitectura y arquitectos en la Provincia jesuítica de Andalucía", op. cit., pp. 63.

18 Ibid. op. cit., pp. 64.

19 Véase Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 84-85.

20 Ibid. pp 85.

En esta segunda Congregación General de 1565, lo que estaba ordenado que se enviase a Roma eran las planimetrías de los futuros edificios, siendo suficiente un simple croquis con las más someras indicaciones sobre la topografía del terreno y la distribución general de la iglesia y del edificio, pero nada de advertencias sobre rasgos formales y estilísticos, dejando libertad para que en cada región se empleasen los allí acostumbrados²¹.

Esta colección de planos de establecimientos jesuíticos que algún día fueron enviados a Roma, aunque considerablemente mermada por todos aquellos documentos que se perdieron en su viaje o fueron simplemente destruidos, se conserva actualmente en la sección de estampas y dibujos de la Biblioteca Nacional de París²². Aunque en un principio pudiera parecer que existe una buena documentación histórica sobre la manera de proceder constructiva de los jesuitas con toda esta colección de planos, cualquier persona que se interese descubrirá que no se tratan de espléndidos dibujos de arquitectura a la manera de los contenidos en los cuadernos de arquitectura del Renacimiento y del Barroco, sino de plantas y más plantas, con una simpleza verdaderamente alarmantes, y sólo excepcionalmente algunos alzados, montes y secciones longitudinales y transversales de edificios en concreto, y prácticamente ningún perfil o detalle, bien arquitectónico o decorativo²³. Esta carencia de cortes, alzados y perfiles indica que en Roma no interesaban los problemas morfológicos y de estilo, sino los de orden funcional y utilitario que eran los que se podían detectar en las plantas²⁴. Tan sólo diecinueve de estos planos corresponden a edificios jesuíticos de Andalucía, donde todos menos uno son de Colegios, destacando como ejemplos excepcionales las iglesias de los Colegios de Sevilla y Málaga²⁵. Para el caso granadino objeto de este trabajo, se han conservado tres plantas, dos pertenecientes al conjunto del Colegio, figuras 4 y 5, y una a las escuelas. El más antiguo, que se conserva en el Archivo Histórico Nacional de Madrid, pertenece al H. Martín de Baseta, de 1575²⁶, el cual marcó todo el proyecto, llegándose a dar el caso que en un intento de modificación del mismo, propició una orden del P. General Tirso Gonzáles para que no se cambiara nunca.

21 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas", 2002, pp 24.

22 VALLERY-RADOT, JEAN. "Le recueil de plans d'édifices de la Compagnie de Jésus conser'vé a la Bibliothèque Nationale de Paris". Roma: Institutum Historicum Societatis Iesu, 1960, pp 60-68.

23 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas", 2002, pp 25.

24 La mayor parte de los planos se localiza en la Biblioteca Nacional de París, existiendo de ellos un inventario realizado por VALLERY-RADOT, J., Le recueil de plans d'édifices de la Compagnie de Jésus conservé à la Bibliothèque Nationale de Paris, Roma, Institutum Historicum Societatis Iesu, 1960.

25 RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., "Arquitectura y arquitectos...", op. cit., pp. 63-74.

26 Véase Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 86-87.

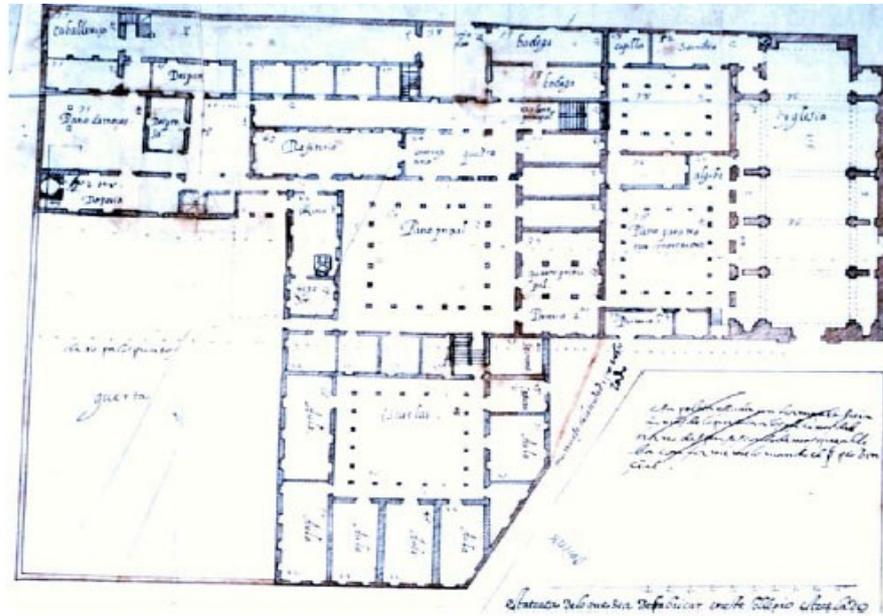


Figura 4. Planta baja del Conjunto Jesuítico del Colegio de San Pablo de Granada. 1579²⁷.

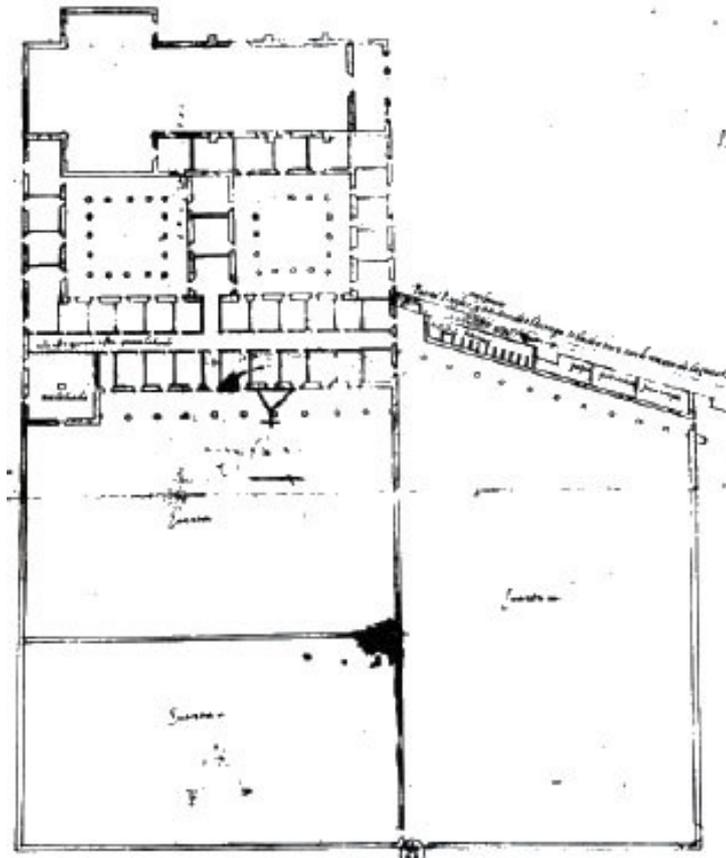


Figura 5. Planta alta del Conjunto Jesuítico del Colegio de San Pablo de Granada. 1579²⁸.

27 Imágenes tomadas del archivo histórico de los Jesuitas, Granada.

28 Ibid.

La falta de reglas o normas referidas a la configuración, ornato y riqueza de los templos, si bien se pone de manifiesto de forma evidente con la sobriedad inicial de las construcciones, se tambaleará a partir de la tercera década del seiscientos y en sintonía con el barroco que se estaba imponiendo en todas partes, la simplicidad y austeridad de la primera arquitectura de la Compañía comenzó a relajarse hacia la búsqueda de ricos y costosos materiales y refinamiento ornamentales y efectos sorprendentes que se obtenía del empleo de pintura ilusionista en muros, bóvedas y cúpulas²⁹.

El padre Giovanni Paolo Oliva fue quien forzó un cambio de interpretación del "*modo nostro*", en el sentido de una mayor permisividad en el uso de todos los resortes sensoriales del Barroco orientados a la conquista de las almas para la religión. Fue Oliva, célebre predicador, entusiasta de las artes, amigo personal de Juan Lorenzo Bernini, quien, elegido General en 1661, inició la nueva era del arte y de la arquitectura de los jesuitas, quien siendo el primero de los Padres Generales en ordenar que, en los proyectos que previamente debían remitirse a Roma para su aprobación, se consagrasen en adelante el orden arquitectónico y los ornatos que comportara³⁰.



Figura 6. Vista interior de la iglesia del Gesú de Roma, después de la barroquización con pinturas y estucos de G. B. Gaulli y otros, ordenada por el P. Giovanni Paolo Oliva³¹.

29 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 29.

30 *Ibid.* pp 30-33.

31 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 29.

1.3. Los constructores, los teóricos y los patronos.

La existencia de un estilo constructivo y decorativo característico de la Compañía de Jesús parecería justificarse por la nómina de arquitectos, maestros de obras, oficiales carpinteros, estuquistas, yeseros y decoradores jesuitas que en muchos casos proyectaron, construyeron y ornamentaron sus iglesias y domicilios. Pero lo que impulsó a la Compañía a emplear en sus fábricas mano de obra propia no fue el conseguir mantener un estilo constructivo concreto, sino ahorrar los costosos salarios y gastos de arquitectos extraños .

Tras tres décadas con el único control desde Roma de la ejecución de sus edificios, en 1590 el Padre General Claudio Acquaviva había exhortado a los jesuitas españoles a que en los edificios de importancia se consultase " *no sólo con los nuestros que saben arquitectura sino también con los maestros de fuera que sean inteligentes, conformándose los superiores con su parecer para evitar yerros, gastos y murmuraciones que por la falta de esto han sucedido*³²". Uno de los más consultados en los primeros tiempos fue el maestro de las obras reales, Juan de Herrera quien, si no dirigió personalmente ninguna iglesia o edificio de la Compañía, sí dictaminó y corrigió de buena gana cuantos proyectos le fueron presentados a examen.

Dentro de los hermanos pertenecientes a la Compañía, destacaron ciertas figuras en el ámbito de la arquitectura religiosa de los jesuitas. En Andalucía brilló con luz propia entre los siglo XVI y XVII el hermano Pedro Sánchez, discípulo del P. Villalpando, quien intervino en casi todas las construcciones que por entonces emprendía la provincia jesuítica de aquella región. Pedro Sánchez, albañil de profesión antes del ingreso en la Compañía, contó con el asesoramiento intelectual, técnico y con el uso de la librería de su colega, el padre Juan Bautista Villalpando, excelente erudito y teórico de la arquitectura. Villalpando fue un arquitecto importante, también sacerdote, y en algún momento discípulo de Juan de Herrera , del que aprendería el clasicismo esencialista y descarnado distintivo de su estilo³³.

Otro de los artistas más importantes dentro de la Compañía fue el padre Bartolomé de Bustamante Herrera, que ingresó ya maduro en la Compañía, habiendo cursado humanidades en la Universidad de Alcalá Henares. Adquirió experiencia en la obra del Hospital de San Juan de Toledo , si bien, al no ser profesional, no se podía equiparar con Alonso de Covarrubias, quien llevaba la dirección técnica de la construcción. Modestas pero seductoras capillas de las confraternidades que alentaban las prácticas religiosas frecuentes, la predicación y las obras de caridad y misericordia, fue el esquema de capillas e iglesias que Bustamante procuró ensayar en España hacia la década de 1650, cuando diseñó numerosos templos en las provincias jesuíticas de Castilla, Toledo y

32 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 33-35.

33 *Ibíd.* pp 37-40.

Andalucía.³⁴

1.4. Iglesias y Colegios de los Jesuitas españoles.

Las primeras iglesias, pertenecientes al siglo XVI, al haber sido proyectadas en época tan avanzada dentro del siglo, respondieron a esquemas y estilismos renacentistas y, aún más, clasicistas y herrerianos³⁵.

En este documento se va a realizar un bosquejo de las iglesias más influyentes en el esquema constructivo de la Compañía de los Jesuitas, el cuál nos va a permitir conocer los principios fundamentales que fueron guiando a su arquitectura religiosa, y las novedades estilistas que se fueron introduciendo.

Una de las primeras obras que nos encontramos fue la construcción del Colegio San Esteban de Murcia, figura 7, que se inició en 1555 pero cuya iglesia no se consagró hasta 1569. Las trazas del Colegio se encargaron a Jerónimo Quijano y Juan Inglés, que en aquellos años del siglo XVI se encontraban trabajando en las obras de la torre de la Catedral de Murcia y de la capilla de Junterón³⁶. En ésta, aunque las bóvedas de los tramos de la nave son de crucería, el bloque de la única nave y de las capillas laterales forman un perfecto cuadrado, síntoma del uso intencionado de una proporción no precisamente goticista. Este bloque lo descomponen a los pies un coro rectangular, que servía de acceso al patio, dependencias del colegio y en su parte superior hacia la tribuna, y en la cabecera a la capilla mayor más estrecha. Se observa pues que los maestros locales idearon un planimetría personal pero, al mismo tiempo, acorde con los requisitos esenciales del "*modo nostro*"³⁷.

En otra de las obras contemporáneas, la iglesia de San Carlos de Zaragoza, figura 8, que se comenzó en 1559, los trabajos de construcción se prolongaron hasta 1853. En esta iglesia, el perfil fundamental era el de una amplia nave única, dividida en cinco breves tramos, sin crucero, que desemboca en un ábside poligonal, con capillas laterales que se ocultan entre los contrafuertes sobre los que cargan las bóvedas de crucería. Este perfil se corresponde con el de templo goticista mediterráneo, el cuál no repugnaba ni mucho menos al esquema de nave única preferido por los jesuitas como el más conveniente para su ministerios³⁸.

34 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 38.

35 Ibid. pp 60.

36 Referencias tomadas de JIMÉNEZ GODOY, I. G. Consejería de Cultura, Educación y Turismo , 1988. *Murcia. Guía Artística.*

37 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 61.

38 Ibid. pp 62-63.

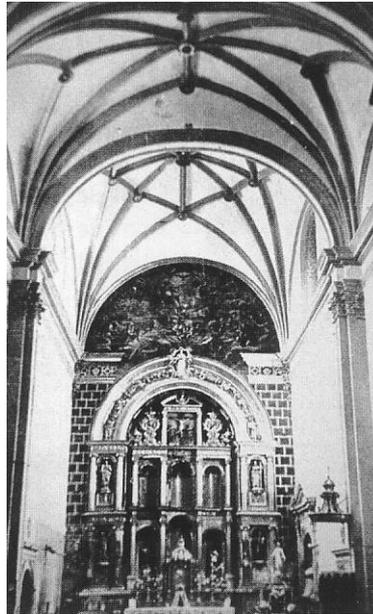


Figura 7. Interior del Colegio de San Esteban de Murcia, de Jerónimo Quijano³⁹.

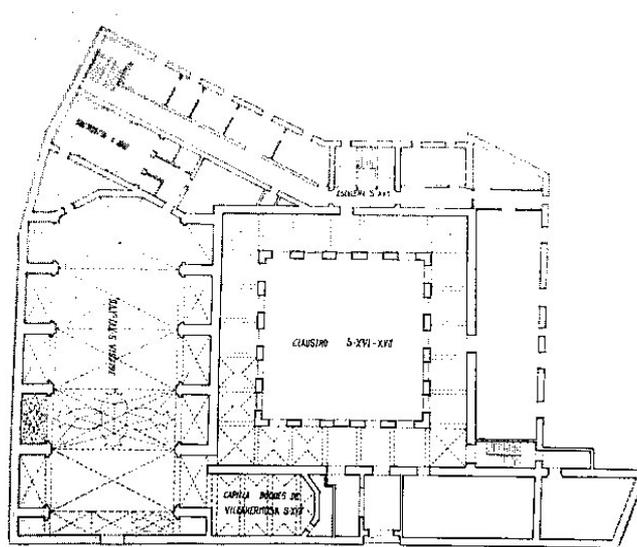


Figura 8. Planta del Colegio de Zaragoza⁴⁰.

Por otro lado, el Colegio de Montesión de Palma de Mallorca, la cuál se muestra en la figura 9, no incluía ninguna novedad de diseño con respecto a las anteriores. Este colegio fue erigido en 1561, pero hasta diez años después no comenzó la construcción del templo, inaugurándose en 1617. Presentaba única y amplia nave con capillas entre los contrafuertes, que era una estructura habitual gótico mediterráneo⁴¹. Así mismo, con una planta semejante a las de Zaragoza y Palma de

39 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 60. Se observa la distribución de nave única cubierta con bóvedas de crucería y capillas laterales.

40 Ibid. pp 62. Dibujo de C.Pernán y J. Fernández de Heredia. Se observa la distribución de nave única cubierta con bóvedas de crucería y capillas laterales.

41 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 65.

Mallorca, la Iglesia de la Casa Profesa de Valencia, figura 10, comenzada en 1595, tuvo la peculiaridad de incorporar una capilla de comunión, sintomática de la región valenciana, que actualmente no existe pues fue demolida en 1868⁴².



Figura 9. Interior de la Iglesia del Colegio de Montesión de Palma de Mallorca⁴³.

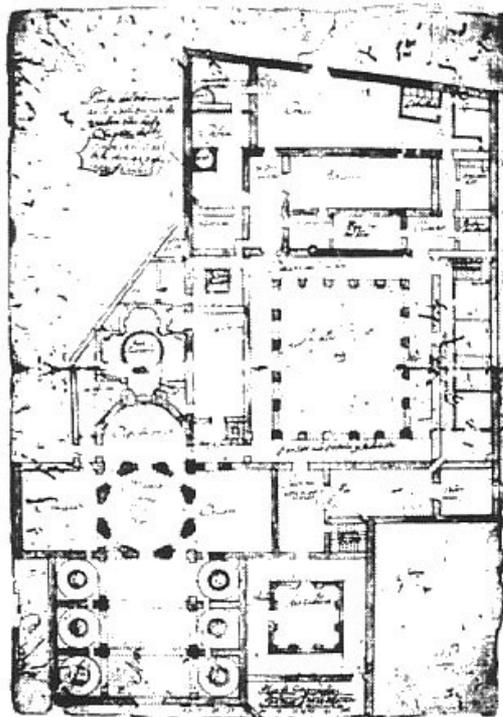


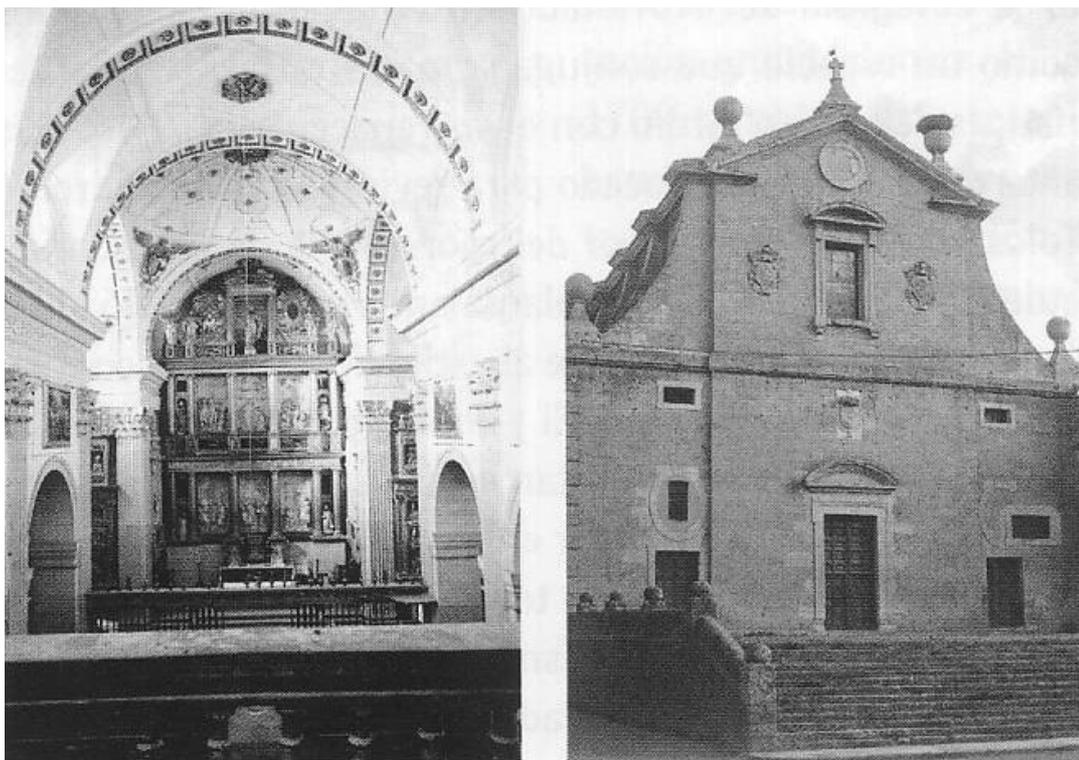
Figura 10. Planta de la iglesia de la Casa Profesa de Valencia⁴⁴.

42 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 66.

43 Imágen tomada de internet. Se observa la distribución de nave única cubierta con bóvedas de crucería y capillas laterales.

44 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 66. Copia dibujada por Antonio Forcada. Archivo de Santa Fe, República Argentina. Se observa una distribución con una única nave principal y capillas laterales, que encajan en una planta cuadrada y no rectangular, tal y como era habitual.

En 1572 el gran maestro castellano Rodrigo Gil proyectó la Colegiata del Noviciado de Villagarcía de Campos, figuras 11 y 12, como un espacio que conjugaba magistralmente características del gótico tardío con otras renacentistas. Pero tres años después fue convocado para revisar la traza Pedro de Tolosa, antiguo aparejador del monasterio de El Escorial, quien, aún conservando la planta anterior, remodeló el alzado y los espacios conforme al estilo del clasicismo vitrubiano de Juan de Herrera. El templo se concluyó en 1580 y los jesuitas se mostraron tan entusiasmados que lo convirtieron en modelo a seguir en otras iglesias de la provincia de Castilla. Cumplía con todos los requisitos fundacionales apetecibles y, al mismo tiempo, su plasmación artística era de una equilibrada y serena belleza que emanaba de la traducción descarnada y esencialista que Herrera había hecho del clasicismo de la antigüedad. Esta belleza no repugnaba a la austeridad, pues no era declamatoria, y se presta a la repetición tipológica. Su influjo se dejó sentir hasta bien entrado el siglo XVII en las iglesias de la Casa Profesa de Valladolid y de los colegios de Palencia, Segovia y Santander, Oviedo, Bilbao y Monforte de Lemos. Por otro lado en la escuela de Villagarcía se formaron los grandes maestros de obras jesuitas de la provincia de Castilla, Juan de Tolosa, Andrés Ruiz, Pedro del Hierro, Juan de Bustamante⁴⁵.



Figuras 11 y 12. Interior y fachada de la Colegiata del Noviciado de Villagarcía de Campos, Valladolid.

45 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 67.

El colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos, figura 13, situado en Lugo, fundado por el cardenal Rodrigo de Castro Osorio, fue proyectado con la iglesia en el centro con dos cuerpos de edificio a los lados, por Veremondo Resta, arquitecto del cardenal, y el hermano Andrés Ruiz. Su construcción se prolongó hasta muy entrado el siglo XVIII y no llegó a rematarse del todo. Intervinieron en ella maestros acreditados como el mencionado Andrés Ruiz, Juan de Tolosa y Simón de Monasterio. La monumental iglesia fue un calco en grande de la colegiata de Villagarcía de Campos, pero con variantes tan significativas como la inserción sobre el crucero de una cúpula de piedra sostenida por tambor, síntoma del nuevo rumbo que tomaba la arquitectura jesuítica hacia soluciones más costosas y grandilocuentes⁴⁶.



Figura 13. Colegio de Nuestra Señora de Monforte de Lemos, Lugo⁴⁷.

En cuanto a las iglesias quinientistas de la provincia jesuítica de Andalucía, tanto P. Villalpando como el hermano Valeriano apelaron con frecuencia a la autoridad de Juan de Herrera, pero los maestros regionales, apoyados por los superiores locales, acabaron por imponer un gusto más florido y delicado⁴⁸.

Como arquetipo de los templos jesuíticos andaluces, se debe considerar el del Colegio de Santa Catalina de Córdoba, que fue la primera fundación andaluza tras el intento fallido de la de Sevilla,

46 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 68-69.

47 Imágen tomada de Wikipedia. Sobre el conjunto resalta la cúpula sobre tambor.

48 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 69.

cuyo primer rector fue el P. Antonio de Córdoba⁴⁹, cuya familia ayudó a la entrada de los jesuitas en la nueva Provincia, siendo éste la puerta de entrada de la Compañía en las tierras andaluzas⁵⁰. Este colegio planeado en 1564 por el P. Bartolomé de Bustamante, conservó el perfil primitivo de la iglesia llamada de cajón, es decir, un espacio cúbico lo más simple posible, sin capillas laterales y cubierto por bóvedas vaídas o esféricas. Este prototipo cuajó de manera más convincente, tanto como espacio útil a los ministerios de la Compañía, como forma estética en la iglesia de la Casa Profesa de Sevilla, figura 14, comenzada el mismo año que la de Córdoba y trazada así mismo por el P. Bustamante⁵¹.

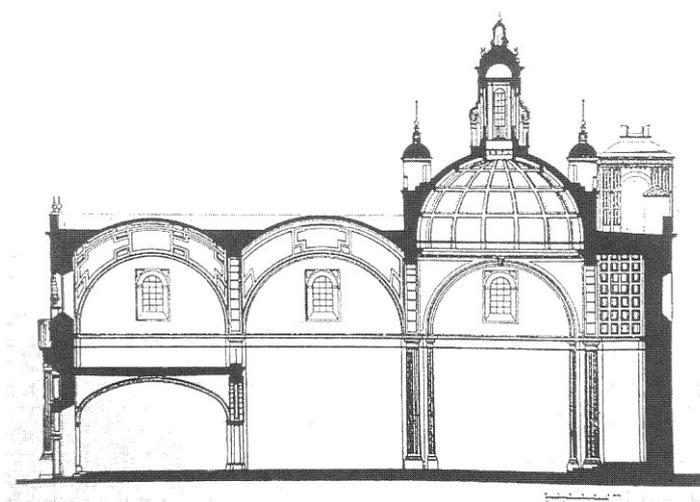


Figura 14. Croquis de la Iglesia de la Casa Profesa de Sevilla⁵².

En el punto nos encontramos, debemos introducir en esta cronología la iglesia objetivo de este trabajo, el conjunto arquitectónico la Iglesia de los Santos Justo y Pastor, antigua iglesia perteneciente al Colegio de San Pablo de la compañía de Jesús, en el que la geometría de su cúpula presenta especial interés, puesto que su trazado es único dentro de la ciudad de Granada. El conjunto jesuítico en el cuál se encuentra ahora esta iglesia, tuvo como espacio escogido para la construcción de la fábrica jesuita el barrio de San Jerónimo⁵³, cuando en 1523, el emperador Carlos V concede a la duquesa de Sessa, María de Manrique, la capilla mayor del templo para enterramiento de su marido. Este hecho produce que la duquesa se traslade a esta zona, generando

49 SOTO ARTUÑEDO, WENCESLAO (2003). "*La fundación del Colegio de San Sebastián. Primera institución de los Jesuitas en Málaga*". Málaga. Pp 49

50 Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 22.

51 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 69-72.

52 *Ibid.* pp 73. Dibujo de José Fagundo.

53 Véase Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005.

así un nuevo ambiente aristocrático, conocido como el barrio de la duquesa, lo que propicia un vuelco del centro de gravedad de la ciudad, al desplazarse hacia la parroquia de los Santos Justo y Pastor. El proceso constructivo del Colegio de los Jesuitas fue iniciado en 1554 y culminará en el año 1719 con la terminación de la torre.

El nacimiento de esta iglesia tiene origen en el siglo XVI, cuando el día 26 de marzo de 1575 se coloca la primera piedra a manos del Arzobispo Pedro Guerrero, a partir del cuál se inicia la construcción por parte de los jesuitas del nuevo templo bajo la advocación del apóstol San Pablo, del que procede el nombre original de este conjunto, así como el de la iglesia, conocida como Iglesia de San Pablo.

Tras la supresión en 1767 de la orden de la Compañía de Jesús, la Iglesia de San Pablo quedaría cerrada durante cuatro años hasta que se trasladó a ella la colegiata de El Salvador, que se mantuvo en esta sede hasta mayo de 1799, año en el que la antigua parroquia de San Justo y Pastor, situada en la frontera plaza de la Encarnación, fue trasladada a esta nueva ubicación, momento en el que la hasta entonces conocida como la Iglesia de la Conversión de San Pablo pase a llamarse la parroquia de los Santos Justos y Pastor, figura 15.



Figura 15. Fotografía aérea del conjunto de la Iglesia de los Santos Justos y Pastor⁵⁴.

⁵⁴ Fotografía obtenida desde la aplicación Bing Maps.

Remitiéndonos al conjunto edilicio donde actualmente se ubica la Iglesia de los Santos Justo y Pastor, el Colegio de San Pablo de Granada, uno de los más antiguos con los que contaron los jesuitas en Andalucía, existe una amplia bibliografía que ha sido oportunamente recogida y analizada en el texto de Rodríguez y Gutiérrez de Ceballos, tantas veces mencionado. Gracias a la misma se sabe que Bartolomé de Bustamante⁵⁵ diseñó el primitivo pabellón para la vivienda y las aulas, que fueron terminadas en 1562 y que en el proyecto se incluía una iglesia con planta de cruz latina y sin capillas. Las obras de la iglesia fueron las primeras de envergadura que se acometieron, iniciándose según algunos investigadores en 1574⁵⁶, y otros que el 26 de marzo de 1575 se pondría la primera piedra⁵⁷, a pesar de que el libro de fábrica señala como principio de las obras el 7 de agosto⁵⁸. No obstante, se conservan unos documentos por los cuales se marca como fecha de inicio de las obras la de 1574⁵⁹.

En cuanto a la iglesia, iniciada como se ha descrito en 1574, aunque el P. Bustamante proporcionó una traza parecida a las anteriores, se prefirió finalmente no el tipo de cajón cúbico sin capillas, sino el de nave única bordeada de capillas laterales, crucero con cúpula y capilla mayor rectangular, es decir una tipología más común y convencional que seguramente le fue sugerida por Lázaro de Velasco⁶⁰, maestro de obras a la sazón de la catedral de granadina, y por el encargado de edificar el templo, el hermano Martín de Baseta⁶¹, que fueron los precursores de que se incorporaban tres capillas a cada lado de la nave. Durante el desarrollo de las obras se produjo la visita de inspección de Valeriani⁶², quien mostró su disconformidad con ciertos aspectos constructivos, diseñando su propio proyecto, el cual "*reproduciría la forma más usual de las iglesias primales de Andalucía*⁶³", es decir, con una nave crucero a la que añadía un nártex o pórtico previo de arcos sobre columnas, además de desaparecer las capillas laterales, correcciones que fueron posteriormente desestimadas. Es también conocido que gracias a la donación del alguacil

55 Véase LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). *Las parroquias de la diócesis de Granada (1501-2001)*. Granada: Arzobispado de Granada ; CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005.

56 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "*La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento*", (1560/1650), Granada, pp 194.

57 A.C., TEMPORALIDADES- GRANADA. Madrid. 1775M abril, 16. *Historia del Colegio de Granada*.

58 RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ DE CEBALLOS, ALFONSO. "*Bartolomé de Bustamante y los orígenes de la arquitectura jesuítica en España*", pp 165.

59 Véase Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 94, primer párrafo.

60 Con un cargo de supervisor y tracista según LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). "*Las parroquias de la diócesis de Granada (1501-2001)*". Granada: Arzobispado de Granada .

61 A cuyo cargo corrió el inicio de las obras y después su continuación hasta terminar la nave en 1589 según LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). "*Las parroquias de la diócesis de Granada*", (1501-2001). Granada: Arzobispado de Granada .

62 Véase LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). "*Las parroquias de la diócesis de Granada*", (1501-2001). Granada: Arzobispado de Granada .

63 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "*La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento*", (1560/1650), Granada, pp 194.

de la Chancillería granadina, Don Bartolomé Veneroso, se pudo fabricar la capilla mayor y el crucero, en donde el hermano Pedro Sánchez levantó una potente cúpula con tambor y linterna, figura 16, a imitación de la existente en la basílica del monasterio de El Escorial, obras que se inauguraron en 1622⁶⁴.



Figura 16. Imagen exterior de la cúpula tomada desde edificación del entorno (Elaboración propia).

La silueta exterior del Templo, de notables proporciones, resulta más hermosa aún por esta gran cúpula hemiesférica, rematada por crestería de balastrada con jarrones y con dieciséis imponentes costillas que recorren la cúpula desde su anillo superior hasta conectar con la crestería de balastrada. Todas estas líneas, de corte clásico, contrastan con la débil gracia de un campanario barroco, agregado en el S. XVIII y que levantó muchas protestas entre los críticos más clasicistas. Pedro Sánchez recibe el mandato del Rector del Colegio, P. Hernando Ponce, de que copia la cúpula de San Lorenzo del Escorial⁶⁵, siendo la primera en Granada una de las primeras en su tipología y una de las pocas que no se cubrieron con un cimborrio⁶⁶. La cúpula conserva al exterior la forma esférica y su cuerpo de luces está adornado con arcos y columnas dóricas⁶⁷. Según Gómez

64 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas" , 2002, pp 72-75.

65 Referencias tomadas de la Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 98.

66 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento", (1560/1650), Granada, pp 195.

67 GÓMEZ MORENO, MANUEL (1982). "Guía de Granada". Archivo de la Diputación de Granada.

Moreno, Pedro Sánchez, al que se atribuye el trazado de esta cúpula, se inspiró seguramente en la del Escorial, debido al grandísimo parecido entre ambas.

No solamente Gómez Moreno llega a esta conclusión, sino que la mayoría de los autores coinciden en esta idea. De este modo, en la guía de arquitectura de Granada⁶⁸ se cita textualmente "...*La iglesia aparece dominada en su volumen externo por la cúpula, sobre un alto tambor articulado con columnas toscanas y arcos de medio punto. Sigue el modelo de El Escorial, actuando el conjunto como un basamento de la airosa cúpula...*". En la Tesis de Miguel Córdoba Salmerón sobre el Colegio de los Jesuitas⁶⁹ cita "...*hasta 1639. Será en este momento cuando se decide que el cierre del crucero sea una suntuosa cúpula, diseñada por Pedro Sánchez, quien recibe el mando del Rector del Colegio, P. Hernando Ponce, que copie la cúpula de San Lorenzo del Escorial siendo la primera en Granada en su tipología y una de las pocas que no se cubrieron con cimborrio...*". En el libro de las Parroquias de la Diócesis de Granada⁷⁰ se encuentra la siguiente descripción "...*En una segunda etapa se hizo la capilla mayor; [...] y la cúpula sobre el crucero, inspirada en la del Escorial, diseñada por el hermano Pedro Sánchez...*".

La decoración escultórica de dicha cúpula, la cuál se observa en la figura 17, fue realizada por Alonso de Mena⁷¹, correspondiendo la pintura y dorado de las pechinas y anillo a Bartolomé de Praxis⁷², mientras las representaciones de los padres de la Iglesia latina y griega y la decoración de los gallones de la cúpula y la linterna fueron pintadas por el hermano Andrés Cortés⁷³. Consta que en 1719 se terminó la torre, según diseño de José de Bada y Navajas.

La portada principal de mármoles se edificó entre 1739 y 1740 con trazas del hermano Francisco Gómez⁷⁴, que era arquitecto, pero además, el profesor Gómez Moreno Calera apunta que la traza fue dada por Alfonso Castillo⁷⁵. La escultura del remate de San Ignacio es de Agustín José de Vera, discípulo de Torcuato Ruiz del Peral⁷⁶.

68 MARTÍN MARTÍN, EDUARDO; TORIECES ABARCA, NICOLÁS; ANDALUCÍA, CONSEJERÍA DE TRANSPORTES Y OBRAS PÚBLICAS (1998). "*Guía de Arquitectura de Granada*". Delegación de Granada, COA de Andalucía Oriental, serie 3. pp 212.

69 Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 98.

70 Veáse LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). "*Las parroquias de la diócesis de Granada*", (1501-2001). Granada: Arzobispado de Granada .

71 Referencia tomada de la Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 159.

72 *Ibid.* pp 159.

73 *Ibid.* pp 162.

74 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*" , 2002, pp 75.

75 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "*La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento*", (1560/1650), Granada, pp 197.

76 RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ DE CEBALLOS, ALFONSO. "*Bartolomé de Bustamante y los orígenes de la arquitectura jesuítica en España*", pp 182.



Figura 17. Perspectiva interior cúpula (Elaboración propia).

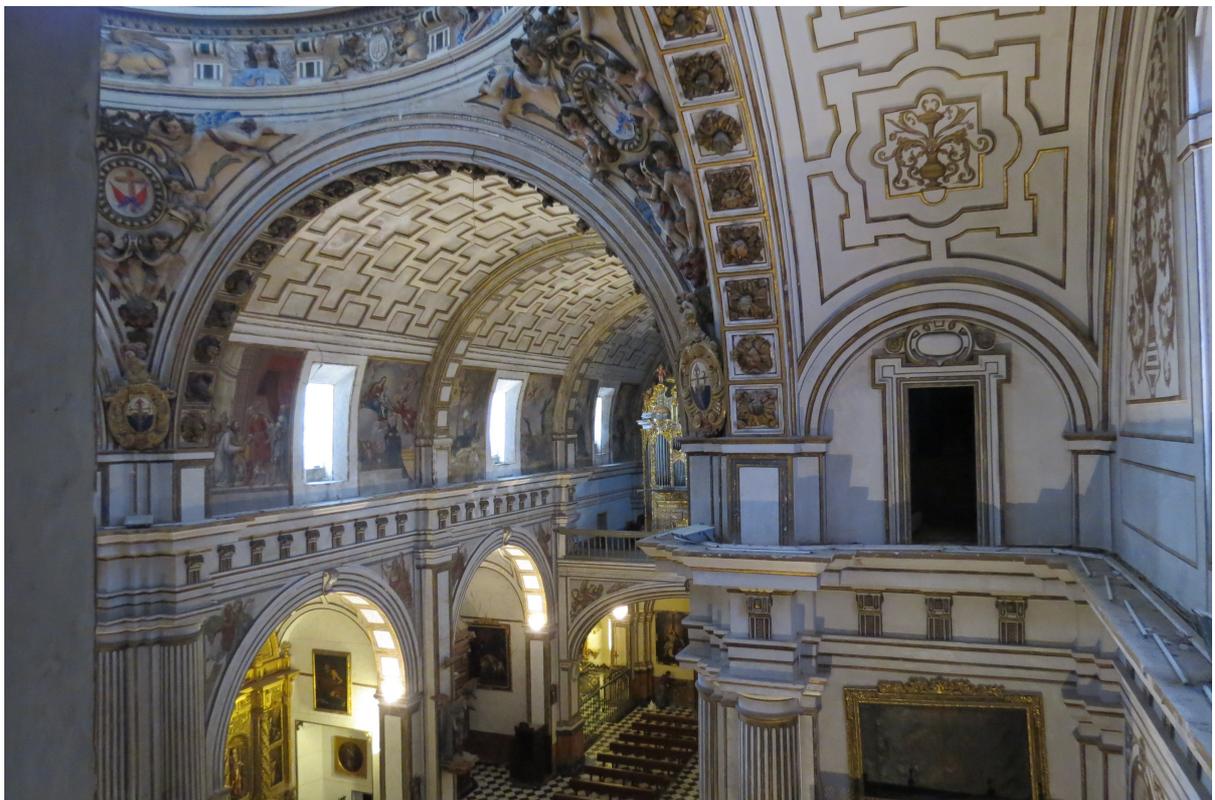


Figura 18. Fotografía interior tomada desde el nivel de la cornisa superior (Elaboración propia).



Figura 19. Interior de la Iglesia del Colegio de Granada, de Bartolomé Bustamante y Martín de Baseta⁷⁷.

Durante el Quinientos lo que singularizó a las iglesias jesuíticas fue la construcción de la gran sala congregacional bordeada o no de capillas, sin que se diese mayor importancia al sistema de cubrición, que se centraba en el sistema de crucería, bóveda de cañón, bóveda vaída o techumbre de madera. En el transepto, cuando lo había, se levantaba un casquete semiesférico y muy rara vez, una cúpula con tambor, calota y linterna. Esta tipología primordial comenzó a variarse durante el siglo XVII, aunque sin novedades radicales, puesto que la arquitectura de la Compañía se mantuvo anclada en la tradición vernácula de muros rectilíneos y espacios inertes, y si se pudiera clasificar de barroca, fue porque se desfogó por los caminos de las virguerías canteriles y esterotómicas o por el desbordamiento decorativo de las yeserías estucos, altares y retablos que tapizaban paredes y bóvedas⁷⁸.

A partir del siglo XVII, la única novedad desde el punto de vista del espacio fue el uso de plantas circulares y ovaladas que en el período anterior no se había puesto nunca en práctica. Ello no iba en contra del *nostro modo*, siempre y cuando se supieran orientar hacia el altar mayor, pues podían acomodar muy bien a los fieles que acudían a los cultos, con la ventaja de aproximarles mejor al área del púlpito y de la capilla mayor, y además resultaban más recogidas para escuchar la

77 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas" , 2002, pp 74.

78 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas" , 2002, pp 76.

predicación , aunque esta morfología no fue de las más usadas por los jesuitas⁷⁹. Los dos templos de planta centralizada más importantes fueron los del Noviciado de Loyola y del Noviciado de Sevilla, figuras 20 y 21 respectivamente.

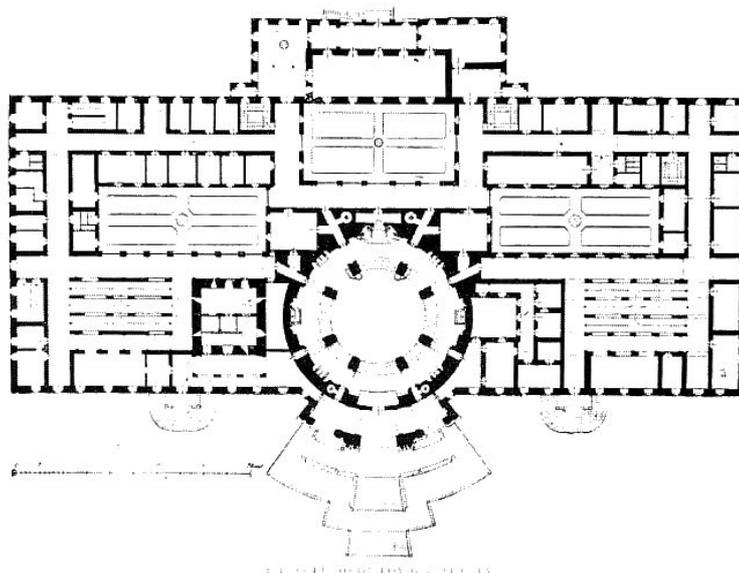


Figura 20. Planta del Santuario de Loyola, Guipuzcoa⁸⁰.

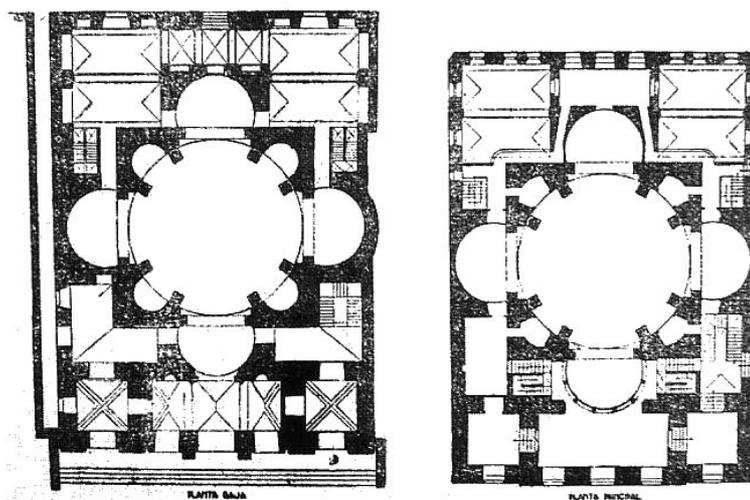


Figura 21. Planta de la Iglesia del Noviciado de San Luis, Sevilla⁸¹.

Otros de los estilos arquitectónicos que surgieron a partir del siglo XVII fueron las iglesias de tres naves, que al igual que las de planta centralizada, fueron excepcionales entre los jesuitas españoles, donde se dio con relativa poca frecuencia. Un ejemplo de esta tipología lo constituye la Iglesia del Colegio de la Coruña, figura 22. Aunque no se considerasen ajenas a la práctica de la

79 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 76-77.

80 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 80. Dibujo de O. Schubert. Compromiso estético de construcción asumido por el P. Giovanni Paolo Oliva.

81 *Ibid.* pp 80. Dibujo moderno. Traza arquitectónica atribuida a Leonardo de Figueroa.

Compañía, las naves laterales suponían, en opinión de muchos, una superfluidad que obstaculizaba el culto. Eran espacios muertos donde el público no veía bien lo que se realizaba en el altar mayor y percibía con poca nitidez las palabras del predicador. Las procesiones litúrgicas para las que servía no eran propias de los jesuitas que practicaban una liturgia simplificada distinta de la de los órdenes monásticos. Por ello, en la Compañía vino a preferirse la nave única bordeada de capillas laterales con pasadizos que las comunicaban entre sí, utilizadas para la celebración de las misas privadas y para la colocación discreta de los confesionarios.

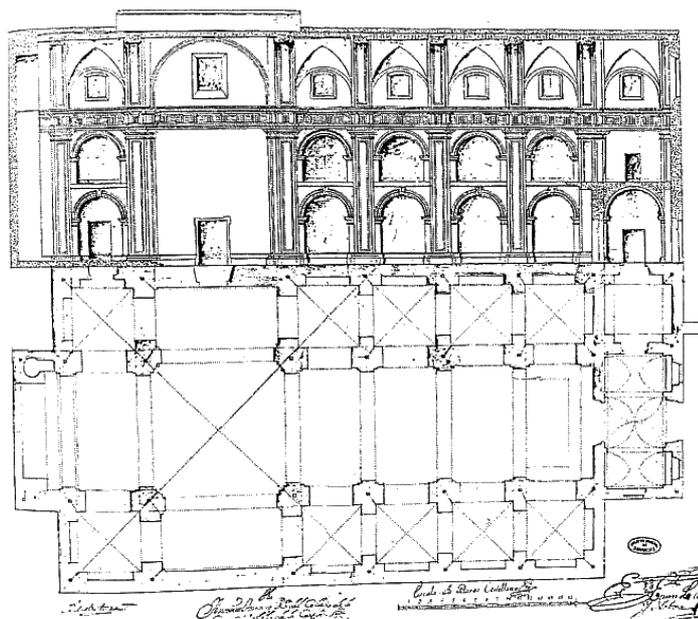


Figura 22. Iglesia del Colegio de la Coruña, Valladolid.

A pesar de todo, las iglesias de una nave con capillas fueron las grandes fundaciones y edificios más culminantes del siglo XVII, tanto por su calidad artística y monumental, como por haber estado situadas en ciudades tan importantes como Madrid y Barcelona, o en centros de sobrado prestigio histórico como Toledo, Salamanca o Alcalá de Henares, donde el gran número de estudiantes presuponía el levantamiento de edificios muy complejos y costosos⁸².

En Madrid se introdujeron tempranamente, construyendo primero una simple residencia de operarios con una modesta iglesia que delineó el P. Bartolomé de Bustamante en 1567. La construcción de la Iglesia del Colegio Imperial de Madrid, figura 23, se demoró hasta 1622, cuyo proyecto fue diseñado por el hermano Pedro Sánchez, traído para este efecto desde Andalucía por el Conde Duque de Olivares. Pedro Sánchez levantó el templo desde los cimientos hasta la cornisa de las bóvedas, teniéndosele que atribuir la planta de única y ancha nave bordeada de capillas, así

82 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas" , 2002, pp 95-96.

como el alzado, de personal y curiosa articulación de muros y vanos. Fallecido en 1633, le sustituyó en la obra el hermano Francisco Bautista, que concluyó la fábrica en 1651. La Iglesia se inauguró con asistencia de Felipe IV, introduciendo importantes y significativas mejoras, tal como el peculiar orden arquitectónico propio que afectaba a los capiteles de las pilastras, al entablamento y cornisa, y una esbelta cúpula sobre el crucero realizada sobre un armazón de madera recubierto de ladrillo enfoscado⁸³.

El corte transversal de la Iglesia del Colegio Imperial de Madrid, figura 23, tiene una importante trascendencia en las hipótesis adoptadas en este trabajo sobre la traza de la cúpula de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor, pues se observa una composición transversal idéntica entre la iglesia de Madrid y la del Monasterio de El Escorial, figura 24, las cuáles estaban ligadas de un modo indirecto por mismo tracista, Pedro Sánchez, que se encargó, como ya se ha indicado, del diseño del Colegio Imperial de Madrid y de la cúpula del Colegio de San Pablo, que tuvo influencia directa de Juan de Herrera a través de su tutor, el P. Villalpando, del cuál aprendería la leyes geométricas herrerianas. Se han comparado las secciones de El Escorial de Juan de Herrera y la del Colegio Imperial de Madrid, donde se ha encontrado una relación proporcional similar entre la altura de la base de la linterna y el diámetro interior en la base de la cúpula de éstas, figura 25.

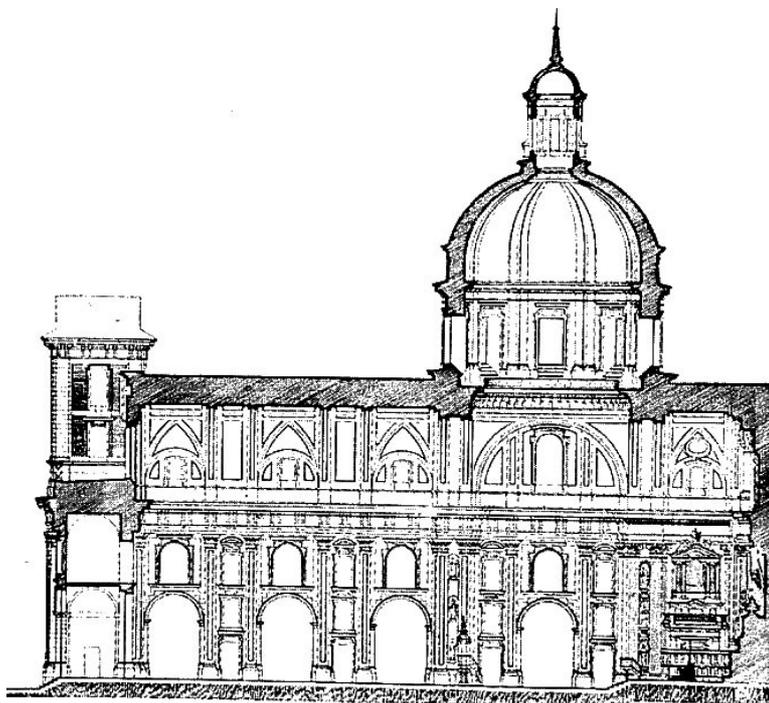


Figura 23. Corte longitudinal de la Antigua Iglesia del Colegio Imperial de Madrid⁸⁴.

83 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 96-100.

84 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 96. Dibujo de O. Schubert.

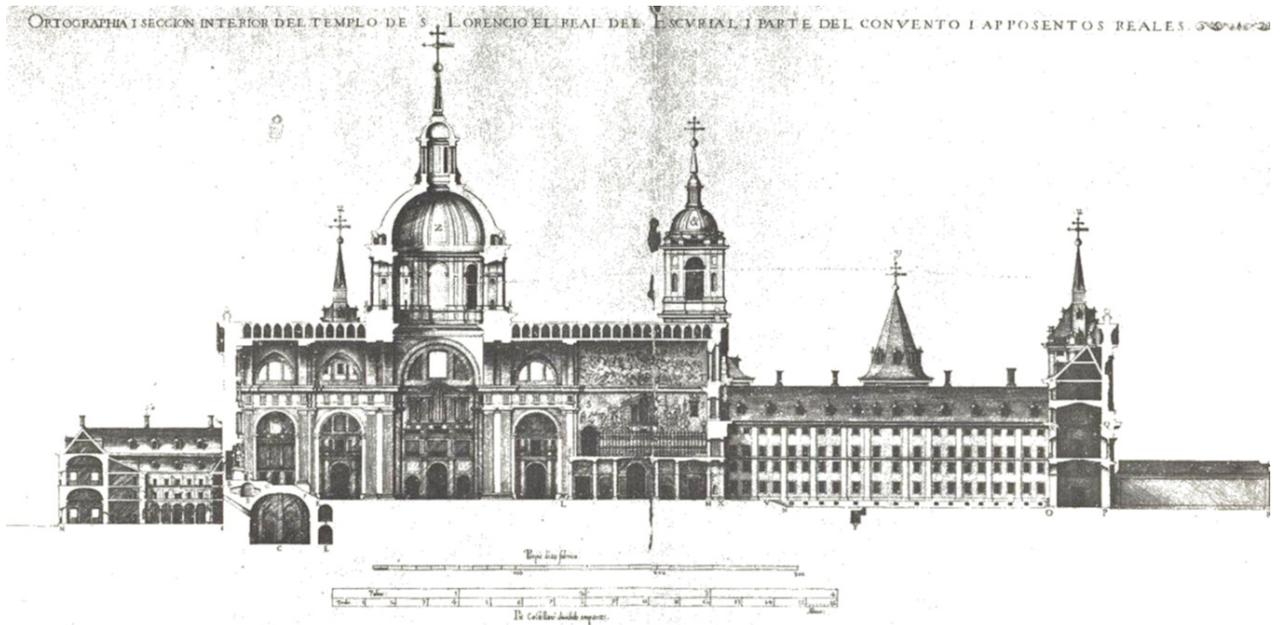


Figura 24. Sección transversal cúpula sobre el crucero del Monasterio de El Escorial⁸⁵.



Figura 25. Relación proporcional entre la altura de la base de la linterna y el diámetro interior en la base de la cúpula entre la Iglesia del Monasterio de El Escorial de Juan de Herrera y la Iglesia del Colegio Imperial de Madrid, en la que intervino Pedro Sánchez (Elaboración propia).

En Madrid se edificaron en el transcurso del siglo XVII otras edificaciones, tales como el Noviciado y la Casa Profesa, que ya no existen. El primero de ellos era un edificio de considerables proporciones situado en la calle San Bernardo. Ofrecieron proyectos para la iglesia y

85 Imagen tomada de CANO DE GARDOQUI GARCÍA, JOSÉ LUIS, 1994. "La construcción del Monasterio de El Escorial: historia de una empresa arquitectónica". Universidad de Valladolid, Facultad de Derecho. Sección este-oeste, por la casa del rey, la basílica y el atrio, plano 5.

edificio arquitectos tan reputados como Juan Bautista Montenegro y Fray Alberto de la Madre de Dios, pero finalmente fue preferido el presentado por el hermano Pedro Sánchez. La iglesia se comenzó en 1632 y se inauguró en 1665⁸⁶.

Por otro lado, la Casa Profesa de Toledo, figura 26, que tuvo entre otros moradores ilustres a los padres de Juan de Mariana, Luis de la Palma y Juan Martínez de Ripalda, fue así mismo uno de los conjuntos de mayor empaque monumental construida por la Compañía en el Seiscientos. La traza de la iglesia se debió nuevamente a Pedro Sánchez, prolongándose la construcción por muchos años. En 1718 se consagró el cuerpo de la iglesia con el crucero y la cúpula, habiendo pasado las obras por manos de muchos maestros, si bien el que dejó una huella más profunda fue el hermano Francisco Bautista⁸⁷.

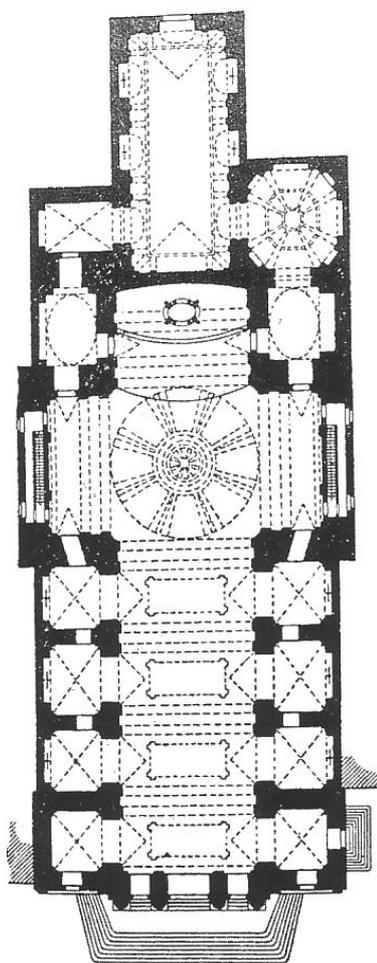


Figura 26. Planta de la Iglesia de la Casa Profesa de Toledo⁸⁸.

86 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 100-103.

87 *Ibid.* pp 109-110.

88 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "*La arquitectura de los Jesuitas*", 2002, pp 104. Se observa la composición de nave única principal con capillas laterales interconectadas mediante pasadizos, crucero coronado con cúpula y sacristía al otro lado de la cabecera.

La Iglesia de los jesuitas de Toledo fue edificada a imitación de la del Colegio Máximo de Alcalá de Henares, figura 27, por voluntad expresa de los fundadores. Esta última institución sirvió de alguna manera de arquetipo de las que luego fueron surgiendo en la provincia jesuítica de Toledo⁸⁹. Así mismo, el Colegio Real del Espíritu Santo en Salamanca fue sin lugar a dudas el edificio más vasto e imponente que levantó la Compañía en España durante el antiguo régimen, tal y como se observa en la figura 28.

Las fundaciones y edificaciones de nueva planta cesaron prácticamente durante el siglo XVIII, arraigada suficientemente e instalada la Compañía en España en los siglos antecedentes. Los jesuitas se dedicaron entonces a ampliar y consolidar sus construcciones y, sobre todo, a ornamentar y enriquecer sus iglesias y capillas en un proceso de barroquización.

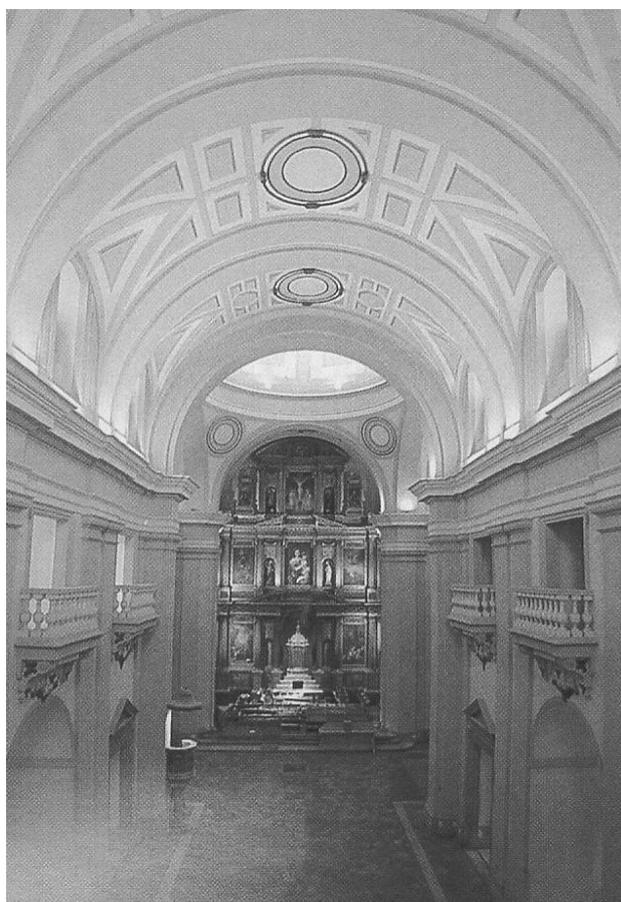


Figura 27. Interior de la Iglesia del Antiguo Colegio Máximo, Alcalá de Henares⁹⁰.



Figura 28. Interior de la Iglesia del Antiguo Colegio de Cáceres⁹¹.

89 Referencias tomadas de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas", 2002, pp 110.

90 Imágen tomada de RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, "La arquitectura de los Jesuitas", 2002, pp 108. Se observan los principios de austeridad, equilibrio y sencillez característicos del *modo nostro*. Los autores de esta obra son el hermano Bartolomé de Bustamante y el hermano Francisco de Mora.

91 *Ibid.* pp 108. Los principios de austeridad, equilibrio y sencillez característicos del *modo nostro*, muestran toda la herencia del clasicismo de Juan de Herrera. El autor fue el arquitecto real Juan Gómez de Mora.

CAPÍTULO 2

2. TRAZA DEL TEMPLO.

2.1 Documentación de archivo y bibliográfica.

Debido a la expulsión de los jesuitas en el año 1767, la mayor parte de documentos existentes sobre la compañía han desaparecido, bien porque fueron destruidos o porque fueron trasladados a ubicaciones desconocidas. Esto, añadido al escaso interés que existía en Roma sobre los problemas morfológicos y de estilo, y a la creciente prioridad por el orden funcional y utilitario de las nuevas construcciones que se podían revisar mediante planimetría de plantas, ha conllevado a que la información adquirida como ayuda o referencia para conseguir desvelar la geometría de la cúpula haya sido muy escasa, limitándose a las dos plantas del conjunto completo del Colegio de San Pablo, figuras 29 y 30, que se muestran a continuación, las cuales se encuentran en el Archivo Histórico Nacional de Madrid, y datan del año 1579, de las que se desconoce la autoría, y que han servido de referencia inicial para obtener las dimensiones del conjunto.

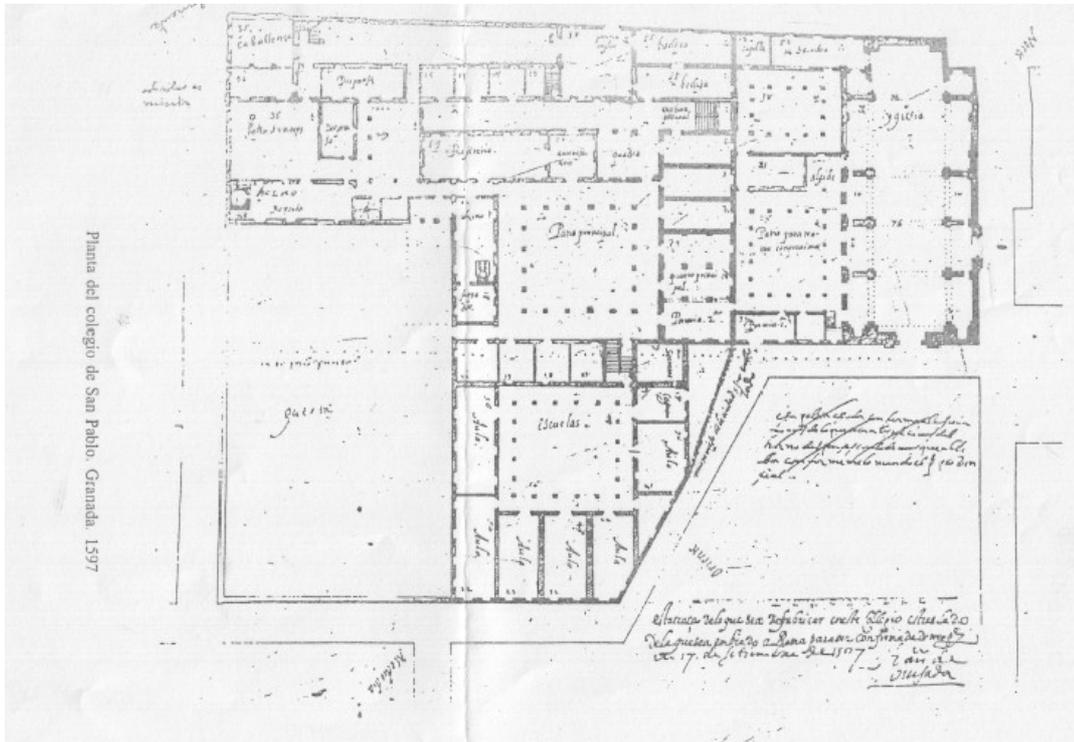


Figura 29. Planta baja conjunto San Pablo, 1579⁹².



Figura 30. Planta superior conjunto San Pablo, 1579⁹³.

92 Imágen tomada de OLIVARES D'ANGELO, ESTANISLAO: "Historia del Colegio de San Pablo, Granada, 1554-1765", Archivo Histórico Nacional, Madrid, Manuscrito Jesuitas, Libro 773. Transcripción de Joaquín de Béthencourt, revisión y notas de Estanislao Olivares.

93 Ibid.

Dada la escasez de información gráfica sobre la geometría real del conjunto, se ha recurrido a la búsqueda de posibles intervenciones posteriores de rehabilitación, en las que pudieran estudiarse sus dimensiones. De este modo, se ha encontrado una intervención realizada en el año 1981, por el arquitecto D. José Antonio Llopis Solbes, figura 31, en la que se procedió a reparar un problema de infiltración de humedad en la cúpula. Esta intervención es el motivo por el que actualmente la cúpula presenta un color negro visible actualmente desde el exterior. Este documento permitió obtener una aproximación más precisa de las dimensiones en planta, pero que aún así no permitía desvelar como era la sección transversal de la cúpula y el tambor.

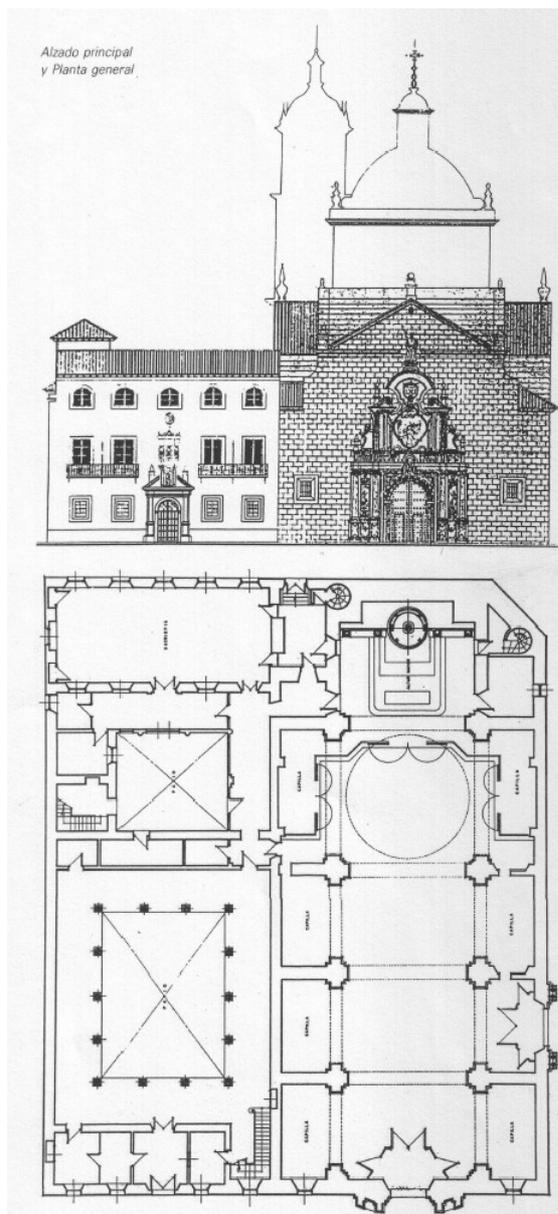


Figura 31. Alzado principal y planta general del proyecto de restauración de 1981⁹⁴.

94 JEREZ MIR, CARLOS. "Guía de Arquitectura de Granada". Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía.

2.2 Primeras hipótesis sobre la traza.

Con las escasas trazas originales encontradas en el fondo antiguo y las medidas recogidas en la visita al templo, resultaba complicado conocer como sería la sección transversal de la cáscara de la cúpula y el tambor. Con el fin de obtener una primera aproximación, se tomó inicialmente como hipótesis que la sección transversal de la iglesia de los Santos Justo y Pastor es la misma que la del monasterio de El Escorial, figura 32.

El fundamento de esta hipótesis radica en la influencia directa de la arquitectura de Juan de Herrera sobre P. Villalpando, el cuál a su vez, fue el maestro de Pedro Sánchez. Esta idea ha si plasmada por diversos autores, tales como Gómez Moreno, que coinciden en la idea de la similitud entre las trazas de las cúpulas. Así mismo, en la guía de arquitectura de Granada⁹⁵ se cita textualmente "*...La iglesia aparece dominada en su volumen externo por la cúpula, sobre un alto tambor articulado con columnas toscanas y arcos de medio punto. Sigue el modelo de El Escorial, actuando el conjunto como un basamento de la airosa cúpula...*". En la Tesis de Miguel Córdoba Salmerón sobre el Colegio de los Jesuitas⁹⁶ cita "*...hasta 1639. Será en este momento cuando se decide que el cierre del crucero sea una suntuosa cúpula, diseñada por Pedro Sánchez, quien recibe el mando del Rector del Colegio, P. Hernando Ponce, que copie la cúpula de San Lorenzo del Escorial siendo la primera en Granada en su tipología y una de las pocas que no se cubrieron con cimborrio...*". En el libro de las Parroquias de la Diócesis de Granada⁹⁷ se encuentra la siguiente descripción "*...En una segunda etapa se hizo la capilla mayor, [...] y la cúpula sobre el crucero, inspirada en la del Escorial, diseñada por el hermano Pedro Sánchez...*".

En consecuencia, un primer acercamiento a la traza del templo muestra que mantiene las mismas relaciones proporcionales que la cúpula del Monasterio de San Lorenzo del Escorial y el Colegio Imperial de Madrid, obra anterior perteneciente también a Pedro Sánchez, que como ya se ha mostrado, presentan un relación proporcional altura y diámetro de la cúpula similar⁹⁸.

Finalmente, tomando como apoyo el plano de planta de José Antonio Llopis Solves en su intervención de restauración del monumento, se consiguió sacar la primera hipótesis sobre la traza, figura 33. Al comparar esta nueva sección transversal con la del Monasterio del Escorial y la del Colegio Imperial de Madrid, se confirma que vuelven a repetirse las relaciones proporcionales altura de la base de la linterna con el diámetro interior de la base cúpula en los tres modelos,

95 MARTÍN MARTÍN, EDUARDO; TORIECES ABARCA, NICOLÁS; ANDALUCÍA, CONSEJERÍA DE TRANSPORTES Y OBRAS PÚBLICAS (1998). "*Guía de Arquitectura de Granada*". Delegación de Granada, COA de Andalucía Oriental, serie 3. pp 212.

96 Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 98.

97 Véase LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). "*Las parroquias de la diócesis de Granada*", (1501-2001). Granada: Arzobispado de Granada .

98 Véase páginas 31 de este documento.

según se muestra en la figura 34.

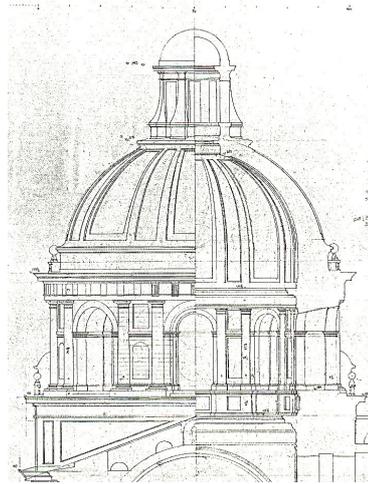


Figura 32. Sección transversal de la cúpula del Monasterio de El Escorial⁹⁹.

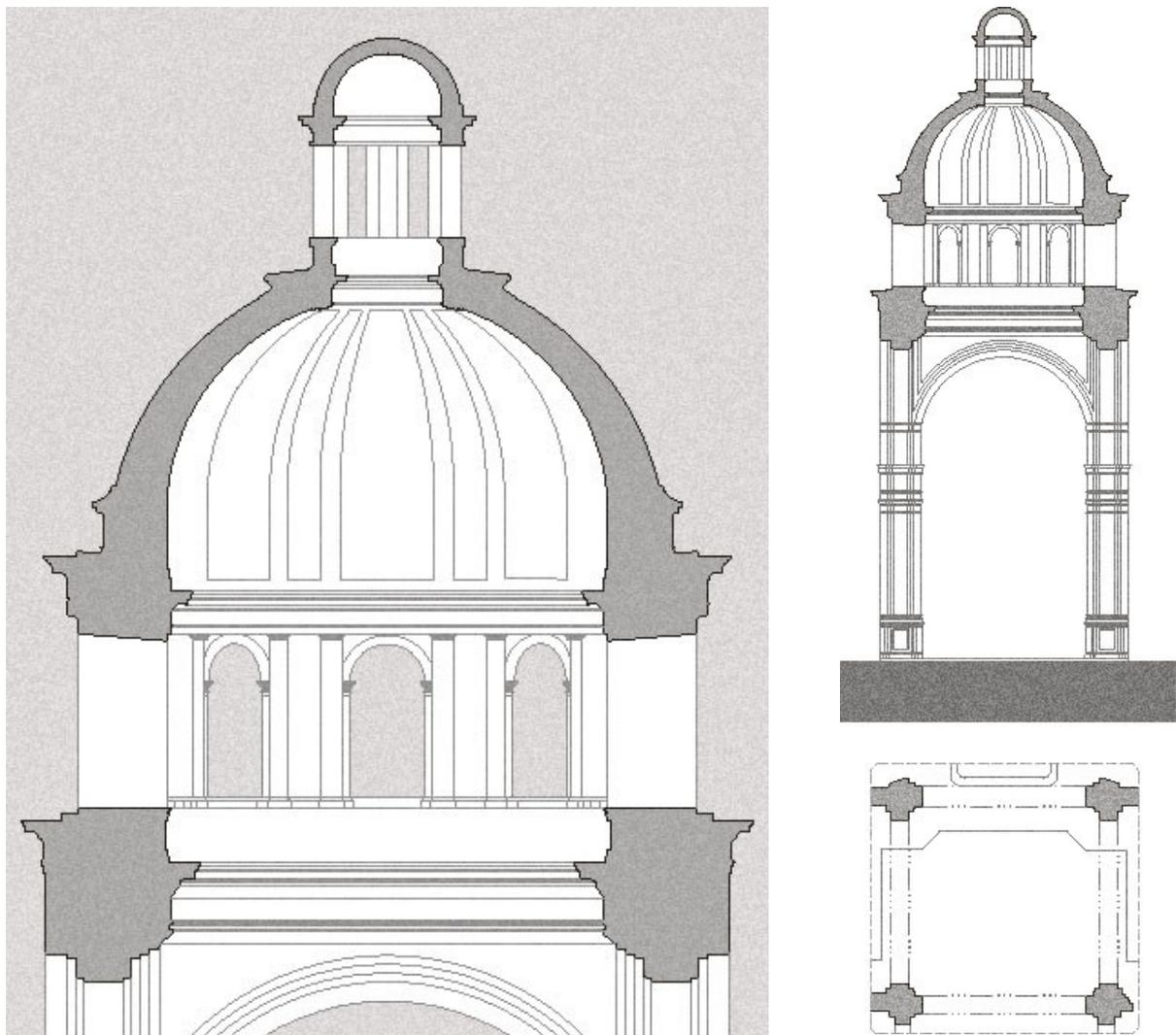


Figura 33. Primera hipótesis sobre la traza de la cúpula y tambor (Elaboración propia).

99 Imágen tomada de CANO DE GARDOQUI GARCÍA, JOSÉ 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, lámina XXXV.

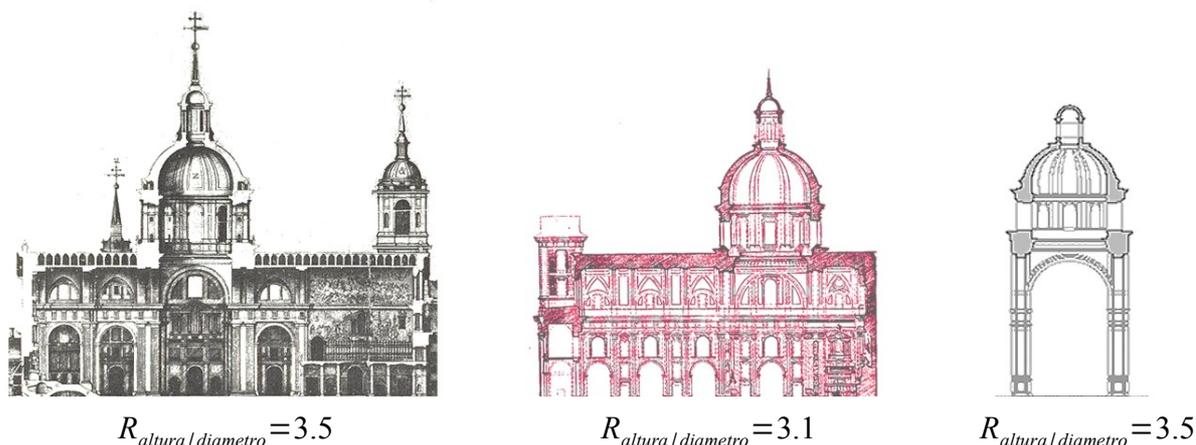


Figura 34. Relación proporcional entre la altura de la base de la linterna y el diámetro interior en la base de la cúpula de la Iglesia del Monasterio de El Escorial de Juan de Herrera, la Iglesia del Colegio Imperial de Madrid, en la que intervino Pedro Sánchez y la primera hipótesis de la traza de la Iglesia de San Justo y Pastor, también de Pedro Sánchez (Elaboración propia).

2.3 Mediciones in situ: cinta métrica y láser.

La Iglesia de San Justo y Pastor fue considerada en 1671 como una de las más "*hermosas y capaces de España*"¹⁰⁰, con una medida "de 159 pies geométricos de largo, y 72 de ancho"¹⁰¹, siendo la primera iglesia en la ciudad de Granada en la que se van a plasmar las ideas contrarreformistas¹⁰², ya que en el resto predominaban ideas gótico-mudéjares o renacimiento-mudéjares¹⁰³.

Según la visita realizada a la iglesia, se observa que presenta una estructura sencilla, con una planta rectangular que encierra en su interior una única nave, cubierta con una bóveda de cañón sin lunetos, peraltada, con arcos fajones que arrancan desde pedestales y decorada con una red de casetones. A la nave central se abren seis ventanas de forma rectangular, así como las capillas laterales, el crucero y la capilla mayor que cuenta con dependencias accesorias adosadas. Observada desde el exterior, tiene una presencia de caja lisa, siendo las fachadas los únicos elementos decorativos junto con la esbelta cúpula, que apoya sobre un tambor cilíndrico formado por arquillos entre columnas dóricas, que remata en una balaustrada con jarrones.

La aparición de las capillas laterales a la nave "*suponía una novedad frente a las anteriores iglesias andaluzas, que se habían realizado con naves sin capillas laterales*"¹⁰⁴, y cuyo objeto era

100 Descripción breve del solemne y festivo culto que dedicó el Colegio de la Compañía de Jesús de Granada a San Francisco de Forja, f. 3r.

101 *Ibíd.*

102 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "*La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento*", (1560/1650), Granada, pp 197.

103 Referencias tomadas de la Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 110.

104 GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL (1989). "*La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento*", (1560/1650), Granada, pp 197.

la posterior venta para financiar la construcción del conjunto¹⁰⁵, permitiendo a su vez la introducción de nuevos usos además del exclusivo uso litúrgico al que estaban acostumbrados los padres de la Compañía de Jesús.

La mayor ambición proyectiva del conjunto se concentra en el crucero, donde se eleva la cúpula, diseñada como ya se ha indicado anteriormente por el P. Pedro Sánchez. Desde el interior se observa que apoya sobre pechinas que dan paso a un anillo como base del alto tambor calado por ventanas que permiten la entrada de gran luminosidad a la cabecera del templo, frente a otras iglesias que estaban tapadas por cimborrios. A su vez, el tambor da paso a un nuevo anillo, de donde nace la cúpula hemisférica y que se culmina con una linterna. Su aspecto exterior vuelve a confirmar su similitud con la cúpula del monasterio de San Lorenzo del Escorial¹⁰⁶.

Con el fin de comprobar y contrastar las primeras hipótesis obtenidas a través de la planimetría encontrada en el fondo antiguo sobre las dimensiones de la iglesia, se han realizado dos tipos de toma de medidas. En primer lugar, el grupo de investigación realizó medidas en planta con la cinta métrica y algunas referencias de alturas de la base con el flexómetro. Por otro lado, a través de un medidor láser con un alcance de unos 50 metros, se tomaron medidas de referencia de las alturas de los distintos anillos que van conformando la cúpula, desde aquel que nace de las pechinas, hasta el que cierra la parte superior de la cúpula, pudiendo incluso conocer la altura del punto más alto de la linterna desde el interior de la iglesia. La aplicación de estos métodos se debe a la complejidad de conocer dichas medidas de forma física, dado que son zonas inaccesibles. Para finalizar la medición, se accedió a la cubierta, desde donde teníamos acceso directo al paramento exterior del tambor de la cúpula, donde se pudieron anotar algunas medidas de forma exacta, tales como la altura del paramento exterior del tambor, las cuáles serían muy útiles para contrastar con las dimensiones estimadas a través de la sección transversal de El Escorial. Estas medidas arrojaron buenos resultados, pues el margen de diferencia entre las medidas obtenidas a través de las trazas originales y las anotadas en la visita al templo no supera un 2% en ninguna de ellas, tal como se refleja en la tabla 1, lo que indica que a través de las trazas originales se ha realizado una óptima aproximación de las dimensiones de la zona de la iglesia que nos ocupa, si bien es necesario tener en cuenta las deformaciones derivadas del paso del tiempo.

105 Véase la Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "*El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII*", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 110.

106 *Ibíd.* pp 112.

	TRAZAS ORIGINALES	CINTA Y LÁSER	% DIF.
ALTURA LINTERNA	34,66	34,80	0,4
PRIMER ANILLO	24,04	24,41	1,5
SEGUNDO ANILLO	18,82	18,55	1,43
ALTURA CLAVE	16,32	16,53	1,27
ALTURA TAMBOR	4,84	4,89	1,02
DISTANCIA HORIZ. CLAVES	10,84	10,63	1,93
DIAGONAL PLANTA	13,66	13,95	2,07
DIST. BASES PILARES	8,63	8,75	1,37

Tabla 1. Margen de diferencia entre las trazas originales y las medidas in situ.

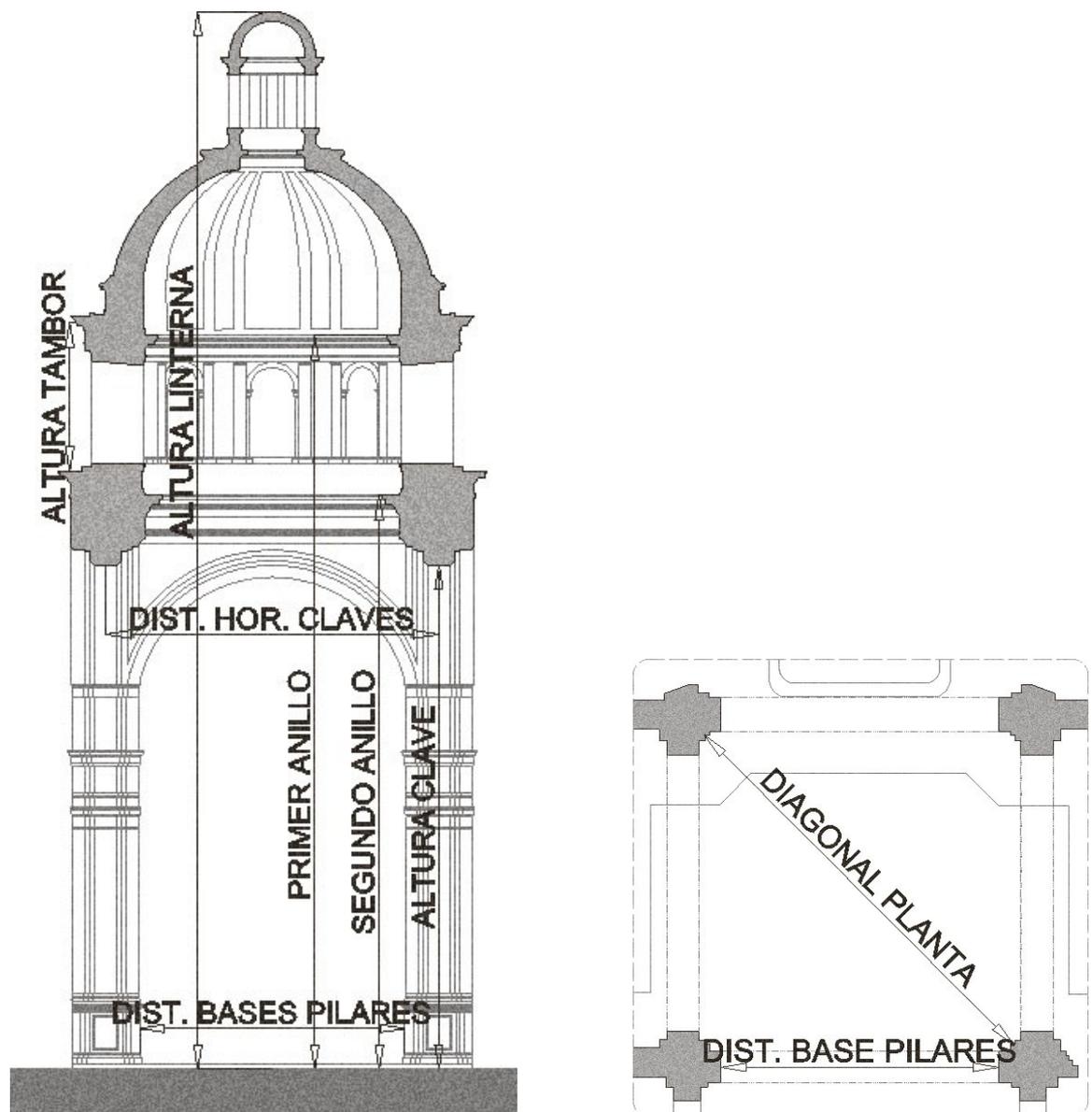


Figura 35. Referencias de medidas tomadas y resumidas en la tabla 1 (Elaboración propia).

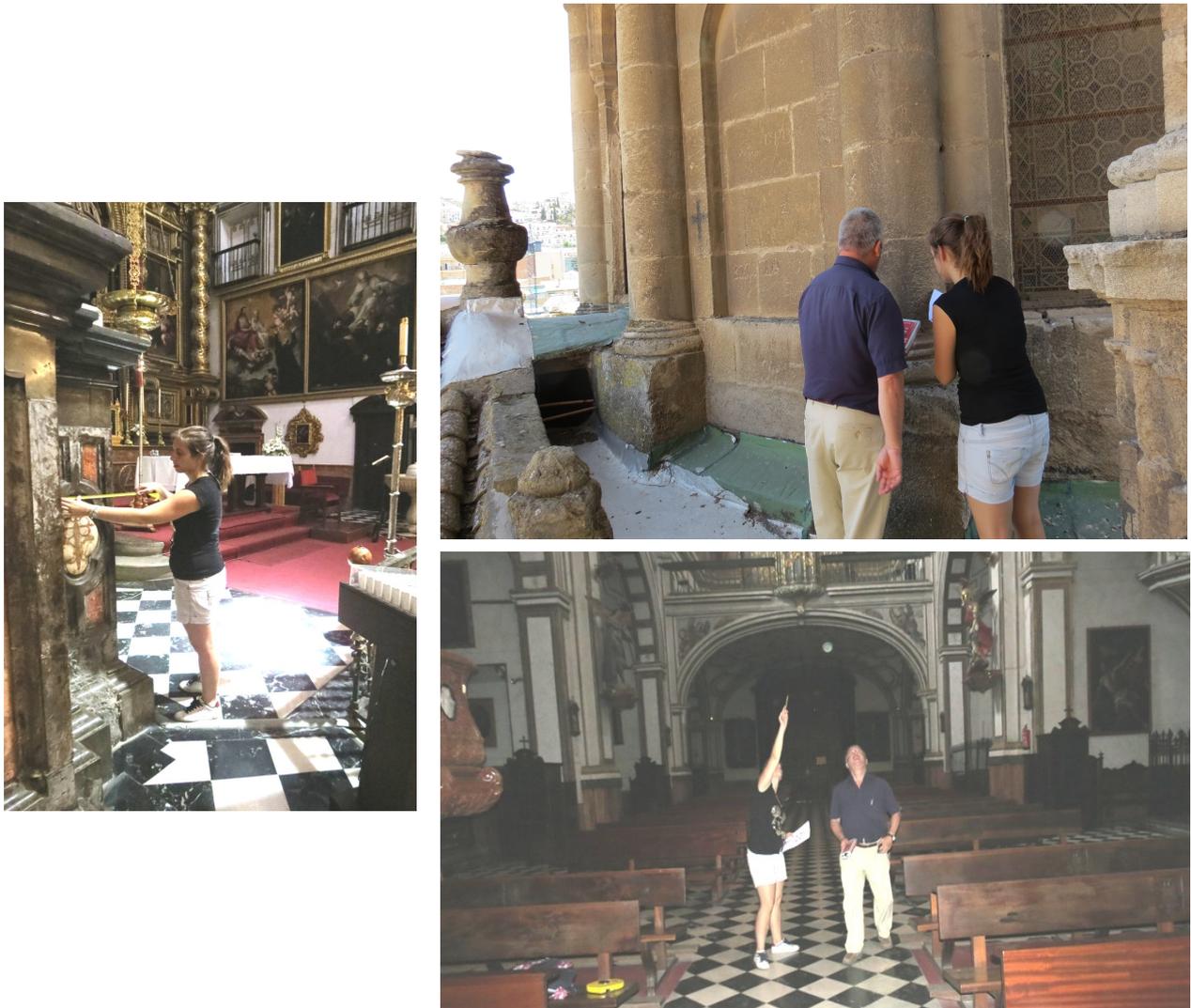


Figura 36. Toma de medidas in situ con cinta métrica y distanciometro láser.

2.4 Sistema de digitalización arquitectónica 3D.

A pesar de que se había obtenido una correcta aproximación sobre la traza del modelo, sobre todo a nivel de las dimensiones internas de la iglesia, el espesor de la cúpula seguía siendo una incógnita, hecho que propició la realización de un levantamiento específico del crucero completo, desde el suelo de la iglesia hasta la aguja de la bola de la linterna, a través de una estación de lectura de rayo láser, figura 37, que permite realizar una digitalización arquitectónica 3D, tomando medidas desde diferentes localizaciones, las cuáles se relacionan entre sí mediante puntos comunes.



Figura 37. Campaña de digitalización tridimensional. Primera base situada en la torre de la Facultad de Derecho de Granada.

Una estación de lectura de rayo láser 3D es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y ocasionalmente su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Desarrollados inicialmente en aplicaciones industriales, han encontrado un vasto campo de aplicación en actividades como la arqueología, arquitectura e ingeniería.

El propósito de una estación de lectura de rayo láser escáner 3D es, generalmente, 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, 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. Las estaciones de lectura de rayo láser 3D son distintas a las cámaras. Al igual que éstas, tienen un campo de visión en forma de cono, pero mientras una cámara reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, las estaciones de lectura de rayo láser 3D reúnen información acerca de su geometría. El modelo obtenido por una estación de lectura de rayo láser 3D describe la posición en el espacio

tridimensional de cada punto analizado.

Si se define un sistema esférico de coordenadas y se considera que el origen es la estación de lectura de rayo láser, 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, una sola digitalización no producirá un modelo completo del objeto. Generalmente se requieren múltiples tomas, incluso centenares, desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del objeto. Estas digitalizaciones tienen que ser integradas en un sistema común de referencia mediante, un proceso que se llama generalmente alineación, 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 3D¹⁰⁷. De este modo, en este trabajo, se han tomado distintas medidas desde diferentes ángulos. La primera localización fue la torre situada dentro de la Facultad de Derecho, figura 37, desde donde se obtuvieron 558.681 puntos del exterior, con una precisión de 1.5 cm. Desde esta ubicación volvimos a realizar una segunda digitalización con una precisión mayor de 5 mm, de la que se obtuvieron 862.058 puntos, con el fin de ajustar la estación de lectura de rayo láser 3D. A continuación, nos dirigimos al interior del templo, figura 38, donde colocamos la estación de lectura justo debajo de la cúpula del crucero, aproximadamente alineada con el centro, desde donde se obtuvieron 1.525.177 puntos. Para poder enlazar los puntos obtenidos desde el interior de la iglesia, pasamos a tomar dos medidas enfrentadas. La primera de ellas fue la digitalización de la calle desde el interior de la iglesia a través de las puertas de la fachada que abrí hacia la Plaza de la Encarnación, de donde se obtuvieron 495.603 puntos. La segunda de estas medidas, con 1.108.092 puntos, enfrentada con esta primera, fue la tomada desde la Plaza de la Encarnación hacia el interior de la iglesia, donde aparecía como fondo el altar mayor. Estas medidas enfrentadas, a su vez, se enlazaron con una digitalización que se realizó de la fachada de la iglesia de San Justo y Pastor, también desde la Plaza de la Encarnación, de donde se obtuvieron 524.358 puntos. Nos falta incluir aquellos puntos ocultos exteriores de la cúpula que habían quedado a las espaldas de la toma realizada desde la torre de la Facultad de Derecho, que para poder encajarlos, tuvimos que realizar dos digitalizaciones más, una de ellas desde la Calle San Jerónimo, con 1.214.084 puntos, desde donde se abarcaba parte de la fachada para poder unir con las digitalizaciones anteriores. La última se realizó desde una de la terraza de una de las casas que quedan por la zona trasera de la iglesia, figura 39, desde donde se obtuvieron 774.380 puntos.

107 FAUSTO BERNARDINI, HOLLY E. RUSHMEIER: The 3D Model Acquisition Pipeline. Comput. Graph. Forum 21(2): 149-172 (2002) .



Figura 38. Campaña de digitalización tridimensional. Segunda base situada bajo el crucero del templo.

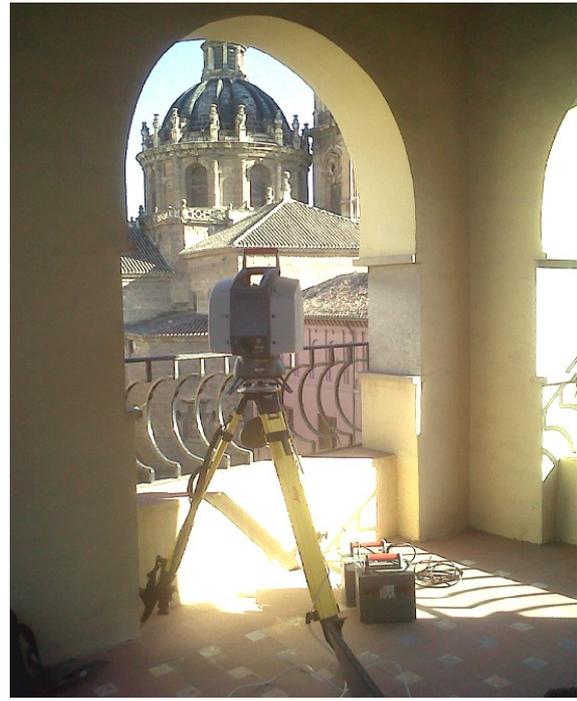


Figura 39. Campaña de digitalización tridimensional. Última base situada en vivienda ubicada en la intersección de la Calle Jerónimo con la calle de Arandas.

Hay dos tipos de estaciones de lectura de rayo láser 3D en función de si hay contacto con el objeto o no. Las estaciones de lectura de rayo láser 3D sin contacto se pueden dividir además en dos categorías principales, distinguidas entre activas y pasivas. Hay una variedad de tecnologías que caen bajo cada una de estas categorías. La tipología usada en este trabajo ha sido la de rayo láser activo, el cuál emite una señal y analiza su retorno para capturar la geometría de un objeto o una escena. Se utilizan radiaciones electromagnéticas o ultrasonidos. En concreto, la tecnología usada ha sido la de tiempo de vuelo¹⁰⁸.

Una estación de lectura 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. Si T es el tiempo del viaje completo, entonces la distancia es igual a $(C * T) / 2$. Claramente la certeza de a 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

108 Conocida como Time of Flight.

invisibles¹⁰⁹.

El distanciómetro láser sólo mide la distancia de un punto en su dirección de la escena. Para llevar a cabo la medida completa, la estación de lectura de rayo láser va variando la dirección del distanciómetro tras cada medida, bien moviendo el distanciómetro o deflectando el haz mediante un sistema óptico. Este último método se usa comúnmente porque los pequeños elementos que lo componen pueden ser girados mucho más rápido y con una precisión mayor. Las estaciones de lectura de rayo láser de tiempo de vuelo típicas pueden medir la distancia de 10.000 a 100.000 puntos cada segundo.

Las principales características de este modelo de digitalización tridimensional es que presenta una gran rapidez en el muestreo, dispone de un sistema de medición que se reinicia al alcanzar el objetivo, el equipo de que consta cuenta con una alta precisión, es apto para trabajos de alta precisión en monumento y elementos constructivos, así como para el análisis de las deformaciones, además de generar un alta densidad de puntos con una frecuencia oscilante comprendida entre los valores antes especificados de 10.000 y 100.000 puntos.

Las nubes de puntos producidas por la estación de lectura de rayo láser 3D pueden ser utilizadas directamente para la medición y la visualización en el mundo de la arquitectura y la construcción. No obstante, la mayoría de las aplicaciones utilizan modelos 3D poligonales, modelos de superficies NURBS, o modelos CAD basados en las características tomadas generando modelos sólidos.

La técnica de digitalización tridimensional con estación de lectura de rayo láser 3D contribuye a la documentación y mantenimiento de edificaciones, monumentos y otros elementos históricos. Además, puede ser una herramienta para la divulgación de turismo histórico a través de modelos virtuales. Para una documentación completa de la información de un monumento histórico es necesario realizar un levantamiento preciso y en detalle de los distintos elementos que constituyen el objeto de estudio para obtener unos resultados fiables y ajustados a la realidad, así como identificar las distintas patologías que puedan afectar al objeto, como problemas estructurales y deformaciones. Pero la documentación del patrimonio cultural no consiste únicamente en el levantamiento de campo de los datos necesarios para su registro en detalle, sino que también requiere procedimientos necesarios para procesar esta información, su presentación posterior y el archivo de los datos imprescindibles para representar la forma, volumen y tamaño del elemento documentado en un determinado momento de la vida del mismo. Como es cada vez más habitual la exigencia en la rapidez y precisión en la documentación de los elementos patrimoniales, la tendencia actual es usar como herramientas más avanzadas de documentación geométrica los

109 Tipo *infrarrojo cercano*.

métodos topográficos y la fotogrametría. Cada vez se hace más necesario obtener un registro en 3D y con ello, un modelo tridimensional que represente gráficamente tanto la geometría del edificio como el aspecto en que se encuentra. En este sentido ha avanzado en las últimas décadas la aplicación de la estación de lectura de rayo láser 3D en el campo del patrimonio cultural, que suple huecos de otras técnicas, presentándose como una alternativa eficiente para la documentación de elementos históricos. En un mundo donde la información se almacena fundamentalmente en formatos digitales, se hace cada vez más necesario generar sistemas en los que ésta quede archivada en formatos que permitan su conservación en el futuro, un formato que sea además compatible con otro tipo de información digital sobre los sitios analizados.

Nuevamente, los resultados obtenidos con esta metodología se ajustaban bastante a las hipótesis de partida, las cuáles se obtuvieron a través de las trazas originales encontradas en el fondo antiguo, además de aproximar a las medidas recogidas en nuestra visita al templo, donde la mayor diferencia entre medidas tomadas oscila en torno a un 2% según se muestra en la tabla 2. No obstante, con respecto a las anteriores medidas, conseguimos obtener el espesor de la cáscara de la cúpula, que era el principal objetivo que seguíamos con este método.

	TRAZAS ORIGINALES	CINTA Y LÁSER	ESTACIÓN LÁSER 3D	% DIF. TRAZAS ORIGINALES Y CINTA-LÁSER	% DIF. TRAZAS ORIGINALES Y ESTACIÓN LÁSER 3D.
ALTURA LINTERNA	34,66	34,80	35,19	0,4	1,5
PRIMER ANILLO	24,04	24,41	24,69	1,5	2,63
SEGUNDO ANILLO	18,82	18,55	18,54	1,43	1,48
ALTURA CLAVE	16,32	16,53	16,15	1,27	1,04
ALTURA TAMBOR	4,84	4,89	4,9	1,02	1,22
DISTANCIA HORIZ. CLAVES	10,84	10,63	11,13	1,93	2,6
DIAGONAL PLANTA	13,66	13,95	13,8	2,07	1,01
DIST. BASES PILARES	8,63	8,75	8,73	1,37	1,14

Tabla 2. Diferencias entre las medidas obtenidas con las trazas originales, las obtenidas con cinta y láser y las proporcionadas por la digitalización con estación de lectura de rayo láser 3D.

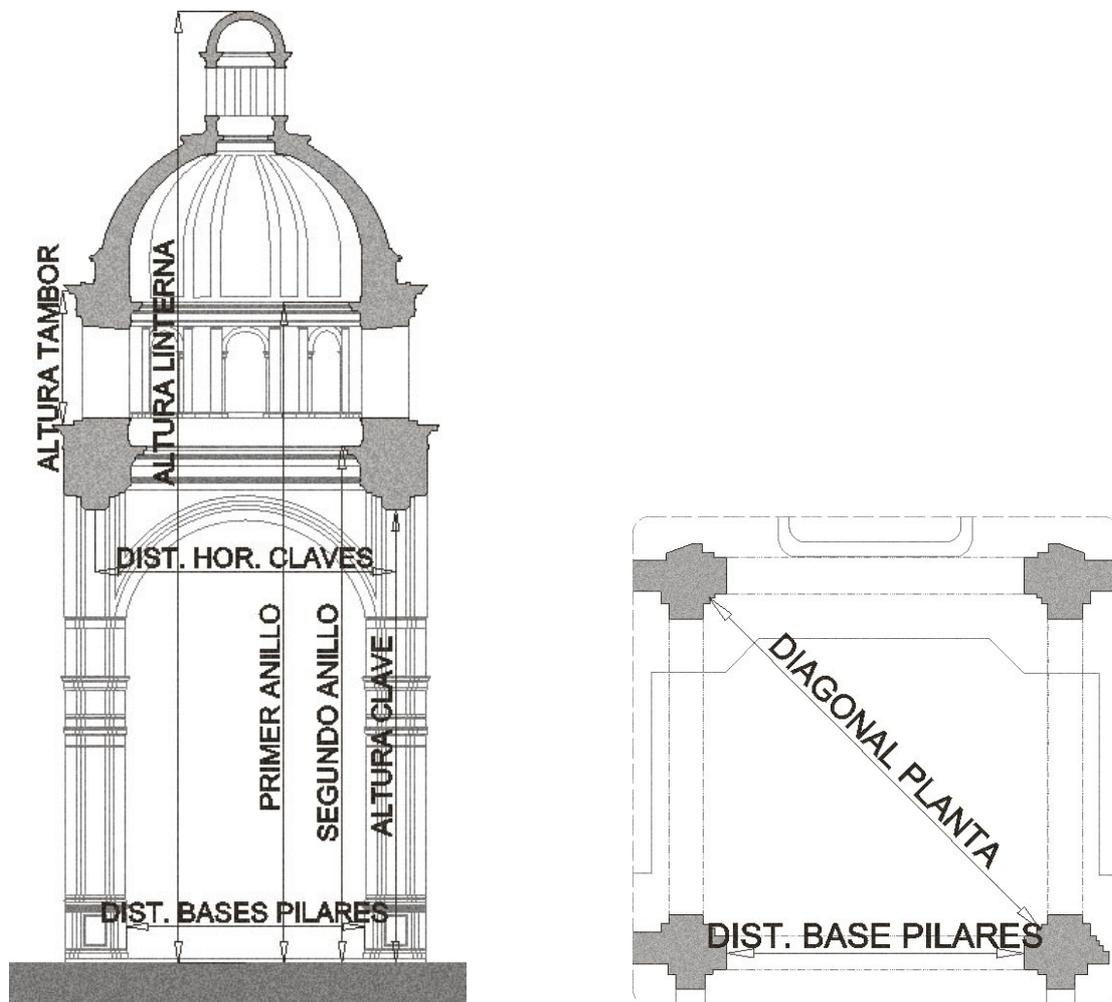


Figura 40. Referencias de medidas tomadas y resumidas en la tabla 2 (Elaboración propia).



Figura 41. Ortofoto transversal (Elaboración propia).

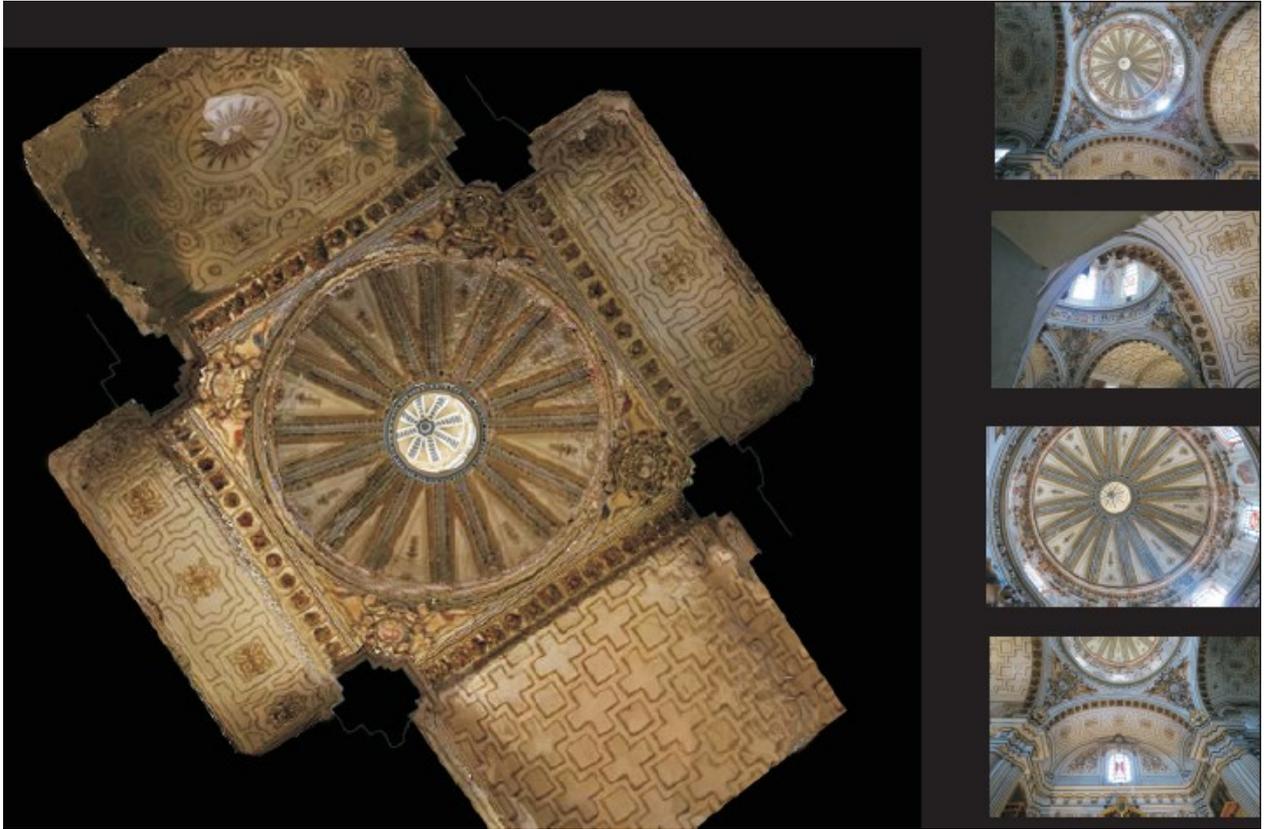


Figura 42. Ortofoto nube puntos cúpula desde interior obtenida con la digitalización con estación de lectura de rayo láser 3D (Elaboración propia).



Figura 43. Ortofoto longitudinal (Elaboración propia).

2.7 Modelización geométrica.

Antes de iniciar el análisis de la estabilidad de la cúpula y el tambor, se ha realizado un levantamiento del conjunto para determinar la estructura geométrica teórica. De este modo, la geometría de la cúpula y el tambor se han idealizado ajustando las medidas obtenidas en la digitalización arquitectónica, aproximando los valores de la traza deformados a valores teóricos basados en el diseño inicial del que pudo partir la construcción de cada uno de los elementos. Con esta base de desarrollo se ha concluido que el conjunto sobre el crucero apoya sobre pechinas formando una planta circular de arranque, cuyo diámetro interno obtenido es de 10 metros. La cúpula hemiesférica apoya sobre el tambor que presenta una altura desde su base hasta la última cornisa de 6 metros, con diámetros internos y externos de 10 y 12 metros respectivamente, lo que conlleva una espesor de paredes de 1 metro. La cúpula, con un espesor de cáscara variable que oscila entre 50 centímetros en su base y 7 centímetros en la corona superior, presenta un diámetro interior de 9 metros, con una altura desde el pavimento hasta la base de la linterna de 30 metros. En cuanto a la linterna, que arranca desde una base circular de 2 metros de diámetro interno, presenta una altura desde el pavimento de 35 metros. La base de esta linterna, que tiene ocho perforaciones, presenta un diámetro externo de 3 metros, con un espesor de pared de 50 centímetros, culminada con una segunda cúpula cuyo diámetro interno es de 2 metros y un espesor de la cáscara variable, siendo en el arranque de 40 centímetros. Todas estas medidas quedan resumidas en la siguiente documentación gráfica compuesta por plantas, figura 45, y secciones, figura 46, así como distintas modelizaciones 3D para conseguir entender mejor la composición global del conjunto linterna, cúpula y tambor.



Figura 44a. Volumetría de la cúpula (Elaboración propia).

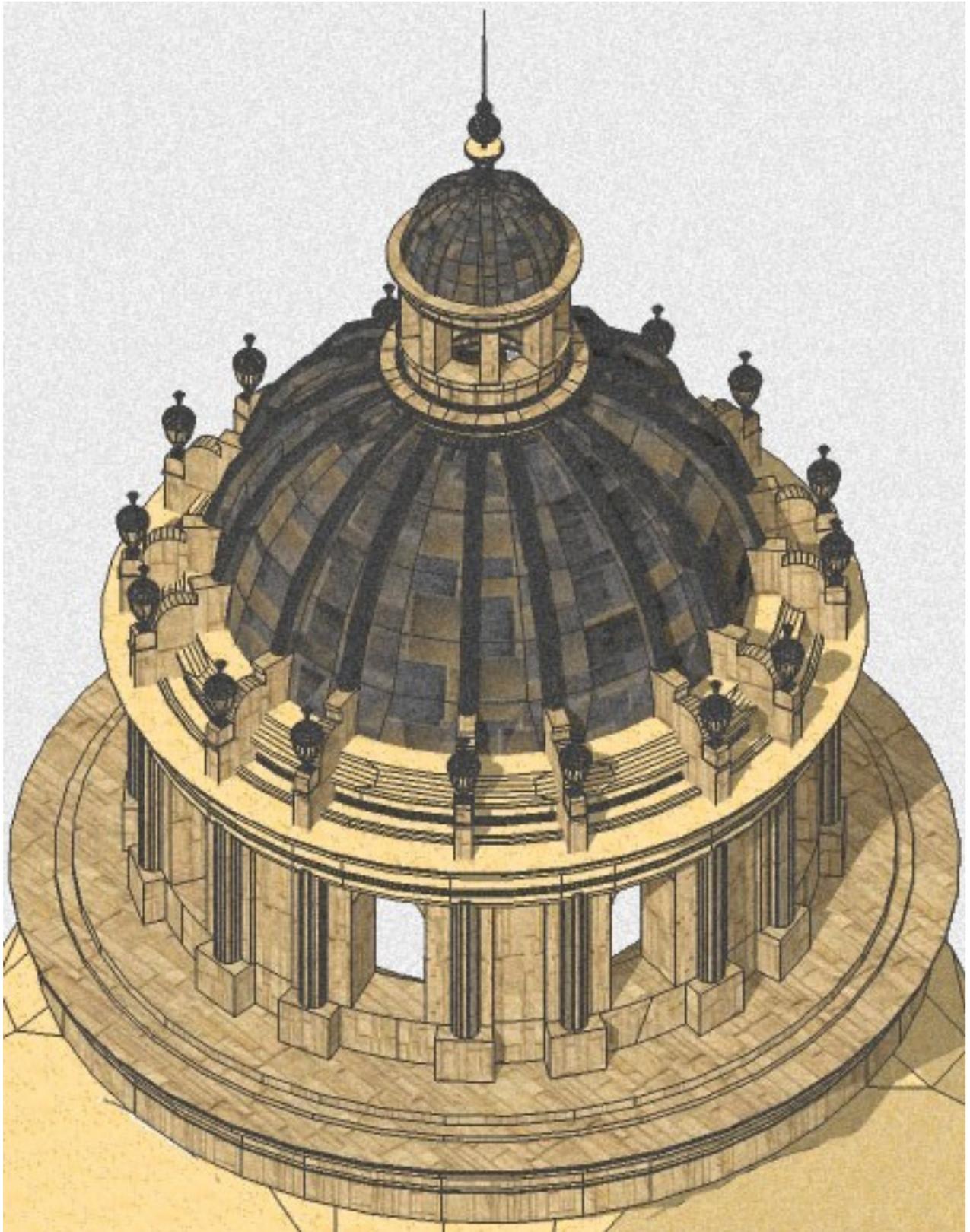


Figura 44b. Volumetría de la cúpula (Elaboración propia).

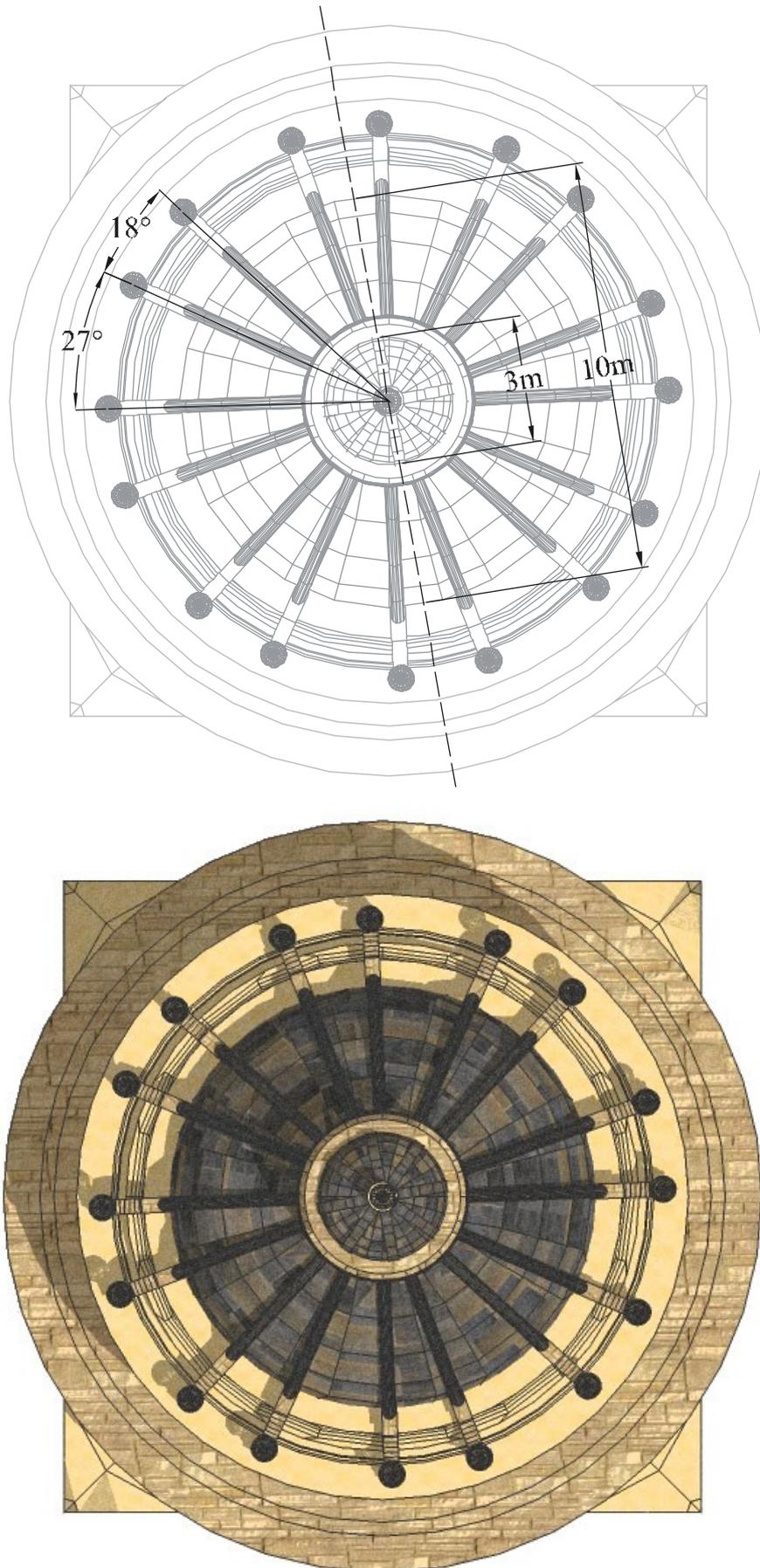


Figura 45. Planta cúpula (Elaboración propia).

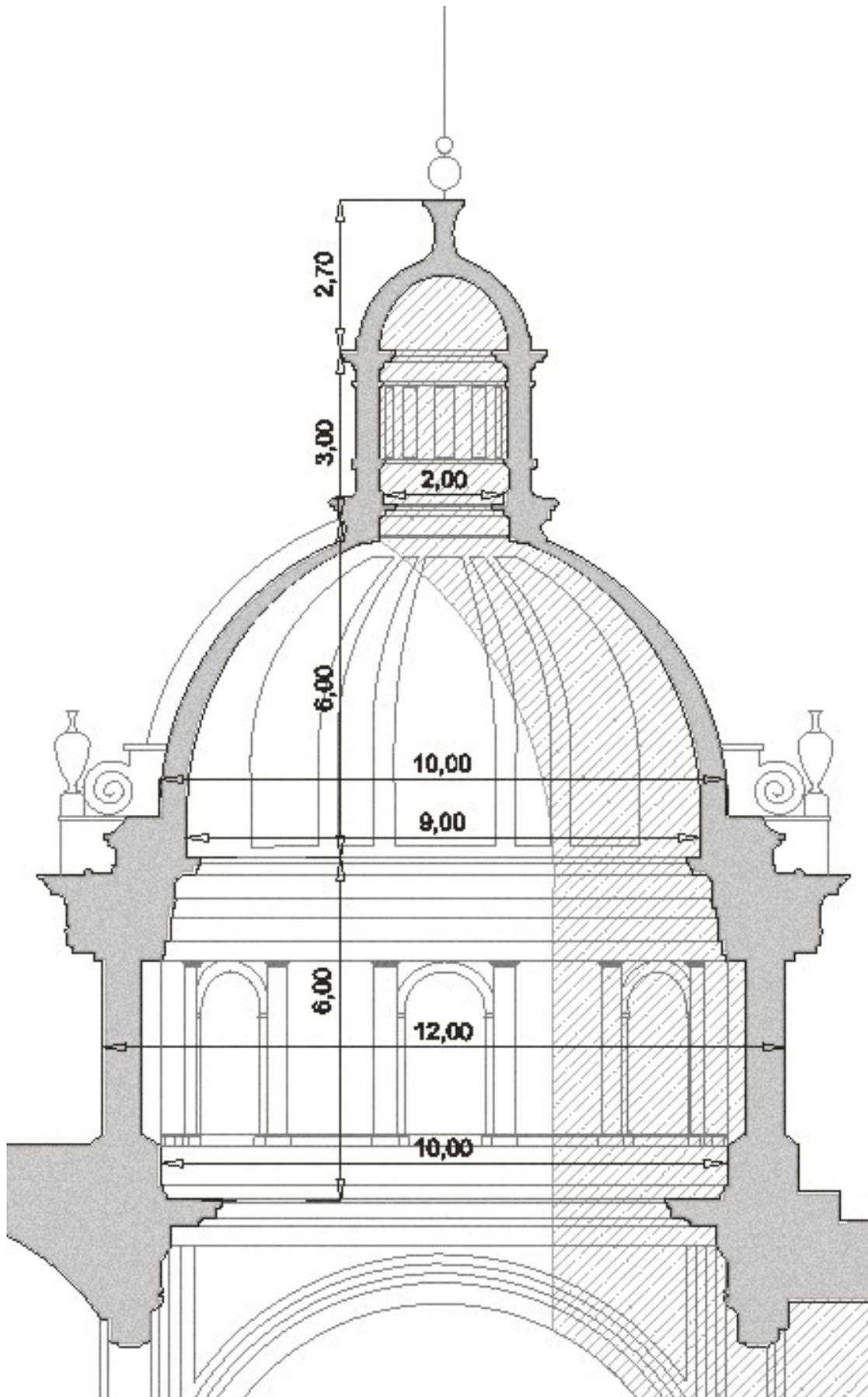


Figura 46. Sección conjunto (Elaboración propia).

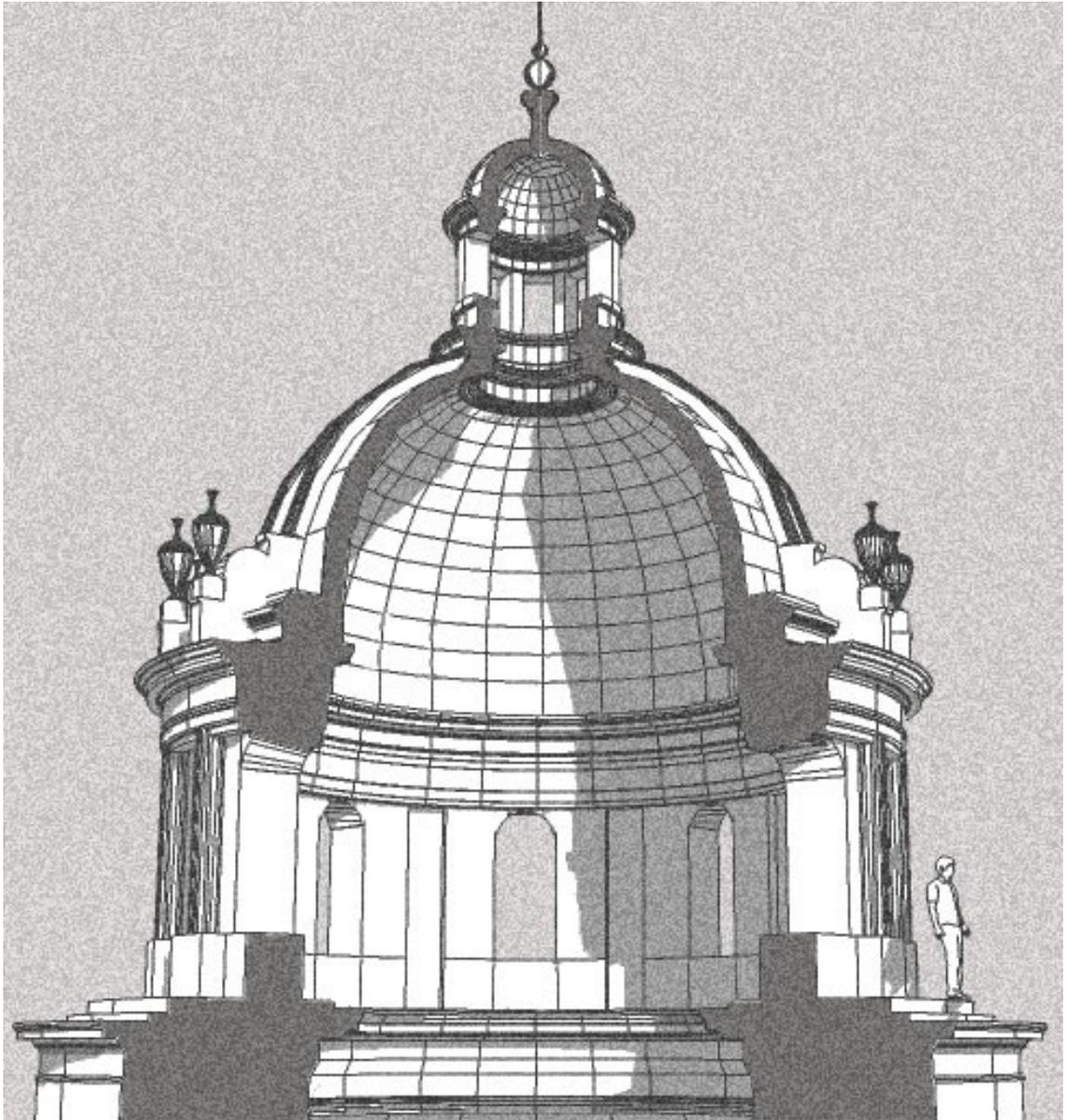


Figura 47. Volumetría cúpula (Elaboración propia).

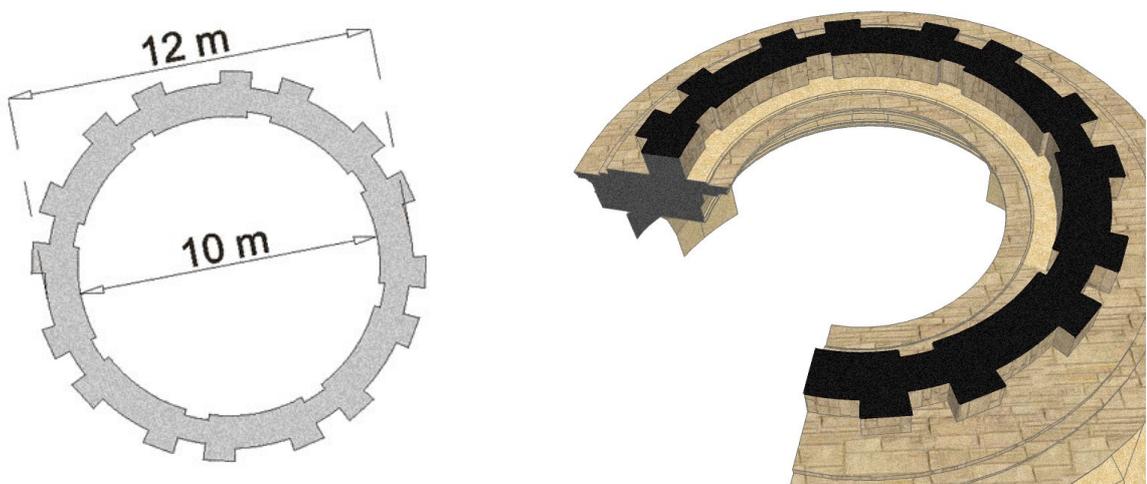


Figura 48. Planta base tambor (Elaboración propia).

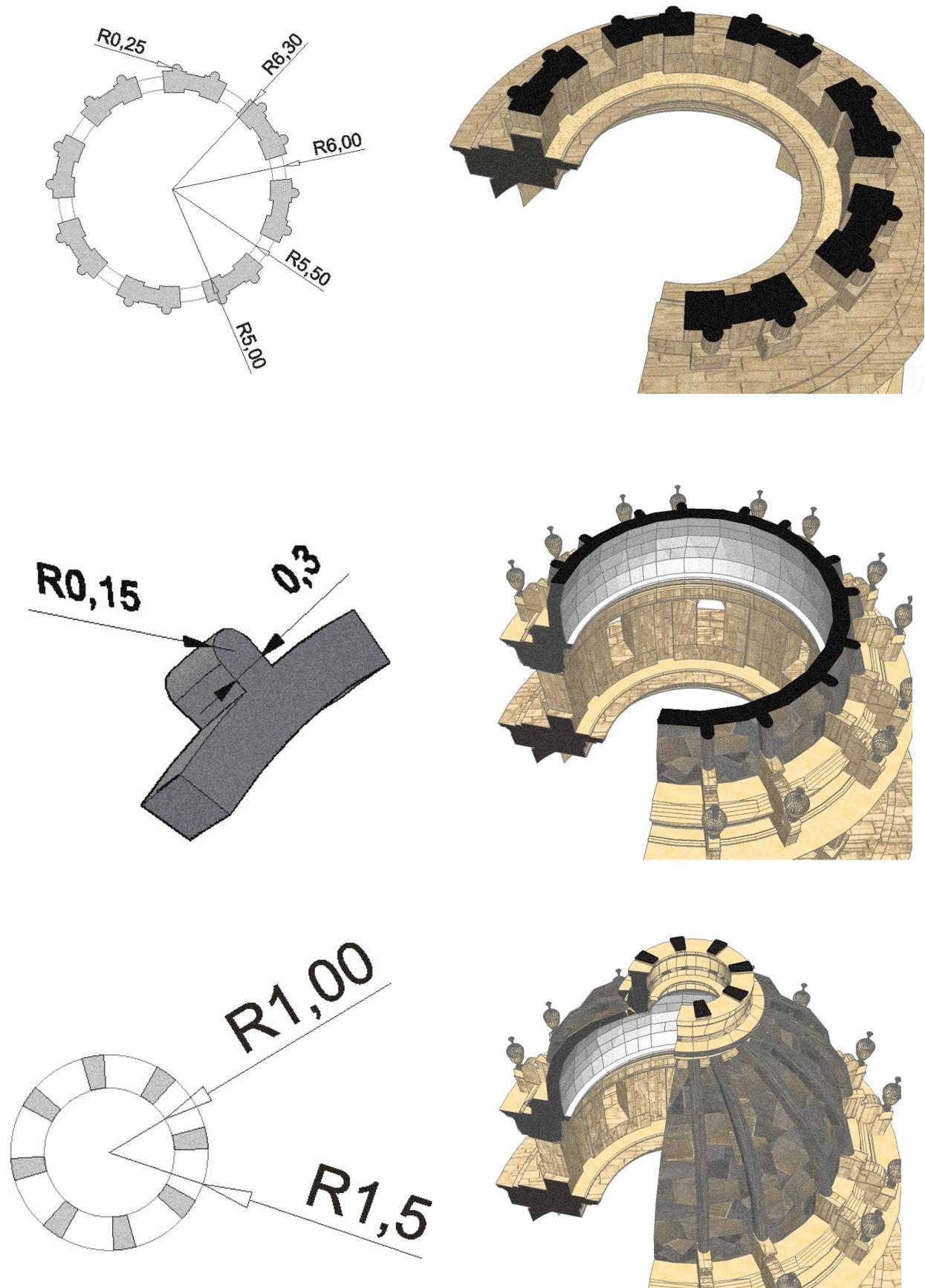


Figura 49. Plantas a distintos niveles (Elaboración propia).

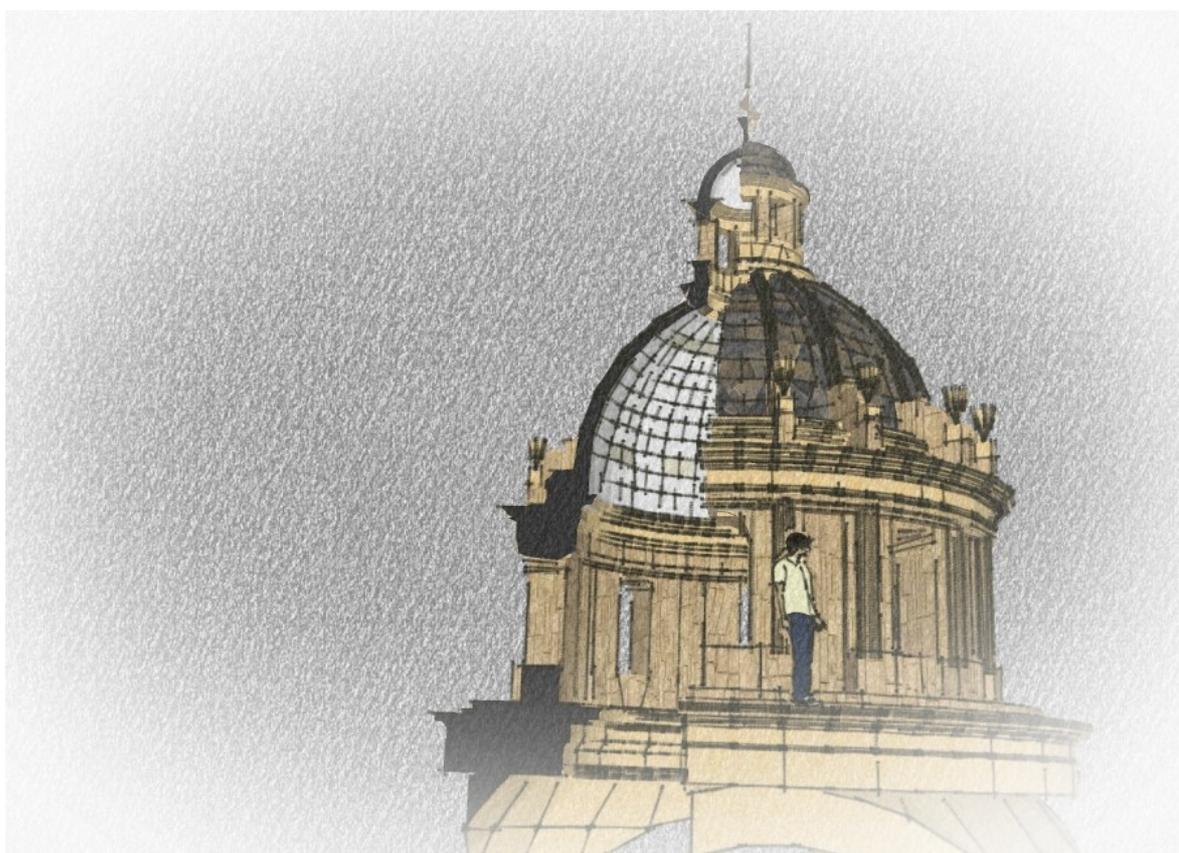
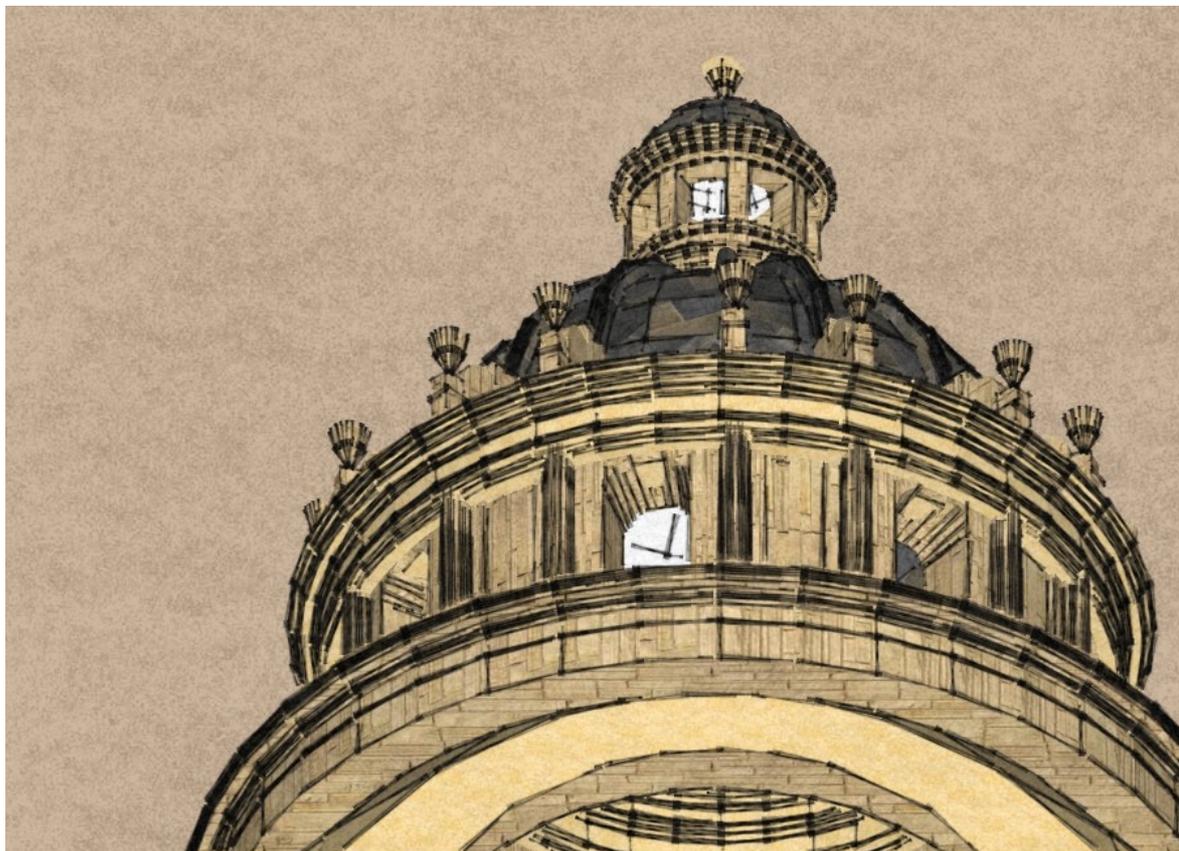


Figura 50. Imágenes conjunto (Elaboración propia).

2.8 Deformación de la cúpulas.

Las deformaciones halladas en la iglesia de los Santos Justo y Pastor pueden proporcionar valiosa información a cerca del diseño original, la construcción y los procesos mecánicos que el edificio ha experimentado. En este caso, las deformaciones se han definido comparando la geometría obtenida en el levantamiento arquitectónico 3D con la modelización geométrica idealizada. Esta modelización geométrica se basa, como ya se ha definido en el apartado anterior, en suponer que la sección de la cúpula es una hemiesfera perfecta, de diámetro igual a 9 metros, medida tomada desde los paramentos interiores de la base de la cúpula. Las alturas se han medido tomando como punto de referencia desde la cota del suelo de la iglesia, las cuáles han quedado definidas en el apartado anterior.

El material de mampostería de la cúpula puede sufrir un proceso de deterioro a causa de una serie de factores. En primer lugar la acción del agua presente en la atmósfera, al ser la mampostería un material poroso tiende a absorberla y si no se ha previsto aislar oportunamente la superficie de la cúpula se pueden observar infiltraciones debido a la lluvia. En el caso de elevados gradientes térmicos, entre el interior y el exterior de la cúpula la humedad atmosférica puede condensar al interno de las paredes. La humedad provoca un aumento de volúmen, que determina el surgimiento de tensiones anormales. Ésto favorece no solo a la separación del revoque, sino también a la solubilización del mortero. Un segundo factor que causa deterioro es el envejecimiento por el transcurso del tiempo, que provoca la pérdida de cohesión de los materiales y sobretodo de los morteros, que se desmoronan de manera no uniforme.

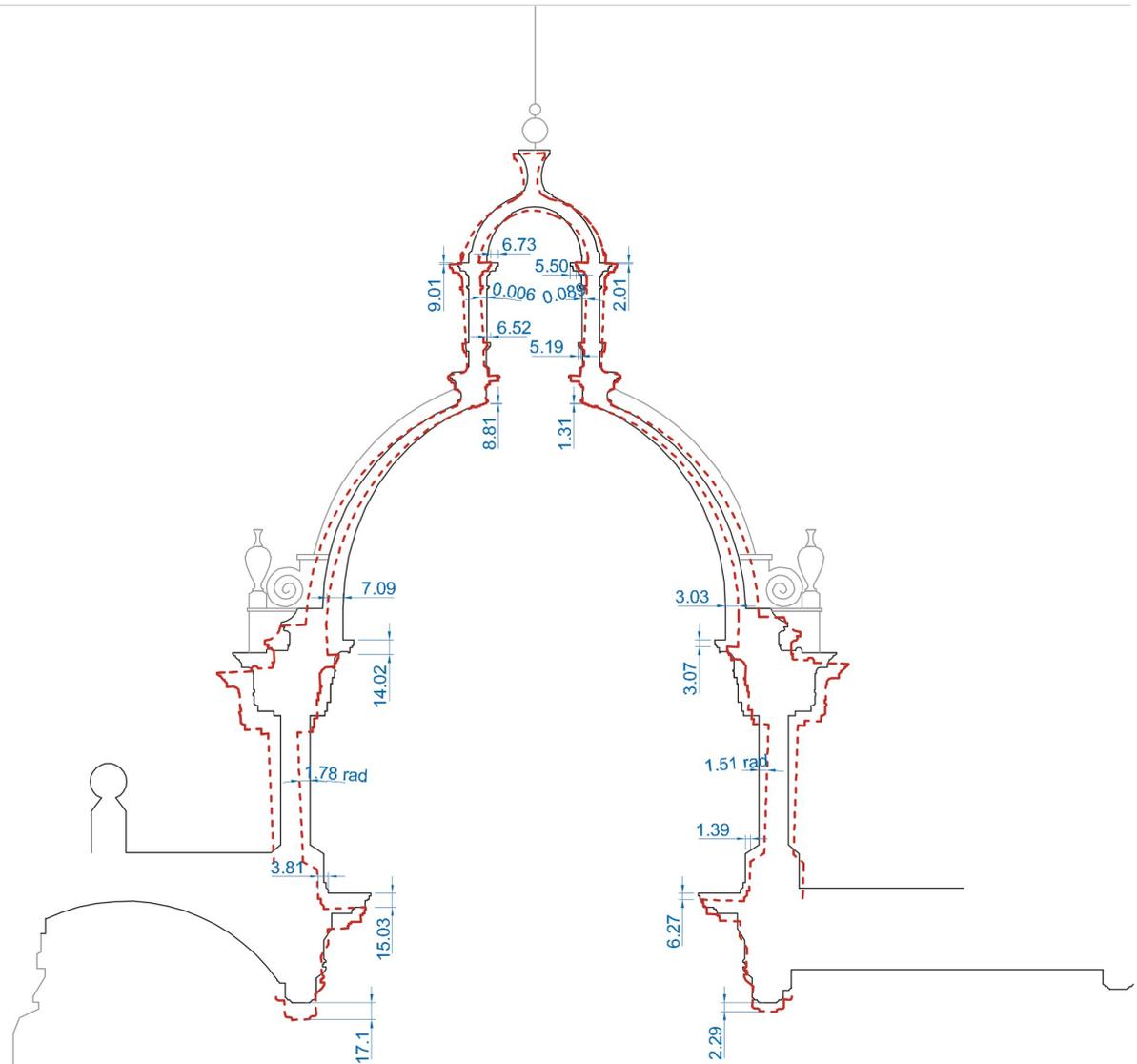
Para describir de manera global las deformaciones experimentadas en el conjunto de la cúpula sobre el tambor se han analizado dos secciones situadas en los dos ejes principales del conjunto, una de ellos en la dirección de la nave principal, coincidiendo con el eje longitudinal de la iglesia, figura 51, y el transversal a éste, figura 53, denominado el eje del transepto.

Una de las primeras deformaciones observadas en todo el conjunto ha sido el desplazamiento hacia extradós de los paramentos del tambor, donde el anillo superior ha experimentado un mayor desplazamiento en todo el perímetro que el anillo en la base, lo que implica que los paramentos se han inducido un giro en toda su revolución. El conjunto cúpula y tambor, construido con materiales de escasa resistencia a tracción, implica que trabajan principalmente a compresión, lo que genera un empuje horizontal que debe ser contrarrestado en los apoyos, en los que las deformaciones por causas mecánicas vendrán acompañadas de rotaciones en las paramentos del tambor de apoyo. El desplazamiento y giro producidos en el tambor, conllevan a que en la cáscara de la cúpula, se haya producido un desplazamiento hacia extradós en todo su perímetro, así como un descenso del nivel de apoyo. Estos mismos efectos producidos se han producido en la parte alta de la cúpula, aunque con un menor grado de deformación. El hecho de que el descenso de la base

haya sido mayor que en el anillo superior de ésta, ha provocado un abombamiento de su cáscara, efecto que ha derivado que pierda su forma hemiesférica, adoptando un perfil más elíptico, según se observa en la figura 52.

La linterna ha sufrido un descendimiento en todo el perímetro de su base, con valores extremos comprendidos entre 8.81 y 1.31 cm, apreciados en la dirección del eje de la nave principal. Toda la base ha experimentado, a su vez, un desplazamiento hacia extradós en las dos direcciones analizadas. En cambio, el anillo superior del soporte de la cúpula de la linterna ha experimentado desplazamientos hacia extradós en la dirección del eje de la nave principal y desplazamientos hacia intradós en el eje del transepto. Estas deformaciones inducen unas inclinaciones hacia extradós de los soportes de la linterna en la dirección del eje de la nave principal, e inclinaciones hacia intradós para el eje del transepto. Por este motivo, la base de la cúpula de la linterna ha sufrido un ensanchamiento superior en el eje de la nave principal con respecto al del eje del transepto. Este ensanchamiento de la base de la linterna ha provocado un achatamiento de la cúpula, según se observa en la figura 52, aunque de menor magnitud que las deformaciones experimentadas en la cúpula.

En el conjunto cúpula y tambor, se ha apreciado un giro global de la estructura, debido a un descenso de mayor valor en los elementos situados en el altar mayor, con un valor de 17.1 cm en la clave del arco situado sobre éste, que en los elementos que lindan con la nave central, con un descenso en la clave del arco situada sobre la nave de 2.29 cm, lo que conlleva un asiento diferencial que oscila entre los 11 y los 14.81 cm. Esta deformación implica un vuelco del conjunto hacia el altar mayor, debido a que en esta zona no existe el refuerzo que supone la bóveda de cañón que discurre sobre la nave central, en la que se ha experimentado un menor descenso del conjunto. Si se analizan las deformaciones en el eje del transepto, los descensos de las claves de la nave lateral izquierda y de la derecha, presentan unos valores bastantes elevados pero uniformes, de 12.46 cm y 13.14 cm, por lo que, en este eje, no aparecerá un vuelco del conjunto como el experimentado en el eje de la nave principal.



EJE NAVE PRINCIPAL - ALTAR MAYOR

1. Desplazamiento extrados de la base cúpula de la linterna: 6.73 cm.
2. Descenso de la base de la cúpula de la linterna: 9.01 cm.
3. Inclinación hacia extrados del soporte de la linterna: 0.006 rad (0.105%).
4. Desplazamiento hacia extrados de la base del soporte de la linterna: 6.52 cm.
5. Descenso del anillo superior de la cúpula: 8.81 cm.
6. Desplazamiento hacia extrados de la base de la cáscara de la cúpula: 7.09 cm.
7. Descenso de la base de la cáscara de la cúpula: 14.02 cm.
8. Inclinación hacia extrados del tambor: 1.78 rad (3.01%).
9. Desplazamiento hacia extrados de la base del tambor: 3.81 cm.
10. Descenso de la base del tambor: 15.03 cm.
11. Descenso de la clave del arco sobre el altar mayor: 17.1 cm.

EJE NAVE PRINCIPAL - NAVE CENTRAL.

1. Desplazamiento extrados de la base cúpula de la linterna: 5.50 cm.
2. Descenso de la base de la cúpula de la linterna: 2.01 cm.
3. Inclinación hacia extrados del soporte de la linterna: 0.089 rad (0.155%).
4. Desplazamiento hacia extrados de la base del soporte de la linterna: 5.19 cm.
5. Descenso del anillo superior de la cúpula: 1.31 cm.
6. Desplazamiento hacia extrados de la base de la cáscara de la cúpula: 3.03 cm.
7. Descenso de la base de la cáscara de la cúpula: 3.07 cm.
8. Inclinación hacia extrados del tambor: 1.51 rad (2.64%).
9. Desplazamiento hacia extrados de la base del tambor: 1.39 cm.
10. Descenso de la base del tambor: 6.27 cm.
11. Descenso de la clave del arco sobre la nave central: 2.29 cm.

Figura 51. Deformación en sección según eje nave principal (Elaboración propia).

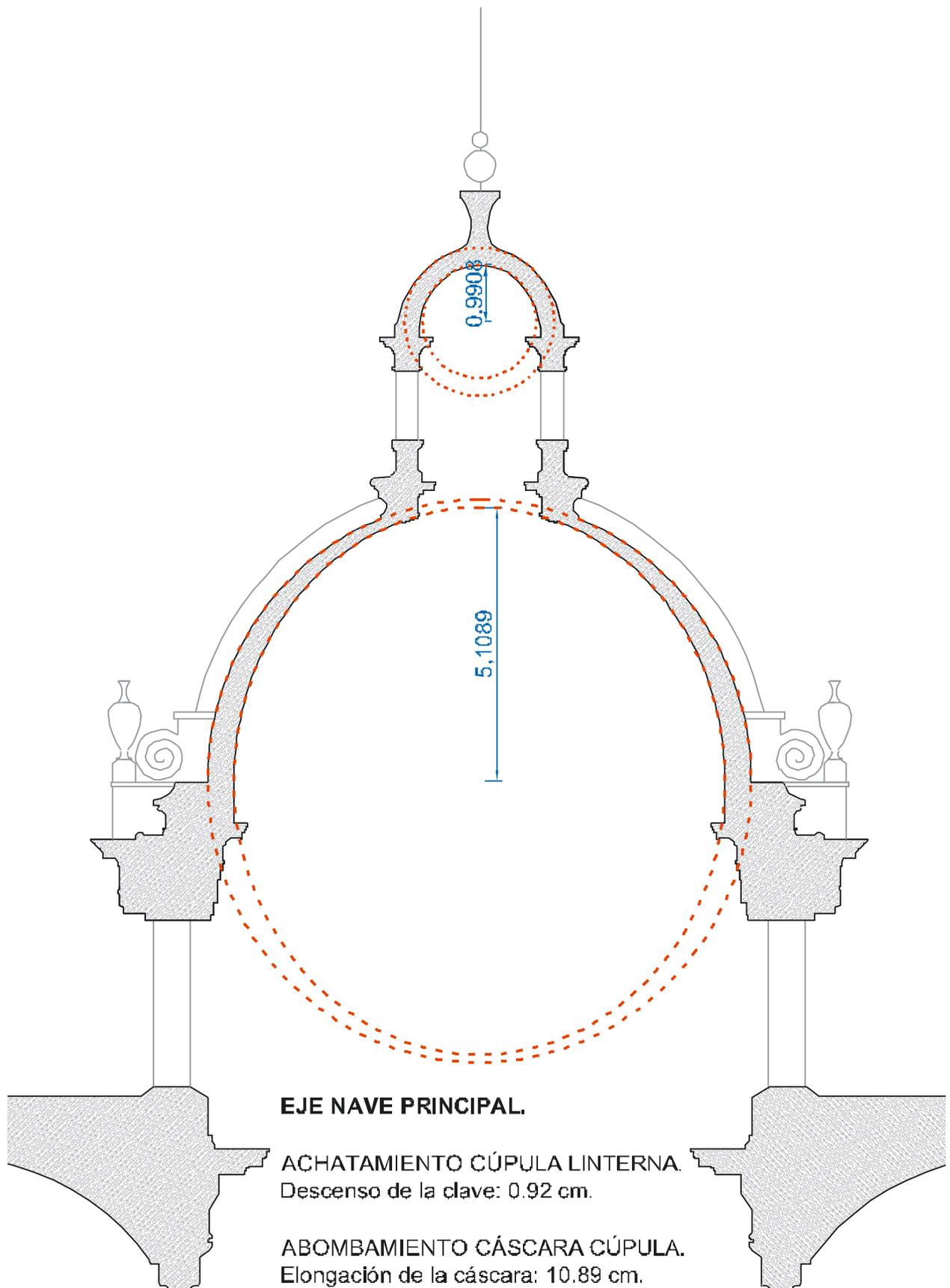
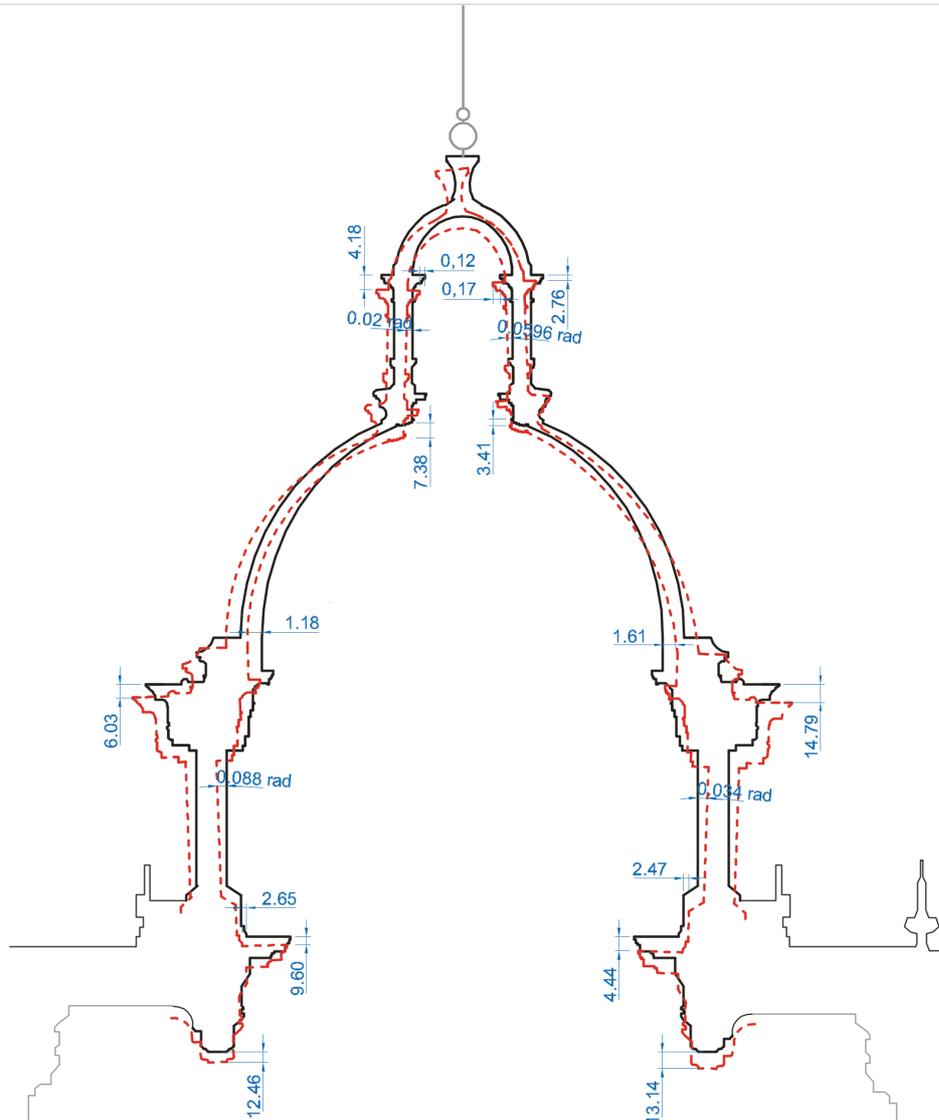


Figura 52. Detalle deformación en sección según eje nave principal experimentada en la cúpula (Elaboración propia).



EJE TRANSEPTO - NAVE IZQUIERDA

1. Desplazamiento extrados de la base cúpula de la linterna: 0.084 cm.
2. Descenso de la base de la cúpula de la linterna: 4.18 cm.
3. Inclinación hacia intrados del soporte de la linterna: 0.002 rad (2.026%).
4. Desplazamiento hacia extrados de la base del soporte de la linterna: 5.72 cm.
5. Descenso del anillo superior de la cúpula: 7.38 cm.
6. Desplazamiento hacia extrados de la base de la cáscara de la cúpula: 1.18 cm.
7. Descenso de la base de la cáscara de la cúpula: 6.03 cm.
8. Inclinación hacia extrados del tambor: 0.088 rad (0.154%).
9. Desplazamiento hacia extrados de la base del tambor: 2.65 cm.
10. Descenso de la base del tambor: 9.60 cm.
11. Descenso de la clave del arco sobre la nave izquierda del transepto: 12.46 cm.

1. EJE TRANSEPTO - NAVE DERECHA

2. Desplazamiento extrados de la base cúpula de la linterna: 0.095 cm.
3. Descenso de la base de la cúpula de la linterna: 2.76 cm.
4. Inclinación hacia intrados del soporte de la linterna: 0.0596 rad (1.041%).
5. Desplazamiento hacia intrados de la base del soporte de la linterna: 2.8 cm.
6. Descenso del anillo superior de la cúpula: 3.41 cm.
7. Desplazamiento hacia extrados de la base de la cáscara de la cúpula: 1.61 cm.
8. Descenso de la base de la cáscara de la cúpula: 14.79 cm.
9. Inclinación hacia extrados del tambor: 0.034 rad (0.059%).
10. Desplazamiento hacia extrados de la base del tambor: 2.47 cm.
11. Descenso de la base del tambor: 4.44 cm.
12. Descenso de la clave del arco sobre la nave izquierda del transepto: 13.14 cm.

Figura 53. Deformación en sección según eje del transepto (Elaboración propia).

2.9 Estereotomía.

Situados desde el exterior del edificio, la cúpula de la Iglesia de los Santos Justos y Pastor desvela la disposición de las dovelas que lo conforman, figura 56, permitiendo determinar la configuración del despiece de las cáscaras de la cúpula y la linterna, las costillas que resaltan sobre ésta y de las paredes del tambor, así como plantear una hipótesis constructiva para estos elementos.

El arquetipo constructivo, según se observa, es el de casquete esférico conocido comúnmente como cúpula de media naranja, apoyada sobre tambor cilíndrico. La traza estereotómica de esta tipología constructiva fue la más importante durante los siglos XVI y XVII. La traza de sus patrones reserva algunas sorpresas interesantes debido a que el único dato que necesita el cantero para tallar las dovelas de esta cúpula es un patrón de la cara interior de las piezas¹¹⁰.

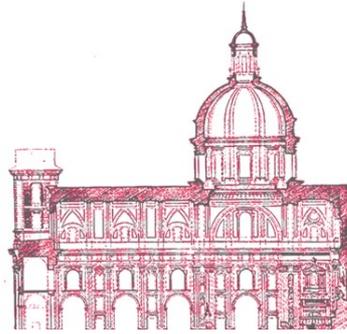
El diseño de una cúpula requiere tomar una serie de decisiones previas, tales como el diámetro de la base, que repercute directamente en su altura, así como el reparto de dovelas en el plano de impostas, y lo que es más importante, el número de hiladas con las que se piensa cerrar la cúpula. En este caso, según se observa desde el exterior, la cúpula se compone de doce hiladas de igual altura, más la pieza de coronación que conecta con la linterna, con juntas de entre 6 y 9 mm de espesor constante. Por otro lado, la cúpula de la linterna presenta cinco hiladas, incluyendo la piedra clave.

En cuanto a las costillas que resaltan en el conjunto, la disposición de las piezas no concuerda con la de la cúpula sobre la que se apoya, con seis hiladas dispuestas en la misma dirección. El espesor de estas costillas, totalmente visible, coincide con el espesor máximo de la dovela inferior de la cáscara de la cúpula, y nos plantea una segunda hipótesis necesaria para la definición constructiva del conjunto, tal como que esta cúpula se genera con una única hilada de espesor. Este factor puede venir derivado de la intención de Pedro Sánchez de reducir al máximo el espesor de la cáscara de la cúpula con respecto a las proporciones que presentaba la iglesia del monasterio de El Escorial, las cuáles eran consideradas de una masividad excesiva dentro del conjunto. En la obra del Colegio Imperial de Madrid de Pedro Sánchez ya se observaba una clara intención en reducir el espesor de la cáscara, pues, mientras que la relación altura-diámetro de la cúpula de esta obra con respecto a la del monasterio de El Escorial se mantiene con una proporción similar según se observa en la figura 54, la relación diámetro-espesor de la cúpula se ve considerablemente aumentada en la obra de Pedro Sánchez, lo que conlleva un menor espesor de cáscara para un mayor diámetro, según se muestra en la figura 55. Esta relación entre los diámetros y los espesores de la cúpula nos plantea la idea de que las costillas marcan el esquema estructural de equilibrio de la obra objeto de estudio de este documento.

110 Referencias tomadas de PALACIOS GONZALO, JOSÉ CARLOS: *"Trazas y Cortes de Cantería en el Renacimiento Español"*, Editorial Munilla-Lería, 2003, pp 186.



$$R_{\text{diámetro/espesor}} = 8.5$$

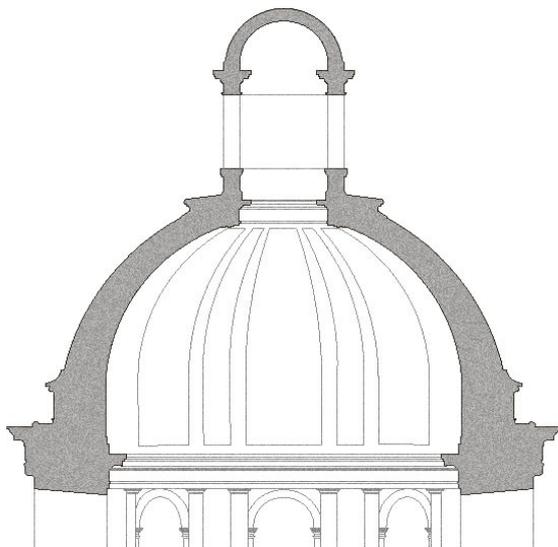


$$R_{\text{diámetro/espesor}} = 10$$

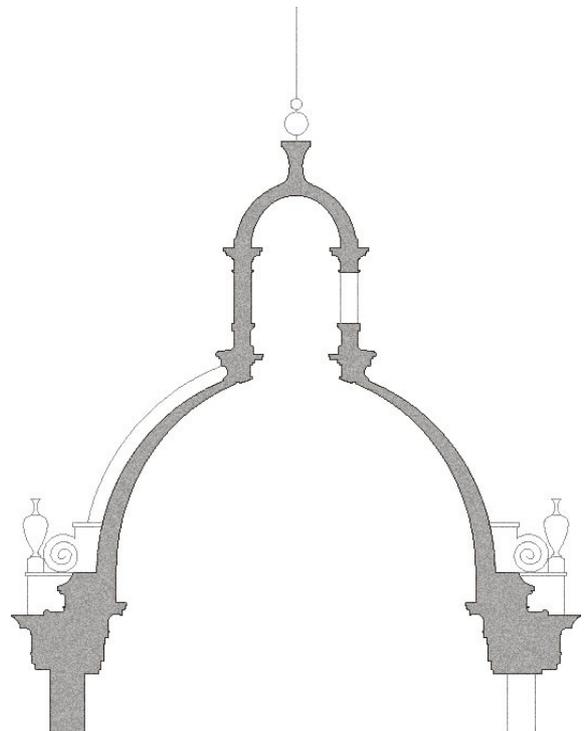


$$R_{\text{diámetro/espesor}} = 8.5$$

Figura 54. Relación proporcional entre el diámetro interior de la base de la cúpula y el espesor en la base de la cáscara de la Iglesia del Monasterio de El Escorial de Juan de Herrera, la Iglesia del Colegio Imperial de Madrid, en la que intervino Pedro Sánchez y la primera hipótesis de la traza de la Iglesia de San Justo y Pastor, también de Pedro Sánchez (Elaboración propia).



$$R_{\text{diámetro/espesor}} = 8.5$$



$$R_{\text{diámetro/espesor}} = 18$$

Figura 55. Relación proporcional entre el diámetro interior de la base de la cúpula y el espesor en la base de la cáscara de la Iglesia del Monasterio de El Escorial de Juan de Herrera y la traza de la Iglesia de San Justo y Pastor de Pedro Sánchez en sus dos secciones tipo, por el eje central de las costillas y por la cáscara de la cúpula (Elaboración propia).



Figura 56. Paramento exterior de la cúpula, donde se puede observar la disposición de los sillares (Elaboración propia).

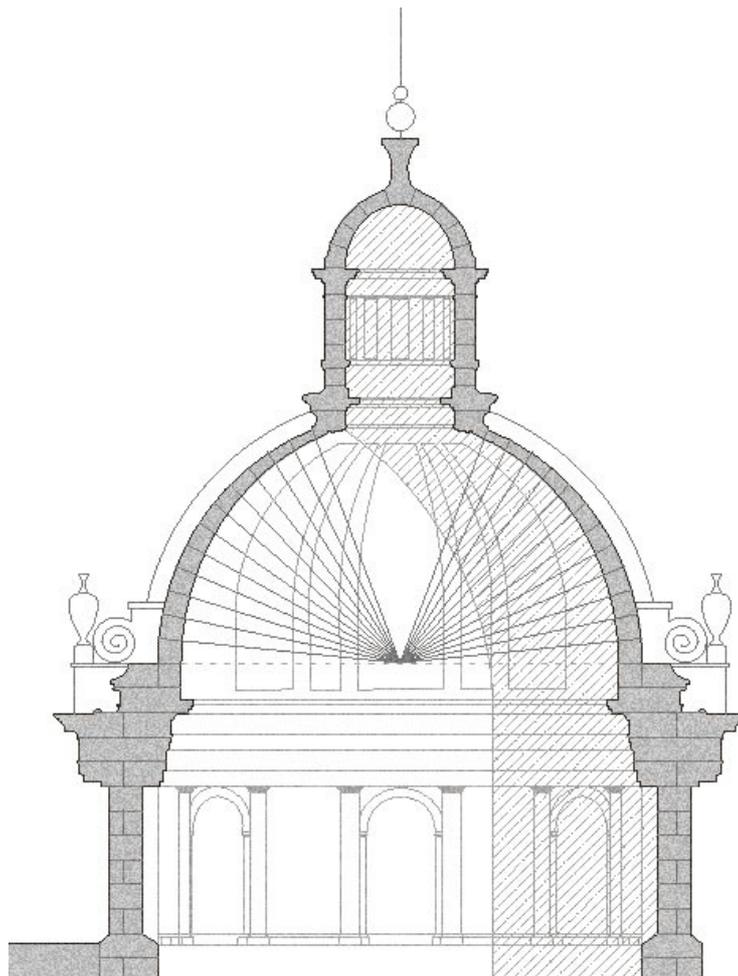


Figura 57. Hipótesis de sección transversal con disposición de dovelas (Elaboración propia).

2.10 Inspección ocular de los materiales constructivos.

Como ya se ha mencionado en este documento, la construcción se hará siguiendo la idea primitiva del hermano Bartolomé de Bustamante¹¹¹. Sobre este proyecto informó posteriormente Juan de Maeda, quien consideró que "...sería conveniente que los muros en lugar de ser de cajones y ladrillos", como indicaba el arquitecto jesuita, "se debían utilizar sillares de Alfacar"¹¹².

En el libro de Las Parroquias de la Diócesis de Granada¹¹³ también se hace referencia al material empleado en la construcción, tanto de la parte inferior como de su cúpula, donde se cita textualmente "... pusieron la primera piedra de esta iglesia, que se hizo en diversas el 26 de marzo de 1575. [...] Juan de Maeda que consideraba hacerla de muros de sillar de Alfacar [...] la cúpula sobre el crucero [...] construida con piedra de Santa Pudia...". Así mismo, en la Guía de Granada, de Gómez Moreno¹¹⁴ se observa la siguiente descripción "... El templo está labrado en piedra de Alfacar, salvo la cúpula, que es la de Santa Pudia...".

A pesar de que existen ciertas partes que han sido reconstruidas o restauradas con cemento, tras la inspección realiza al conjunto se han reconocido las siguientes características de la cantería que conforman el conjunto. De este modo, para los paramentos exteriores que aún no han sido posteriormente tratados, se observan que presentan un color ocre dorado-gris y alta porosidad, características visibles propias del travertino de Alfacar. Del mismo modo, a través de la inspección ocular realizada en el acceso a la cubierta de la iglesia, se pudieron reconocer en los paramentos exteriores del tambor características propias de la piedra franca de Santa Pudia como el color amarillento a pardo claro y una porosidad alta.

Travertino de Alfacar.



Calcarenita de La Escribana¹¹⁵.



Figura 58. Textura de los materiales utilizados en la Iglesia de San Justo y Pastor.

111 Véase página 24 de este documento.

112 Referencias tomadas de la Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., Patrimonio artístico y ciudad moderna. "El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII", Madrid, Fundación Universitaria Española, 2005. pp 94-95.

113 Véase LÓPEZ MIGUEL, A. (2002). "Las parroquias de la diócesis de Granada", (1501-2001). Granada: Arzobispado de Granada .

114 GÓMEZ MORENO, MANUEL (1982). "Guía de Granada. Archivo de la Diputación de Granada", pp 384.

115 También Piedra de Santa Pudia o Piedra franca.

Para poder realizar el posterior análisis de estabilidad es necesario conocer las características de los materiales utilizados en la fábrica de la iglesia, para así poder conocer la mecánica de la cantería utilizada y obtener las cargas que se transmiten debido al peso propio de cada elemento. A diferencia de otras regiones españolas, en las que la mayor parte del patrimonio monumental está constituido por rocas plutónicas, el contexto geológico de Andalucía Oriental ha propiciado el uso frecuente de rocas carbonáticas. En las proximidades de la ciudad de Granada se sitúan dos canteras que han suministrado material pétreo a lo largo de su extensa historia arquitectónica, una de ellas es la cantera de calcarenita de *La Escribana*, en el cortijo de Santa Pudia, y la otra cantera, la de travertino de Alfacar¹¹⁶.

La cantera *La Escribana*, hasta su cierre en 1994, proporcionó la calcarenita denominada *piedra franca*, material utilizado en construcciones patrimoniales singulares como la Catedral de Granada, Palacio de Carlos V, Monasterio de San Jerónimo, Hospital Real y Real Chancillería. Tras su cierre, las actividades extractivas se trasladaron a la cantera de Escúzar, también conocida como Las Parideras, situada igualmente en el cortijo de Santa Pudia, en la que se han seguido explotando calcarenitas utilizadas recientemente en la restauración de la Mezquita de Córdoba, o en el Palacio de las cinco llagas de Sevilla.

La piedra *piedra franca*, como se ha indicado, es una calcarenita, que se presenta como un material muy poroso y permeable, de escasa densidad y resistencia, fácil de labrar pero que resiste poco el deterioro y la filtración de agua, que es una de las causas más comunes de deterioro. Este agua ataca y disuelve el escaso material de unión dando lugar a la pérdida de cohesión interna y posterior arenización. Los problemas de infiltración de agua que ha padecido la construcción en la zona del crucero, con un respectivo proyecto de rehabilitación realizado por el arquitecto José Antonio Llopis Solbes¹¹⁷, concentrados en la zona de la cúpula, nos muestran la porosidad que presenta este material, dado que a la cúpula se le atribuye la *piedra franca*¹¹⁸. Por otro lado, el travertino extraído de la cantera de Alfacar, procedente de depósitos cuaternarios sobre materiales de la cuenca intramontañosa en el borde noroeste de la depresión de Granada, ha sido utilizado en la construcción del Monasterio de San Jerónimo, Hospital Real, Iglesia de los Santos Justo y Pastor¹¹⁹ e Iglesia del Salvador¹²⁰. Se incluye a continuación unos resúmenes de la caracterización

116 Véase UROSEVIC, M.; SEBASTIÁN 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, 93-114.

117 Proyecto de restauración, LLOPIS SOLBES, JOSÉ ANTONIO, 1981. Plano 67 (D), Colegio de los Jesuitas, Oficina Técnica de Construcción de Granada.

118 También conocida como Piedra de Santa Pudia.

119 Material atribuido a todos los elementos exceptuando la cúpula y tambor sobre crucero, a los que se atribuye la calcarenita de La Escribana, también conocido como Piedra franca.

120 Véase UROSEVIC, M.; SEBASTIÁN 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 95.

petrográfica y físico-mecánica de la piedra franca y de piedra de Alfacar.

A partir de resultados publicados del análisis químico de litotipos extraídos de la cantera de travertinos de Alfacar y de la calcarenita de La Escribana, en la siguiente tabla se incluye sus composiciones en elementos mayoritarios y determinados elementos minoritarios como Cu, Zn, Sr y Zr. La calcita es la principal fase mineral (84-100%), detectándose también cuarzo (14%), dolomita (<5%) y feldespatos (<1%). Así mismo, los travertinos están compuestos en su mayoría por calcita, siendo su proporción menor en el travertino de Alfacar(84-100%), donde también se ha detectado cuarzo (hasta ~14%), dolomita (< 5%) y feldespatos (< 1%).

	TRAVERTINO	CALCARENITA		
%	Travertino de Alfacar	Escribana E1	Escribana E2	Escribana E3
SiO ₂	14	2,83	1,79	2,38
Al ₂ O ₃	2,05	0,64	0,35	0,34
Fe ₂ O ₃	0,86	0,14	0,27	0,49
MgO	2,15	0,3	0,46	0,44
CaO	43,9	52,8	54,8	54,1
K ₂ O	0,38	0,09	0,06	0,07
P ₂ O ₅	0,08	0,09	0,07	0,1
Ppm	Travertino de Alfacar	Escribana E1	Escribana E2	Escribana E3
Cu	6,4	4,2	3,4	4,9
Zn	30,2	15,8	60,6	24,3
Sr	317	318	457	358
Zr	27	<10	<10	<10

Tabla 3. Análisis químico de elementos mayoritarios y minoritarios de calcarenitas y travertinos¹²¹.

El estudio petrográfico de la piedra de Alfacar revela una textura de precipitación química sobre restos vegetales, donde se reconocen restos fósiles de gasterópodos, en una matriz de calcita esencialmente micrítica. Se trata de un material de elevada y heterogénea porosidad, alcanzando los poros o coqueras hasta tamaños centimétricos.

121 Datos obtenidos de UROSEVIC, M.; SEBASTIÁN 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 100.

La calcarenita histórica de La Escribana, conocida como Piedra franca o de Santa Pudia, se caracteriza por presentar mayor cantidad de foraminíferos y serpúlidos, y menor tamaño de bioclasto. Se pueden distinguir dos tipos de porosidad primaria, una de pequeño tamaño parcialmente cementada, correspondiente a una porosidad intraclasto en foraminíferos y briozoos, y una porosidad interclasto irregular, no cementada y de mayor tamaño. Además, se pone de manifiesto una baja interconexión entre la porosidad intra e interclasto.

La medida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, permite la evaluación de las propiedades mecánicas de la roca. En las siguientes tablas se incluyen resultados publicados de la medida en el travertino de Alfacar y de la calcarenita de La Escribana, en cuanto a los parámetros de la velocidad de propagación de las ondas P y S, según tres direcciones ortogonales, así como la estimación de sus características mecánicas.

TRAVERTINO DE ALFACAR									
Densidad aparente (g/cm ³)	Velocidad de onda compresiva V _P (m/s)	Velocidad de onda de cizalla V _S (m/s)	V _P /V _S	Módulo de Young E _d (GPa)	Coeficiente dinámico de Poisson V _d	Coeficiente de anisotropía			
						Total ΔM _P (%)	Relativa Δm _P (%)	Total ΔM _S (%)	
1,81	X	4571	2149	2,13	22,7	1,5	1,6	3,2	
	Y	4679	2253	2,08	24,8				
	Z	4603	2188	2,10	23,5				
CALCARENITA DE LA ESCRIBANA – PIEDRA franca									
Densidad aparente (g/cm ³)	Velocidad de onda compresiva V _P (m/s)	Velocidad de onda de cizalla V _S (m/s)	V _P /V _S	Módulo de Young E _d (GPa)	Coeficiente dinámico de Poisson V _d	Coeficiente de anisotropía			
						Total ΔM _P (%)	Relativa Δm _P (%)	Total ΔM _S (%)	
1,85	X	3328	-	-	-	5,0	3,6	-	
	Y	3566	-	-	-				
	Z	3441	-	-	-				

Tabla 4. Caracterización mecánica del travertino de Alfacar y de la calcarenita de la Escribana o piedra franca¹²².

122 Datos obtenidos de UROSEVIC, M.; SEBASTIÁN PARDO, E.; RUIZ AGUDO, E. Y CARDELL, C. 2011.

2.11 Hipótesis sobre el proceso constructivo.

En la cúpula se puede observar el desarrollo de ideas estructurales tal como el planteamiento de despiece horizontal para la construcción sin cimbra. Las cúpulas de media naranja, como es el caso, se despiezan habitualmente por hiladas circulares, donde no se acometía la talla de cada piedra por separado, debido a la complejidad de las formas de cada una de las piezas¹²³. La construcción de una cúpula de revolución es uno de los casos más sencillos. Basta con disponer un cintrel¹²⁴ que, unido a un punto fijo, da la posición de cada hilada, que en el caso de las medias naranjas, la longitud es fija¹²⁵. Los salientes del tambor en los que apoya la cúpula plantean una suposición sobre el proceso constructivo que implicó la cúpula. De este modo, el saliente donde actualmente se ubica la crestería pudo servir de punto de acceso para construir los primeros anillos de la cúpula, que servirían de guía para los posteriores, según se muestra en la figura 60, hasta alcanzado una altura en la que resultara imposible acceder, momento en el cual, apoyando una cimbra en el vuelo interior de la corona del tambor, se remataría el resto de los anillos, donde los sillares sería elevados hasta la altura necesaria a través de guías y poleas. Esta hipotética cimbra ha sido descrita en la figura 61.

Por otro lado, alrededor del tambor existe una pequeña terraza protegida en todo su perímetro por una balaustrada de fábrica. El motivo de esta pequeña superficie aterrazada pudo deberse a la necesidad de una zona base para iniciar la elevación el imponente volumen del tambor, que a su vez, como se ha descrito, serviría de punto de apoyo para la construcción de la cúpula. Este tambor se iría construyendo en sucesivos anillos, respetando la composición de macizo y hueco para ventanas de las que se componen este elemento, según se observa en la figura 59.

De todo este proceso se deduce que el aspecto estético del tambor y la cúpula, no solamente se debió a formalismos estilísticos, sino que el proceso constructivo tuvo un papel importante en la composición del conjunto, en donde aparacen unos prominentes salientes que pudieron servir de base para la construcción de los sucesivos elementos en el tambor y crucero.

"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 108.

123 RABASA DÍAZ, ENRIQUE. *"Guía práctica de la estereotomía de la piedra"*, 2007.

124 Palo o cuerda.

125 HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO. *"Informe sobre la estabilidad de la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados, Valencia"*, 2002.

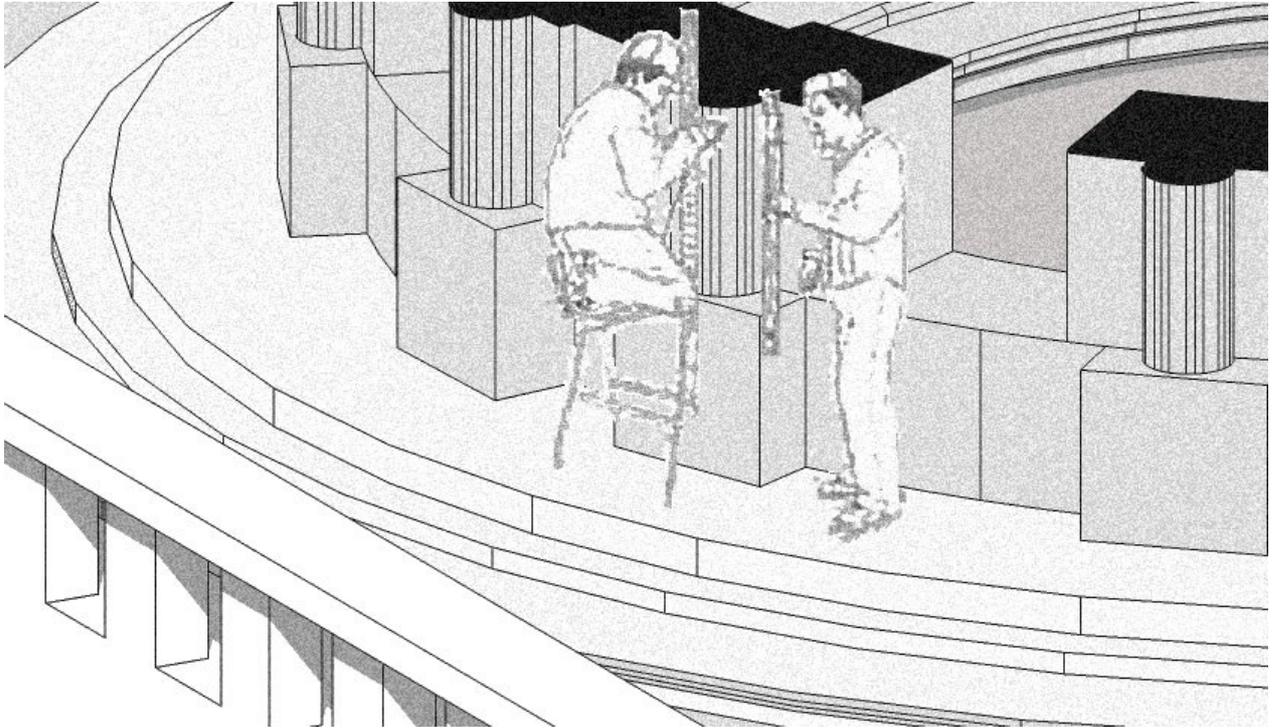


Figura 59. Hipótesis sobre el proceso constructivo del tambor (Elaboración propia).



Figura 60. Hipótesis sobre el proceso constructivo de los primeros anillos de la cúpula (Elaboración propia).

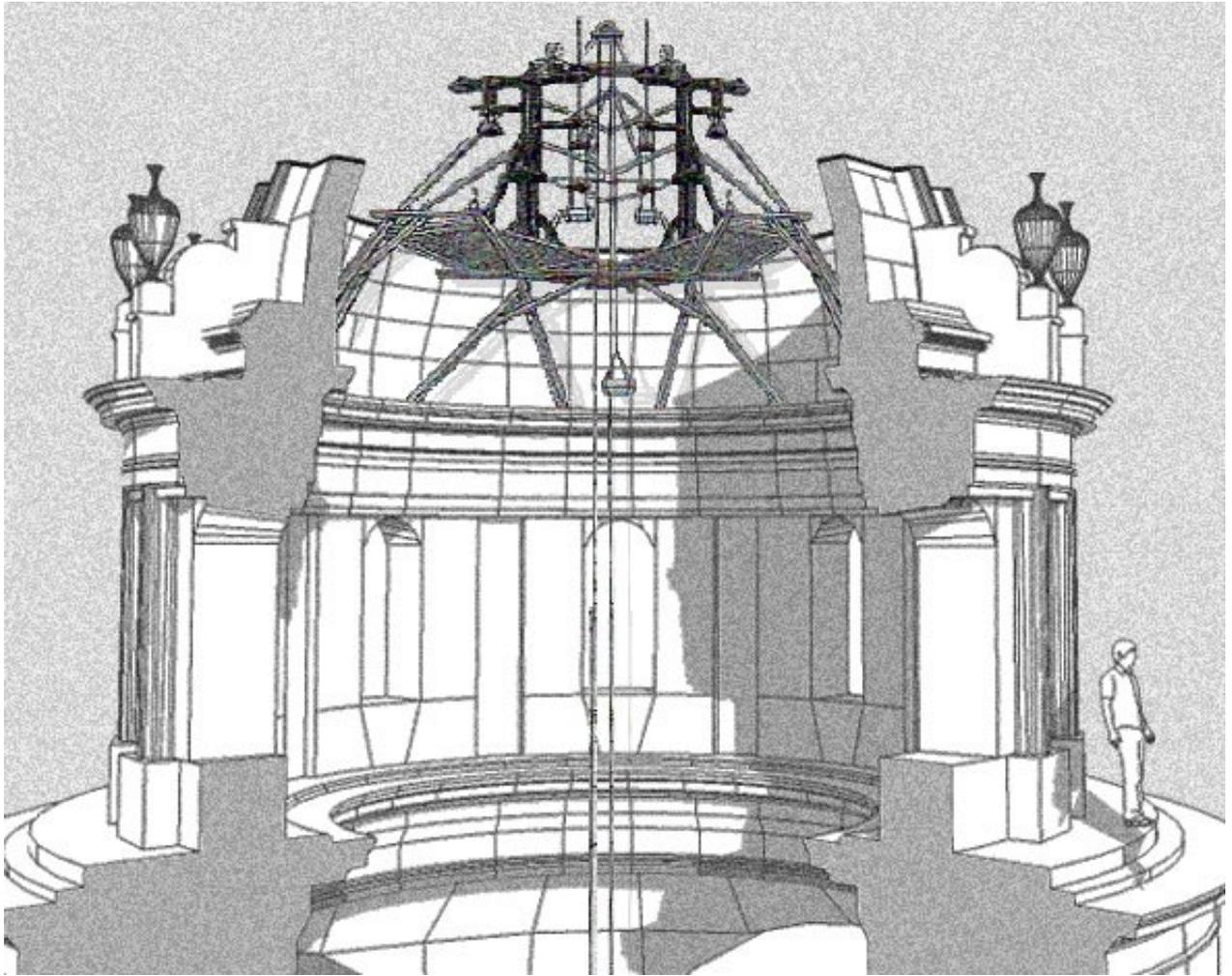


Figura 61. Hipótesis sobre el proceso constructivo de los anillos de altura superior de la cúpula (Elaboración propia).

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

3.1 Estado del arte.

La historia de la Arquitectura y la Construcción ha estado condicionada por elementos o circunstancias externas como el clima y las condiciones de abundancia o escasez de materiales. Los materiales más fundamentales han sido la piedra y la madera, los cuáles han influenciado a su vez la forma de construir de los pueblos.

La construcción de fábrica, término en el que se incluye la piedra, el ladrillo o el adobe, surge con los primeros asentamientos permanentes, con la agricultura y las primeras ciudades, con el nacimiento de la civilización. Hay un deseo evidente de permanencia frente al paso del tiempo. Las primeras construcciones tenían muros de fábrica sobre los que apoyaban troncos de árbol para

formar los suelos o techumbres. El siguiente paso consistió en cubrir el espacio también con fábrica. La manera natural de salvar un vano a base de pequeñas piedras o ladrillos es formar un arco, y el arco se inventa en Mesopotamia o Egipto hace unos 6.000 años. El cómo se pudo llegar a esta idea es un misterio, pero que no es algo evidente lo demuestra que otras culturas, por ejemplo los mayas o los incas, construyeron en fábrica durante siglos sin jamás llegar a la idea del arco.

A pesar de la larga presencia de las construcciones de fábrica en la historia, no fue hasta el año 1773 cuando se escribió sobre la primera técnica eficiente de análisis estructural, ideada por Coulomb, en la que postuló que el fallo en un arco de fábrica se produce cuando la línea de empujes ya no se halla contenida en la sección, idea basada 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 y que quedan resumidas en tres hipótesis sobre las estructuras de fábricas. La primera de ellas es que la obra de fábrica no tiene resistencia a tracción, la segunda es que la resistencia a compresión es infinita o bien que, las tensiones actuantes se mantienen siempre muy por debajo de la resistencia a compresión, y por último, no se produce deslizamiento entre las dovelas. El mismo Heyman, dentro del marco de los teoremas límites de la plasticidad, y aplicando estas hipótesis, expuso las grandes posibilidades que tiene aplicar el cálculo clásico desarrollado por Coulomb, planteando que cuando la línea de empujes se hace tangente con el contorno, se puede afirmar que se forma una rótula plástica. El número de rótulas que se requieren para que se produzca un mecanismo de colapso es fácilmente calculable. Así por ejemplo, para un arco considerado desde el punto de vista estructural convencional, el cuál se considera una estructura hiperestática de tercer grado, necesitaría tres rótulas para transformarse en una estructura estáticamente determinada, donde la cuarta rótula la convierte en un mecanismo¹²⁶. Este hecho motivó que se transformara en el principal método para visualizar mecanismos últimos de colapso, aunque al no aportar ningún tipo de información relativa a la deformación de la estructura, es una técnica escasamente aplicable en situaciones de servicio no asociadas al fallo de la estructura.

Posterior a estos avances en el análisis estructural de las obras de fábrica, surgió el Cálculo Elástico Lineal, en el que se considera la estructura como un cuerpo continuo, deformable y de un material cuyo comportamiento se puede describir mediante ecuaciones de la elasticidad lineal. A partir de la elasticidad lineal se desarrolló la técnica de la fotoelasticidad, basada en la propiedad de doble refracción que presentan ciertos materiales elásticos cuando se someten a un estado tensional al paso de la luz polarizada. Por su complejidad, el método fotoelástico normalmente se limita al análisis experimental de modelos sometidos a un estado tensional elástico plano.

126HEYMAN, JACQUES, 1995. "*Teoría y restauración de estructuras de fábrica*". Instituto Juan de Herrera, pp. 8.

Actualmente la técnica de los elementos finitos es una de las más generalizadas para el análisis de construcciones antiguas, principalmente porque permite una fácil modelización de geometrías complicadas. No obstante, el método de los elementos finitos es una técnica poco apropiada para el estudio de estructuras construidas con obra de fábrica por no presentar apenas resistencia a tracción y experimentar desplazamientos relativos entre sus bloques en las fases avanzadas de carga¹²⁷.

El tercer método de análisis estructural de construcciones antiguas es la Formulación Matricial Generalizada, que se trata de una extensión del cálculo matricial convencional considerando parte de los fenómenos no lineales propios de la obra de fábrica. Su formulación está planteada en términos de flexibilidad y se basa en el equilibrio de fuerzas externas e internas a nivel de sección, aplicables a estructuras reticulares planas o espaciales con elementos curvos o rectos, de sección constante o variable¹²⁸.

3.2 Justificación del modelo de análisis estructural elegido.

Fue Heyman quien expuso las grandes posibilidades que tiene aplicar el cálculo clásico desarrollado por Coulomb, aunque partiendo de los teoremas límite de la plasticidad. A la hora de estudiar las construcciones de fábrica, hay que tener en cuenta que en ellas no hay deformación elástica, por lo que no cabe ningún tipo de análisis que provenga de las relaciones entre tensión y deformación. Las fábricas no tienen flecha, tienen desplazamientos, corrimientos o traslaciones¹²⁹. Su carácter de agregado de elementos independientes sin relación de vínculo entre ellos, le confiere un comportamiento que plantea una infinidad de incógnitas hiperestáticas, por lo que el problema de la fábrica desde la elasticidad y la resistencia de materiales se hace ingobernable. La fábrica es, pues, un material esencialmente discontinuo y anisótropo¹³⁰. El enfoque elástico considera de los tres requisitos estructurales, resistencia, rigidez y estabilidad, el primero es el que rige el proyecto de una estructura. No obstante, en el caso de las estructuras de fábrica, dada la alta resistencia a compresión de estos materiales, el papel que tiene este parámetro dentro del cálculo es secundario, siendo la estabilidad el principal objetivo de estudio de estos elementos.

El edificio antiguo posee una gran estabilidad, derivada del peso de sus materiales y de las bajas esbelteces de sus elementos¹³¹. Una estructura de fábrica, en pura teoría, no tolera los cambios de

127 MASSANAS, M ; ROCA, P.; CERVERA, M, 2004. "*Análisis estructural de la Mezquita pequeña Santa Sofía de Estambul*". Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Monografía CIMNE nº – 89, pp. 6.

128 *Ibíd*, pp. 7.

129 Referencias tomadas de MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 18.

130 HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO. "*Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*". Madrid: Instituto Juan de Herrera, pp. 11.

131 *Ibíd*. pp 19.

posición en la carga para una forma dada. La realidad es que, dado que el peso propio de las fábricas es el determinante de su forma y diseño, las sobrecargas accidentales son siempre mucho menores y son asumidas, en general, por ligeras modificaciones de la línea de empujes que carecen de importancia¹³².

En este trabajo se realiza el estudio de la estabilidad por el método gráfico de los cortes de la traza. Este método, bastante intuitivo por su desarrollo, busca un estado posible de equilibrio a compresión, estudiando dos gajos enfrentados de la cúpula que forma un arco, de tal modo que se reduce el problema espacial de la cúpula al problema plano del arco¹³³. Este análisis se realiza dentro del marco teórico del Análisis Límite que desarrolla el profesor Heyman, aplicando sus tres hipótesis definidas anteriormente, las estructuras de fábrica tienen resistencia nula a tracción, infinita resistencia a compresión y fallo por deslizamiento. Con este método se puede obtener un coeficiente de seguridad geométrico en los elementos analizados en este trabajo, resultado de dividir el espesor del arco real por el espesor del arco límite, el cual proviene de la línea de empujes que representa un estado de equilibrio del conjunto.

3.3 El arco de fábrica.

Dado que este trabajo se centra en el estudio de la cúpula de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor, podría parecer que, al hacer referencia al arco, este documento se estaría desviando de su objetivo principal, pero el conocimiento del comportamiento estructural de este elemento constructivo se vuelve indispensable para un adecuado entendimiento de la forma de trabajo de la cúpula, la cuál posteriormente será descrita.

Una de las posibles definiciones del arco se puede encontrar en el libro de José Antonio Mas-Guindal, él cuál lo define como una estructura de directriz curva o poligonal que salva una luz y deposita la carga en los apoyos mediante una fuerza inclinada llamada empuje¹³⁴. La existencia de esta fuerza es determinante para su equilibrio, por lo que sin ella la estructura no existe.

Un arco típico se construye apilando piedras¹³⁵ unas al lado de las otras, asentadas sobre mortero sobre una estructura auxiliar de madera o cimbra. La cimbra da la forma al arco, donde se empiezan a colocar las piedras a partir de los arranques y colocada la última de ellas en el centro, la cuál se conoce como la clave, el arco queda terminado. Al bajar la cimbra una vez completado el

132 *Ibid.* pp 27.

133 HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO, 2004. "*Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*". Madrid: Instituto Juan de Herrera, pp. 444.

134 *Ibid.* pp 36.

135 Conocidas como "*dovelas*".

arco, las piedras tienden a caer hacia abajo. Así, una dovela que intenta caer empuja a las dos dovelas colindantes que contrarrestan ese empuje, y los empujes se van transmitiendo, incrementados por los pesos. Si la forma del arco es correcta, y su espesor suficiente, estos empujes y contraempujes se anularán entre sí y el arco permanecerá en equilibrio. El arco debe estar apoyado firmemente contra un elemento que resista el empuje que transmite a los arranques.

Alberti fue el primer teórico artístico del Renacimiento, una figura emblemática por su dedicación a las más variadas disciplinas, quien se mostró constantemente interesado por la búsqueda de reglas, tanto teóricas como prácticas, capaces de orientar el trabajo de los artistas mencionando algunos cánones. Aunque leyó diligentemente a los antiguos como Vitruvio, Plinio y Frontino, en modo alguno su obra no es una mera recopilación de opiniones diversas, sino el fruto de sus investigaciones, no sólo de las fuentes escritas sino de los monumentos existentes, así como de su propia experiencia profesional. El resultado es un compendio de todo el saber constructivo de su época. Su influencia en este sentido ha sido enorme, apareciendo citado en la práctica totalidad de los tratados de construcción hasta el siglo XIX. El tratado de Alberti contiene algunas reglas estructurales y observaciones constructivas muy interesantes. De este modo, recomienda que los arcos se hagan de dovelas de gran tamaño y que éstas sean iguales entre sí: "*Los cuños de que se hace el arco querría que fuesen todos de piedra ancha, y cuanto pueda ser grande, porque la naturaleza de cualquier cuerpo es mas indisoluble, la que esta llegada y unida por natura que no la que es conjunta y compuesta con la mano, y arte de los hombres, y conviene que sean entre si iguales, para que como en balanza correspondan las cosas diestras a las siniestras en haz, grandeza, peso y en las demás semejantes*". También establece la dirección de las juntas entre dovelas, que deben dirigirse hacia el centro según describe "*En todo arco harás que las apegaduras de las junturas, y los cerramientos se enderecen a su centro*". Esta última observación, por obvia, suele pasarse por alto, pero esta prescripción es fundamental para evitar los posibles fallos por deslizamiento. Recomienda asimismo que la clave sea una piedra grande.

Otro criterio a tener en cuenta es que el arco de dovelas de fábrica tiene que trabajar a compresión, de lo contrario aparecerán flexiones que, al no poder ser admitidas por el sistema de unión a base de juntas, transformaría la estructura en un mecanismo¹³⁶.

El arco empuja de forma permanente contra los arranques, hecho que se describe fielmente en un antiguo proverbio árabe que dice que "*el arco nunca duerme*¹³⁷". Los estribos, las construcciones más o menos complicadas que resisten el empuje de los arcos y de las bóvedas y lo transmiten

136 Referencias tomadas de MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 37.

137 Artículo de HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO, 2001. "*Mecánica de las bóvedas de fábrica: el enfoque del equilibrio*". Versión revisada de la conferencia invitada al 3rd. International Seminar on Historical Constructions, Guimaraes 7-9.

hasta el terreno, son los que dan firmeza a los edificios. Conocer el empuje de los arcos para poder dimensionar adecuadamente sus estribos ha sido el problema central de la construcción en fábrica desde sus orígenes hasta la actualidad.

Existe un primer problema de lenguaje, puesto que hoy día asociamos el término empuje al concepto de fuerza medida por ejemplo en kN o toneladas. Los antiguos constructores no distinguían claramente entre el empuje y su consecuencia, que era el estribo. Éstos medían el empuje de los arcos por su efecto. De este modo, consideraba que un arco empuja mucho si requiere grandes estribos, y poco si estos son pequeños. Por ejemplo, para Tosca¹³⁸, el cimborrio de la catedral de Valencia no produce empuje porque el propio espesor de la pared es suficiente, no habiendo estribos propiamente dichos. Actualmente calculamos el empuje de los arcos basándonos en la teoría de las estructuras, esto es, aplicando las leyes de la mecánica y de la resistencia de materiales. Este tipo de cálculo, que podríamos denominar científico es relativamente reciente, puesto que nace a finales del siglo XVII, se desarrolla durante el siglo XVIII y su empleo sólo se generaliza a lo largo del siglo XIX. El Panteón de Roma, Santa Sofía, las catedrales góticas, en resumen, los mejores ejemplos de la construcción de fábrica son muy anteriores a este cálculo científico. Resulta evidente, sin embargo, que estas grandes obras del pasado no fueron hechas por aficionados, dado que la sabia disposición de sus formas, su estructura interna, su construcción, manifiestan una seguridad y una maestría que sólo pueden ser el fruto de un profundo conocimiento de la mecánica de las fábricas. Antes del cálculo científico hubo otro cálculo, un cálculo tradicional fruto de otra teoría de las estructuras de fábrica.

Consideremos la mitad de un arco sometido a su propio peso. Para que se sostenga, es preciso aplicar un cierto empuje en su clave. Este empuje puede ser suministrado por un apeo, por ejemplo, o por el otro semiarco. En el semiarco tomado de Snell, de 1846, figura 62, se ha aplicado la noción de línea de 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. En la junta de la clave actúa un cierto empuje horizontal, donde la condición de simetría fija la dirección horizontal del empuje en la clave. Es preciso componer este empuje con el peso de la primera dovela, aplicado en su centro de gravedad. Para componer ambas fuerzas se prolongan sus líneas de acción, donde la diagonal del paralelogramo resultante es el empuje que se transmite a la segunda dovela. El centro de empuje es el punto de corte con la primera junta. Posteriormente se compone esta fuerza con el peso de la segunda dovela y, así sucesivamente, se van calculando los empujes para cada junta. Estos 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

138 Arquitecto, filósofo, matemática, y astrónomo, comienza su Tratado de Arquitectura abordando el tema de la traza o proyecto de bóvedas.

forma justa para resistir las cargas. Nótese que la línea de empujes no coincide con este polígono de empujes, puesto que ésta 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. De este modo, se identifica una relación inherente entre el polígono de empujes y una cadena funicular.

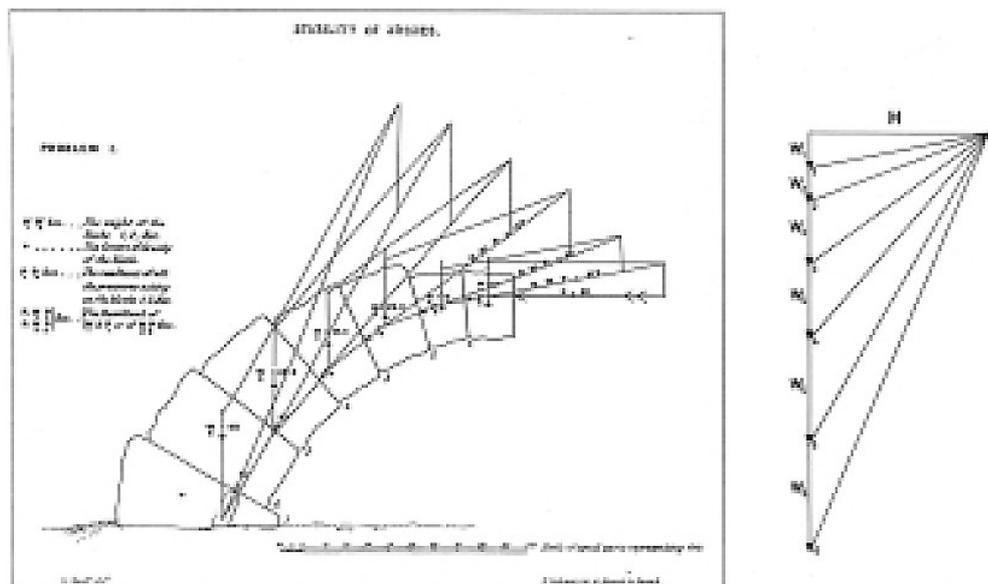


Figura 62. Equilibrio de un arco simétrico, Snell 1846. La condición de simetría equivale a suponer el empuje horizontal en la clave. Se supone un cierto empuje aplicado y, luego, se van componiendo sobre el propio dibujo las fuerzas a partir de la clave. Los puntos de la línea de empujes son el resultado de la intersección de las resultantes con los planos de junta. La composición de fuerzas podría haberse realizado en un diagrama a parte, la cuál se representa por el polígono de fuerzas que se ha añadido a la derecha¹³⁹.

Según unas palabras de Robert Hooke¹⁴⁰, "... del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así, pero invertido se sostendrá el arco rígido...". El hilo tenso debe de deformarse adaptándose a la forma de la carga para que haya equilibrio, de ahí su denominación funicular. Por el mismo motivo, la inversión de esa forma, a la que se denomina antifunicular, debe de reproducir el sistema de compresión. El problema de la estructura antifunicular a compresión es que no puede modificar su forma a voluntad de la aplicación de la carga como en el caso del hilo, de ahí que el trazado sea el problema central del arco. El conocimiento del comportamiento de un arco pétreo es algo que ha ocupado varios siglos, por lo que la ingeniería del siglo XIX utilizó del polígono funicular para sus

139 HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO, 2004. "Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica". Madrid: Instituto Juan de Herrera, pp. 41.

140 Véase HOOKE, ROBERT S.R.S, 1977. "Lecciones de Potencia Restitutiva". Ed. Alpuerto Intemac.

construcciones en tiempos en donde no existía otra herramienta¹⁴¹. La aparición del ordenador y de los programas de dibujo asistido han puesto otra vez los métodos gráficos en uso, dado que no son más que una verificación elemental del equilibrio.

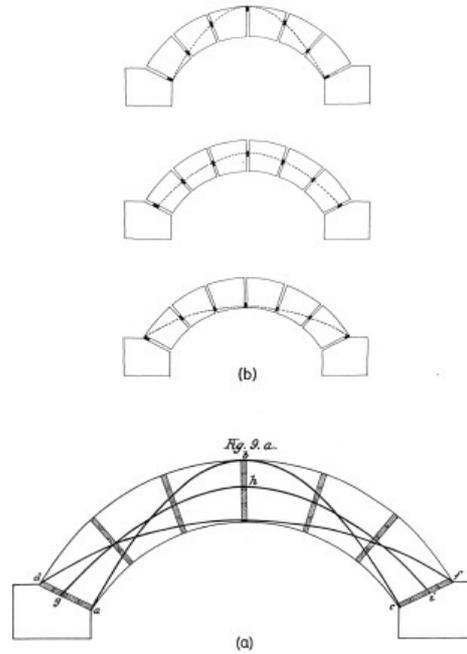
3.4 Ensayos de Barlow .

Las ideas sobre líneas de empujes pueden parecer quizás obvias hoy día, cuando en los estudios de estructuras se manejan todavía conceptos y herramientas de estática gráfica. No lo fueron cuando este concepto se difundió, hacia 1840. En efecto, mientras que en los métodos de rotura de Coulomb, las juntas de rotura tenían una realidad física, que podía verificarse en los ensayos de colapso de arcos, las líneas de empujes no se pueden ver. De este modo, Young, hacia 1816, decía que era una "*curva imaginaria*" en el mismo sentido que el "*centro de gravedad es un punto imaginario*". En 1846 el ingeniero inglés W. H. Barlow publicó una serie de ensayos, figura 63, en un artículo titulado "*Sobre la existencia de la línea de empuje horizontal constante en los arcos*". Barlow quería demostrar mediante experimentos las ideas de Moseley¹⁴². Entre los modelos que propone hay uno particularmente útil para comprender el concepto de línea de empujes y algunas de sus propiedades fundamentales. Se trata de un arco de seis dovelas separadas por juntas compuestas por tablillas de madera. Barlow dibuja primero, mediante un método gráfico, tres posibles líneas de empujes, la de empuje mínimo *abc*, la de empuje máximo *df* y una tercera, que se aproxima a la línea media del arco, *ghi*. Después, elegida una cierta línea, retira las tablillas a las que no corta, y observa que el equilibrio se mantiene. Realiza la misma operación para las otras líneas, con el mismo resultado. Las tablillas marcan, necesariamente, la trayectoria de los empujes. Comprueba, además, que si las tablillas de separación no están dispuesta siguiendo la forma de una cierta línea de empujes, el equilibrio es imposible. Otro modelo ideado por Barlow iba dirigido específicamente a ver, directamente, la forma de la línea de empujes. Se trataba 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

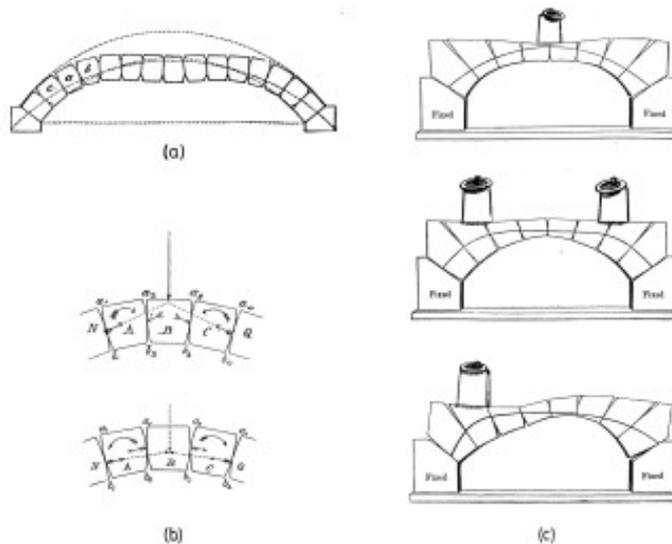
141 Referencias tomadas de MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 41-42.

142 Fue Moseley quien se planteó por primera la pregunta de cuál sería la verdadera línea de empuje dentro de un arco, y trató de determinar su posición. Para ello necesitó realizar otras afirmaciones, además de las de equilibrio. En los inicios del análisis elástico enunció un "*nuevo Teorema de la Estática*" con el objetivo de obtener las reacciones de las estructuras hiperestáticas rígidas, que fue el Principio de la Mínima Reacción. Aplicando este principio a los arcos concluyó que el empuje real debía ser el mínimo. Otro enfoque era proyectar el arco con la forma de la línea de empujes, suponiendo entonces que la línea de empujes real coincidiría con la línea media del arco. Como alternativa, se podían colocar tres articulaciones, una en la clave y otras dos en los arranques, lo que convertía el arco en uno triarticulado isostático y la posición de la línea de empujes quedaba fijada.

las dovelas, e interpreta, correctamente, que esto se debe a la diferente forma del arco y de la línea. La línea de empujes nos da la forma que debería tener el arco de fábrica si quisiéramos que solo trabajase a compresión simple. Este empuje en toda la directriz es la suma vectorial de dos esfuerzos, el cortante y el empuje horizontal constante en todo el arco.



Ensayo para «demostrar la existencia en la práctica de la línea de empujes» propuesto por Barlow en 1846. (a) El modelo del arco está compuesto por dovelas separadas por juntas de tablillas; Barlow ha dibujado tres posibles líneas de empujes. (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.



Modelos de arcos con dovelas de juntas convexas. (Barlow 1846 y Jenkin 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.

Figura 63. Ensayos de Barlow.

Ante los infinitos estados de equilibrio que un arco puede albergar, problema que es a priori irresoluble, el analista se encuentra con la dificultad de encontrar el estado único de equilibrio de la estructura que responde al sistema de cargas aplicado. Si el peso se distribuye alrededor del arco, la forma de la línea de empujes es una catenaria, y hay un espesor mínimo para ese arco que alberga la catenaria. Según la regla del tercio central, la línea de empujes estaría dentro de ese tercio, con lo que se evitarían las indeseadas tracciones y el coeficiente de seguridad geométrico sería 3¹⁴³. Con esta regla del tercio central definimos el lugar de todos los empujes posibles que someten al arco a compresión compuesta, es decir, siempre que el empuje pase por esa zona del tercio central, puede asegurarse que el arco está solo comprimido, hecho que sucede en pocas configuraciones de carga para un arco dado, es decir, cumpliendo esta regla, al menos en teoría, el arco exento debe de ser estable, si el empuje se sale de esta zona terciada central, la dovela comenzará a tener tracciones y regiones del arco estarán en tracción compuesta¹⁴⁴. Existen dos teoremas fundamentales en los que se basa la obtención de la línea de empujes.

3.5 El teorema de la seguridad . Equilibrio.

El primer teorema nos dice que "*si se puede hallar una posición cualquiera para la línea de empujes, contendida dentro de la fábrica, la estructura es estable y el colapso no sucederá para la carga dada*"¹⁴⁵. Este teorema implica que la carga de colapso es única, pero que puede haber varios mecanismos que conduzcan a la misma carga de colapso. De este modo, el arco que ha formado cuatro articulaciones que se alternan en el trasdós y el intradós, se convierte en un mecanismo cinemáticamente admisible que está en equilibrio inestable. De este modo, el teorema del equilibrio considera las formas posibles de la línea de empujes que llevan al colapso, y de esta consideración puede predecirse el mismo, puesto que el colapso acontece en un arco cuando se forma un número suficiente de rótulas que lo convierten en mecanismo.

En el arco se verifica el teorema de la seguridad, pues solamente habrá que demostrar que la línea de empujes se mantiene dentro del perímetro del arco de la fábrica para un estado de cargas que no viole la condición límite del material. La potencia del Teorema radica en que el conjunto de líneas de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser elegida libremente. Elegida una solución de equilibrio a compresión, se podrán aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones y deducir un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrica. Este enfoque del equilibrio, que se deduce del Teorema de la Seguridad, es la base de cualquier análisis de

143 Referencias tomadas de MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 59.

144 *Ibid.* pp 60.

145 *Ibid.* pp 60.

estructuras de fábrica. Este teorema constituye "*la roca sobre la que se cimenta hoy día toda la teoría del cálculo de estructuras*"¹⁴⁶. El enfoque del equilibrio está implícito en las reglas geométricas de los maestros antiguos y fue empleado por los grandes ingenieros de los siglos XVIII y XIX¹⁴⁷. Este hecho invalida la creencia de que los arcos que han modificado su forma durante los años, a los que erróneamente se les dice que tiene flecha excesiva cuando no existe estado elástico que la garantice, pueden colapsar por tener formas alejadas de sus configuraciones geométricas originales. Un arco que perdió su forma original, está trasladado de su forma y tiene sensiblemente la misma línea de empujes que tenía antes de su cambio de forma, por lo que es igualmente estable que el original. De todo esto deriva el hecho de que el cambio de forma en un arco no tiene el mismo sentido mecánico que en una estructura de rigidez elástica.

Aplicando estos conceptos al arco, el teorema de la seguridad establece que un arco no se hundirá, es decir, será seguro si es posible dibujar una línea de empujes en su interior. Las pequeñas variaciones de las condiciones de contorno o de la compatibilidad interna, como por ejemplo el contacto entre dovelas, que conducen a agrietamientos y a variaciones bruscas de la posición de la línea de empujes alterando significativamente los esfuerzos internos, no afectando a la estabilidad del arco, que soportará estas agresiones del medio sin problemas. La seguridad en un arco no se expresa por un número de resistencia sino por las condiciones reales de la línea de empujes que para cada arco serían diferentes¹⁴⁸. Es por ello, por lo que la seguridad hay que establecerla en términos de geometría, y no de resistencia, puesto que una estructura de fábrica está trabajando a 40-10 veces menos que su tensión de rotura del material, por lo que no es significativa. Siguiendo de nuevo a Heyman, el estado del arco cumple las condiciones de equilibrio de cedencia y de mecanismo. Estas condiciones verifican el teorema de la seguridad y garantizan que la carga es menor o igual que la de colapso. Según la regla de los cinco minutos de Heyman "*si resiste cinco minutos, resiste quinientos años*", lo que refleja que si ha resistido los primeros cinco minutos es debido a que ha encontrado una línea estable.

3.6 El teorema de la inseguridad. Rotura.

El segundo teorema de la teoría de rotura de fábricas establece que "*si es posible encontrar un mecanismo de colapso cinemáticamente admisible, la estructura se hundirá*"¹⁴⁹. El término cinemáticamente admisible significa que en un desplazamiento virtual de la estructura la suma de

146 HEYMAN, JACQUES. "*La ciencia de las estructuras*", 2001. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

147 HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO. "*Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*". Madrid: Instituto Juan de Herrera.

148 *Ibid.* pp 65.

149 Véase MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 63.

fuerzas exteriores e interiores produzca un trabajo positivo. Debido a que el colapso se produce por formación de mecanismos cinemáticamente admisibles también ha sido denominado teorema *cinemático*. Una estructura alcanza una configuración de colapso cuando desarrolla el número suficiente de rótulas o articulaciones para convertirse en un mecanismo¹⁵⁰. 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. En el caso de los arcos de fábrica, dada la inexistencia de tracciones, el trabajo de las fuerzas interiores es cero, y el teorema adopta una forma más simplificada, la cuál se resume en que el colapso se producirá en una configuración de rotura determinada, si en un desplazamiento virtual el trabajo de las fuerzas exteriores es mayor o igual a cero, o lo que es lo mismo, si el mecanismo resultante de la aparición de las rótulas está en equilibrio inestable. No obstante, el hecho de que el colapso no se produzca para una cierta distribución de articulaciones no significa que el arco sea seguro, puesto que puede existir otra configuración distinta que conduzca al hundimiento. Por este motivo se llama también teorema de la *inseguridad*.

3.7 La cúpula.

Una cúpula no es más que una estructura que traslada carga al suelo al igual que un pilar hueco, con la diferencia sobre este, que esa carga es trasladada según un empuje de arco, en función de la tangente a la curva de la cúpula. Esa inclinación, al igual que en el arco, pues no es otra cosa distinta, 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 conjunto¹⁵¹.

Desde los albores de la civilización se construyeron cúpulas falsas con materiales variados, incluyendo las cubiertas tradicionales, que todavía están en uso, de las jurtas del Asia central, de los iglúes esquimales, y en la arquitectura funeraria, como por ejemplo en los *"tholos"*. Uno de los tholos más relevantes es el Tesoro de Atreo en Micenas, cuya construcción se estima tuvo lugar en 1250 a.C. Es una construcción de piedra adintelada que constituye por tanto una falsa cúpula, con un diámetro de 14,5 m. El uso de la cúpula, sin embargo, fue poco común en la antigua Grecia, y durante el Imperio romano se comienzan a levantar las primeras cúpulas verdaderas. Los más grandes complejos termales y palacios romanos incluyeron cúpulas como elemento de cobertura.

150 Ibíd. pp 63.

151 Véase MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 87.

Los comentarios de Alberti sobre las cúpulas demuestran el profundo conocimiento del funcionamiento estructural que tenían los arquitectos italianos del Renacimiento, que ya quedó de manifiesto en el pliego de condiciones escrito por Brunelleschi para la construcción de la cúpula de Santa María del Fiore. Alberti explica el funcionamiento estructural de las cúpulas esféricas diciendo que se componen de "arcos" y "cornijas¹⁵²", y efectivamente este hecho es el 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. Alberti cita textualmente, *"Pero entre las bóvedas de todas, solo ay una que es la recta spherica, que no pide cimbras pues ella cierto no consta solamente de arcos, sino también de cornijas. Quien podría contar o pensar, quanto sean el uno y otro destes innumerables apegados, aplicados, cortándose entre si en ángulos iguales y desiguales, de suerte, que en cualquier lugar por toda la semejante bóveda entrecortares alguna piedra, entiendas que tu has puesto cuño de muchos arcos y cornijas, y el que sobrepusiere cornija a cornija, y el que echare un arco sobre otro fingireys que quiere arruinar la obra, de donde comendara, yendo principalmente todos los cuños o valsares que miran a un centro con igual ahincó y fuerça"*. También sabía Alberti que la cúpula poligonal es, en determinadas condiciones, autoportante y puede construirse sin cimbra.

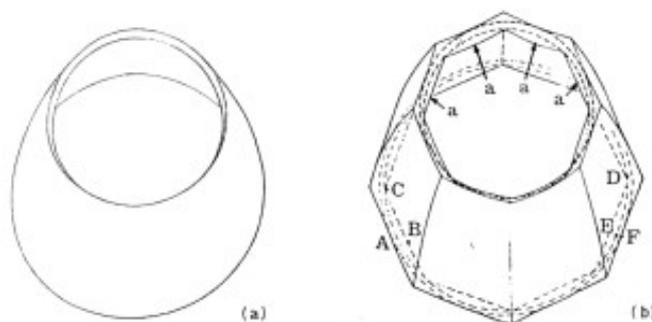


Figura 64. Estabilidad de cúpulas semiesféricas y poligonales. (a) la cúpula semiesférica es estable en todas las etapas intermedias de la construcción siempre que se ejecute realizando anillos completos, ya que el último anillo actúa como una clave; (b) la cúpula poligonal es estable si es capaz de contener dentro de su espesor un anillo circular. (Mainstone 1977) .

La teoría de rotura de las bóvedas se puede establecer desde los mismos postulados, hipótesis de partida y teoremas establecidos para los arcos, es decir, si se puede encontrar un sistema de grietas provocado por el ligero cedimiento de apoyos, en el que la membrana de empujes permanezca dentro del interior de la materialidad de la cúpula, es decir, entre su intradós y extradós, la cúpula estará en equilibrio.

152 Cornisas.

3.8 Análisis límite.

Las estructuras de gravedad o de fábrica pueden peritarse por métodos basados en la geometría, ya que su estabilidad es una condición más restrictiva que su resistencia, por lo que los métodos vectoriales están aconsejados¹⁵³. Estos métodos se basan en verificar, de forma geométrica y vectorial, el equilibrio estático de una estructura comprobando de forma simple su estabilidad global, por lo que son previos a actuaciones más especializadas. En estos se utilizan los conceptos elementales del algebra vectorial, asociando las acciones de una estructura a vectores deslizantes, es decir, fuerzas con magnitud, dirección y sentido. Así la suma de varias fuerzas dará otra fuerza que tiene como origen el de la primera, y extremo el de la última. Esa suma de todas las fuerzas forma un polígono al que se le denomina polígono de las fuerzas, donde es condición para el equilibrio el que esté cerrado.

En este trabajo se realiza el estudio de la estabilidad por el método gráfico de los cortes de cada una de las trazas. El cálculo que se realiza permite determinar el grado de seguridad de la estructura y entender el funcionamiento de la misma. De este modo, el método de los cortes busca un estado posible de equilibrio a compresión, estudiando dos gajos enfrentados de la cúpula que forman un arco, que tal como indica Santiago Huerta, "*...se reduce el problema espacial de la cúpula al problema plano del arco*"¹⁵⁴. El análisis se realiza dentro del marco teórico del Análisis Límite que desarrolla el profesor Jacques Heyman, quien plantea tres hipótesis para su aplicación en las fábricas. Estas hipótesis se resumen a que las estructuras de fábrica tienen nula resistencia a tracción, infinita resistencia a compresión y fallo por deslizamiento imposible. Bajo estas tres hipótesis de comportamiento del material, Heyman determina el "*Teorema de la Seguridad*", el cuál define que un arco de fábrica es seguro si es posible dibujar una línea de empujes en su interior. 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 en 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 límite¹⁵⁵. Es importante resaltar que no es necesario encontrar la línea de empujes real, sino cualquiera que equilibre el arco y esté en el interior del mismo. La holgura que tenga el trazado de las líneas de empujes entre el trasdós y el intradós determinarán el grado de seguridad, siendo este un coeficiente de seguridad geométrico¹⁵⁶.

153 Referencias tomadas de MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "*Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban*". Editorial Munilla Lería, pp 73.

154 HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO, 2004. "*Arcos, bóvedas y cúpulas: geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*". Madrid: Instituto Juan de Herrera, pp 444.

155 HEYMAN, JACQUES, 1999. "*El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica*". Madrid: Instituto Juan de Herrera, pp 24.

156 HEYMAN, JACQUES, 1995. "*Teoría y restauración de estructuras de fábrica*". Instituto Juan de Herrera. Madrid; HEYMAN, JACQUES, 1999. "*El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica*". Madrid:

El análisis se va a realizar directamente sobre la cúpula principal con el tambor incluido, introduciendo el efecto de la linterna a través del peso que ésta transmite a la corona superior de la cúpula. Por este motivo, el primer paso ha sido obtener la carga superficial que transmite la linterna al anillo superior de la cúpula. A partir del modelado tridimensional con el programa informático Autocad se calculó el volumen total de la linterna, el cuál presenta un valor de $V_{linterna} = 17.2916 m^3$. El peso se calculó considerando que toda la cúpula está construida en piedra franca de la cantera de La Escribana, con una densidad de $\rho_{cupula} = 18.50 KN/m^3$, obteniendo un valor para el peso de la linterna de $P_{linterna} = 319.8946 KN$. Realizando un equilibrio de momentos con respecto al eje central del conjunto, dada la disposición pareada de las costillas, se puede demostrar que el peso de la linterna se equidistribuye entre las dieciséis costillas de los que se compone la cúpula. Por este motivo, el peso se repartirá entre estos elementos, lo que supondría una carga aproximada de 20 KN por cada nervio, que será incluida en el análisis de la estabilidad como una carga puntual en el centro de gravedad de la primera dovela para simplificar el cálculo.

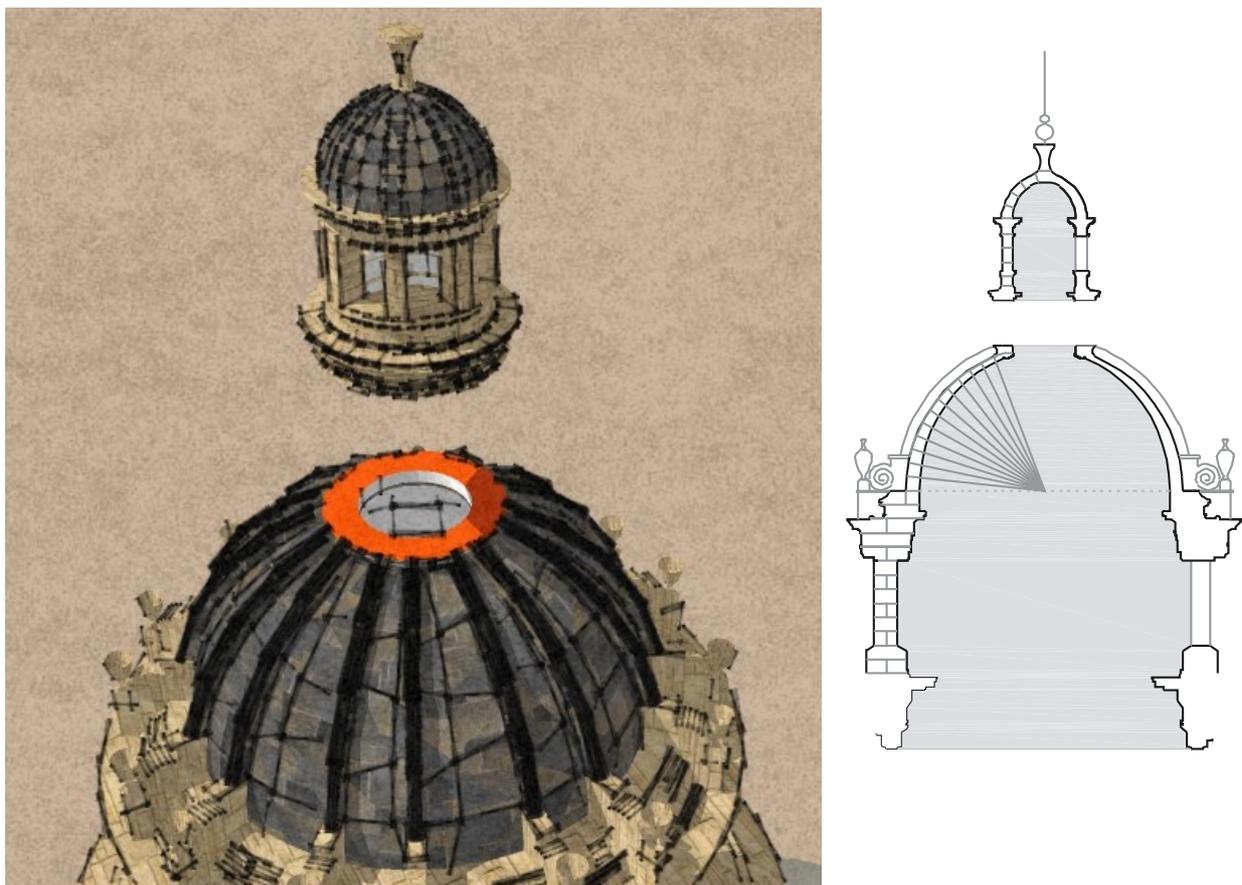


Figura 65. Superficie de transmisión de la carga de la linterna a la cúpula (Elaboración propia).

Instituto Juan de Herrera; HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO, 2004. "Arcos, bóvedas y cúpulas: geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica". Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Como se ha indicado, en la cúpula se disponen dieciséis costillas las cuáles se distribuyen de forma pareada , formando cada par de costillas un ángulo de 18° , y entre pares de costillas uno de 27° , según se observa en la planta del conjunto, figura 45. De este modo, la cúpula se puede dividir en 16 gajos de 22.5° con una composición idéntica, en la que se incluye uno de los dieciséis costillas. Este gajo se obtiene realizando los dos planos de sección formando 9° y 13.5° respectivamente desde el eje central del nervio, el cuál se supone el centro principal de cada sector, según se observa en la figura 66. No obstante, esta sector es demasiado complejo para el análisis de la estabilidad mediante el método de los cortes, dado que no presenta una simetría con respecto al eje central, obteniendo una sección plana alabeada para el análisis del conjunto, lo que dificultaría excesivamente el análisis gráfico. Por este motivo, con el fin de obtener sectores simétricos con respecto al eje central del nervio, se van a analizar dos secciones tipo dentro del conjunto. En primer lugar, se estudia un sector de 18° , tomando 9° a cada lado del nervio, considerando que soporta la misma carga que el sector real de 22.5° , lo cuál conlleva un factor de seguridad debido a la mayoración del esfuerzo. Con este primer sector, nos acercaremos a la mejor forma de trabajo del conjunto. Una vez conocido el comportamiento más adecuado de la cúpula, se analiza un sector de 27° tomando 13.5° a cada lado del nervio, con el fin de incluir el sector real dentro del estudio. Para este segundo sector se ha tomado la verdadera carga que transmite la linterna a la cúpula, obtenida multiplicando la tensión superficial que transmite la linterna a la cúpula, $\sigma_{linterna}=44.1508 \text{ KN/m}^2$, por el área correspondiente al sector estudiado, $A_{sector27}=0.53 \text{ m}^2$, obteniendo una carga total de $P_{sector27}=23.40 \text{ KN}$.

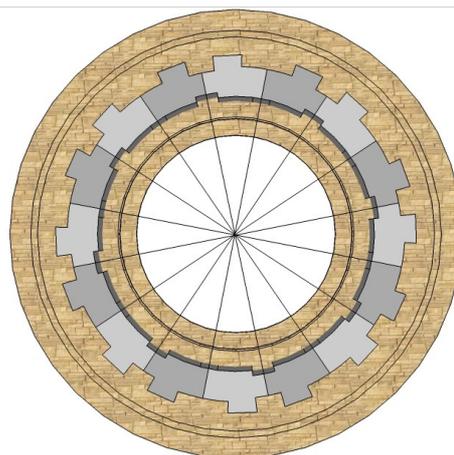


Figura 66. División de la planta en dieciséis sectores de 22.5° (Elaboración propia).

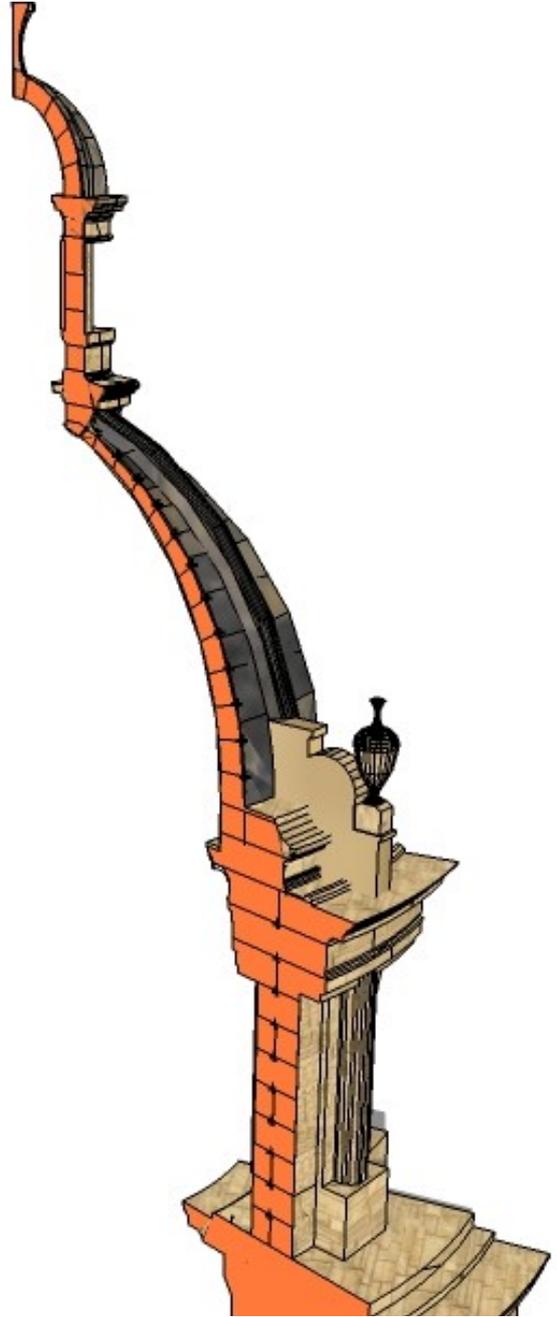


Figura 67. Sector real de trabajo de la cúpula (Elaboración propia).

CAPÍTULO 4

4. HIPÓTESIS Y RESULTADOS.

Como se ha definido anteriormente, la cúpula se compone de dieciséis costillas dispuestas sobre la cúpula para presentar un carácter de refuerzo para soportar la carga que transmite la linterna a la cúpula. A partir de este esquema, con el objetivo de estudiar el funcionamiento estructural del conjunto de la cúpula y las costillas, se han analizado tres situaciones posibles dentro de la estructura. En la primera hipótesis se considera que el peso de la linterna se transmite directamente a las costillas, lo cual implica que la cáscara de la cúpula se autosustenta, sin recibir más carga que su propio peso. Esta primera hipótesis implica una independencia total del nervio con respecto a la

cáscara, por lo que este nervio no se ha considerado a la hora de obtener los pesos y centros de gravedad de la sección plana analizada. De este modo, se plantea el análisis sobre un sector radial que comprende 1/20 de la parte del total de la cúpula con un ángulo de 18° y se considera la división de las hiladas tal como aparece en la figura 68. A partir del modelado tridimensional con el programa informático Autocad se calculó el volumen de cada pieza y se localizó su centro de gravedad, datos que quedan resumidos en la tabla 5. El peso se calculó considerando que la cúpula está construida en piedra franca de la cantera de La Escribana, con una densidad de 18.50 kN/m³. Se analiza la cúpula como un elemento sometido únicamente a su propio peso, al considerar que las demás sobrecargas posibles de viento, nieve u otras acciones externas posibles, son despreciables en comparación a la magnitud del peso propio. Se considera que la sección analizada no cuenta con más sistema de contrarresto que el propio paramento del tambor en el que apoya, realizando el cálculo sobre un solo gajo de la cúpula considerando que existe uno igual simétrico que lo equilibra. Tras realizar una serie de aproximaciones, las cuáles quedan resumidas en el Anexo A de este documento, se consiguió encajar una línea de empuje, figura 69, con un factor de seguridad de 1.3 obtenido de dividir el ancho real entre el ancho eficaz de la sección.

DOVELA A	P(KN)	V(m ³)	X _g	Y _g	DOVELA	P(KN)	V(m ³)	X _g	Y _g
CÚPULA					TAMBOR				
1	2,6528	0,1434	0,3560	11,6954	14	21,9040	1,1840	4,8753	6,7658
2	1,2728	0,0688	0,8748	11,3235	15	19,1270	1,0339	4,0546	6,4015
3	1,8222	0,0985	1,3019	11,0679	16	22,5256	1,2176	4,0553	5,8997
4	2,3976	0,1296	1,7057	10,7686	17	38,6761	2,0906	4,7309	5,4051
5	3,0040	0,1624	2,0780	10,4335	18	32,2731	1,7445	4,7322	4,8813
6	3,6223	0,1958	2,4158	10,0651	19	28,7840	1,5559	4,8211	4,3779
7	4,2309	0,2287	2,7163	9,6668	20	19,0143	1,0278	4,8589	3,8523
8	4,8100	0,2600	2,9770	9,2423	21	17,4899	0,9454	4,8689	3,3266
9	5,3409	0,2887	3,1958	8,7955	22	17,4899	0,9454	4,8689	2,8092
10	5,8053	0,3138	3,3710	8,3306	23	17,4899	0,9454	4,8689	2,2917
11	6,1854	0,3344	3,5011	7,8515	24	17,4899	0,9454	4,8689	1,7742
12	6,4730	0,3499	3,5852	7,3634	25	17,4899	0,9454	4,8689	1,2568
13	5,5249	0,3527	3,6534	6,8785	26	22,8049	1,2327	4,8718	0,7393
					27	22,8000	1,2324	4,8718	0,2218

Tabla 5. Pesos, centros gravedad y volúmenes para un sector de 18° sin considerar el nervio.

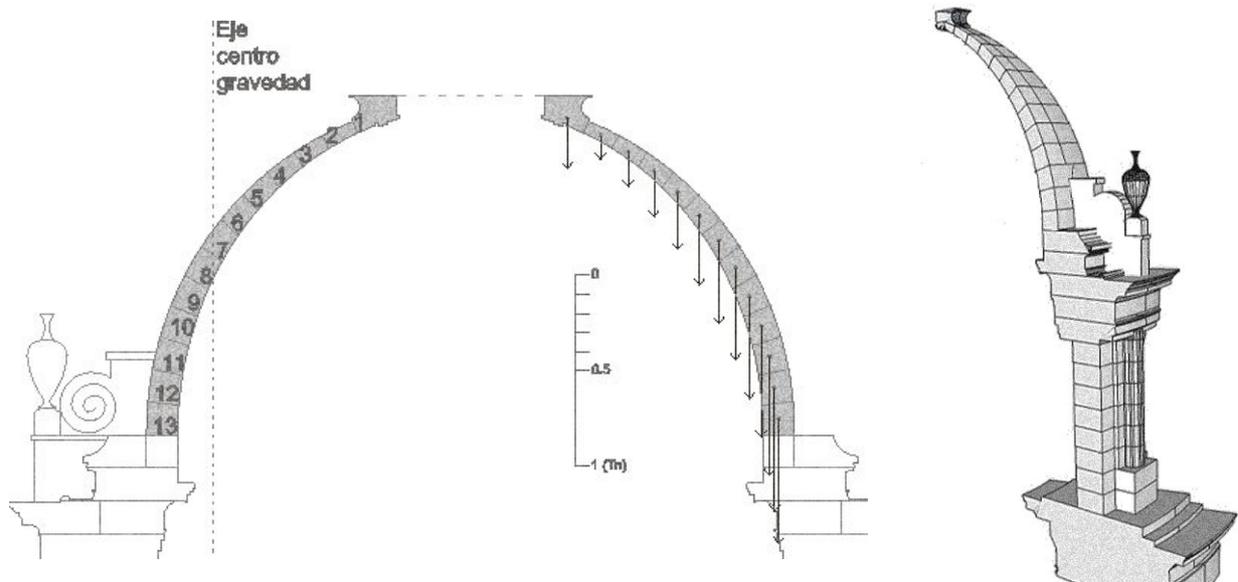


Figura 68. Pesos e hiladas hipótesis 1 (Elaboración propia).

La valoración de los resultados refleja la dificultad de encajar una línea de empujes dentro de la sección plana estudiada donde, en la mayoría de los gráficos, la línea obtenida se sale del espesor del arco estimado, siendo únicamente posible el paso de empujes en el interior en el caso que se expone en la figura 69. Por este motivo, se evalúa la cúpula como estable, considerando el coeficiente de seguridad geométrica obtenido, de valor 1.3, un índice bastante bajo, puesto que la línea no recorre el arco, obtenido al seccionar la cúpula, de manera holgada, sino que se acerca sensiblemente al perímetro de esta sección plana. Por este motivo se procede a realizar el estudio de la segunda hipótesis, en la que se considera un trabajo solidario entre la cáscara y las costillas, teniendo en cuenta el bajo nivel de seguridad obtenido en esta primera hipótesis, en la que además se ha considerado que la carga de la linterna tampoco incide sobre la cáscara de la cúpula.

En las sucesivas aproximaciones que se han realizado para encajar la línea de empujes dentro de un factor de seguridad geométrica, resultado de dividir el ancho eficaz por el ancho real del arco que constituye la sección plana del sector analizado, se ha observado que para que la resultante de esta línea encaje dentro del perímetro del sector, es condición necesaria que el punto pase lo más próximo posible al intradós de la primera dovela situada en la corona de la cúpula, siendo el punto de paso de la resultante en el salmer de este sector el más próximo al extradós de la pieza que constituye la base de la cúpula. Esta evolución queda descrita en las sucesivas aproximaciones estudiadas y resumidas en el Anexo A de este documento, donde se observa que cuanto más próxima pasa la resultante del empuje al extradós de la dovela superior de la cúpula, la línea de empujes tiende a salirse fuera del perímetro por la zona del extradós, y la única forma de corregir este suceso es acercando el punto de la aplicación de la resultante en la corona superior, aproximándolo hacia el intradós. Un mismo análisis se realiza para el salmer del sector analizado, donde cuanto más próximo es el punto de aplicación de la resultante en la base de la cúpula al

intradós, ésta tiende a salir fuera del perímetro por la zona interna, corrigiendo esta tendencia ajustando al máximo posible el paso de la resultante en el salmer del sector a la zona extradós de la pieza.

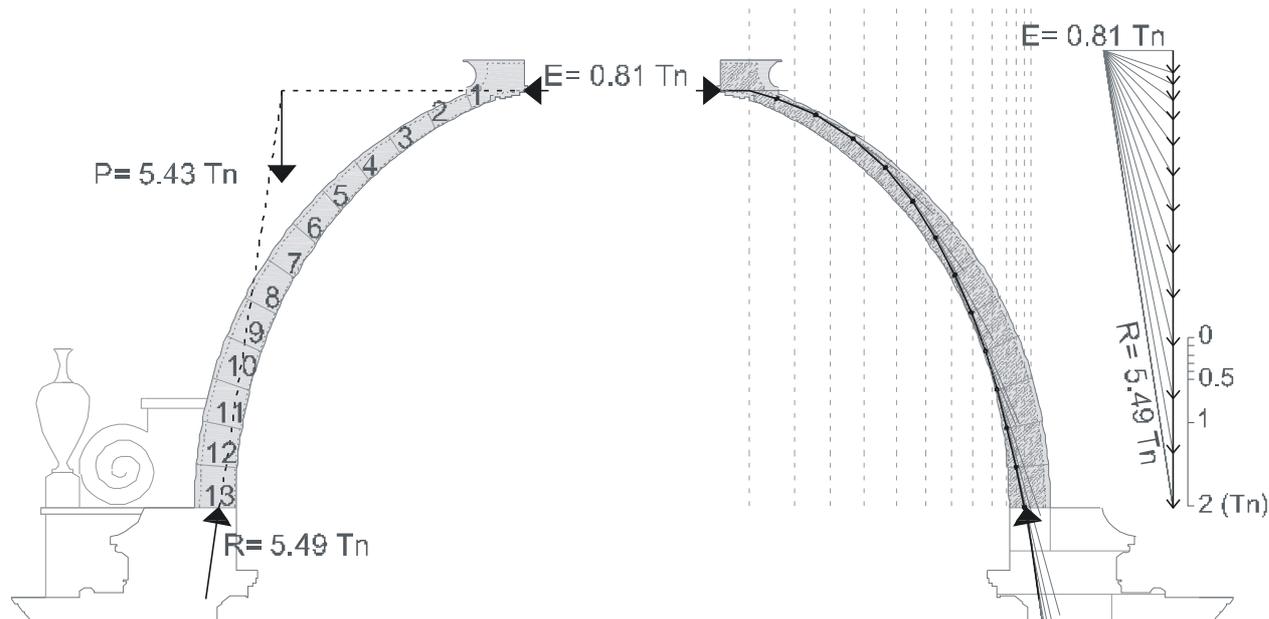


Figura 69. Ajuste línea empuje hipótesis 1 (Elaboración propia).

Como se ha comentado, a través de los resultados obtenidos, y debido a la dificultad de encajar una línea de empujes dentro de la sección plana analizada, se considera que la cúpula y el nervio deben trabajar de manera solidaria, siendo necesaria la influencia del peso de la interna en el adecuado funcionamiento del conjunto analizado. De este modo, se estudia una segunda hipótesis en la que se considera que la cáscara de la cúpula y el nervio trabajan solidariamente, lo cuál implica un aumento de la sección transversal, tanto en dimensiones como en peso, recibiendo el conjunto una carga de la linterna de valor de $P/16$, mayor que el que realmente recibiría dado que este sector presenta un menor ángulo que el que soportaría el dieciséisavo de la carga. Nuevamente, se plantea el análisis sobre un sector radial que comprende $1/20$ de la parte del total de la cúpula con un ángulo de 18° y se considera la división de las hiladas tal como aparece en la figura 70. A partir del modelado tridimensional con el programa informático Autocad se calculó el volumen de cada pieza y se localizó su centro de gravedad, datos que quedan resumidos en la tabla 6. El peso se calculó considerando que la cúpula está construida en piedra franca de la cantera de La Escribana, con una densidad de 18.50 kN/m^3 . Se analiza la cúpula como un elemento sometido únicamente a su propio peso, al considerar que las demás sobrecargas posibles de viento, nieve u otras acciones externas posibles, son despreciables en comparación a la magnitud del peso propio. Se considera que la sección analizada no cuenta con más sistema de contrarresto que el propio paramento del tambor en el que apoya, realizando el cálculo sobre un solo gajo de la cúpula

considerando que existe uno igual simétrico que lo equilibra. Tras realizar una serie de aproximaciones, las cuáles quedan resumidas en el Anexo B de este documento, se consiguió encajar una línea de empuje, figura 71, con un factor de seguridad de 2 obtenido de dividir el ancho real entre el ancho eficaz de la sección.

DOVELA	P(KN)	V(m ³)	X _g	Y _g	DOVELA	P(KN)	V(m ³)	X _g	Y _g
CÚPULA					TAMBOR				
1	3,0060	0,1625	0,3760	11,7153	14	21,9040	1,1840	4,8753	6,7658
2	1,9780	0,1069	0,8608	11,4224	15	19,1270	1,0339	4,0546	6,4015
3	2,5330	0,1369	1,3457	11,1296	16	22,5256	1,2176	4,0553	5,8997
4	3,1000	0,1676	1,7456	10,8187	17	38,6761	2,0906	4,7309	5,4051
5	3,6980	0,1999	2,1079	10,4689	18	32,2731	1,7445	4,7322	4,8813
6	4,3086	0,2329	2,4702	10,1191	19	28,7840	1,5559	4,8211	4,3779
7	5,0912	0,2742	2,7669	9,7106	20	19,0143	1,0278	4,8589	3,8523
8	5,8349	0,3154	3,0242	9,2774	21	17,4899	0,9454	4,8689	3,3266
9	6,1640	0,3332	3,2402	8,8230	22	17,4899	0,9454	4,8689	2,8092
10	6,4953	0,3511	3,3959	8,4032	23	17,4899	0,9454	4,8689	2,2917
11	7,3090	0,3951	3,5516	7,8642	24	17,4899	0,9454	4,8689	1,7742
12	8,7505	0,4730	3,7139	7,3886	25	17,4899	0,9454	4,8689	1,2568
13	8,3065	0,4490	3,7455	6,8884	26	22,8049	1,2327	4,8718	0,7393
					27	22,8000	1,2324	4,8718	0,2218

Tabla 6. Pesos, centros gravedad y volúmenes para un sector de 18° considerando el nervio.

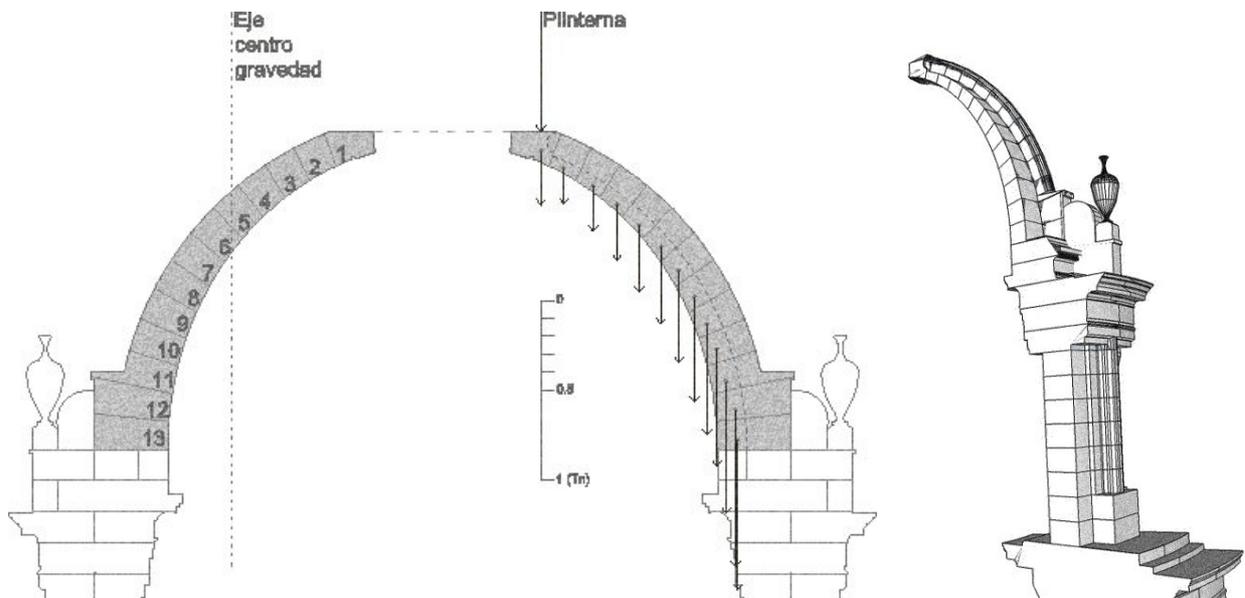


Figura 70. Pesos e hiladas hipótesis 2 (Elaboración propia).

En este caso, la valoración de los resultados refleja una mayor facilidad para encajar la línea de empujes dentro de la sección plana analizada, pues es posible encajar más de una línea dentro de los límites de la sección del arco, aunque únicamente se ha podido obtener el paso del empuje en la mitad central del arco para uno de los casos, el cual queda reflejado en el gráfico 71. Por este motivo, la cúpula se vuelve a evaluar como estable, considerando que la línea de empujes queda de forma holgada en su interior, entre el extrasdós y el intradós de la sección transversal de la cáscara, obteniendo un coeficiente de seguridad medio, que aunque se aleja del valor 3, lo que implica que la cúpula se verá sometida a tracciones, tampoco se obtiene un coeficiente geométrico de seguridad tan bajo como ocurría en la primera hipótesis. Con un coeficiente de seguridad geométrico de valor 2, aunque puedan aparecer tracciones en el interior de la cáscara, no se producirá rotura de la cúpula por carga excesiva o por espesor insuficiente en el arco que constituye el corte transversal de la cúpula.

Debido al aumento experimentado en el factor de seguridad con respecto a la primera hipótesis analizada, en la que se consideraba la cáscara de la cúpula independizada del nervio y de la carga de la linterna, se deduce que el peso de la linterna es un factor influyente en la estabilidad del conjunto.

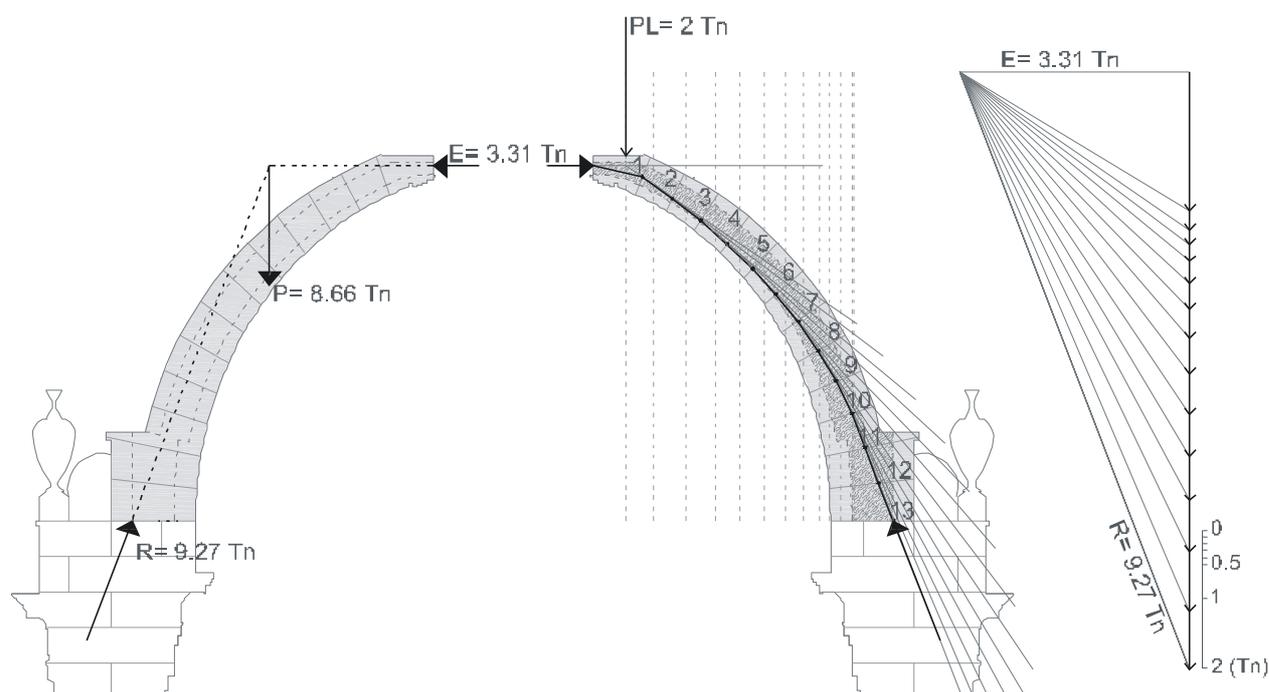


Figura 71. Ajuste línea empuje hipótesis 2 (Elaboración propia).

Dado que se ha obtenido un adecuado factor de seguridad, se analiza la línea de empuje en todo el conjunto de cúpula y tambor, con el fin de analizar la reacción en la base del tambor, figura 72.

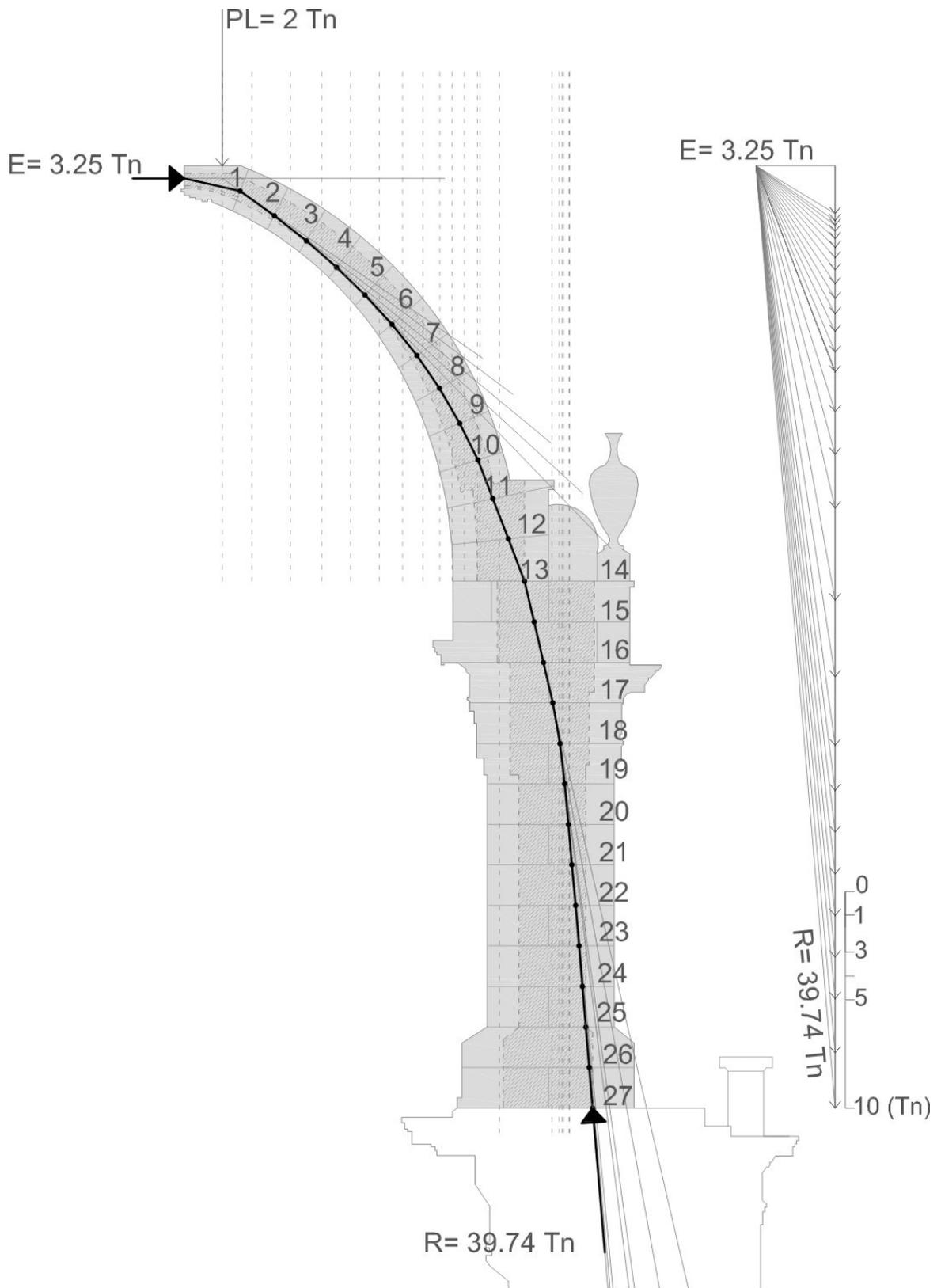
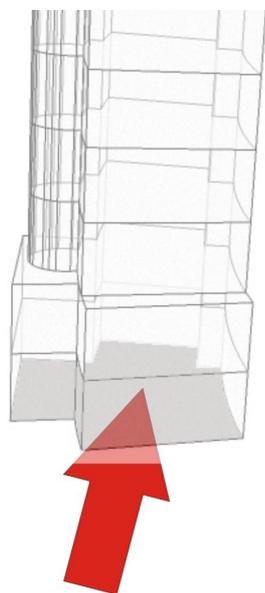


Figura 72. Ajuste línea empuje hipótesis 2 junto con tambor (Elaboración propia).

Conocida la reacción total en la base del tambor, se puede calcular el valor de la tensión superficial que transmite el sector de 18° en la superficie de transmisión de la carga de la base del tambor a las pechinas, obtenida de dividir el valor vertical de esta reacción entre el área de la base de apoyo. Los valores obtenidos quedan resumidos en la figura 73.



$$R = 39.74 \text{ Tn} = 397.4 \text{ KN}$$

$$R_V = 39.60 \text{ Tn} = 396 \text{ KN}$$

$$R_H = 3.31 \text{ Tn} = 33.1 \text{ KN}$$

$$S = 2.39 \text{ m}^2$$

$$\sigma = \frac{R_V}{S} = \frac{396 \text{ KN}}{2.39 \text{ m}^2} = 166 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 0.166 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

Figura 73. Reacciones en la base del tambor (Elaboración propia).

En las sucesivas aproximaciones que se han realizado para encajar la línea de empujes dentro de un factor de seguridad geométrico, resultado de dividir el ancho eficaz por el ancho real del arco que constituye la sección plana del sector analizado, se ha observado que para que la resultante de esta línea encaje dentro del perímetro del sector, es condición necesaria que el punto pase lo más próximo posible al intradós de la primera dovela situada en la corona de la cúpula, siendo el punto de paso de la resultante en el salmer de este sector el más próximo al extradós de la pieza que constituye la base de la cúpula. Esta evolución queda descrita en las sucesivas aproximaciones estudiadas y resumidas en el Anexo B de este documento, donde se observa que cuanto más próxima pasa la resultante del empuje al extradós de la dovela superior de la cúpula, la línea de empujes tiende a salirse fuera del perímetro por la zona del intradós, y la única forma de corregir este suceso es acercando el punto de la aplicación de la resultante en la corona superior, aproximándolo hacia el intradós. Un mismo análisis se realiza para el salmer del sector analizado, donde cuanto más próximo es el punto de aplicación de la resultante en la base de la cúpula al intradós, ésta tiende a salir fuera del perímetro por la zona interna, corrigiendo esta tendencia ajustando al máximo posible el paso de la resultante en el salmer del sector a la zona extradós de la pieza.

La distribución del empuje hacia la sección transversal del tambor muestra una excentricidad del

empuje desplazándose hacia el exterior, aunque manteniendo el factor de seguridad que presenta la cúpula. El efecto de esta excentricidad del empuje hacia el exterior del en el tambor provoca un giro del elemento también hacia el exterior, y por lo tanto, un desplome del mismo, efectos que se han observado en el análisis de las deformaciones experimentadas en el conjunto.

Habiendo llegado a la conclusión de que la mejor forma de trabajo del conjunto es considerar que la cáscara de la cúpula y las costillas trabajan de manera solidaria, se procede a analizar un nuevo sector con un ángulo de 27° , con el fin de encajar el sector real de trabajo de la cúpula de 22.5° dentro del análisis del conjunto. En este caso se considerará la carga total transmitida de la linterna a la cúpula, obtenida multiplicando la tensión superficial que transmite la linterna a la cúpula, $\sigma_{linterna} = 44.1508 \text{ KN/m}^2$, por el área de transmisión de la carga de la linterna correspondiente al sector estudiado, $A_{sector27} = 0.53 \text{ m}^2$, área que se ha obtenido a través del volumen del sector dibujado en autocad, obteniendo una carga total de $P_{sector27} = 23.40 \text{ KN}$. De este modo, se plantea el análisis sobre un sector radial con un ángulo de 27° y se considera la división de las hiladas tal como aparece en la figura 74. A partir del modelado tridimensional con el programa informático Autocad se calculó el volumen de cada pieza y se localizó su centro de gravedad, datos que quedan resumidos en la tabla 7. El peso se calculó considerando que la cúpula está construida en piedra franca de la cantera de La Escribana, con una densidad de 18.50 kN/m^3 . Se analiza la cúpula como un elemento sometido únicamente a su propio peso, al considerar que las demás sobrecargas posibles de viento, nieve u otras acciones externas posibles, son despreciables en comparación a la magnitud del peso propio. Se considera que la sección analizada no cuenta con más sistema de contrarresto que el propio paramento del tambor en el que apoya, realizando el cálculo sobre un solo gajo de la cúpula considerando que existe uno igual simétrico que lo equilibra. Tras realizar una serie de aproximaciones, las cuáles quedan resumidas en el Anexo C de este documento, se consiguió encajar una línea de empuje, figura 75, con un factor de seguridad de 2.5 obtenido de dividir el ancho real entre el ancho eficaz de la sección. Este factor de seguridad, además de aumentar con respecto a la hipótesis dos debido a que se ha considerado la carga real transmitida de la linterna, se acerca al factor de seguridad 3, hecho que evidencia un factor de seguridad alto dentro de la estabilidad de la cúpula.

DOVELA	P(KN)	$V(m^3)$	X_g	Y_g	DOVELA	P(KN)	$V(m^3)$	X_g	Y_g
CÚPULA					TAMBOR				
1	4,3031	0,2326	0,3565	11,6954	14	21,9040	1,1840	4,8753	6,7658
2	3,0229	0,1634	0,8445	11,4185	15	27,2080	1,4707	4,0330	6,4144
3	3,4836	0,1883	1,3324	11,1417	16	34,3027	1,8542	4,0330	5,9270
4	4,3438	0,2348	1,7347	10,8279	17	57,8292	3,1259	4,5055	5,4365
5	5,2484	0,2837	2,1050	10,4809	18	47,4136	2,5629	4,5928	4,9231
6	6,5176	0,3523	2,4406	10,1031	19	43,2659	2,3327	4,5928	4,4289
7	7,4352	0,4019	2,7390	9,6972	20	23,1305	1,2503	4,6335	3,9041
8	7,9698	0,4308	2,9979	9,2664	21	21,2029	1,1461	4,6455	3,3761
9	9,1131	0,4926	3,2153	8,8142	22	21,2029	1,1461	4,6455	2,8586
10	9,4739	0,5121	3,3892	8,3444	23	21,2029	1,1461	4,6455	2,3412
11	10,8447	0,5862	3,5235	7,8613	24	21,2029	1,1461	4,6455	1,8237
12	11,8715	0,6417	3,6577	7,3781	25	21,2029	1,1461	4,6455	1,3062
13	11,6846	0,6319	3,7050	6,8809	26	31,5869	1,7074	4,6871	0,7888
					27	31,7589	1,7167	4,6910	0,2699

Tabla 7. Pesos, centros gravedad y volúmenes para un sector de 27° considerando el nervio.

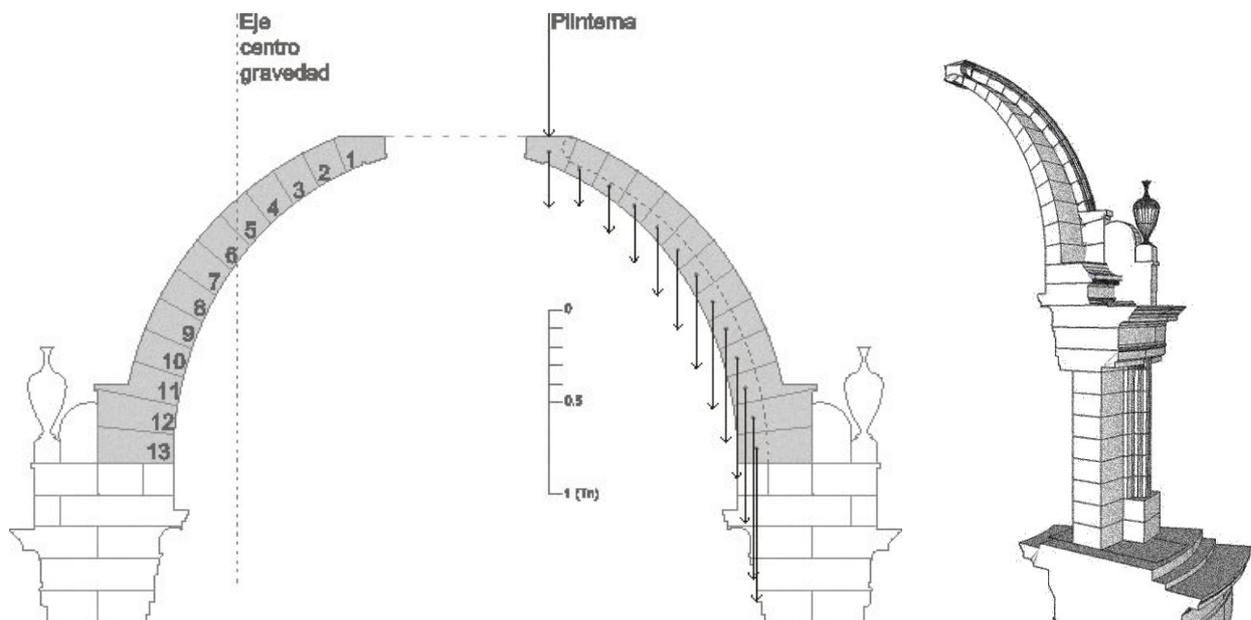


Figura 74. Pesos e hiladas hipótesis 3 (Elaboración propia).

Debido a la situación, a través de la valoración de los resultados, en los que ha sido relativamente sencillo encajar la línea de empujes dentro de la sección plana analizada, se ha conseguido obtener una de estas líneas dentro de un ancho eficaz el cuál proporciona un factor de seguridad de valor 2.5, cuyo resultado queda reflejado en la figura 75. Este coeficiente geométrico de seguridad se

considera bastante alto, puesto que la línea recorre el arco de la sección plana de manera holgada, sin acercarse al perímetro de ésta. Este resultado viene motivado por el análisis del sector con la carga real que soporta, y no mayorada como se hizo en el caso de la segunda hipótesis. Este hecho evidencia la fuerte influencia del peso de la linterna en la estabilidad global del conjunto, comparando con los resultados obtenidos en la primera hipótesis estudiada. Con un factor geométrico de seguridad de 2.5, aunque más bajo de la posibilidad de encajar la línea en el tercio central en el que no se producen tracciones en la cúpula, se puede considerar un resultado bastante óptimo con el que no se producirá rotura por carga excesiva o por espesor de arco insuficiente. También resulta interesante resaltar que, con un mayor factor de seguridad, es capaz de asumir un mayor empuje, de valor 4.3588 Tn, que el obtenido en la segunda hipótesis, que presentaba un valor de 3.2486 Tn.

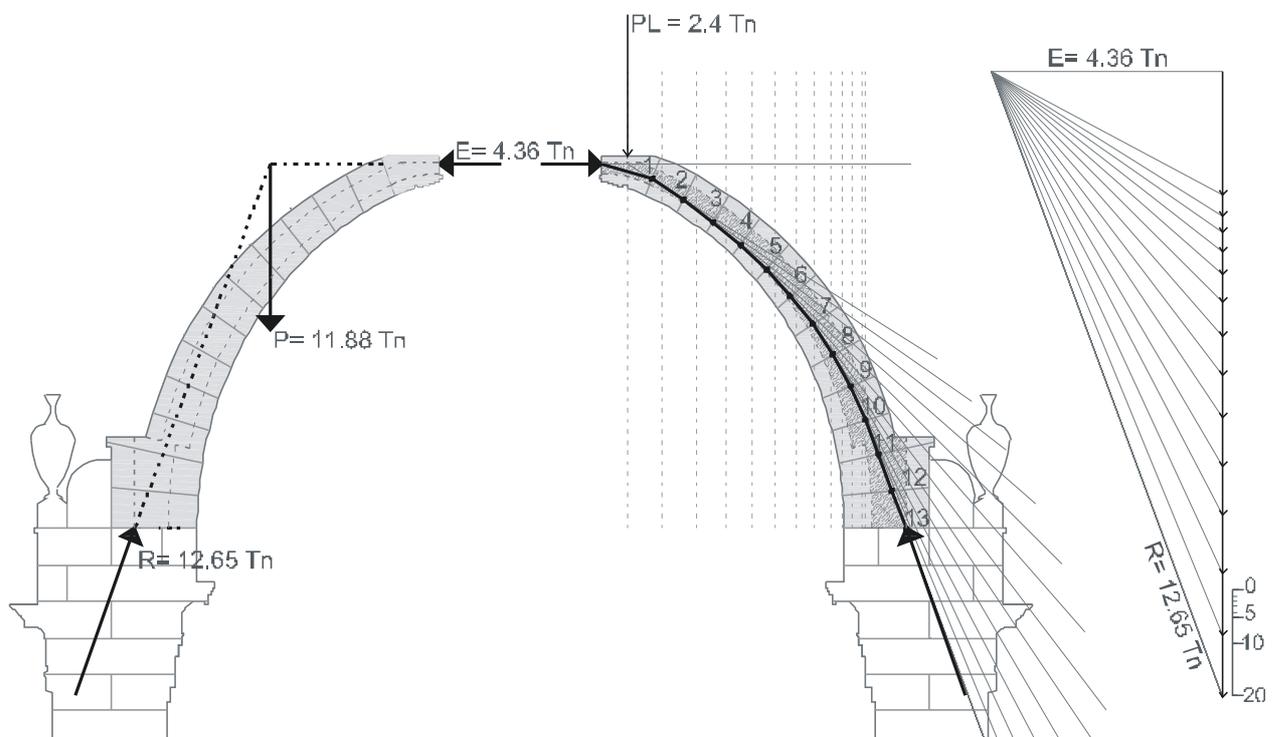


Figura 75. Línea empuje hipótesis 3 (Elaboración propia).

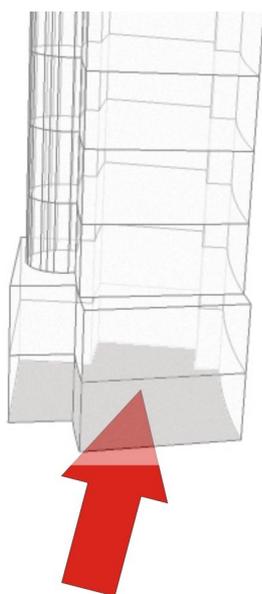
Encontrada una línea de empuje que se ajusta al máximo factor de seguridad, se procede a encajar la línea en todo el conjunto incluyendo el tambor, con el fin de obtener la reacción en la base de éste, figura 77.

En las sucesivas aproximaciones que se han realizado para encajar la línea de empujes dentro de un factor de seguridad geométrico, resultado de dividir el ancho eficaz por el ancho real del arco que constituye la sección plana del sector analizado, se ha observado que para que la resultante de esta línea encaje dentro del perímetro del sector, es condición necesaria que el punto pase lo más

próximo posible al intradós de la primera dovela situada en la corona de la cúpula, siendo el punto de paso de la resultante en el salmer de este sector el más próximo al extradós de la pieza que constituye la base de la cúpula. Esta evolución queda descrita en las sucesivas aproximaciones estudiadas y resumidas en el Anexo C de este documento, donde se observa que cuanto más próxima pasa la resultante del empuje al extradós de la dovela superior de la cúpula, la línea de empujes tiende a salirse fuera del perímetro por la zona del intradós, y la única forma de corregir este suceso es acercando el punto de la aplicación de la resultante en la corona superior, aproximándolo hacia el intradós. Un mismo análisis se realiza para el salmer del sector analizado, donde cuanto más próximo es el punto de aplicación de la resultante en la base de la cúpula al intradós, ésta tiende a salir fuera del perímetro por la zona interna, corrigiendo esta tendencia ajustando al máximo posible el paso de la resultante en el salmer del sector a la zona extradós de la pieza.

La distribución del empuje hacia la sección transversal del tambor muestra una menor excentricidad del empuje hacia el exterior, aumentando el factor de seguridad obtenido con respecto a la segunda hipótesis. Aunque presenta menor excentricidad, los efectos siguen siendo la provocación de un giro del elemento hacia el exterior, lo que conlleva un desplome del mismo, efectos que se han observado en el análisis de las deformaciones experimentadas en el conjunto.

Conocida la reacción total en la base del tambor, se puede calcular el valor de la tensión superficial que transmite el sector de 27° en la superficie de transmisión de la carga de la base del tambor a las pechinas, obtenida de dividir el valor vertical de esta reacción entre el área de la base de apoyo. Los valores obtenidos quedan resumidos en la figura 76.



$$\begin{aligned}
 R &= 51.88 \text{ Tn} = 518.8 \text{ KN} \\
 R_V &= 51.66 \text{ Tn} = 516.6 \text{ KN} \\
 R_H &= 4.58 \text{ Tn} = 45.8 \text{ KN} \\
 S &= 3.30 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{R_V}{S} = \frac{516.6 \text{ KN}}{3.30 \text{ m}^2} = 156 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 0.156 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

Figura 76. Reacciones en la base del tambor sector 27°.

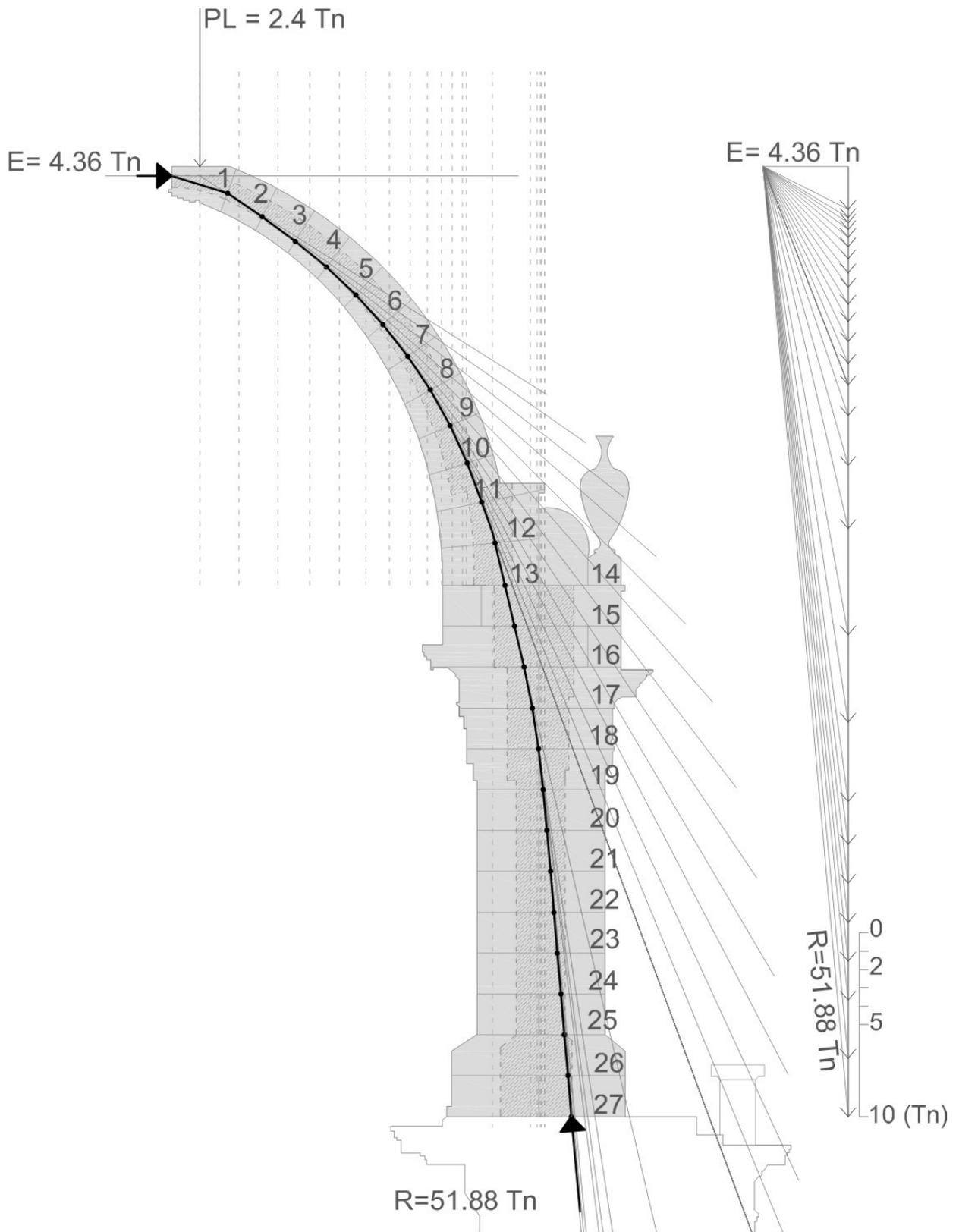


Figura 77. Línea de empuje del conjunto cúpula y tambor para la hipótesis 3 (Elaboración propia).

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES

5.1 Análisis de resultados.

La traza de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor, conocida anteriormente como la Iglesia de San Pablo, perteneciente al antiguo Colegio de los Jesuitas de San Pablo, parece animada de un espíritu diferente al de las otras iglesias granadinas de la misma época. Un espíritu que viene influenciado por la incursión de la arquitectura religiosa jesuita en este reino, con una nueva sensibilidad al mundo renacentista, que se manifiesta claramente en las secciones y elevaciones del templo. Esto puede comprobarse en muchas de las proporciones que se encuentran en las diferentes trazas de la cúpula referentes a las pautas del diseño del espacio y la estructura.

El tratado de Alberti, que se publicara en español en el año 1582, contiene reglas estructurales y observaciones constructivas muy interesantes. Los arquitectos italianos del Renacimiento tenían un profundo conocimiento de funcionamiento estructural de las cúpulas. Durante el siglo XVII, en el que se construye la cúpula objeto de este trabajo, se consolidaban en toda Europa los tipos estructurales clásicos o renacentistas. El diseño estructural a través de las proporciones podría haber sido una de las principales premisas en el proyecto de la cúpula de los Santos Justo y Pastor, evidenciado en la relación proporcional entre la cúpula de San Lorenzo de El Escorial, la del Colegio Imperial de Madrid y la de los Santos Justo y Pastor, todas ellas ligadas a una misma

influencia arquitectónica, la que deriva de la escuela de Juan de Herrera. Si bien en las cúpulas de El Escorial y del Colegio Imperial de Madrid se mantienen las relaciones principales de altura-diámetro de la cúpula, y diámetro- espesor de la cáscara, en la de San Justo y Pastor, el arquitecto Pedro Sánchez realiza dos modificaciones importantes con respecto a las dos anteriores. En primer lugar, propone una disminución considerable del espesor de la cáscara de la cúpula, que bien podría estar animado con el fin de mejorar el proyecto de la cúpula de El Escorial, la cuál presenta una gran masividad dentro del conjunto de El Escorial. Al disminuir notablemente la sección transversal de la cáscara, dispuso dieciséis costillas con el fin de poder soportar la carga que transmite la linterna. Por otro lado, se aprecia una disminución de la altura de la linterna, con el fin de compensar el aligeramiento del espesor de la cúpula.

Además, en la propuesta se puede observar el desarrollo de ideas estructurales tal como el planteamiento de despiece horizontal para la construcción sin cimbra. Con todo lo anterior puede considerarse que el proceso de diseño para la cúpula de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor respondía no sólo a aspectos estéticos, sino también a aspectos estructurales.

En cuanto al proceso constructivo, analizando la sección del conjunto y observando una serie de salientes bastante prominentes, se ha llegado a la conclusión de que la estética del conjunto no se rige únicamente por los aspectos formales que existían en la época, sino que el proceso constructivo jugó un papel importante en la composición del conjunto, donde iban apareciendo una serie de puntos claves que permitían llevar a cabo la construcción del conjunto del tambor y de la cúpula.

En el estudio de la estabilidad del conjunto cúpula y tambor se llega a dos conclusiones principales. En primer lugar, las costillas trabajan solidariamente con la cáscara dentro del mecanismo de estabilidad de la cúpula. Tras analizar las tres hipótesis de mecanismo de estabilidad del conjunto, considerando que las costillas absorben todo el peso de la linterna y considerando que tanto las costillas como la cáscara sirven de sustento para la linterna, demostrado con un aumento del factor de seguridad de 1.4 a 2.0 y 2.5 entre las tres diferentes hipótesis. En segundo lugar, el peso de la linterna es un factor muy influyente en la estabilidad del conjunto, dado que si se obvia su influencia resulta complicado encajar una línea de empujes dentro de la sección transversal adoptada, tal y como ocurría en la primera hipótesis en la que se consideraba que la cáscara no recibía peso de la linterna y simplemente se autosustentaba.

Finalmente, del análisis de la estabilidad por estática gráfica, se deduce que la línea de empujes, figura 78, tiene un trazado bastante holgado entre el intradós y el trasdós, con respecto al perímetro del arco obtenido al seccionar la cúpula por el eje central del nervio, lo que indica un coeficiente de seguridad geométrico bastante alto, con un valor de 2.5. El empuje en el tambor presenta una excentricidad hacia el exterior en la base de éste, lo que provoca un giro del paramento del tambor

hacia el extradós, produciendo a su vez, un desplome del mismo, tal y como se ha observado en el análisis de las deformaciones experimentadas en el conjunto cúpula y tambor.

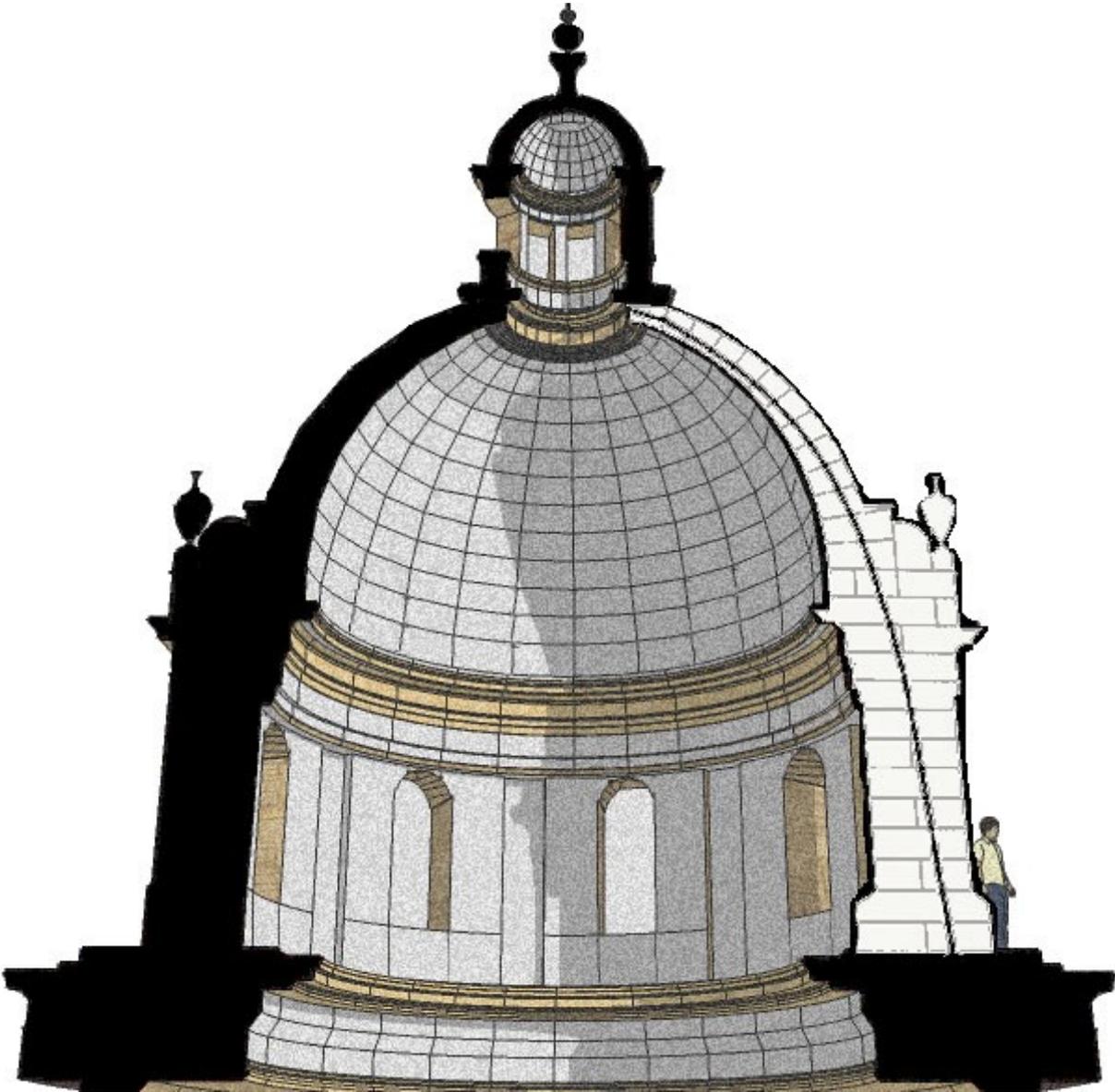


Figura 78. Línea de empuje definitiva (Elaboración propia).

5.2 Futuras líneas de investigación.

El presente trabajo pretende servir como punto de partida de un análisis más detallado de la Iglesia de los Santos Justo y Pastor de Granada. En este sentido, se propone a continuación una serie de futuras líneas de investigación que permiten avanzar en el estudio realizado en este trabajo.

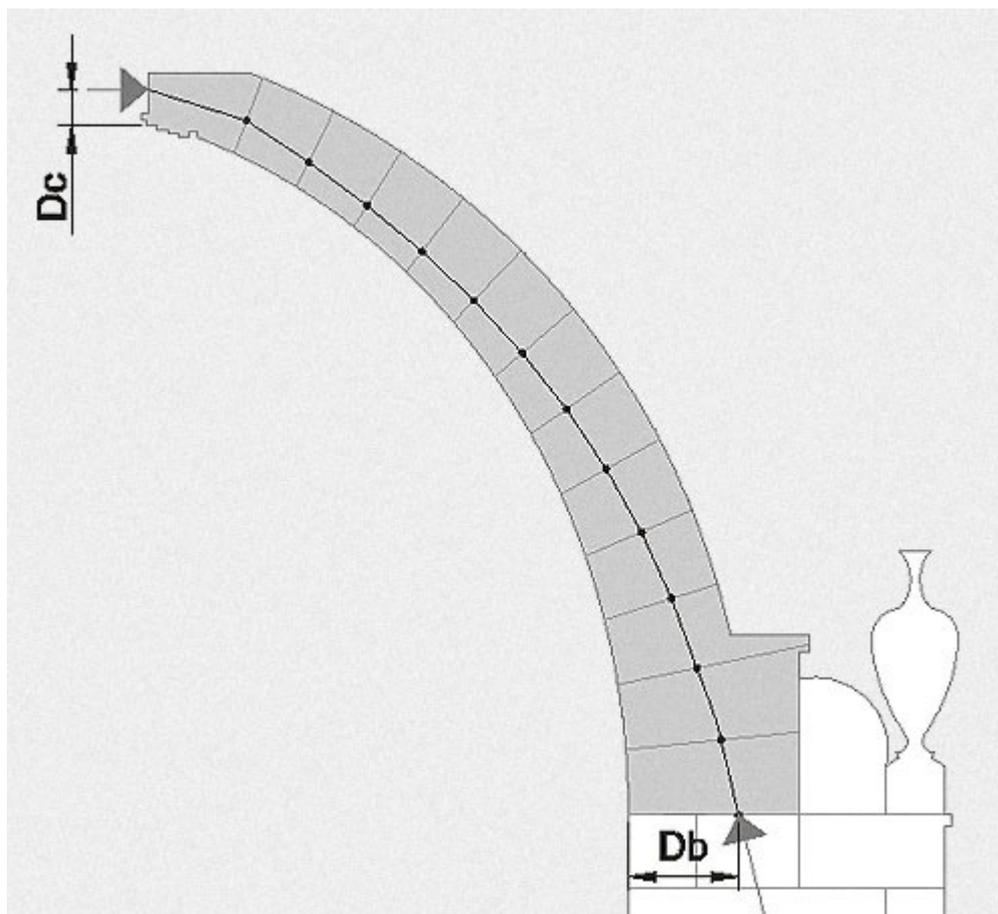
- Ampliar el análisis estructural al conjunto de la iglesia aplicando el método del Análisis Límite planteado por Heyman, con el fin de obtener un coeficiente de seguridad geométrico en la cimentación.
- Análisis estructural del conjunto de la iglesia mediante aplicación de métodos numéricos.

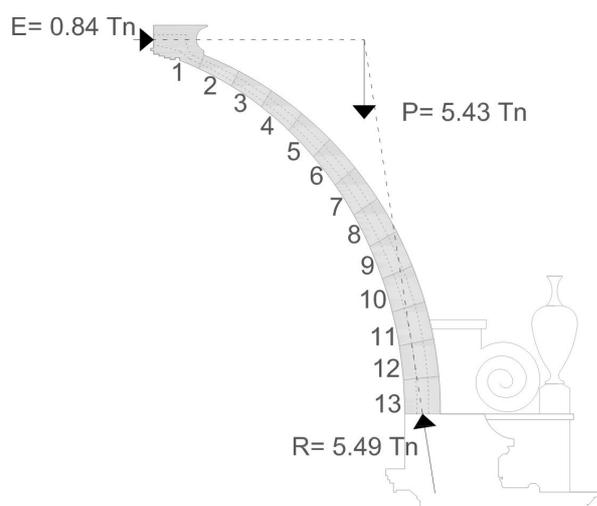
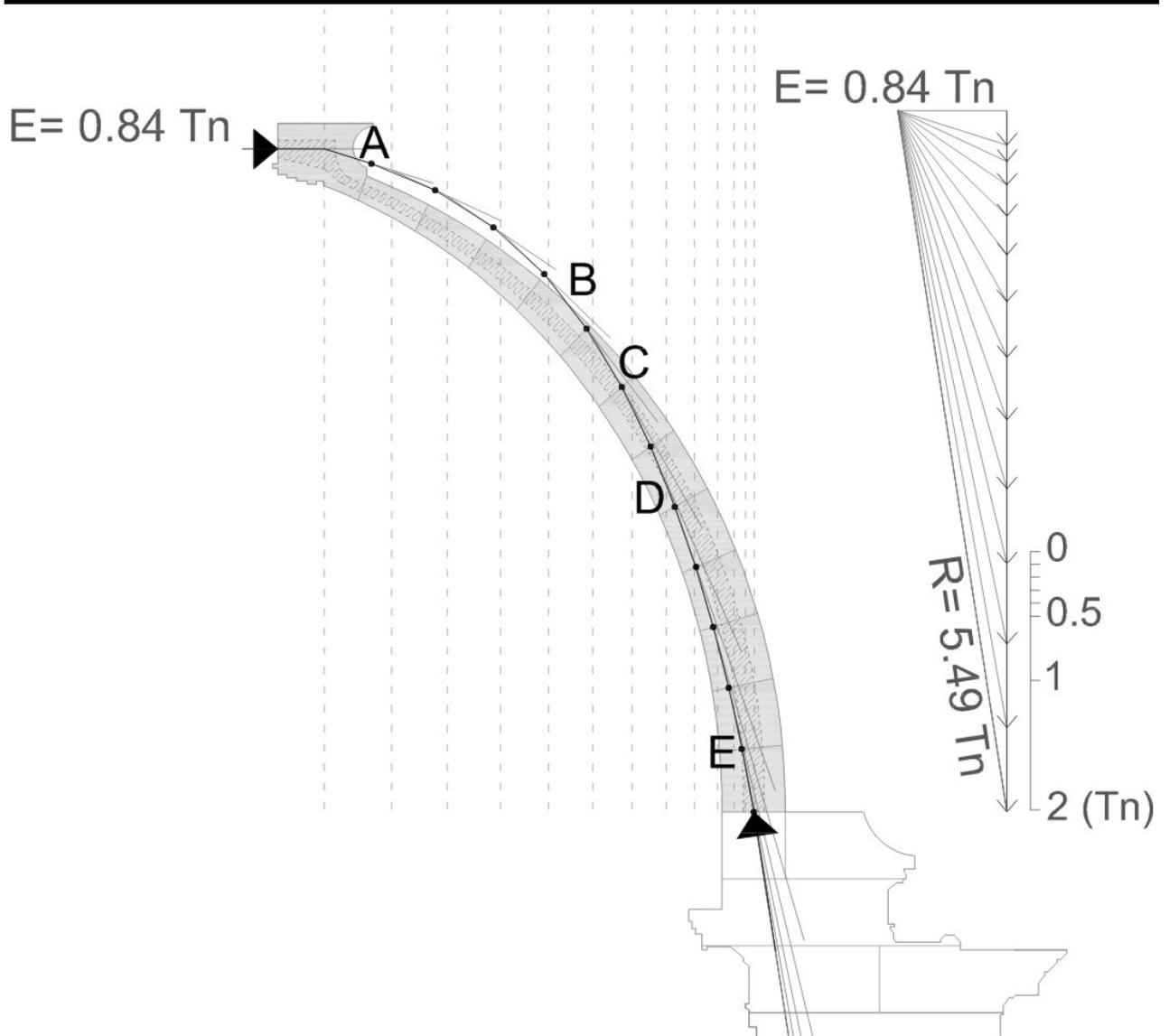
ANEXOS

ANEXO A.

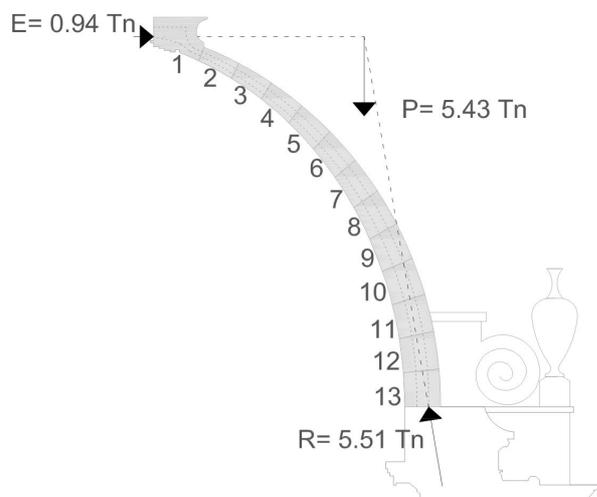
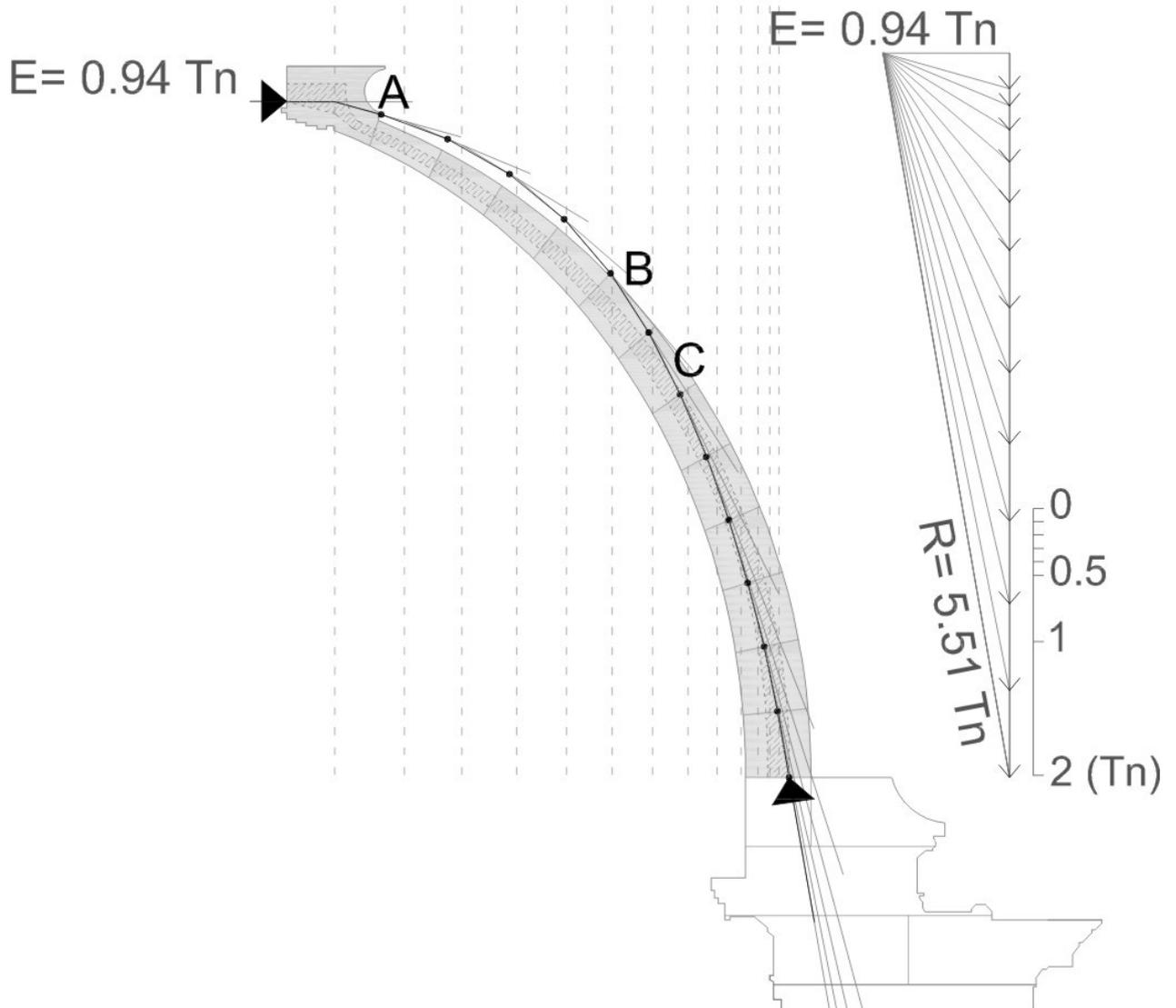
Obtención de la línea de empujes considerando en el cálculo un sector radial que comprende 1/20 de la parte total de la cúpula con un ángulo de 18° , considerando que el peso de la linterna se transmite directamente a las costillas, por lo que la cáscara de la cúpula se autosustenta, sin recibir más carga que su propio peso.

Partiendo de este modelo de geometría y con la estimación de cargas evaluadas, se efectúan sucesivos cálculos de empujes hasta conseguir encajarlo en un factor de seguridad geométrico concreto. Con este objetivo, se identifican cada una de las líneas de empuje estudiadas a través de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_c , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro es el punto de paso de la resultante, aplicado en el salmer de la cúpula, cuya posición queda definida por la distancia D_b , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del esfuerzo.

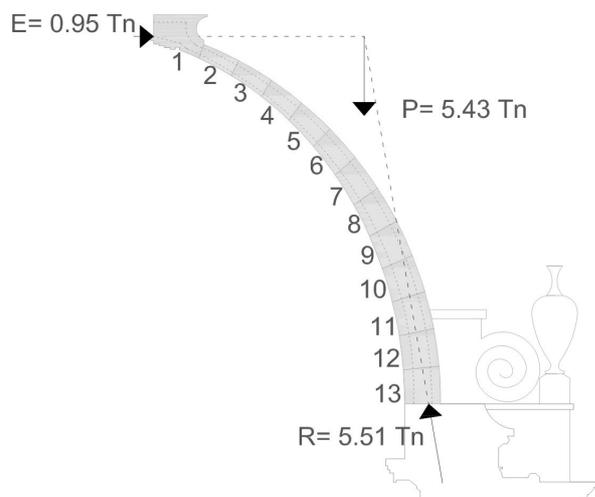
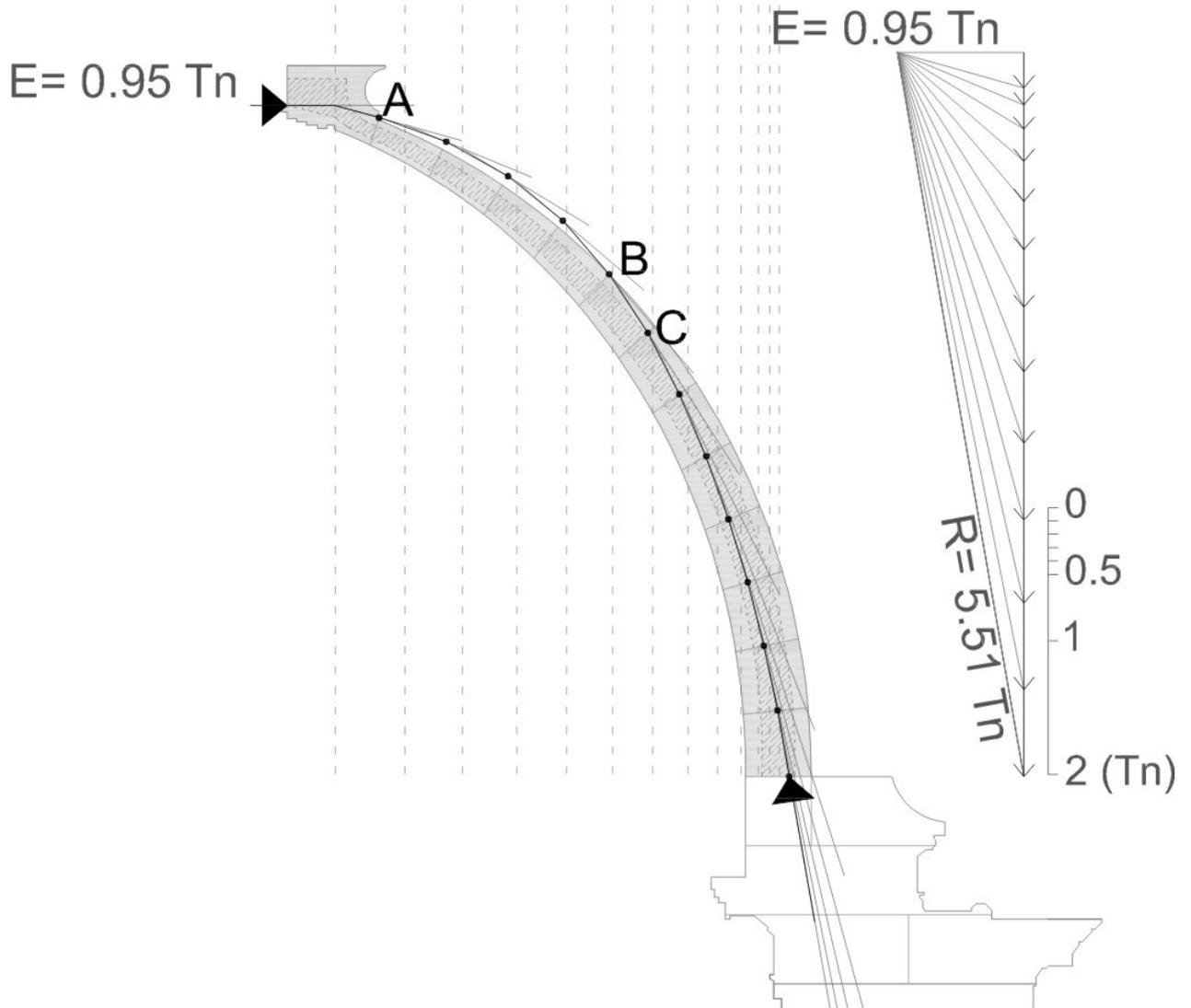




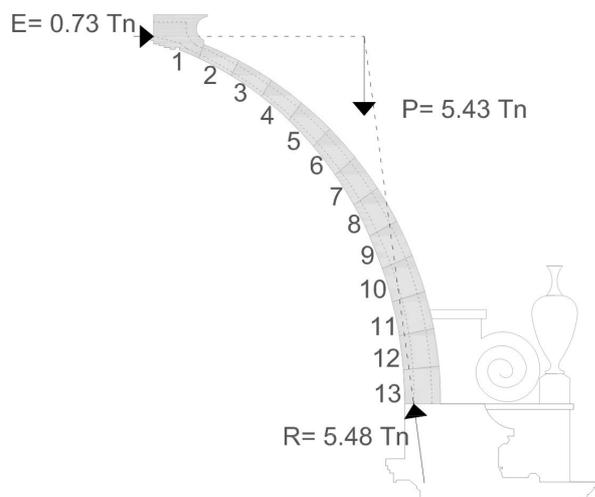
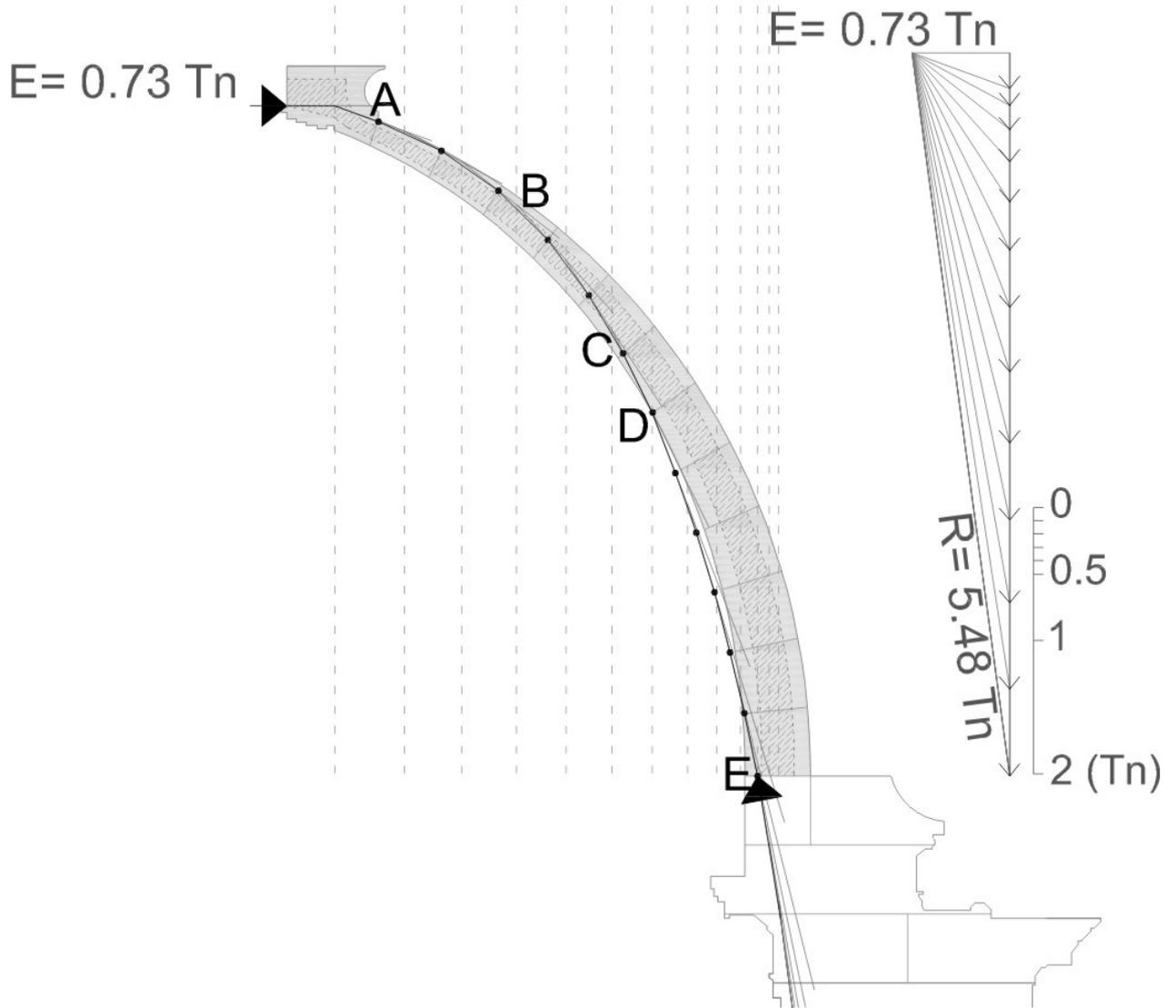
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula y por el punto medio la sección en el salmer. Entre los puntos A y B, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



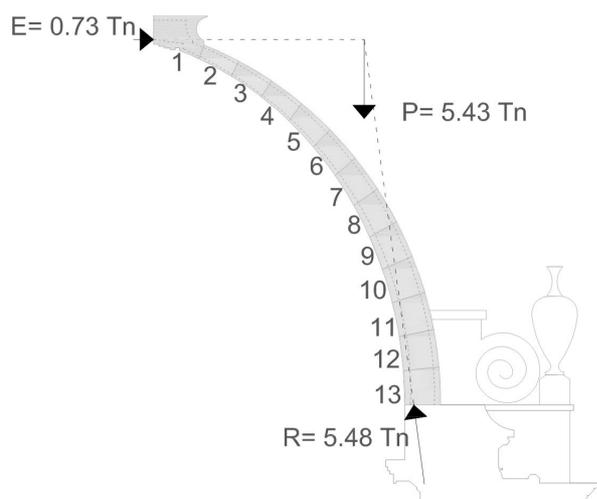
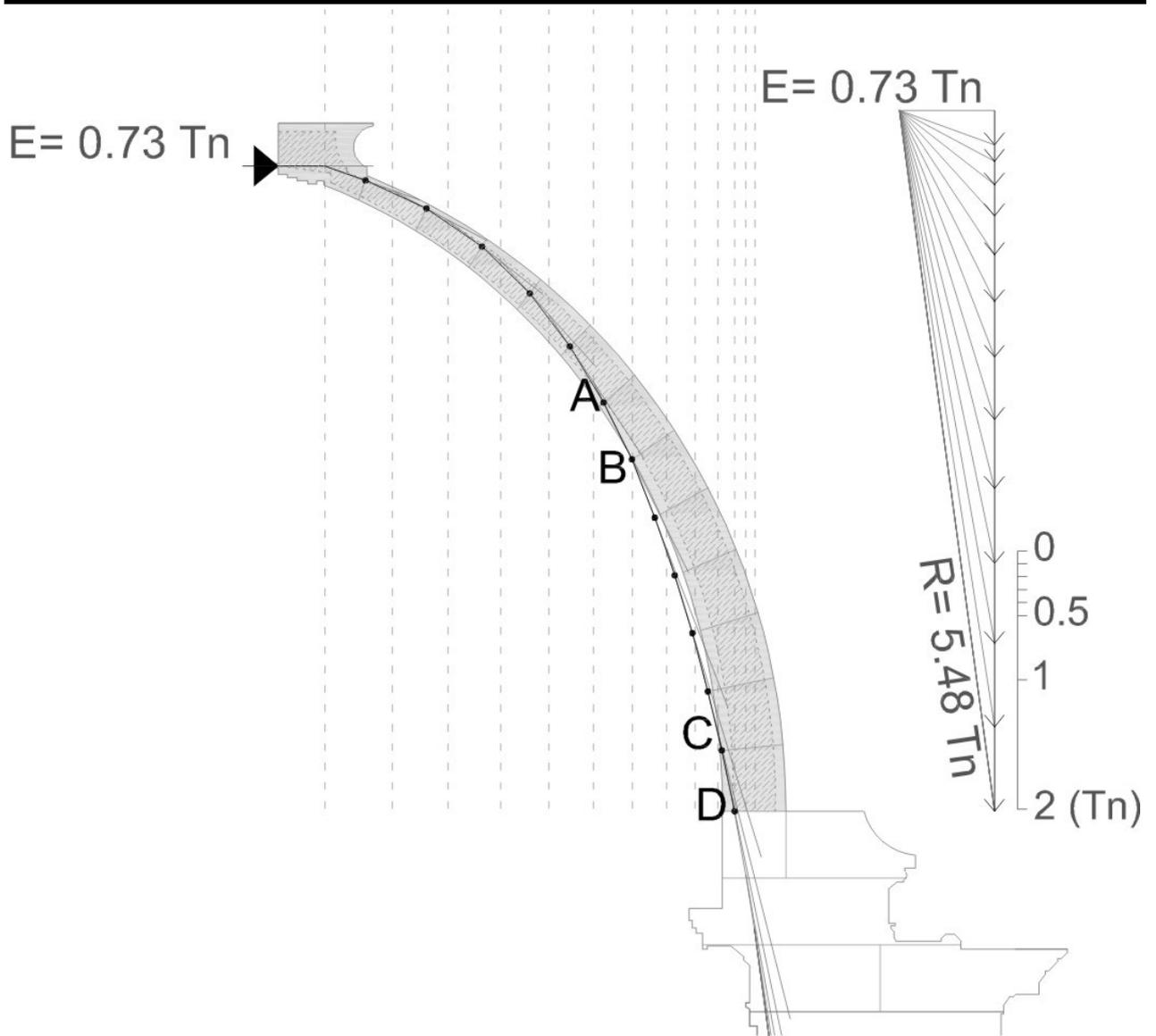
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Entre los puntos A y B, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



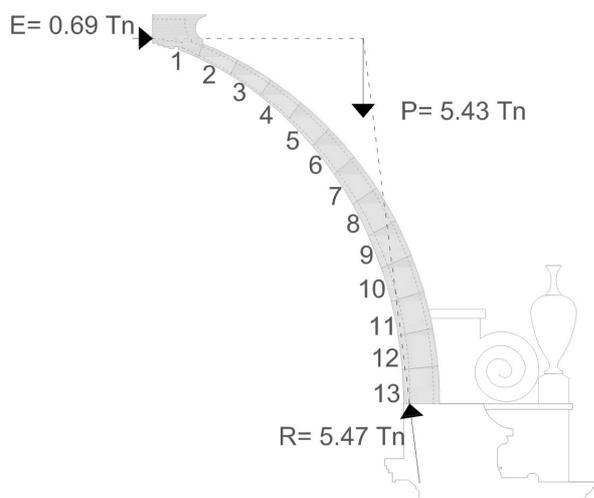
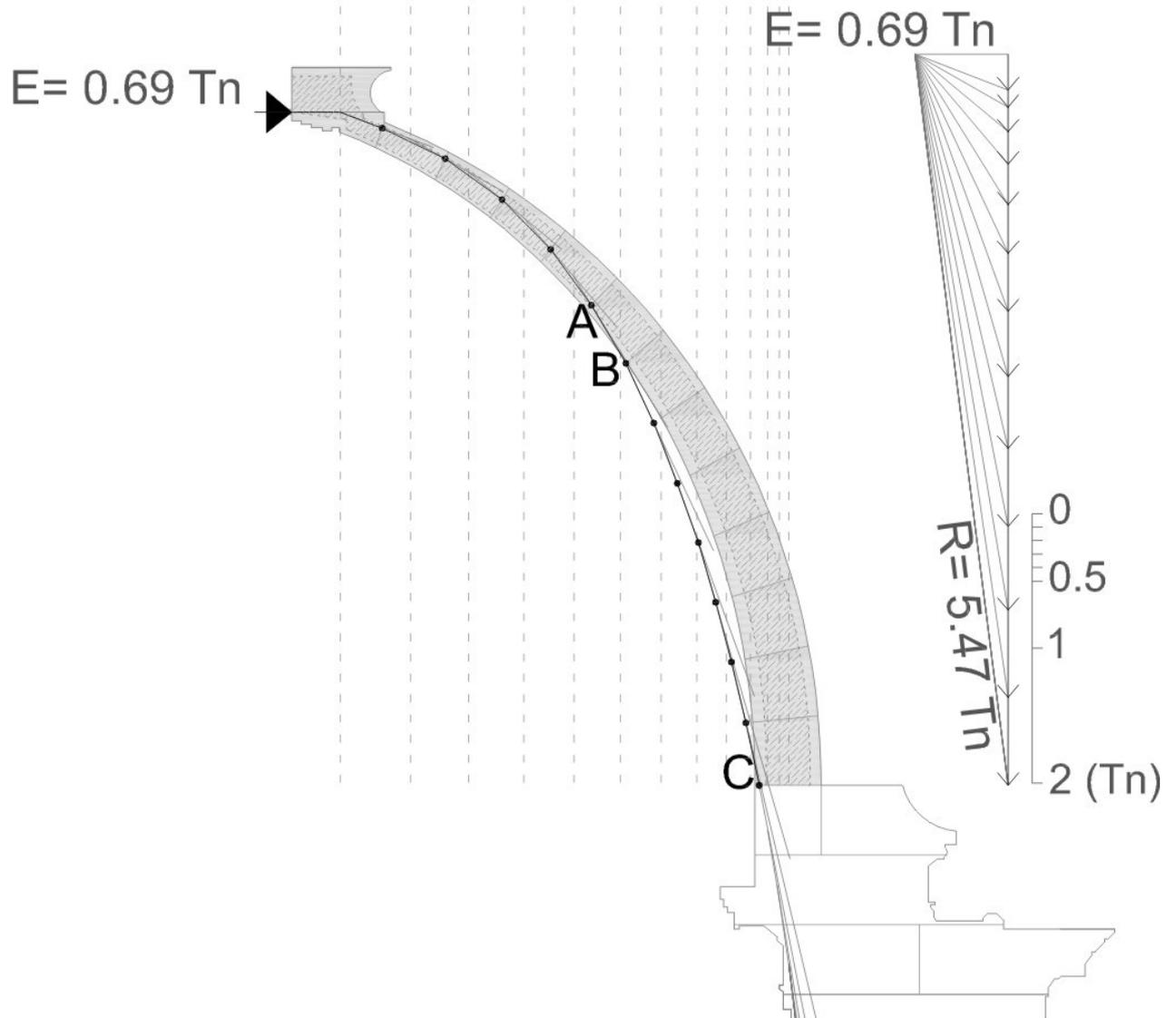
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior de la mitad central en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite superior de la mitad central del salmer. Entre los puntos A y B, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



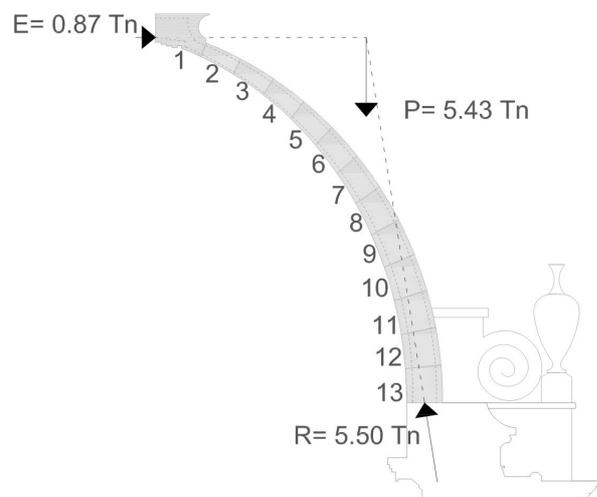
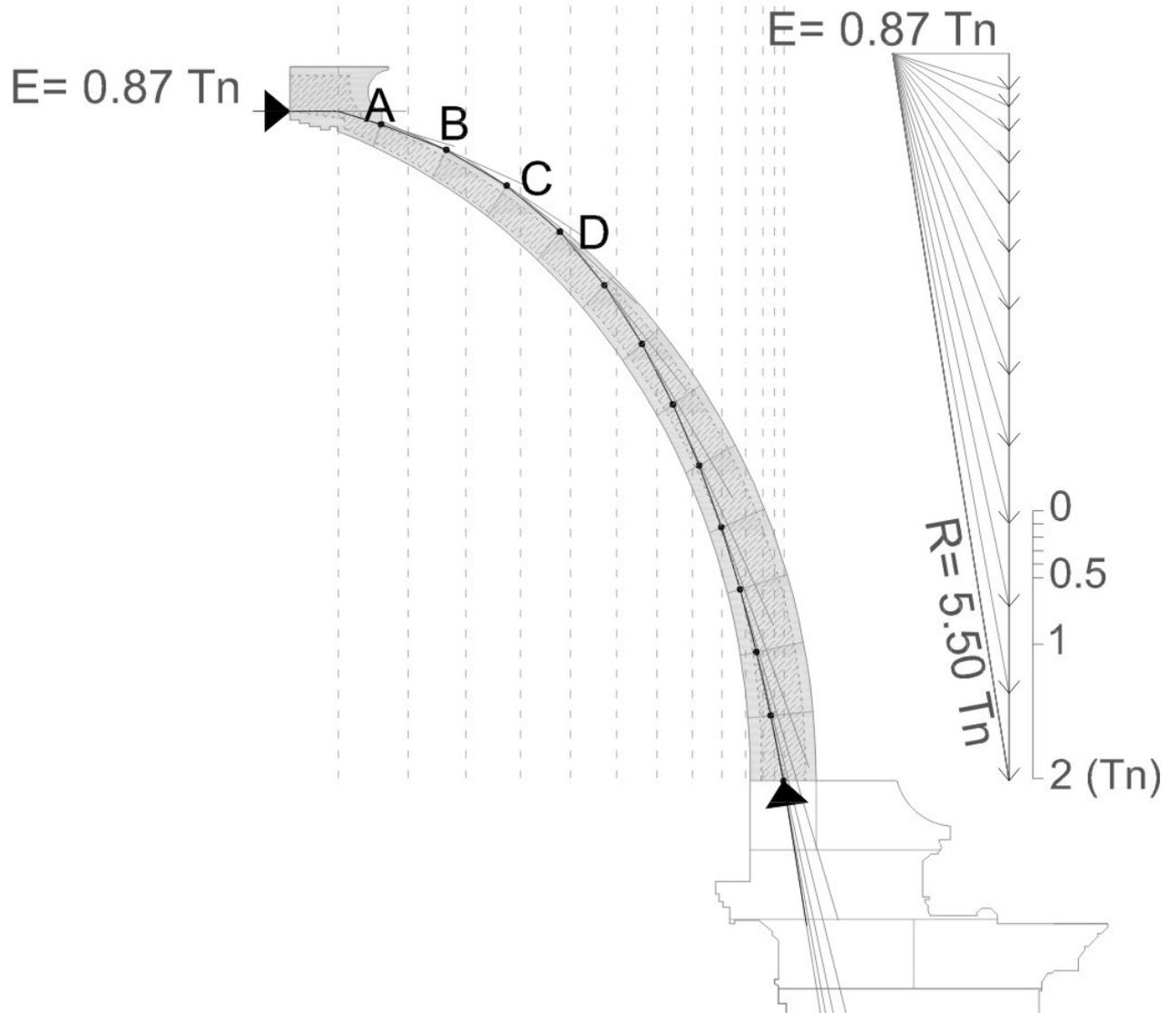
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior de la mitad central en la corona superior de la cúpula y por el límite inferior de la mitad central del salmer. Entre los puntos D y E, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



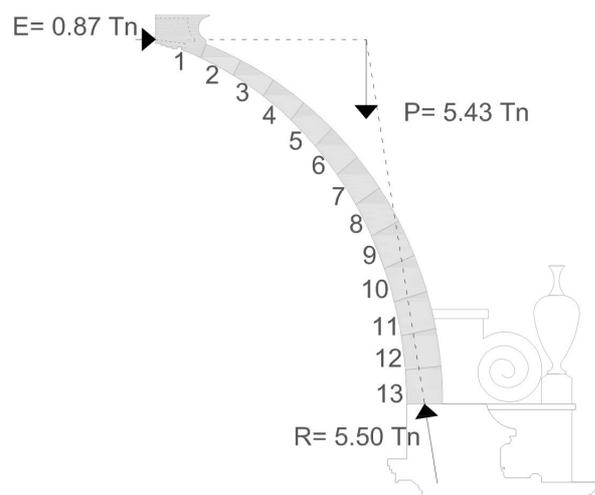
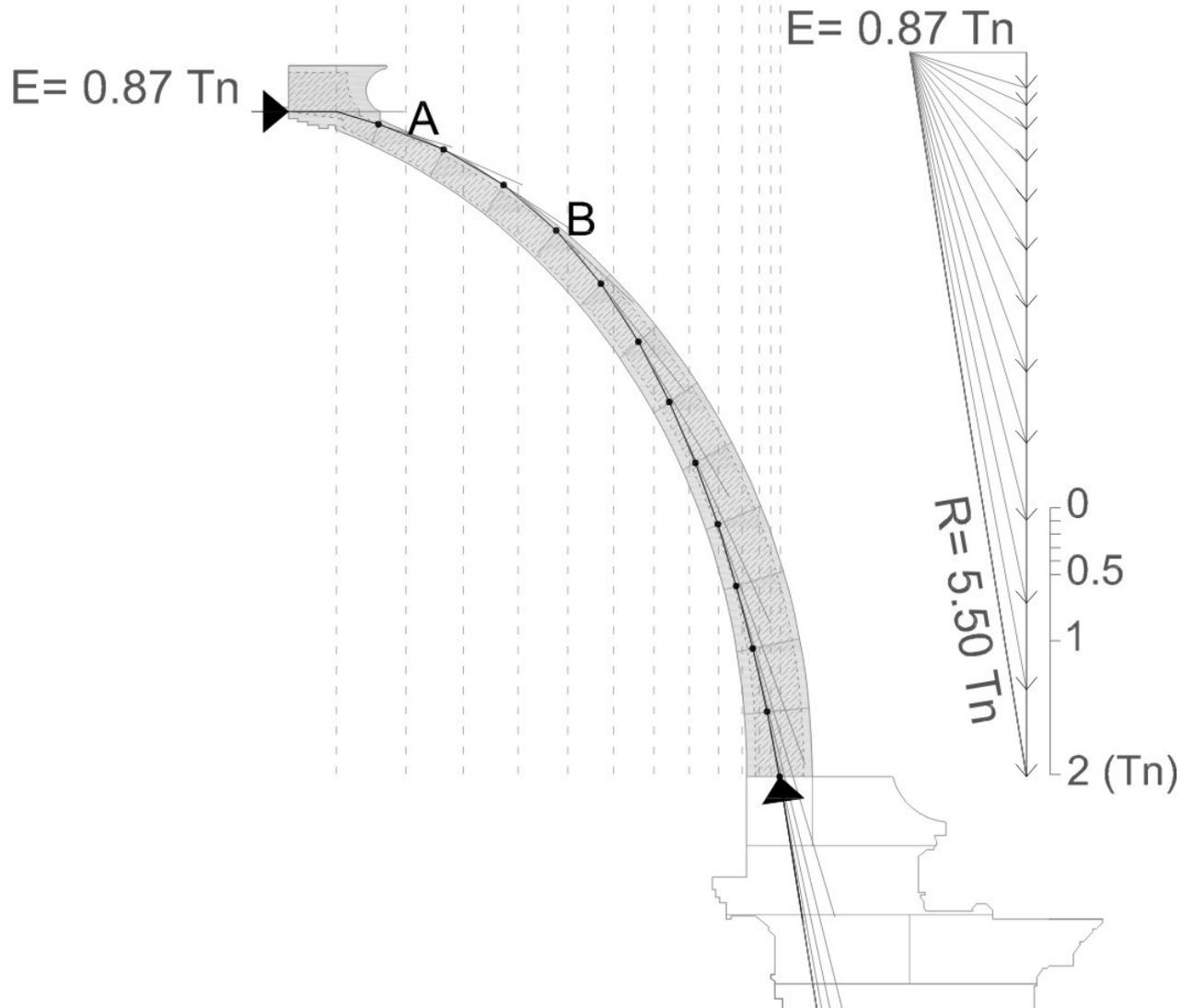
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.5 en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.5 del salmer. Entre los puntos B y C, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



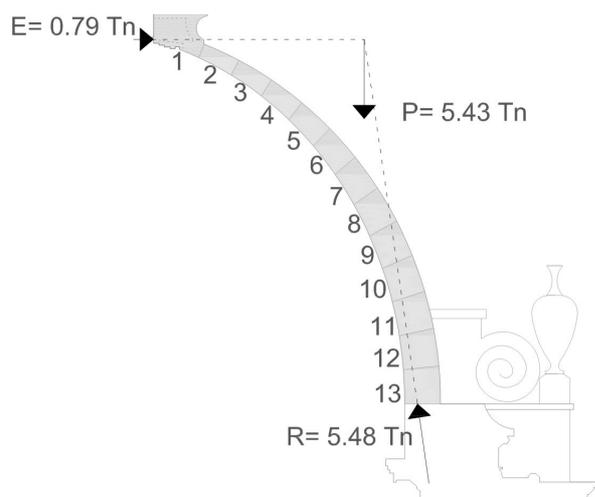
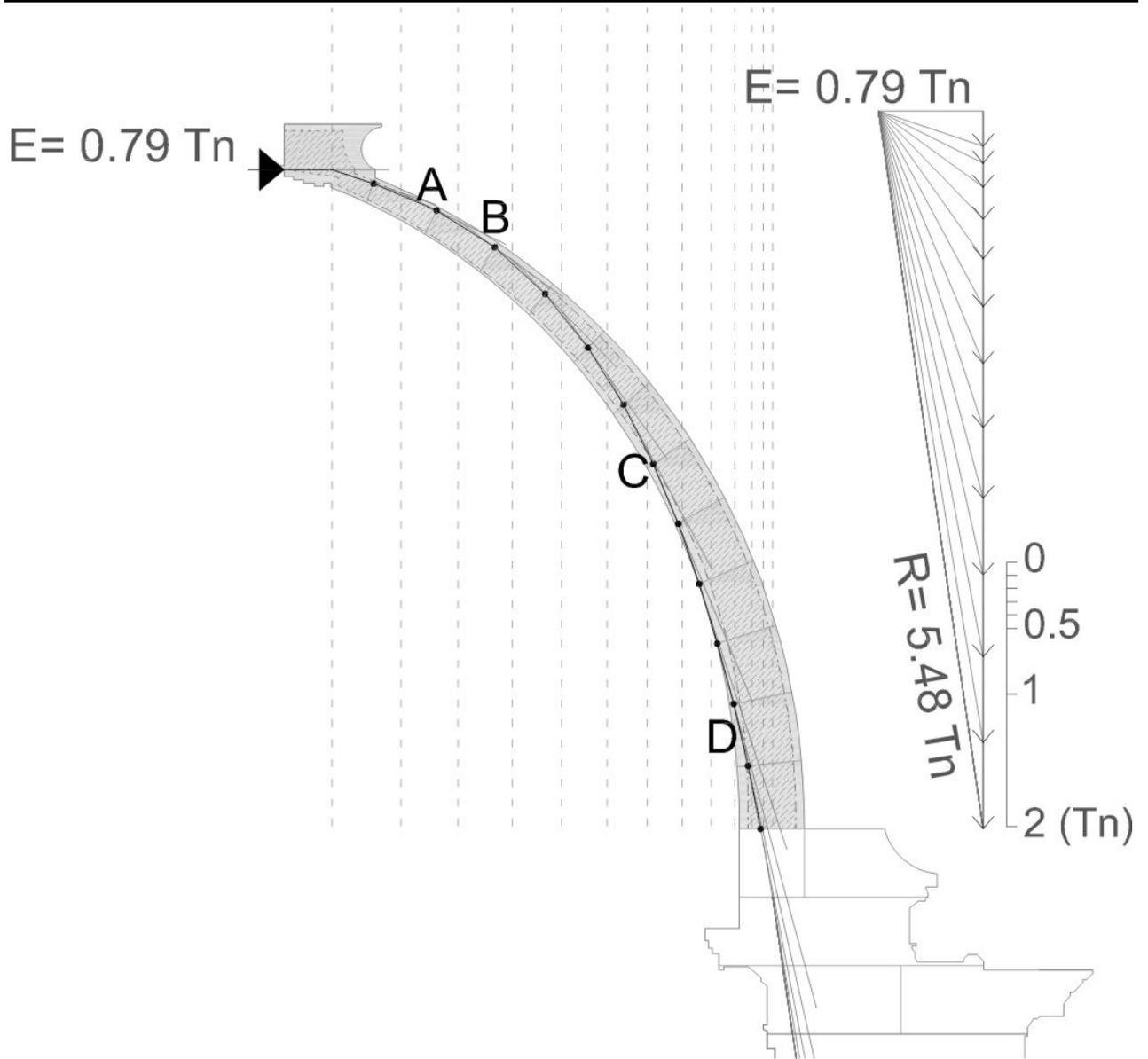
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.5 en la corona superior de la cúpula y por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.5 del salmer. Entre los puntos B y C, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



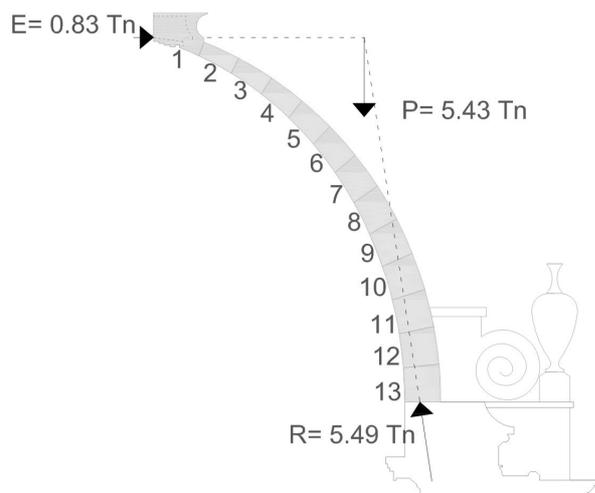
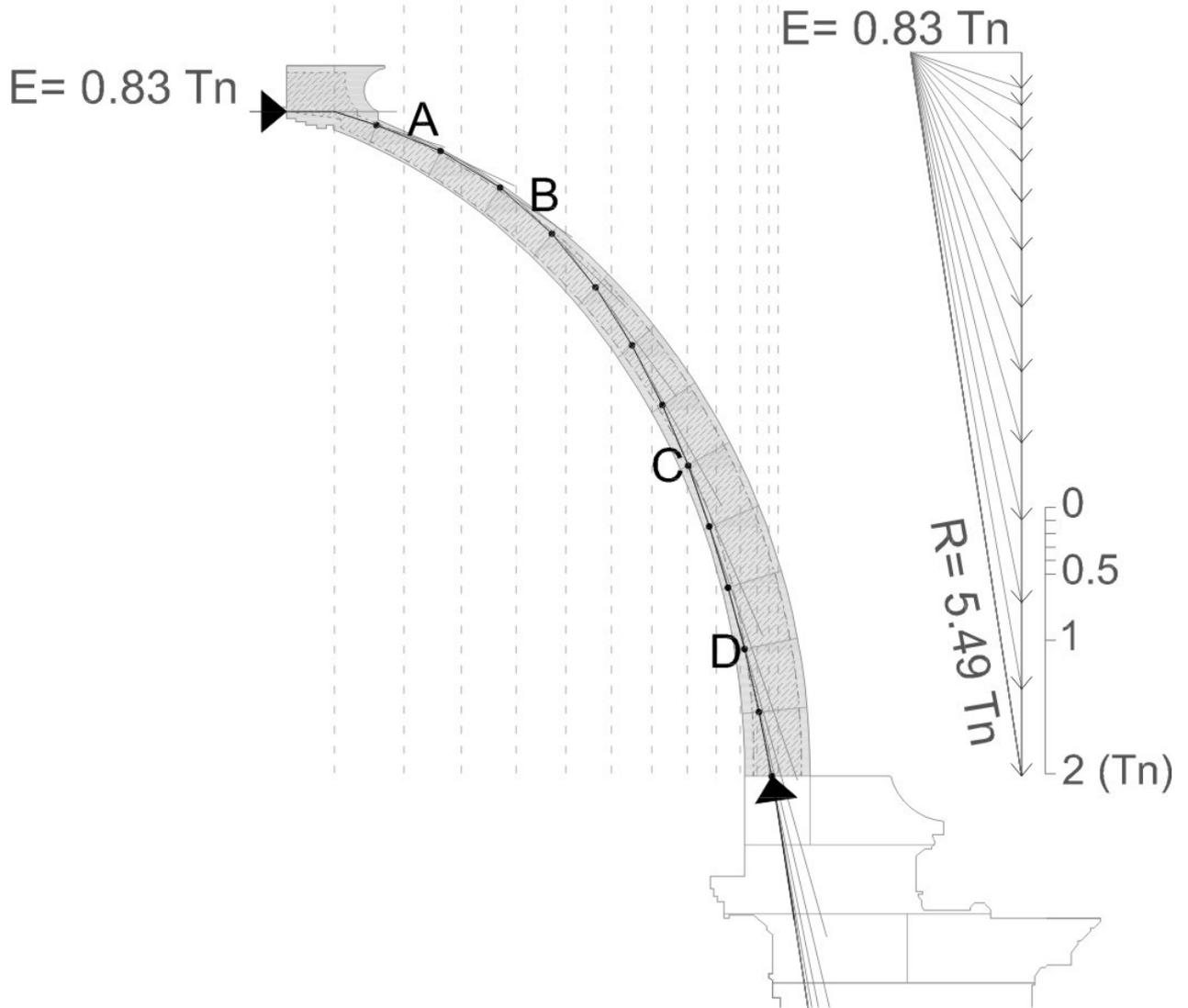
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.5 en la corona superior de la cúpula y por el punto medio del límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.5 del salmer. Entre los puntos B y C, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



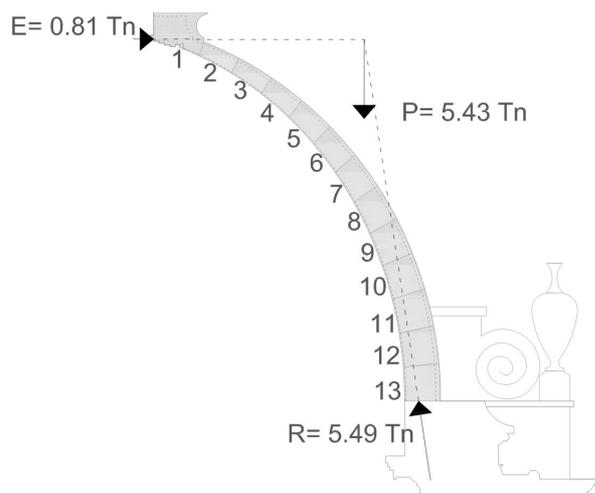
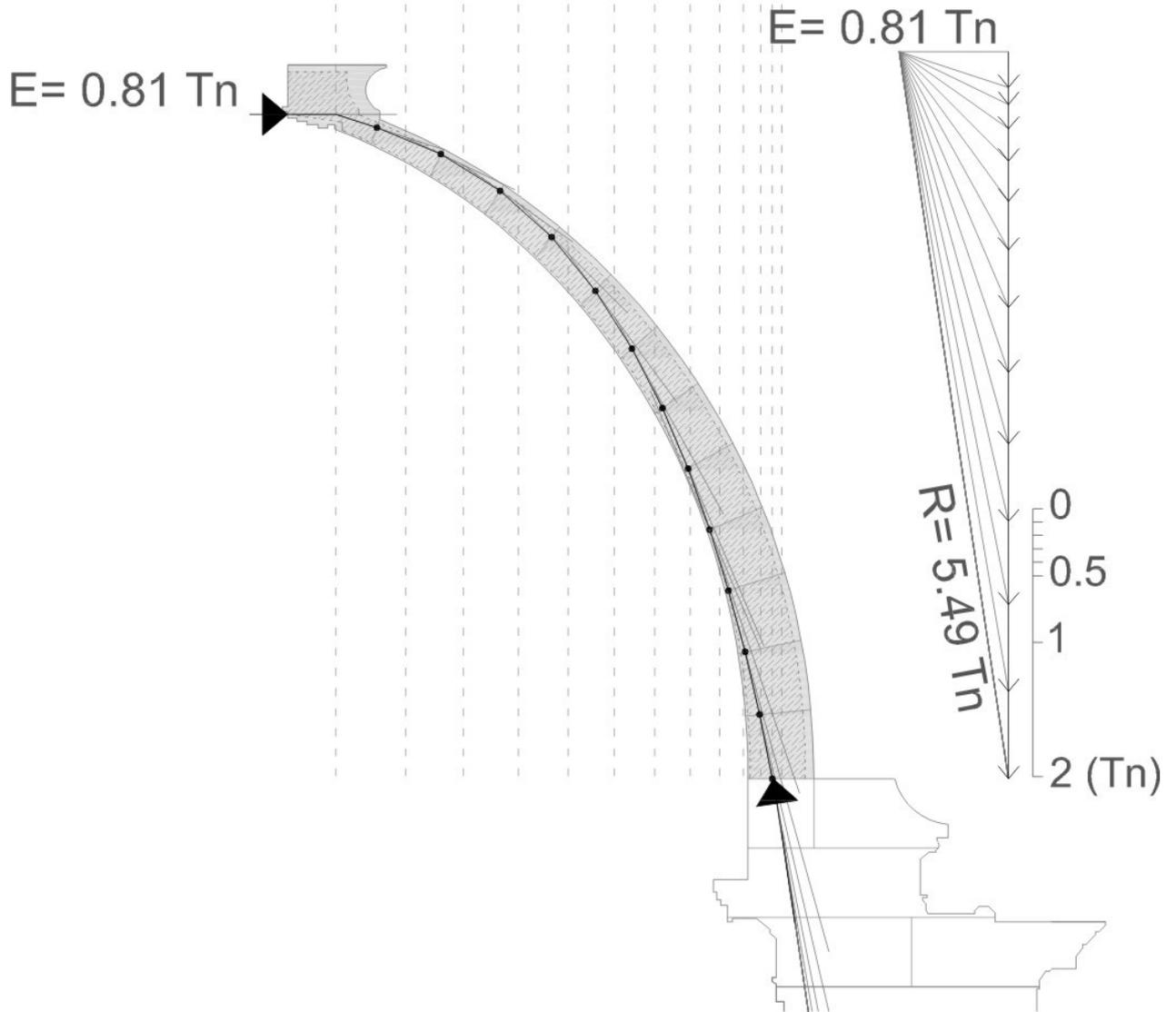
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.4 en la corona superior de la cúpula y por el punto medio del límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.4 del salmer. Aunque la línea de empujes se encuentra encerrada en el perímetro de la cúpula, entre el tramo A-B, la resultante se encuentra fuera del ancho central de factor de seguridad 1.4, obteniendo un factor de seguridad de valor 1, resultado de dividir el ancho eficaz entre el real.



Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.4 en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.4 del salmer. La sección queda encerrada dentro del perímetro de la cúpula, pero entre los tramos A-B y C-D, la resultante se encuentra fuera del ancho central de factor de seguridad 1.4, con un factor de seguridad de valor 1, obtenido de dividir el ancho real entre el eficaz.



Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.4 en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.4 del salmer. La sección queda encerrada dentro del perímetro de la cúpula, pero entre los tramos A-B y C-D, la resultante se encuentra fuera del ancho central de factor de seguridad 1.4, con un factor de seguridad de valor 1.5, obtenido de dividir el ancho real entre el eficaz.

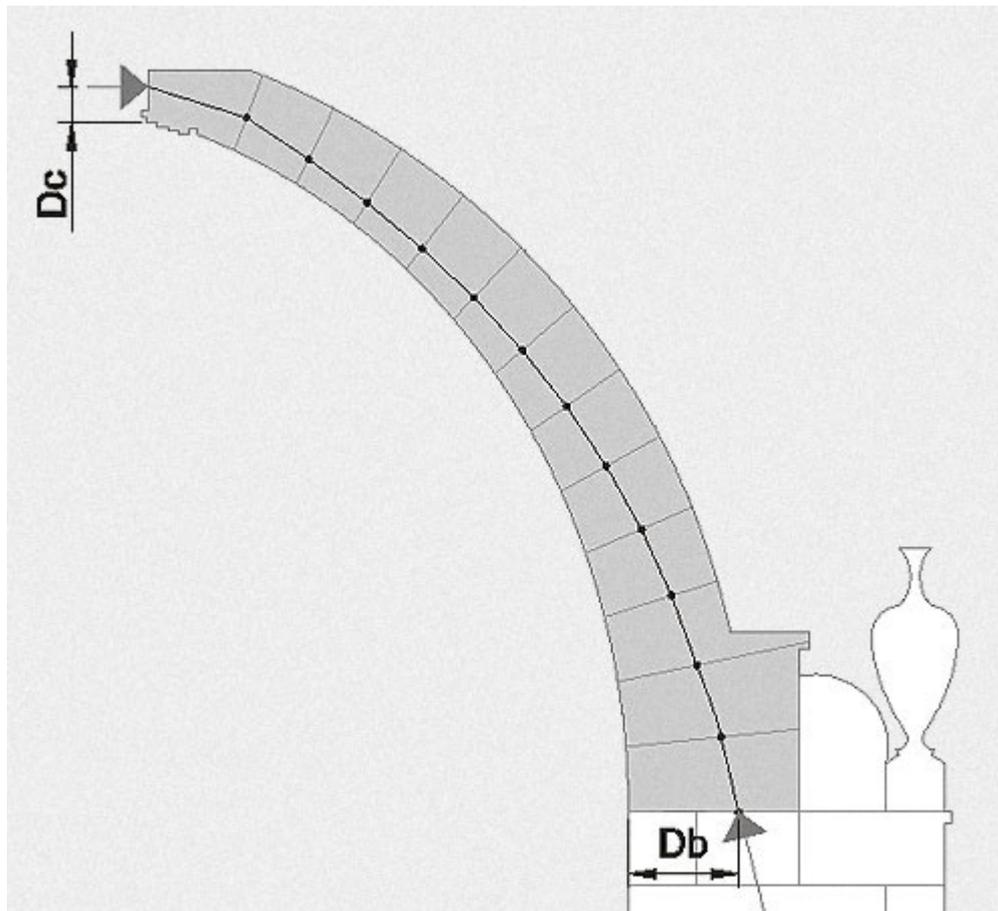


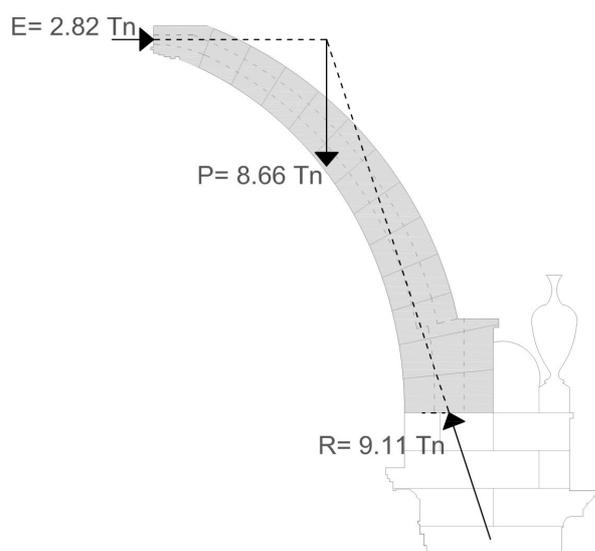
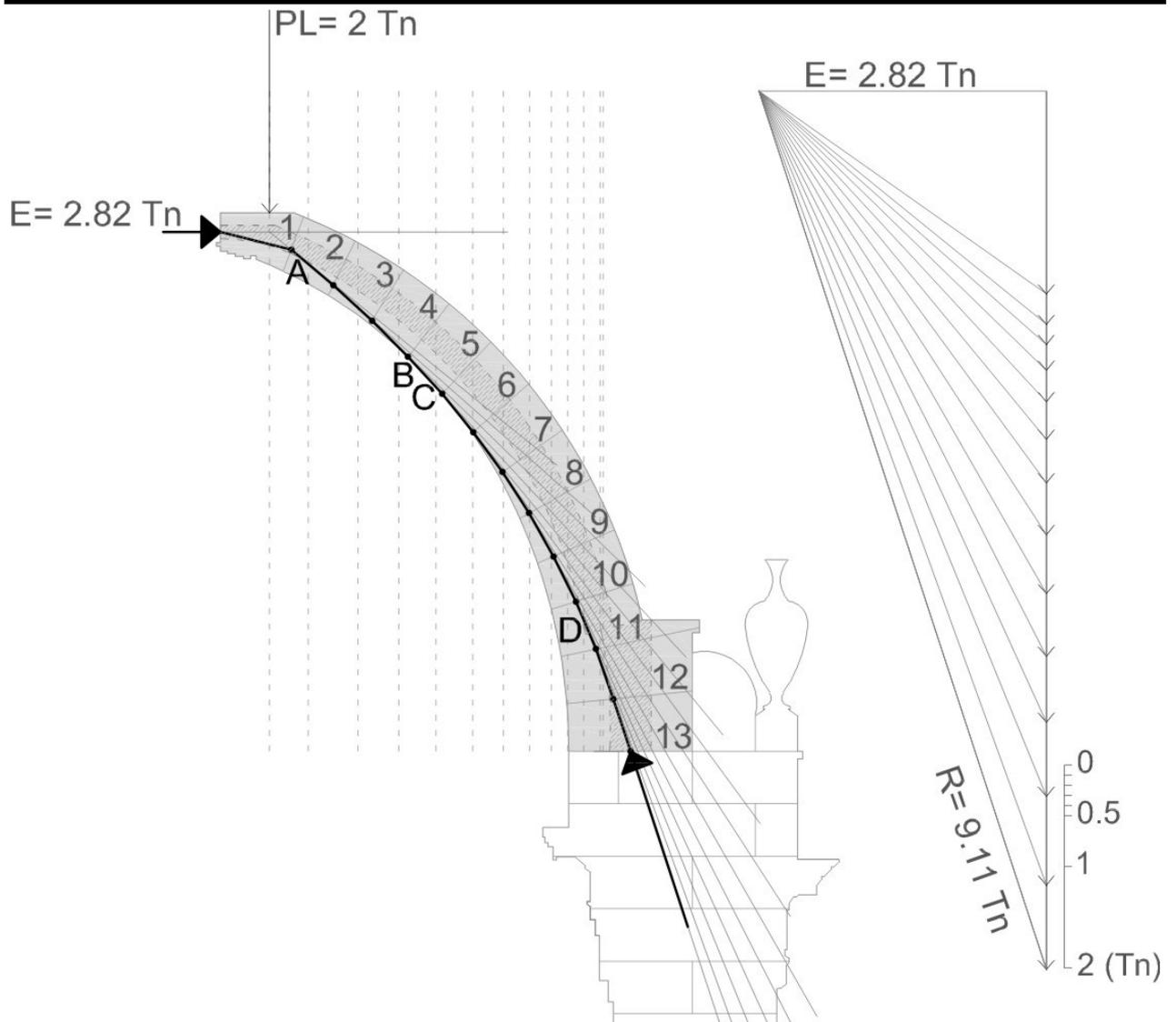
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.3 en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite inferior del ancho central de factor de seguridad 1.3 del salmer. La resultante queda dentro del ancho central de factor de seguridad 1.3, por lo que presenta un factor de seguridad geométrico de este valor. Se evalúa la situación como estable, pero con un coeficiente de seguridad muy bajo, generando tracciones en la cúpula.

ANEXO B.

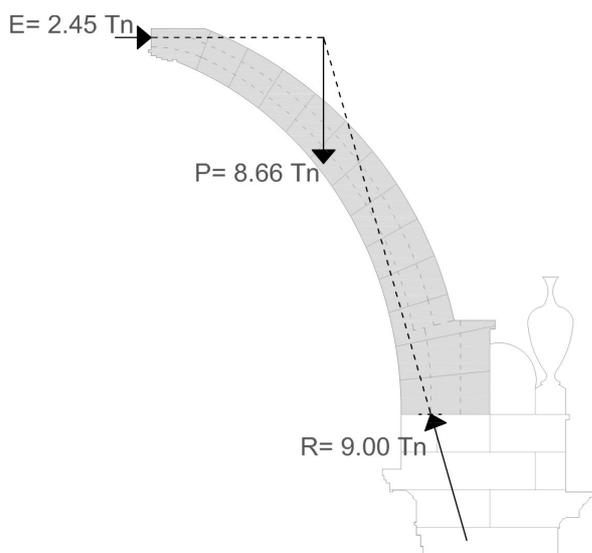
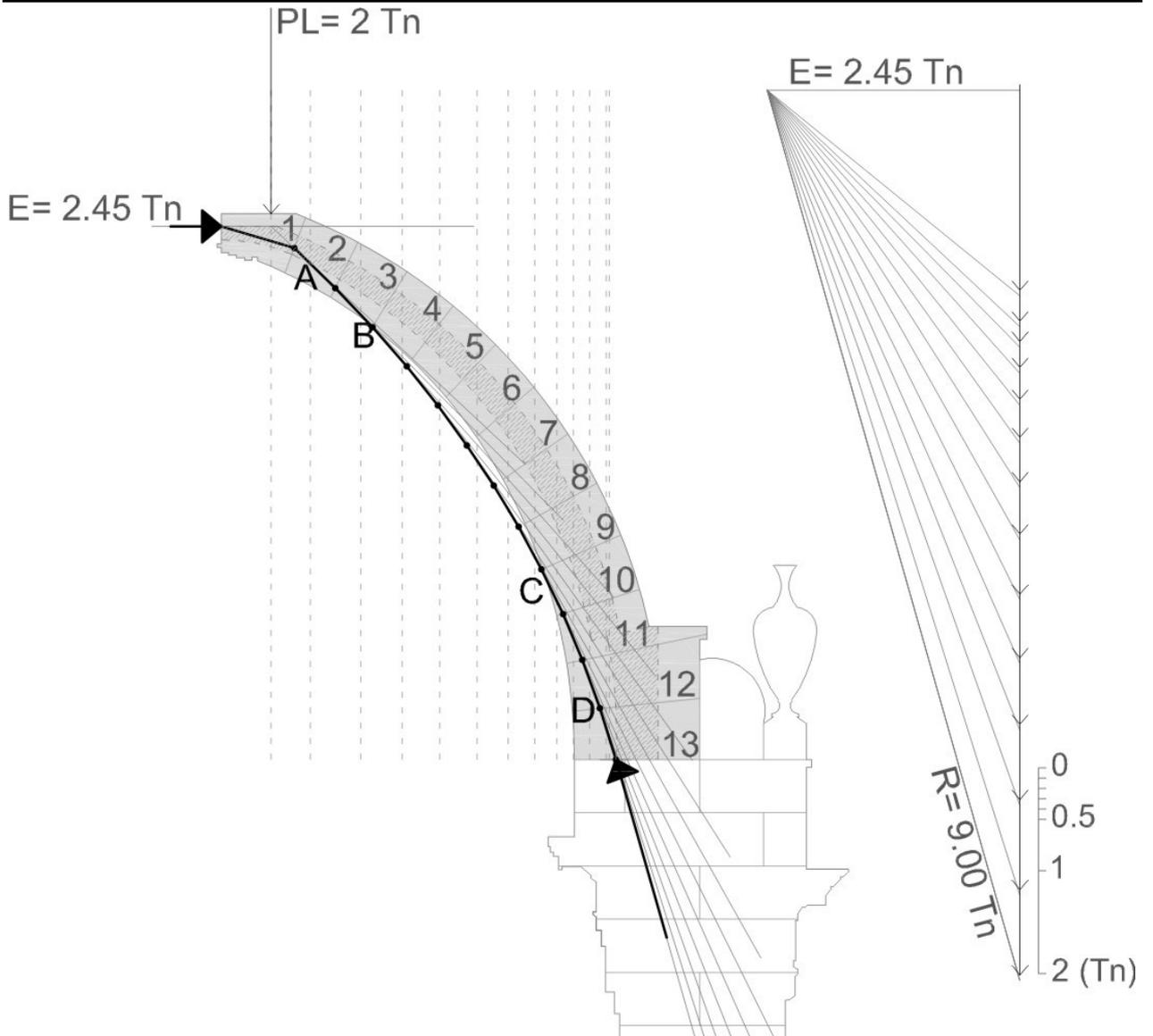
Obtención de la línea de empujes considerando en el cálculo un sector radial que comprende 1/20 de la parte total de la cúpula con un ángulo de 18° , considerando que la cáscara y las costillas trabajan de forma solidaria frente al esfuerzo, soportando una carga mayorada de la linterna de valor 20 KN.

Partiendo de este modelo de geometría y con la estimación de cargas evaluadas, se efectúan sucesivos cálculos de empujes hasta conseguir encajarlo en un factor de seguridad geométrico concreto. Con este objetivo, se identifican cada una de las líneas de empuje estudiadas a través de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_c , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro es el punto de paso de la resultante, aplicado en el salmer de la cúpula, cuya posición queda definida por la distancia D_b , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del esfuerzo.

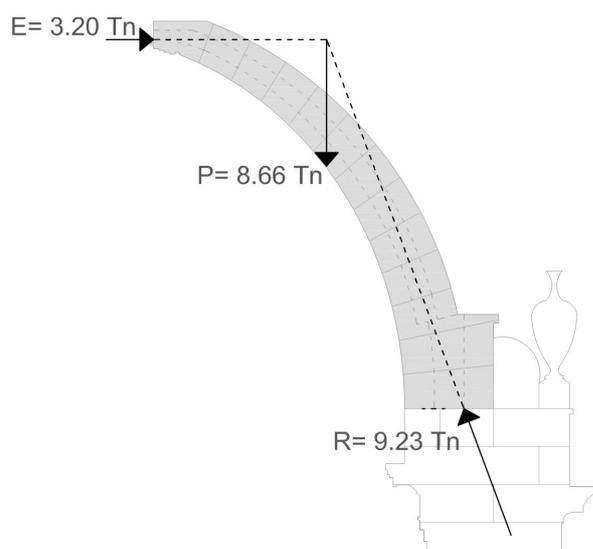
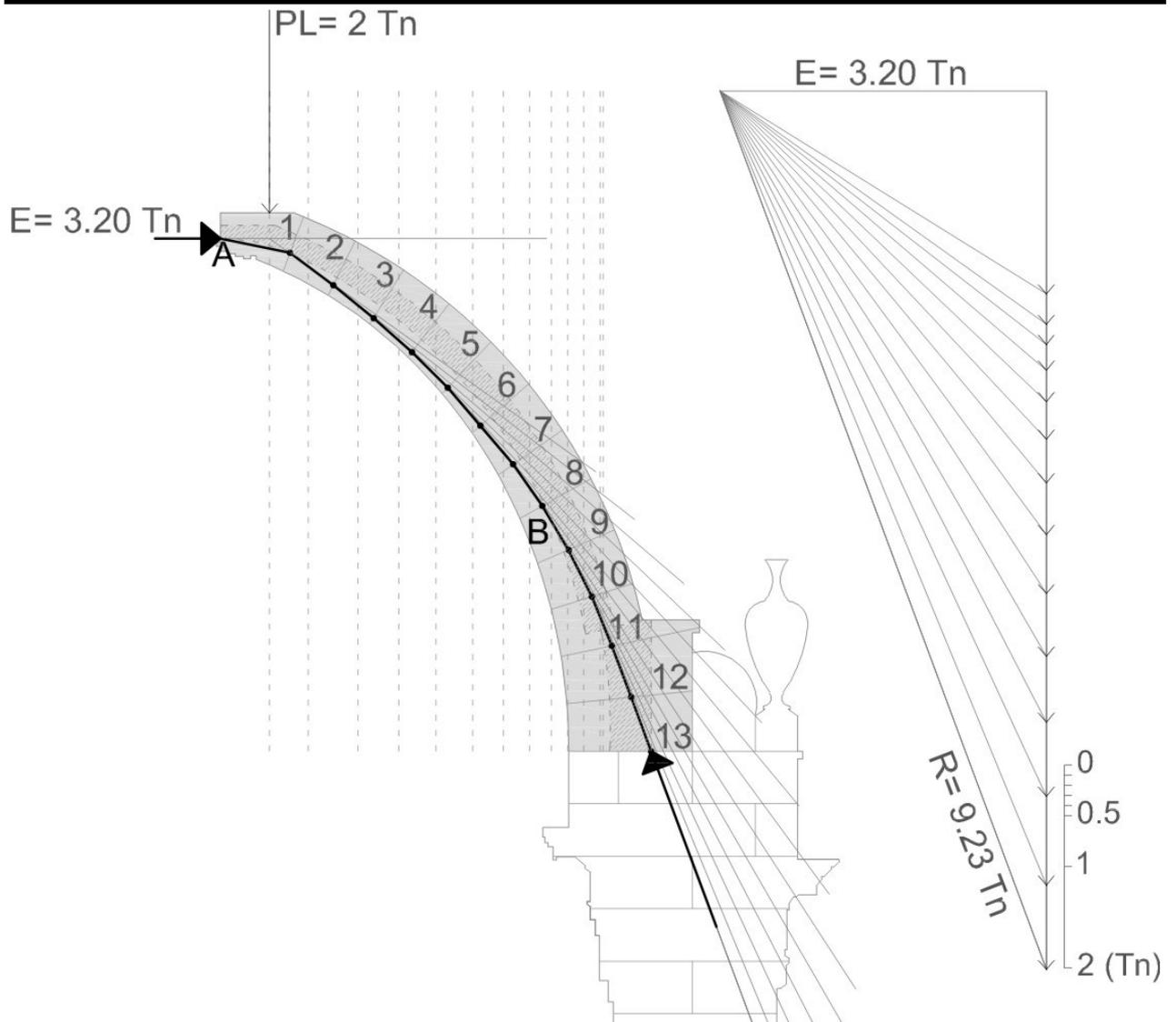




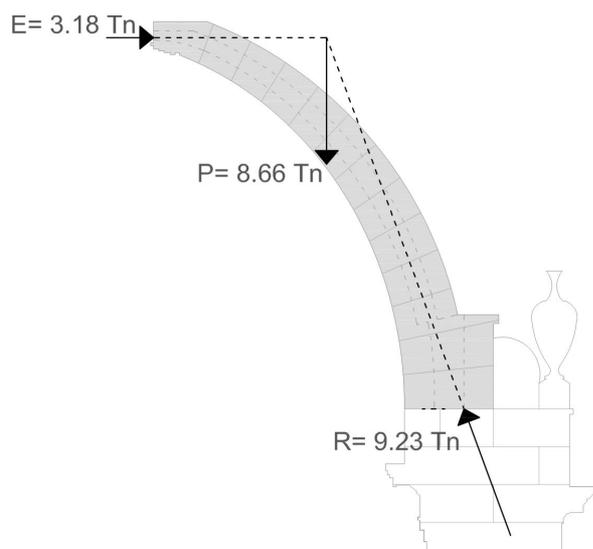
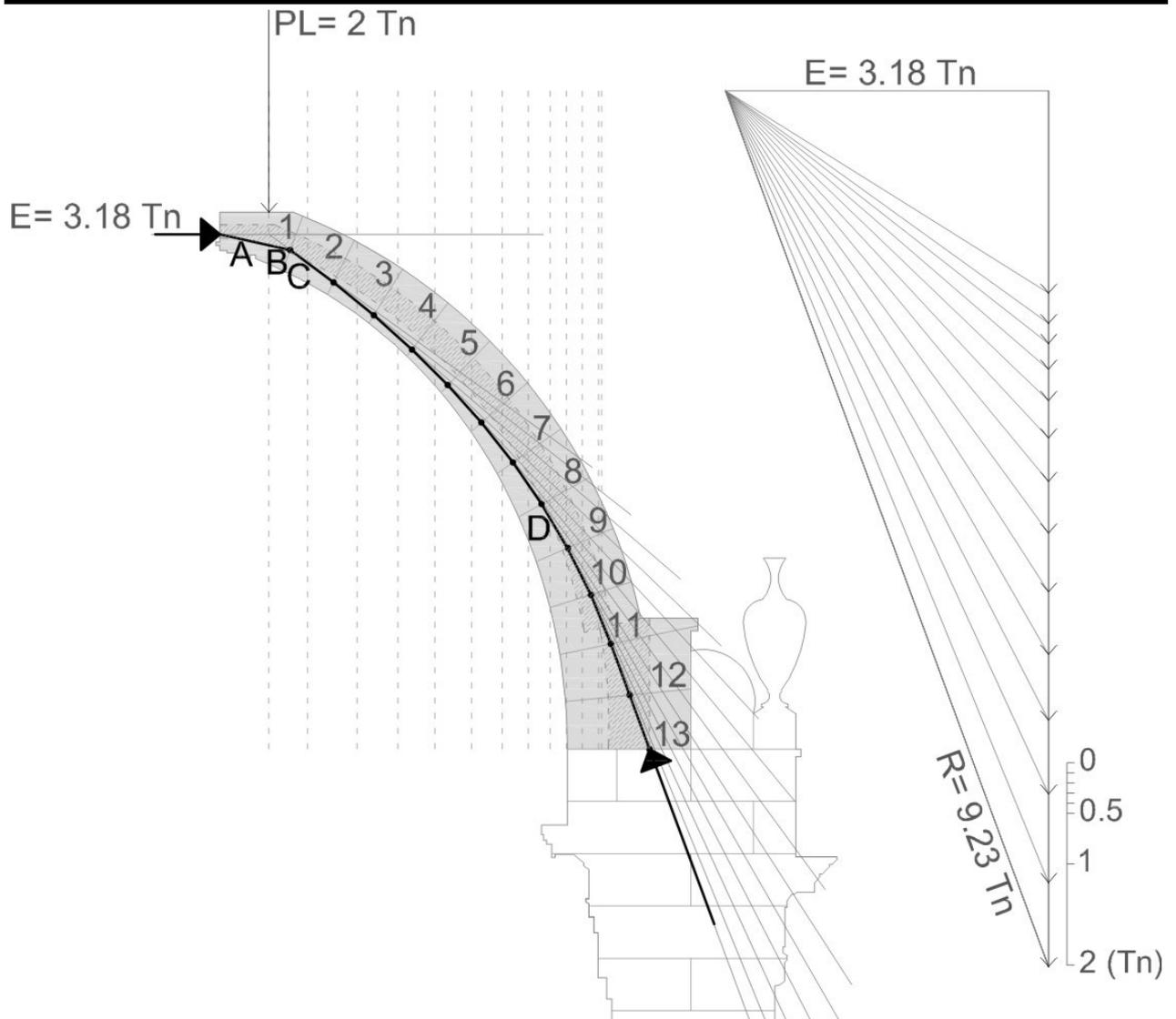
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula y por el punto medio de la sección en el salmer. Entre los puntos B y C, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



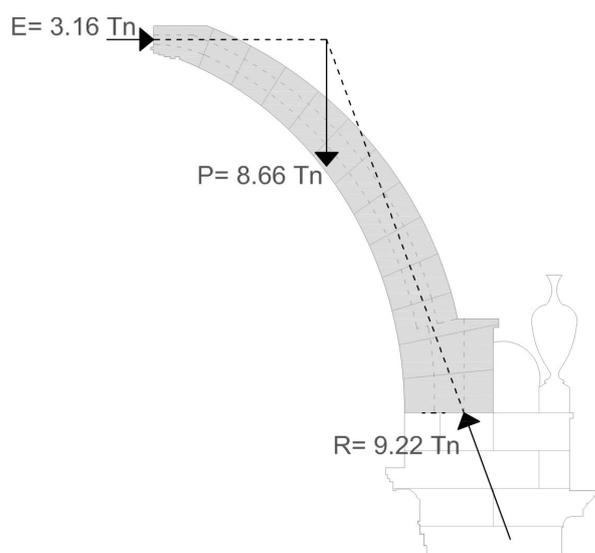
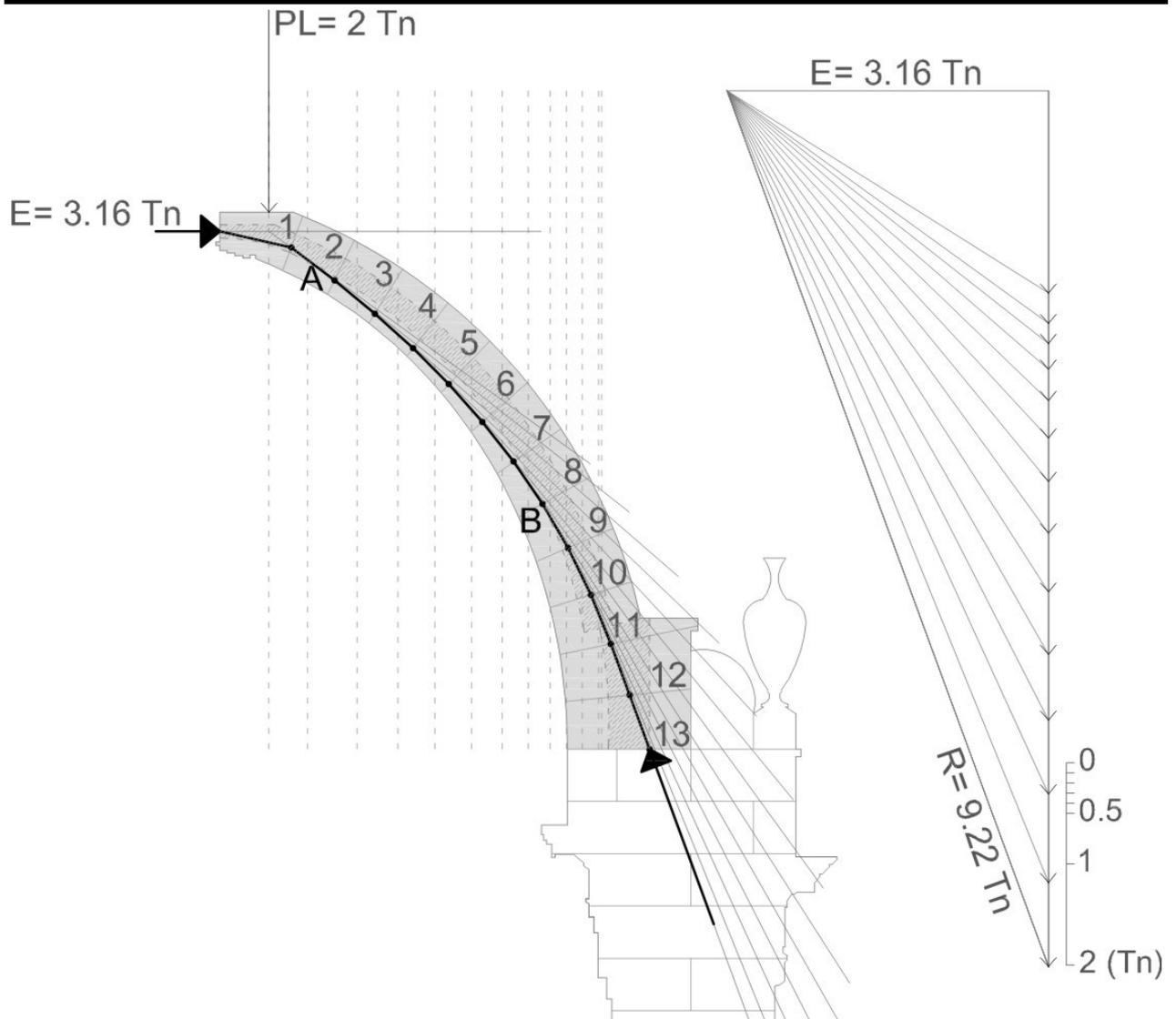
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite superior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite inferior del tercio central del salmer. Entre los puntos B y C, la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



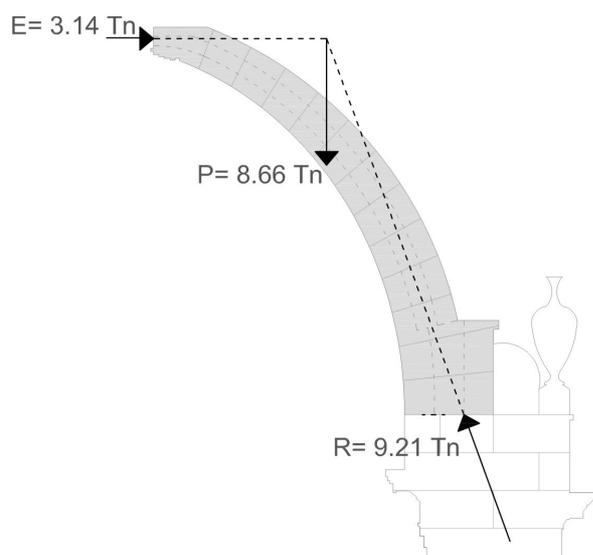
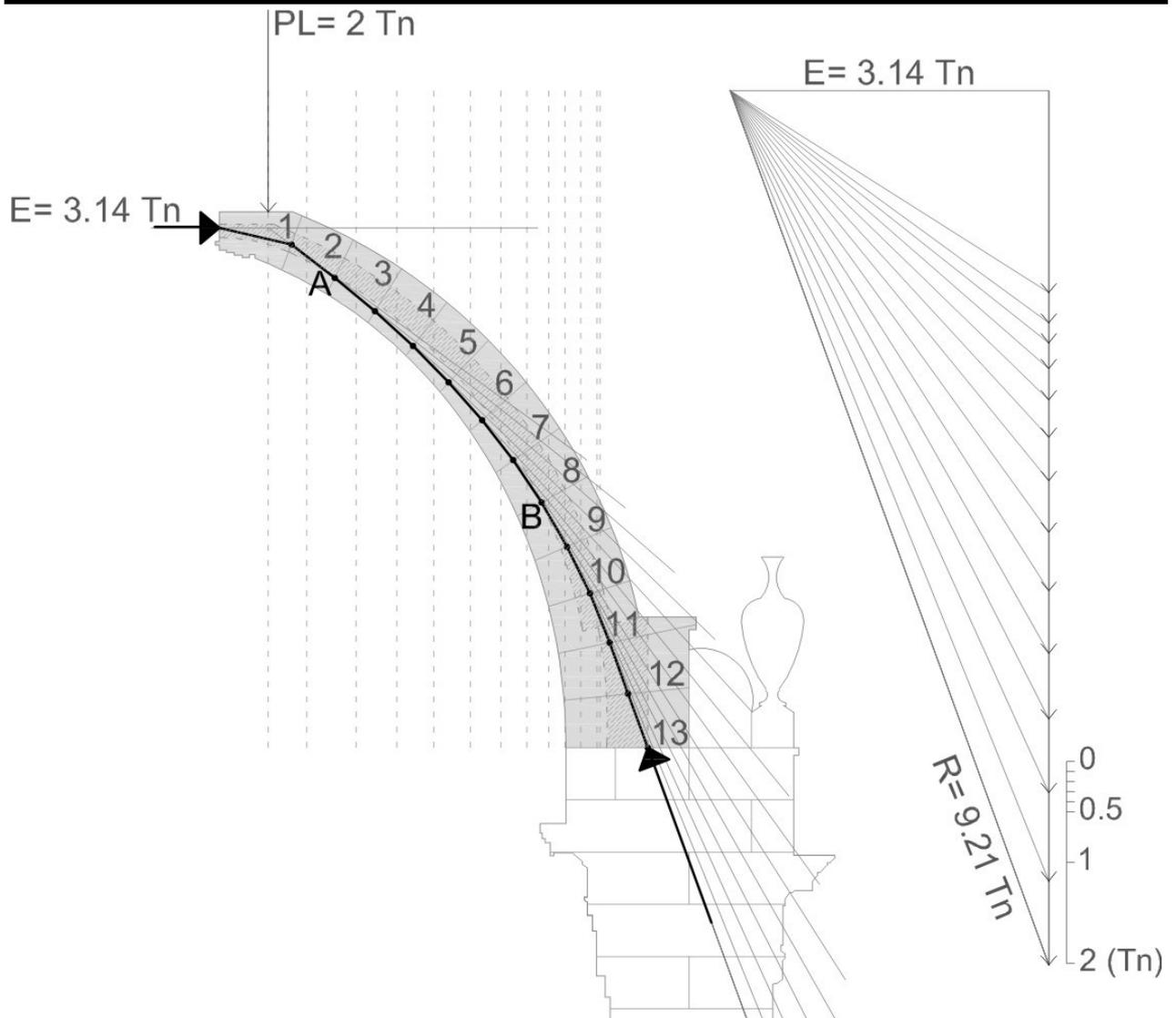
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite inferior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzado un coeficiente de seguridad geométrico de valor 1.24, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



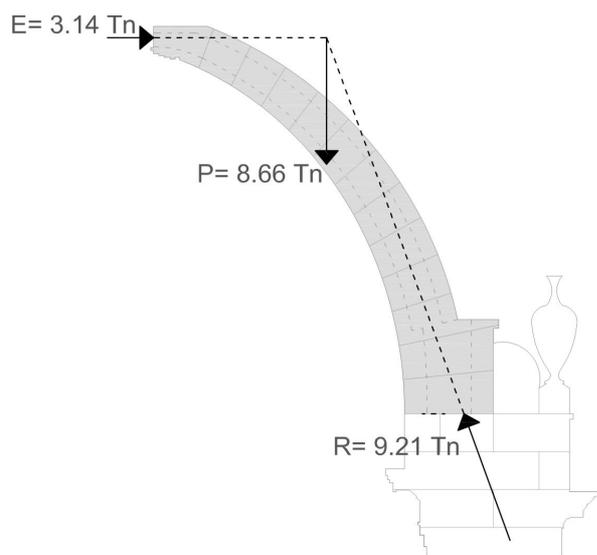
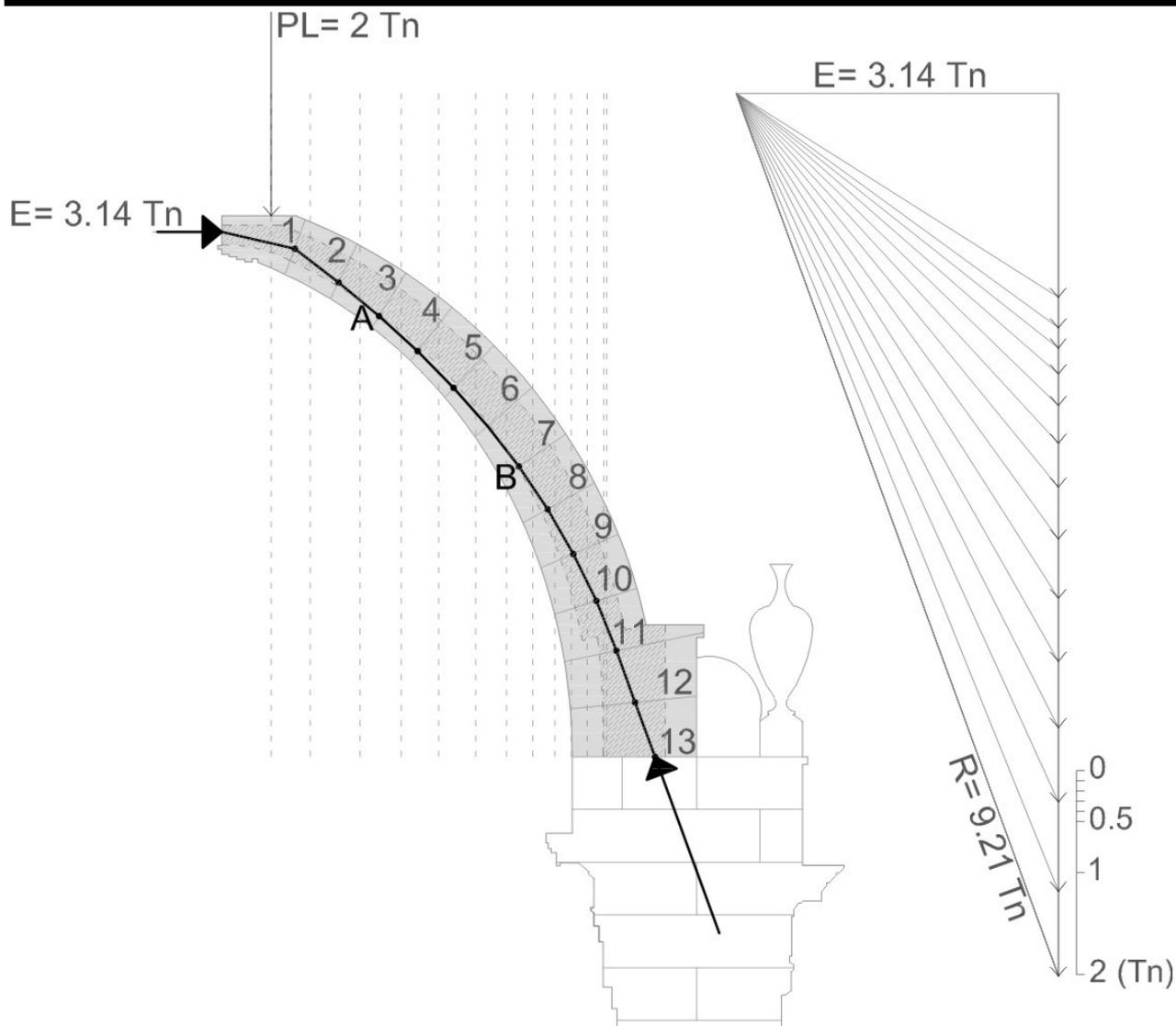
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite inferior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los tramos A-B y C-D, la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.32, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



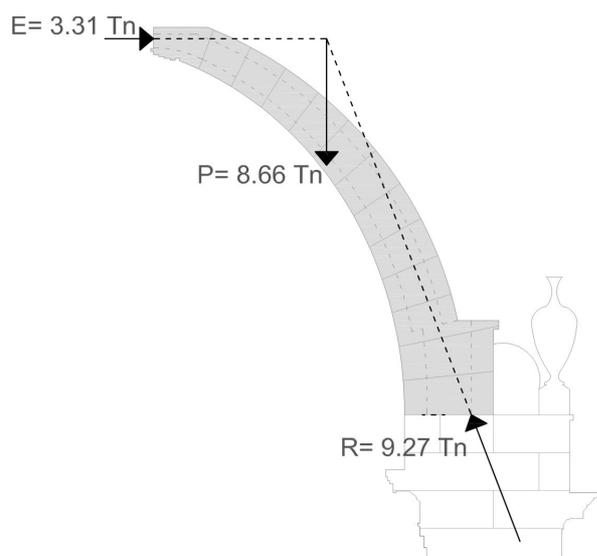
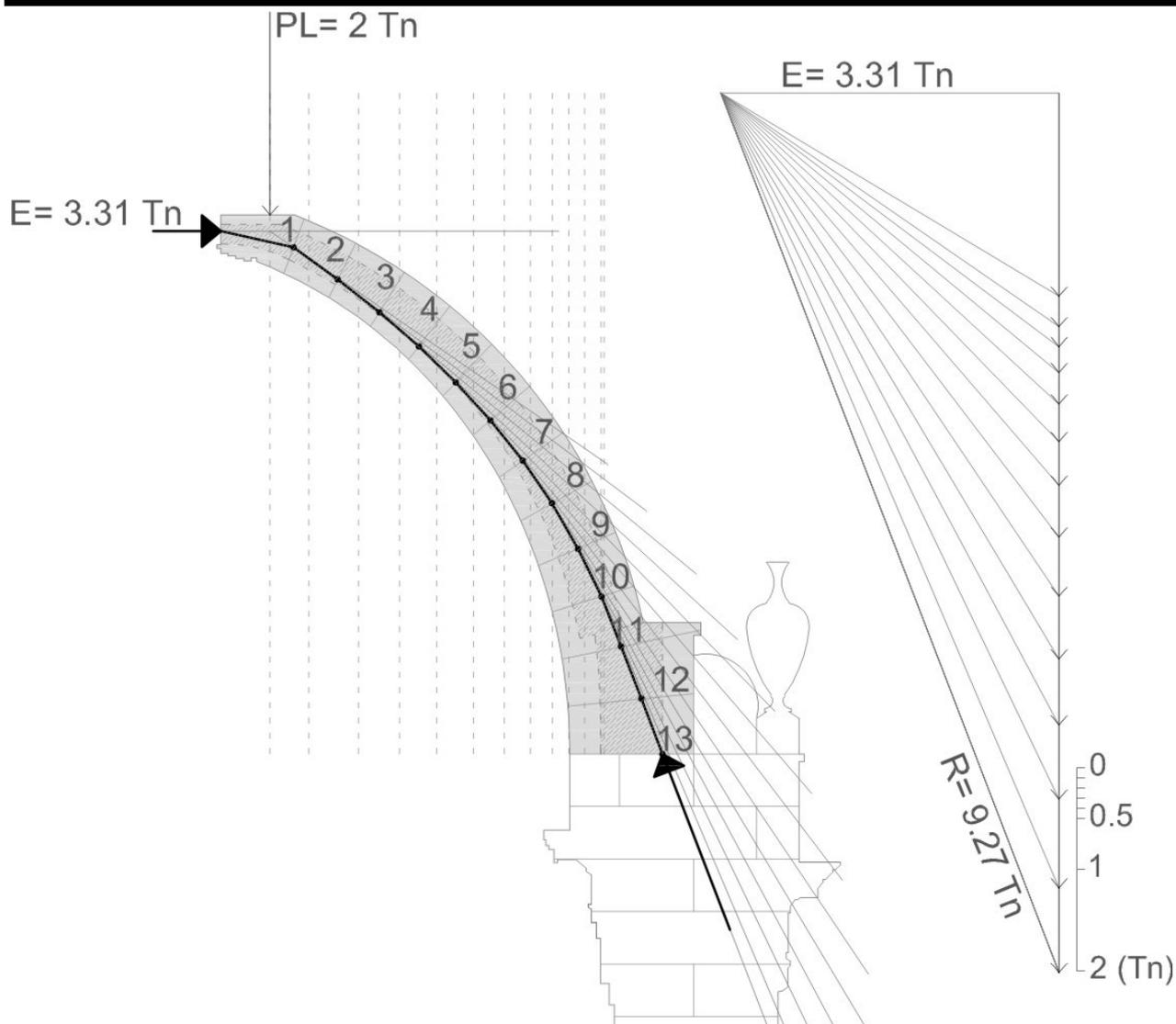
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto medio del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, alcanzando un factor de seguridad de 1.55, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



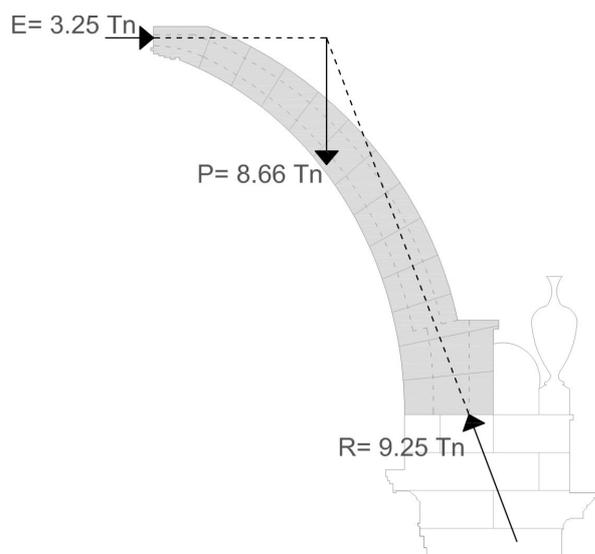
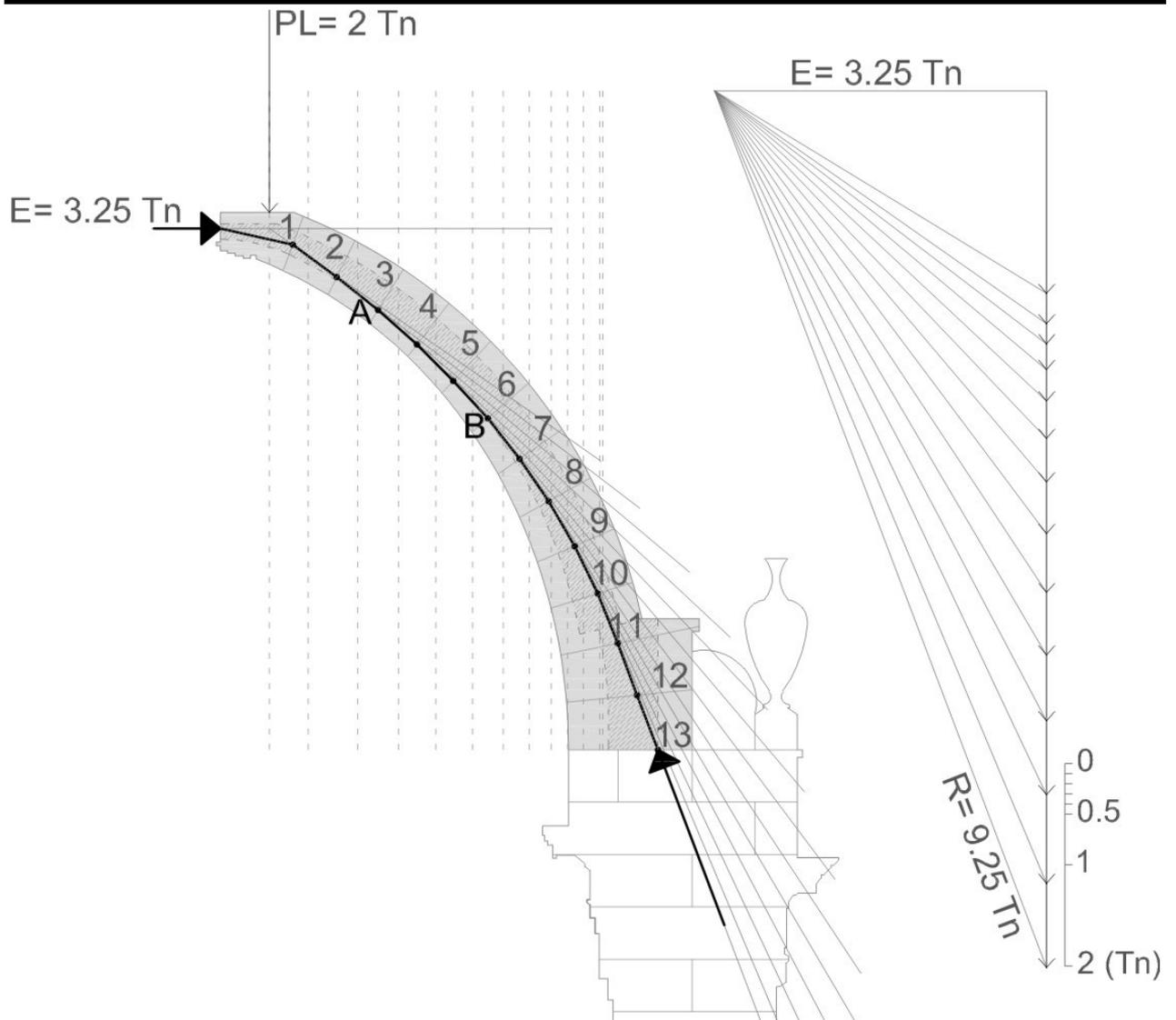
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.55, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



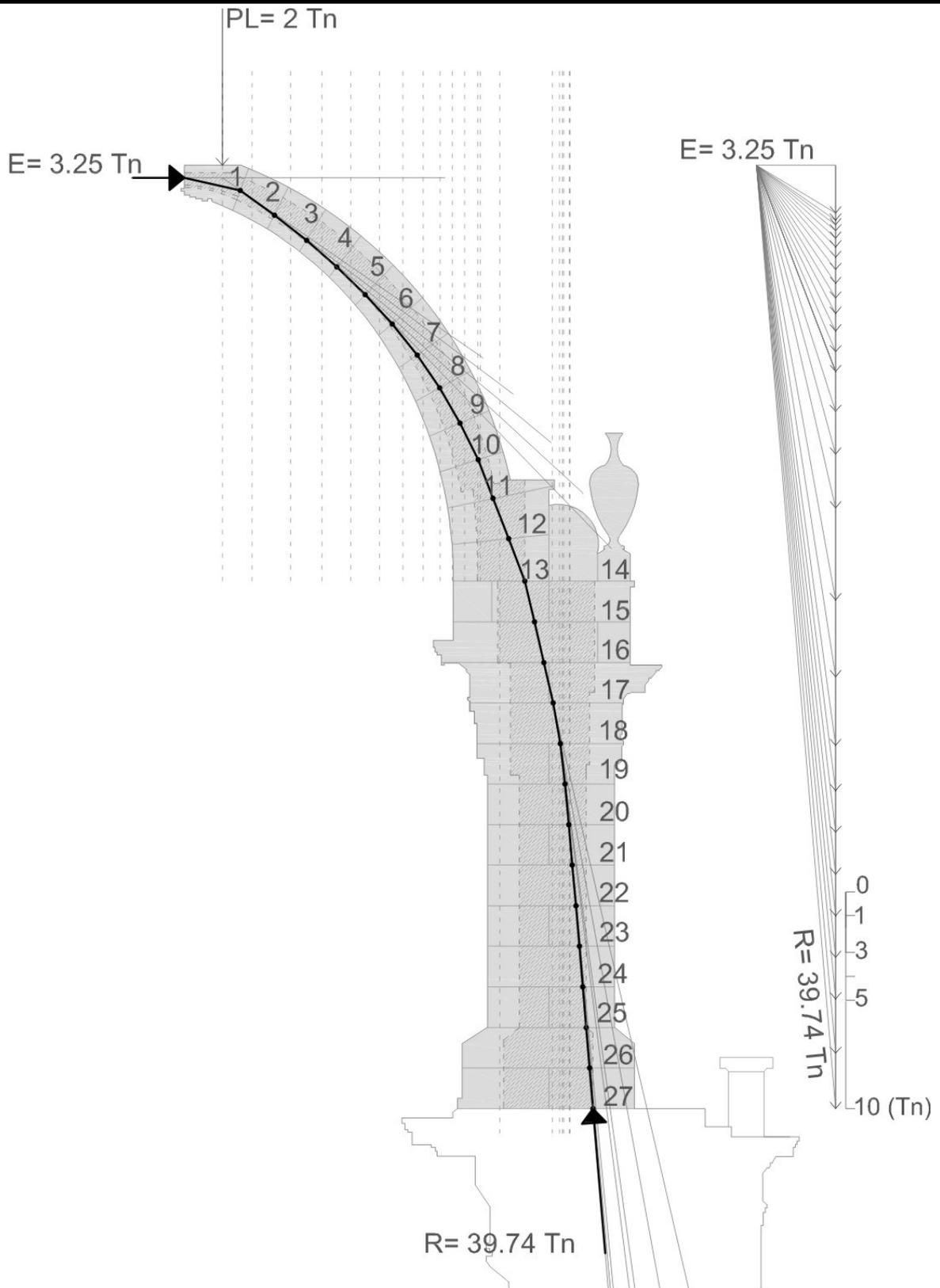
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al punto medio de la mitad central en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite superior de la mitad central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.55, obtenido de dividir el ancho real entre el ancho eficaz de ésta.



Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior de la mitad central en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite superior de la mitad central del salmer. La resultante queda completamente dentro del ancho la mitad central de factor de seguridad 2, por lo que presenta un factor de seguridad geométrico de este valor. Se evalúa la situación como estable, pero con un coeficiente de seguridad medio, generando tracciones en la cúpula.



Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior del ancho central de factor de seguridad 2.5 en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del ancho central de factor de seguridad 2.5 del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del ancho central de factor de seguridad 2.5, alcanzando un factor de seguridad de 2.00, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.

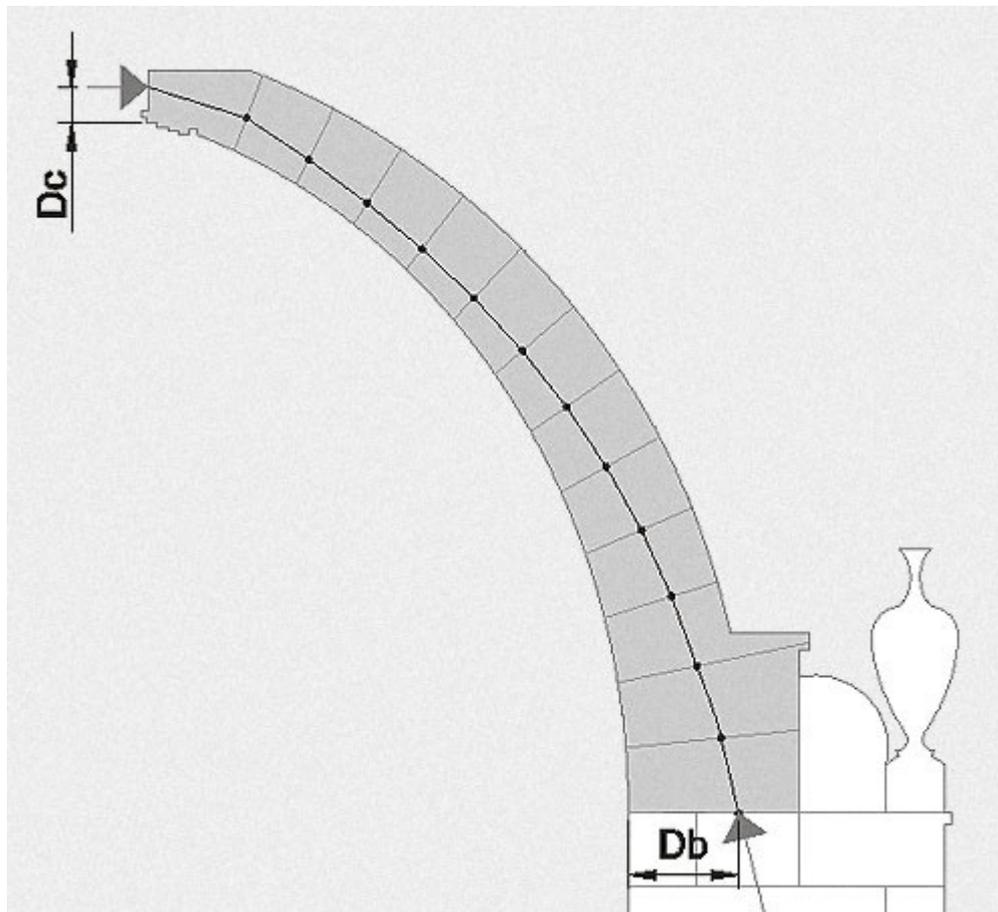


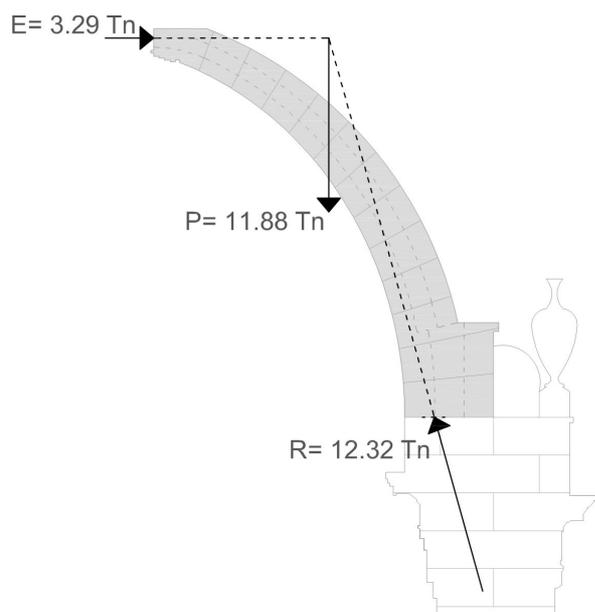
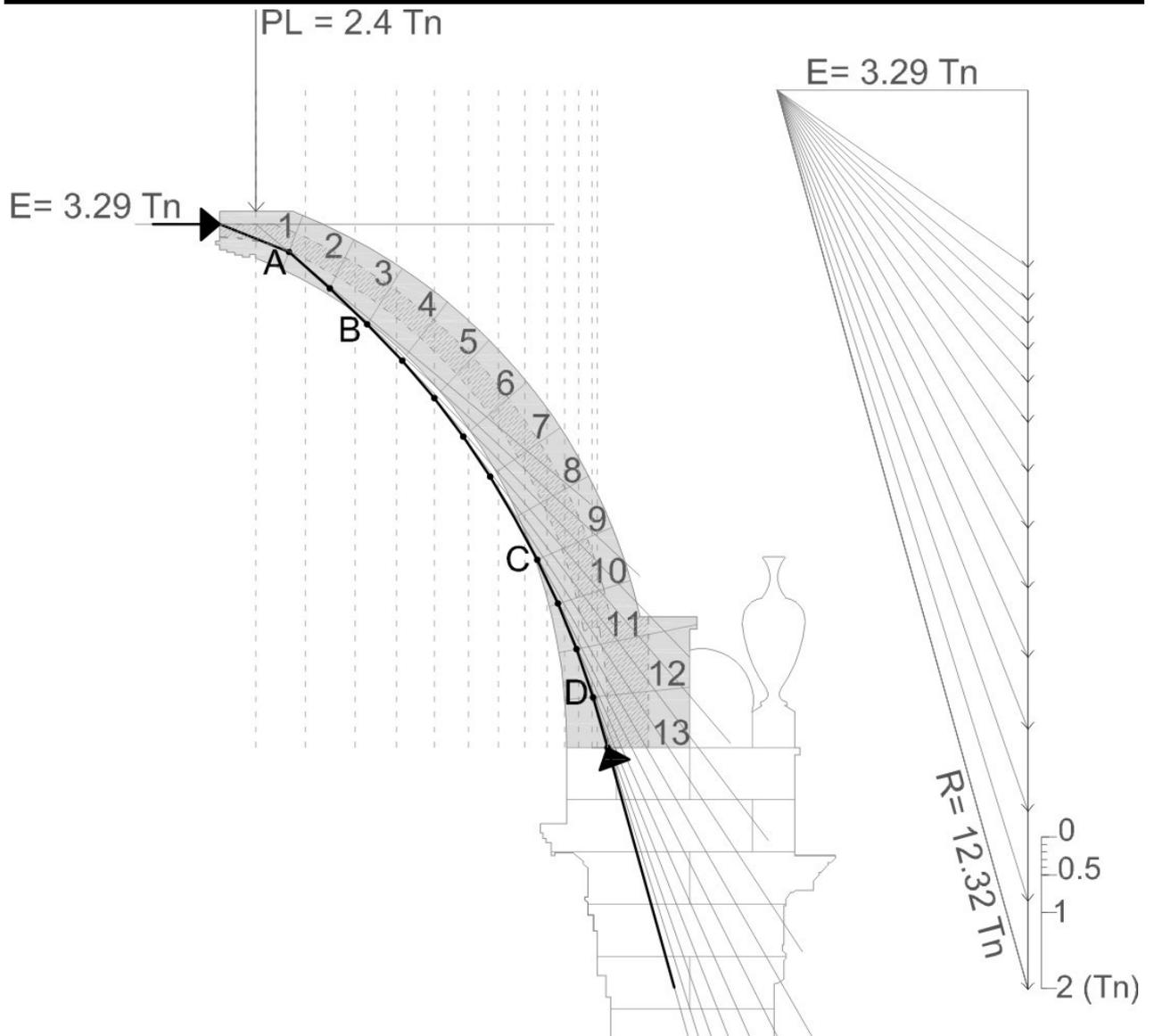
Distribución del empuje hacia la sección transversal del tambor con un factor de seguridad geométrico de valor 2, donde se observa una excentricidad hacia el exterior del empuje en la base del tambor.

ANEXO C.

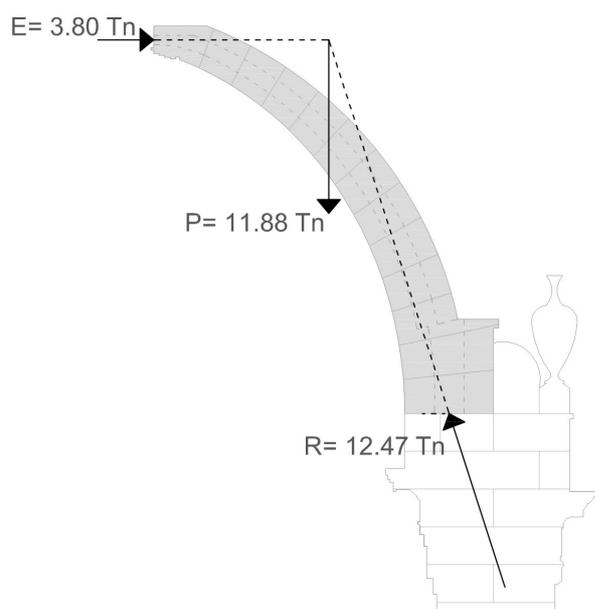
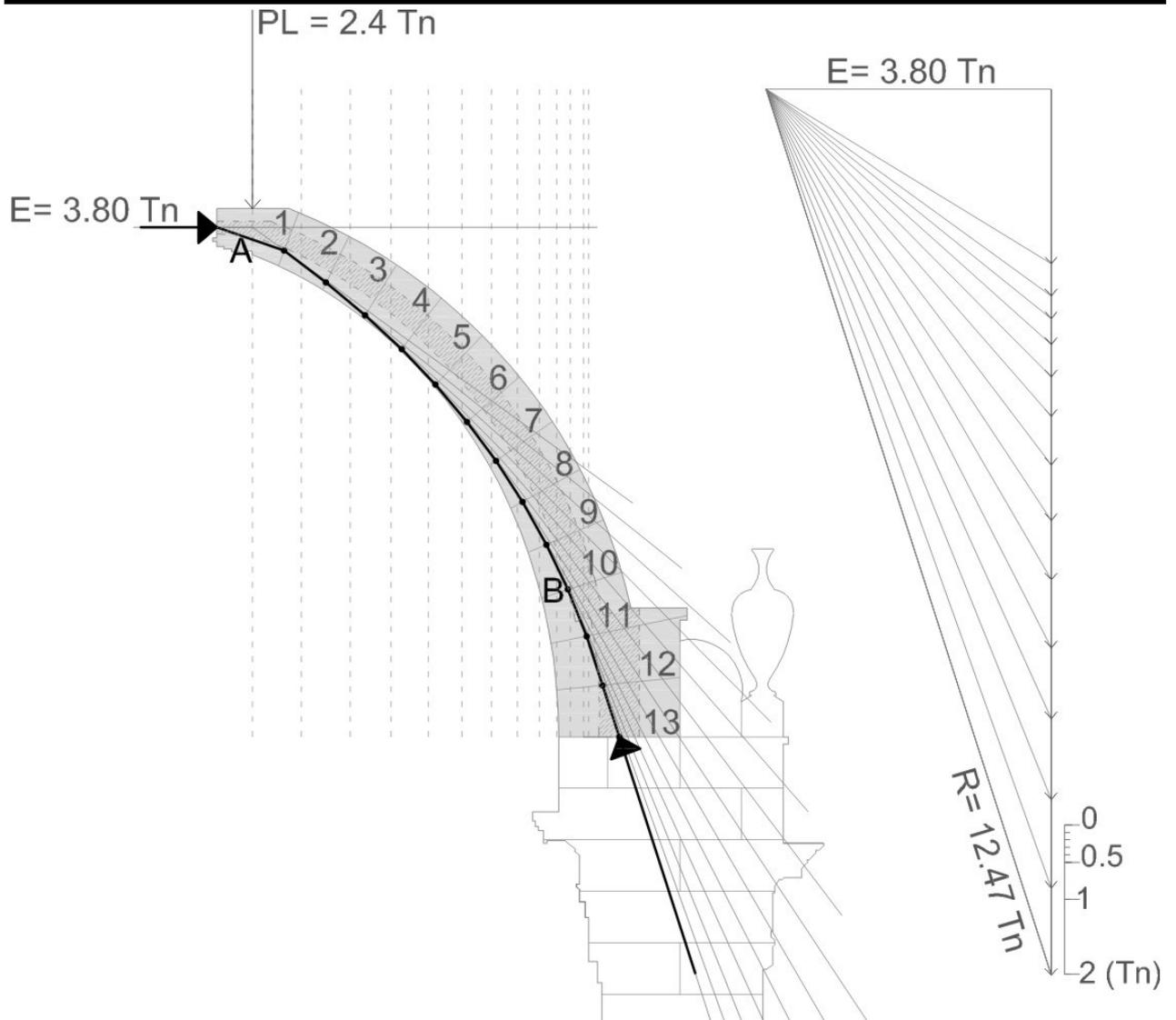
Obtención de la línea de empujes realizando el cálculo en un sector radial con un ángulo de 27° , considerando que la cáscara y las costillas trabajan de forma solidaria frente al esfuerzo, soportando una carga real de la linterna de valor de 23.40 KN.

Partiendo de este modelo de geometría y con la estimación de cargas evaluadas, se efectúan sucesivos cálculos de empujes hasta conseguir encajarlo en un factor de seguridad geométrico concreto. Con este objetivo, se identifican cada una de las líneas de empuje estudiadas a través de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_c , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro es el punto de paso de la resultante, aplicado en el salmer de la cúpula, cuya posición queda definida por la distancia D_b , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del esfuerzo.

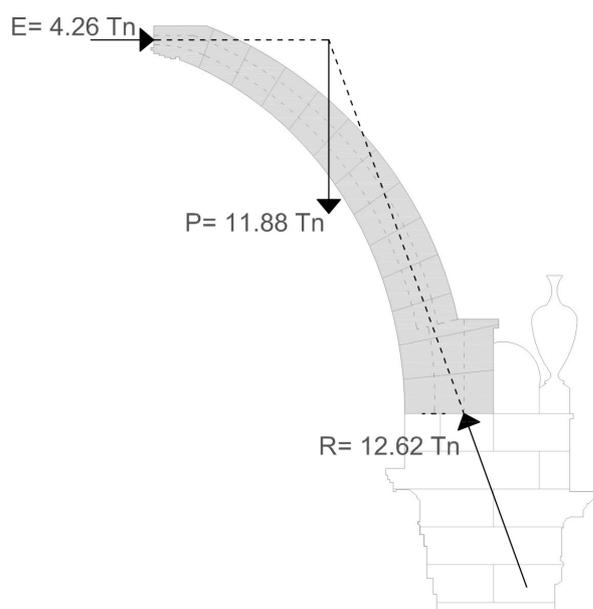
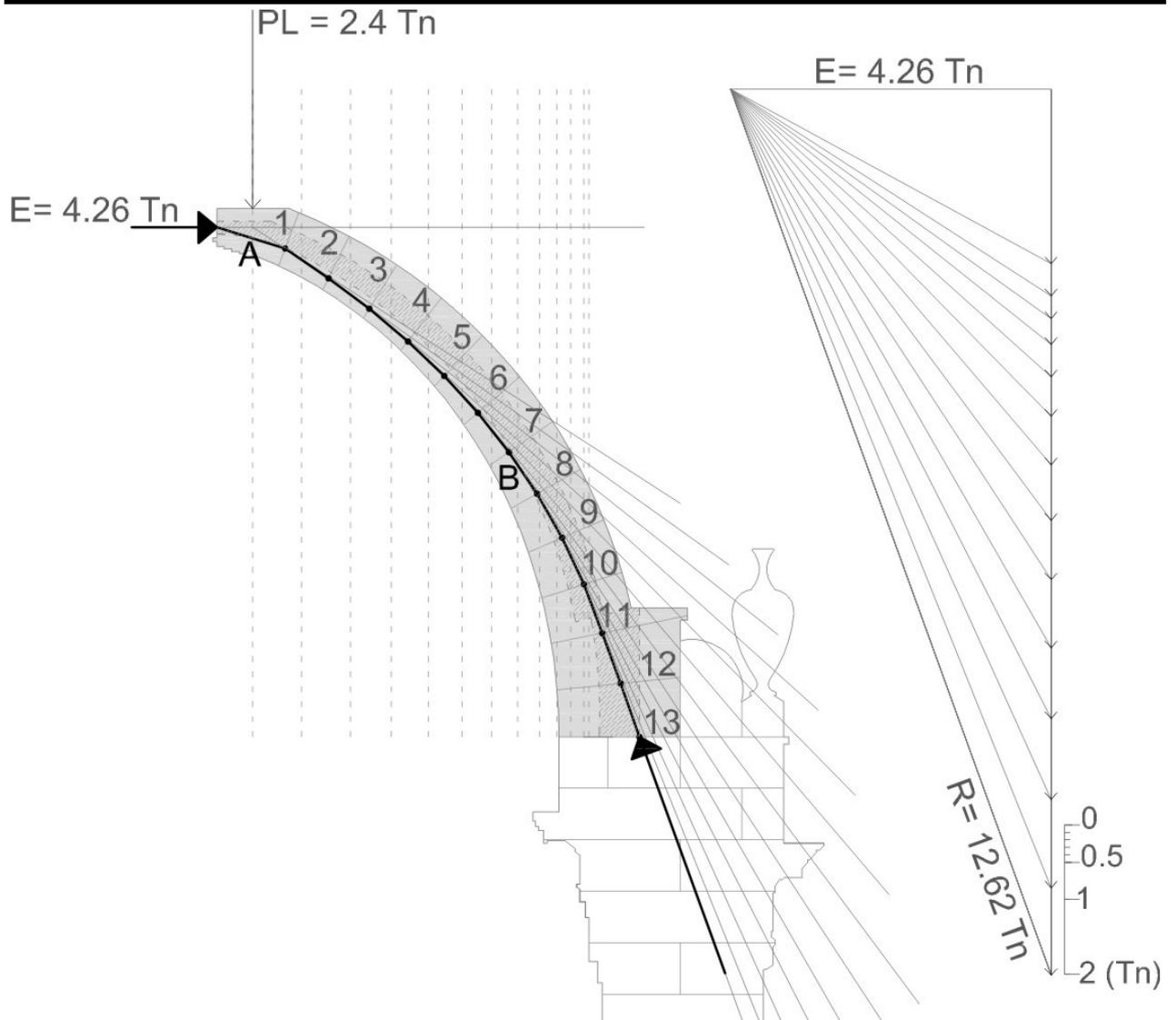




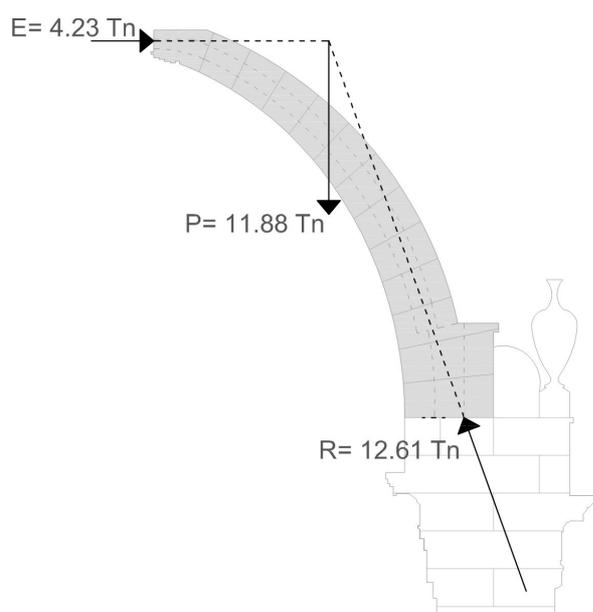
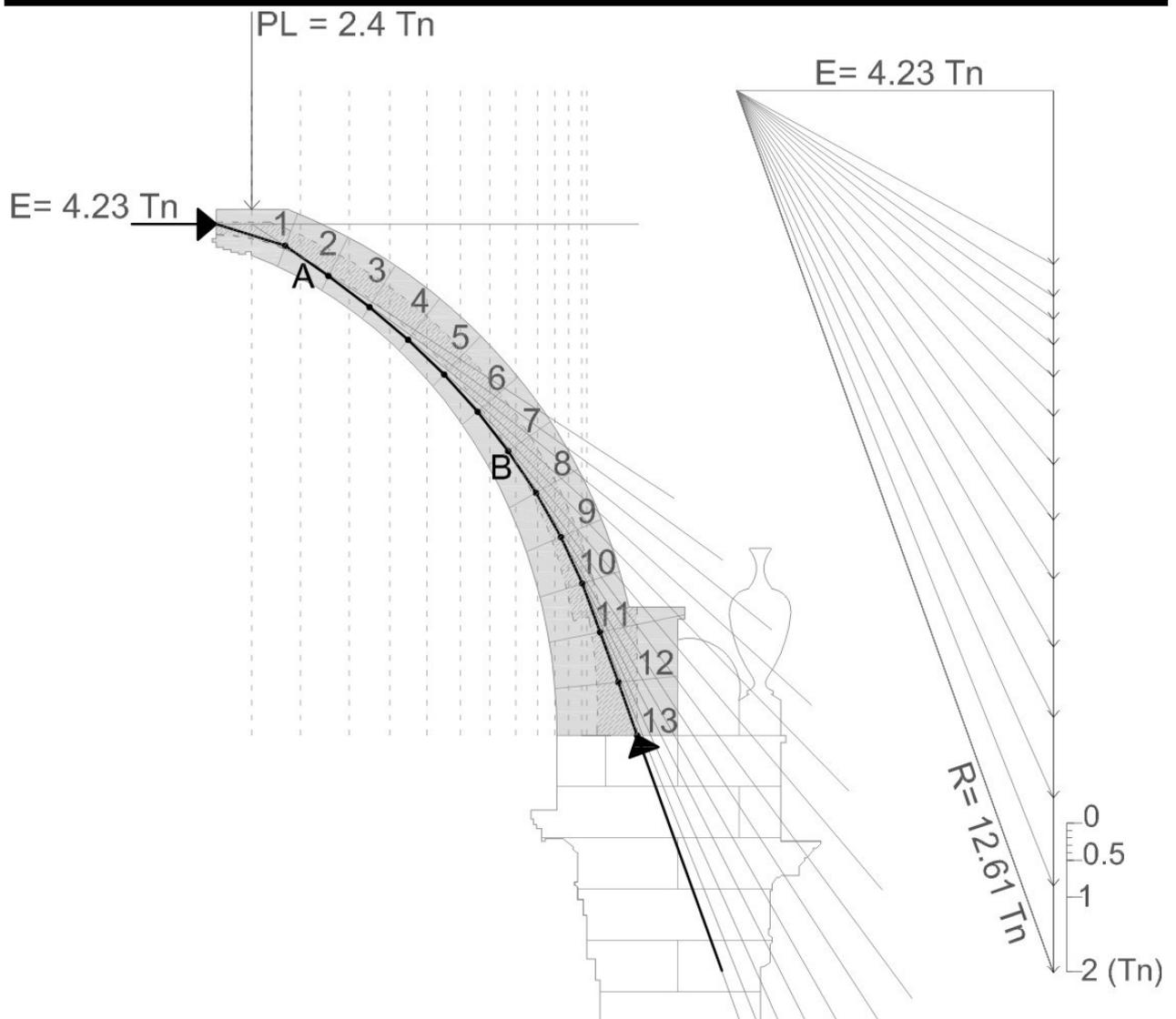
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite superior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el punto medio del tercio central del salmer. Entre los puntos B y C, la resultante de la línea de empujes sale de la sección plana estudiada. Se evalúa esta situación como no estable, puesto que la línea sale fuera del perímetro de la sección plana analizada para este sector.



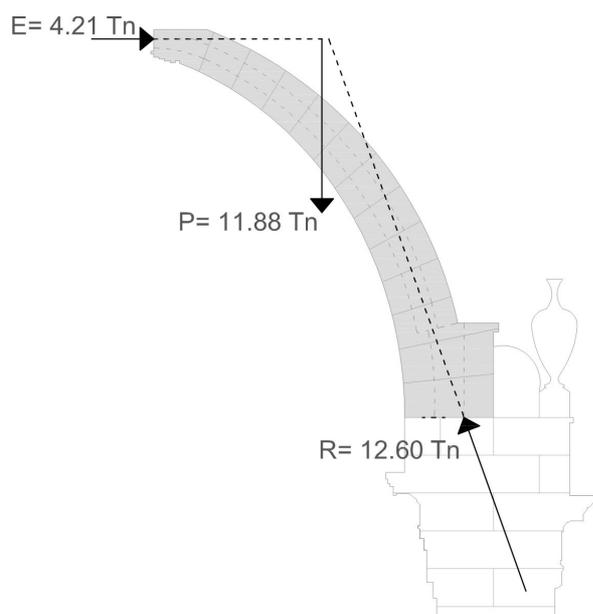
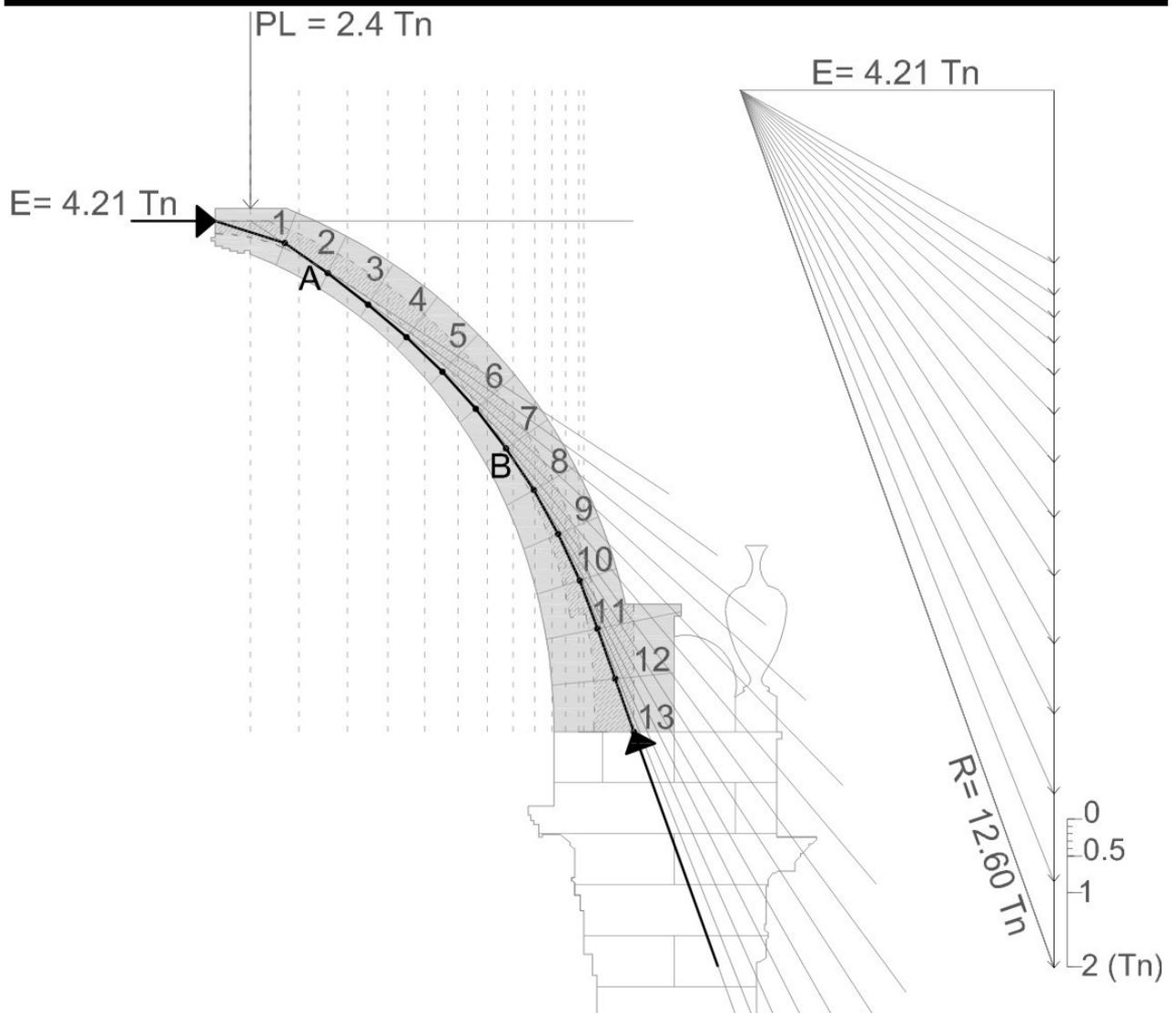
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto medio del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el punto medio del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.04, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



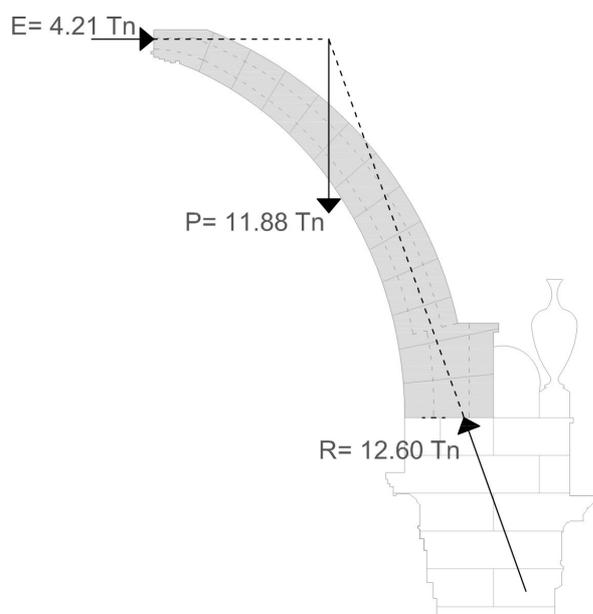
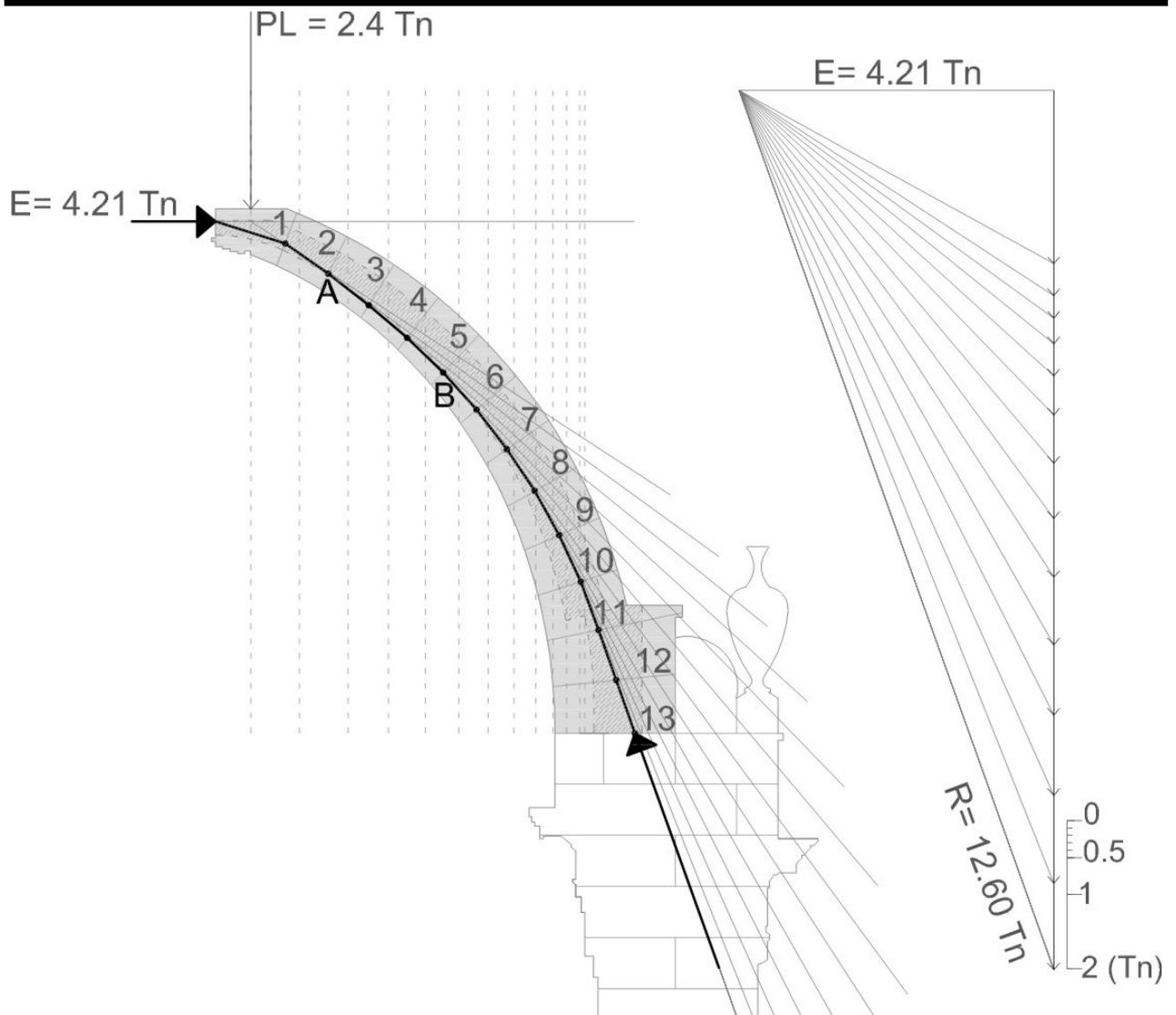
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto medio del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.51, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



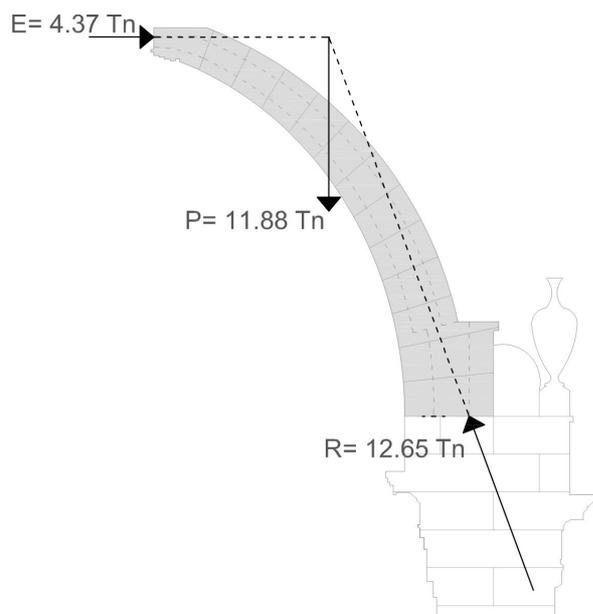
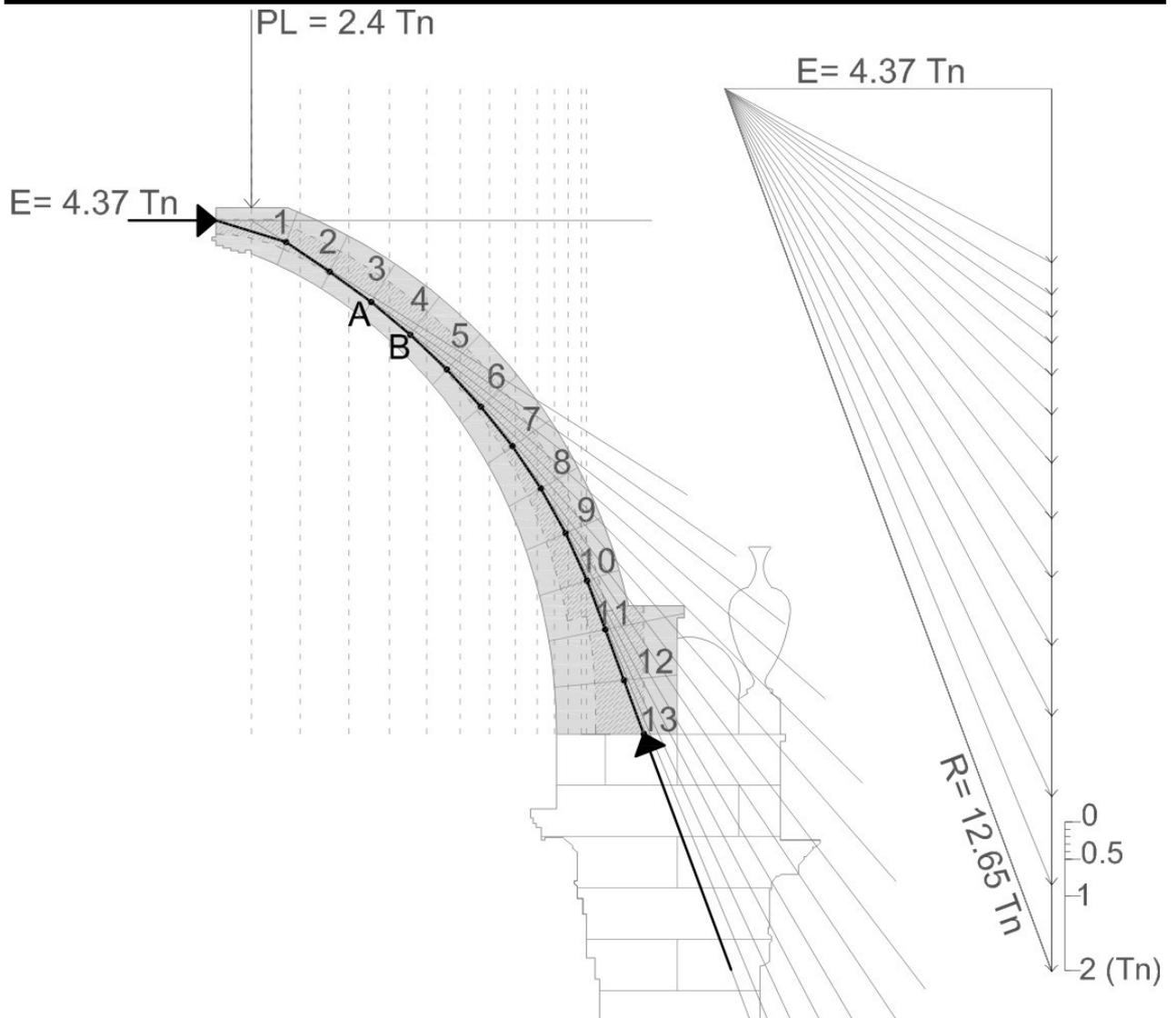
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.70, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



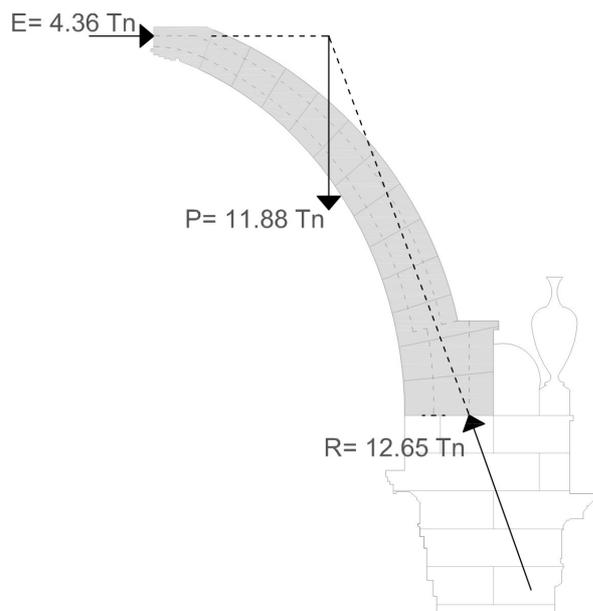
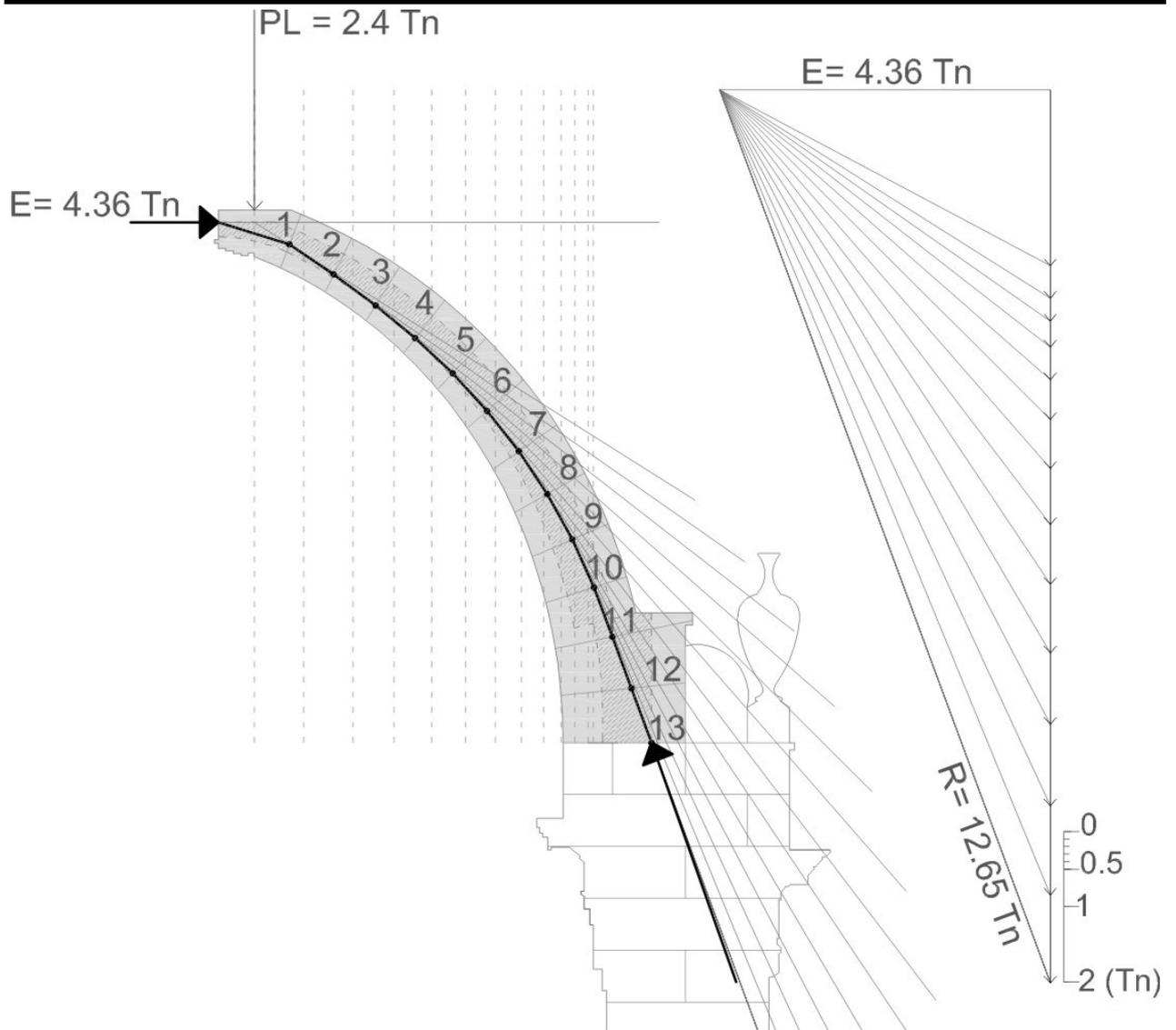
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el límite superior del tercio central en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del tercio central del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del tercio central, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.80, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



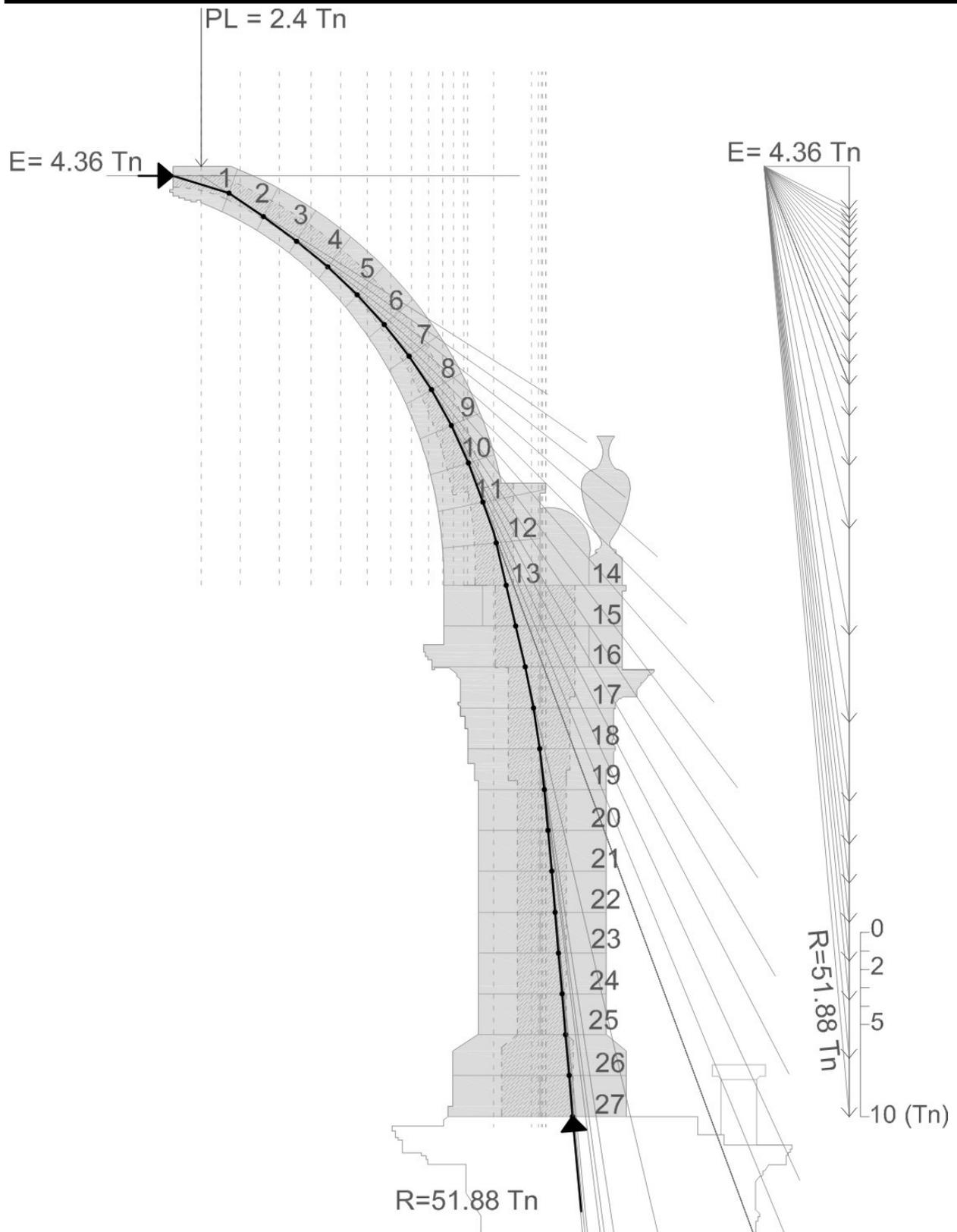
Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior del ancho central de seguridad 2.5 en la corona superior de la cúpula y por el punto próximo al límite superior del ancho central de seguridad 2.5 del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del ancho central de seguridad 2.5, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 1.80, obtenido de dividir el ancho real de la sección entre el ancho eficaz de ésta.



Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior del ancho central de seguridad 2.5 en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del ancho central de seguridad 2.5 del salmer. Aunque la resultante de la línea de empujes queda contenida entre el perímetro de la cúpula, entre los puntos A y B la resultante se encuentra fuera del ancho central de seguridad 2.5, generando tracciones en la cúpula, alcanzando un factor de seguridad de 2.30, obtenido de dividir el ancho real entre el ancho eficaz.



Empuje obtenido imponiendo la condición de que la resultante pase por el punto próximo al límite superior del ancho central de seguridad 2.5 en la corona superior de la cúpula y por el límite superior del ancho central de seguridad 2.5 del salmer. La línea de empujes queda contenida entre el ancho central de seguridad 2.5, por lo que alcanza el factor de seguridad de este valor. Se evalúa la situación como estable, con un coeficiente de seguridad alto, generando tracciones en la cúpula.



Distribución del empuje hacia la sección transversal del tambor con un factor de seguridad geométrico de valor 2.5, donde se observa una excentricidad hacia el exterior del empuje en la base del tambor.

REFERENCIAS

- GÓMEZ MORENO, MANUEL, 1982. "Guía de Granada". Archivo de la Diputación de Granada.
- GÓMEZ-MORENO CALERA, JOSÉ MANUEL, 1989. "La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento", (1560/1650), Granada.
- JIMÉNEZ GODOY, I. G. Consejería de Cultura, Educación y Turismo, 1988. Murcia. *Guía Artística*.
- LÓPEZ MIGUEL, A., 2002. *Las parroquias de la diócesis de Granada (1501-2001)*. Granada: Arzobispado de Granada.
- RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, 2002, "La arquitectura de los Jesuitas".
- RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., 1967, "Bartolomé de Bustamante y los orígenes de la arquitectura jesuítica en España", Roma, Institutum Historicum Societatis Iesu.
- RODRÍGUEZ G. DE CEBALLOS, A., S.J., 1970, "El arquitecto Hermano Pedro Sánchez", Archivo Español de Arte, 169, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro de Estudios Históricos.
- RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ DE CEBALLOS, ALFONSO, 2004. "Arquitectura y arquitectos en la provincia jesuítica de Andalucía". En *El arte de la Compañía de Jesús en Andalucía (1554-2004)*. Córdoba.
- SOTO ARTUÑEDO, WENCESLAO, 2003. "La fundación del Colegio de San Sebastián. Primera institución de los Jesuitas en Málaga". Málaga.
- Tesis de CÓRDOBA SALMERÓN, M., 2005, Patrimonio artístico y ciudad moderna. "El conjunto jesuítico y Colegio de San Pablo entre los siglos XVI y XVIII", Madrid, Fundación Universitaria Española.
- VALLERY-RADOT, JEAN, 1960. "Le recueil de plans d'édifices de la Compagnie de Jésus conservés à la Bibliothèque Nationale de Paris". Roma: Institutum Historicum Societatis Iesu.
- A.C., TEMPORALIDADES- GRANADA. Madrid. 1775M abril, 16. *Historia del Colegio de Granada*.
- MARTÍN MARTÍN, EDUARDO; TORIECES ABARCA, NICOLÁS; ANDALUCÍA, CONSEJERÍA DE TRANSPORTES Y OBRAS PÚBLICAS, 1998. "Guía de Arquitectura de Granada". Delegación de Granada, COA de Andalucía Oriental, serie 3.
- CANO DE GARDOQUI GARCÍA, JOSÉ LUIS, 1994. "La construcción del Monasterio de El Escorial: historia de una empresa arquitectónica". Universidad de Valladolid, Facultad de Derecho.
- OLIVARES D'ANGELO, ESTANISLAO: "Historia del Colegio de San Pablo, Granada, 1554-1765", Archivo Histórico Nacional, Madrid, Manuscrito Jesuitas, Libro 773. Transcripción de Joaquín de Béthencourt, revisión y notas de Estanislao Olivares.
- JEREZ MIR, CARLOS, 1996. "Guía de Arquitectura de Granada". Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía.
- FAUSTO BERNARDINI, HOLLY E. RUSHMEIER, 2002. "The 3D Model Acquisition Pipeline. Comput. Graph. Forum 21".
- PALACIOS GONZALO, JOSÉ CARLOS, 2003. "Trazas y Cortes de Cantería en el Renacimiento Español", Editorial Munilla-Lería.
- UROSEVIC, M.; SEBASTIÁN 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, 93-114.
- LLOPIS SOLBES, JOSÉ ANTONIO, 1981. Plano 67 (D), Colegio de los Jesuitas, Oficina Técnica de Construcción de Granada.
- RABASA DÍAZ, ENRIQUE, 2007. "Guía práctica de la estereotomía de la piedra".
- HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO, 2002. "Informe sobre la estabilidad de la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados, Valencia".
- MAS-GUINDAL LAFARGA, AJ. 2011. "Mecánica de las estructuras antiguas o cuando las estructuras no se calculaban". Editorial Munilla Lería.
- HUERTA FERNÁNDEZ, SANTIAGO. "Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica". Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- HOOKE, ROBERT S.R.S, 1977. "Lecciones de Potencia Restitutiva". Ed. Alpuerto Intemac.
- HEYMAN, JACQUES. "La ciencia de las estructuras", 2001. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- HEYMAN, JACQUES, 1999. "El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica". Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- HEYMAN, JACQUES, 1995. "Teoría y restauración de estructuras de fábrica". Instituto Juan de Herrera.
- MASSANAS, M ; ROCA, P.; CERVERA, M, 2004. "Análisis estructural de la Mezquita pequeña Santa Sofía de Estambul". Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Monografía CIMNE nº – 89, pp. 6.

