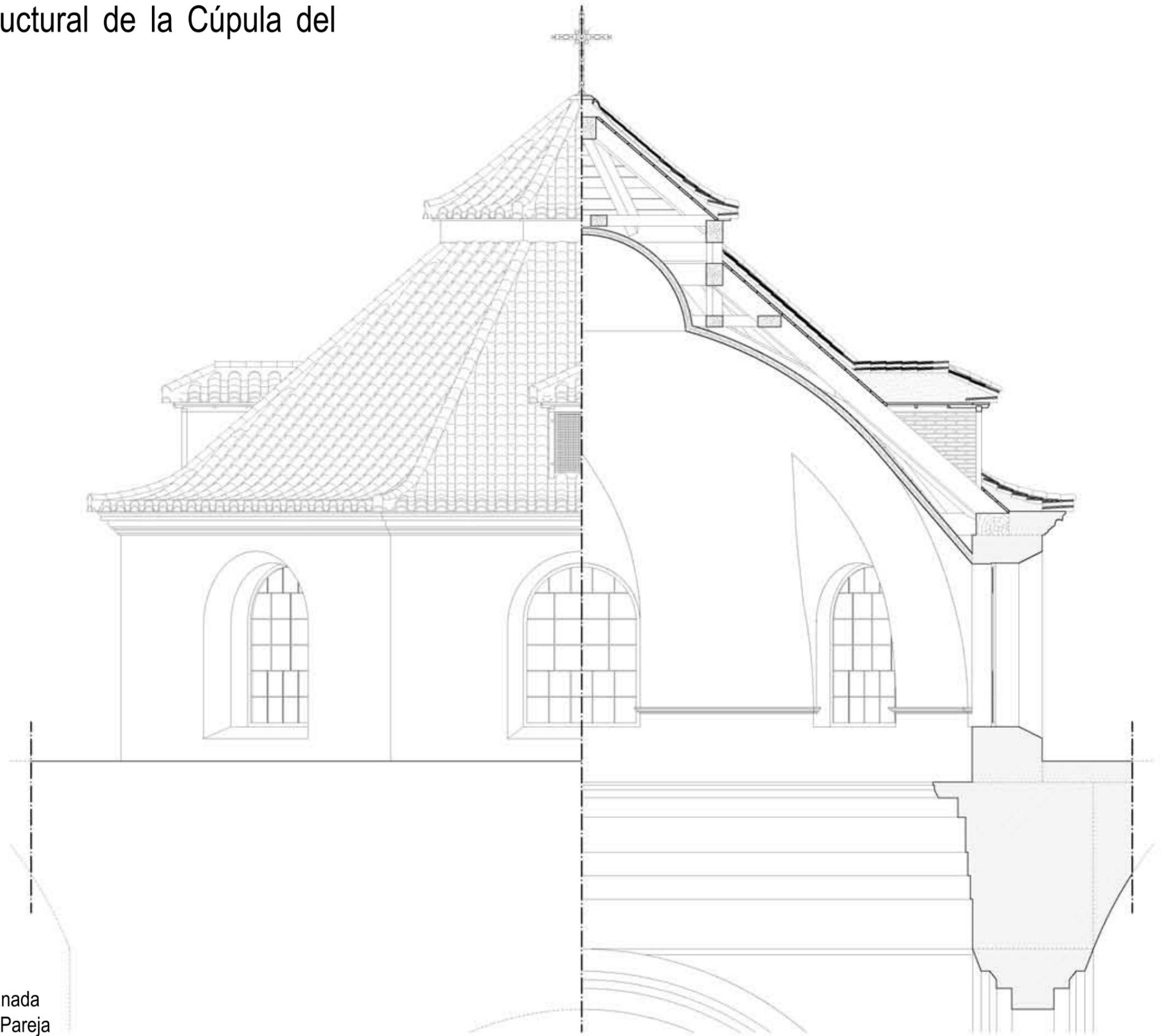


Análisis Constructivo y Estructural de la Cúpula del Sagrario de Granada



Antonio Sastre Sastre
Trabajo Fin de Grado 2019/2020
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada
Tutores: F. Javier Suárez Medina - Rafael Bravo Pareja

ÍNDICE

1. Objetivos		1
2. Metodología seguida		2
3. Análisis histórico		
3.1. La mezquita zirí de Granada		3
3.2. La Reconquista de Granada y los primeros emplazamientos de la Catedral		4
3.3. La Catedral de Granada, la Capilla Real y la necesidad de construir el Sagrario		5
3.4. La construcción del Sagrario		5
3.5. Resumen cronológico		6
4. Descripción arquitectónica		
4.1. Planimetría		7
4.2. Generalidades		8
4.3. Cripta		9
4.4. Planta principal		10
4.5. Lenguaje empleado en la iglesia		11
4.6. Alzados exteriores		14
5. Análisis constructivo		
5.1. Historia y evolución de la construcción tabicada		16
5.1.1. Los precedentes		16
5.1.2. Aparición en España		17
5.1.3. Siglos XVI-XVIII: Generalización del sistema y cambio al lenguaje clásico		18
5.1.4. Andalucía		19
5.2. Evolución histórica de la construcción del Sagrario		20
5.2.1. La etapa de Francisco Hurtado Izquierdo (1705-1719)		20
5.2.2. La primera etapa de José de Bada y Navajas (1722-1738)		20
5.2.3. La quiebra del pilar y la Junta de Maestros de 1738		21
5.2.4. Decisiones adoptadas tras la Junta de Maestros de 1738		24
5.2.5. El recalco de las bóvedas y la sustitución de la linterna		25
5.3. Materiales empleados en su construcción		27
5.4. Planteamiento y justificación de la hipótesis de cúpula encamionada		27
5.5. Decisiones constructivas adoptadas		29
5.5.1. Muro exterior		29
5.5.2. Cúpula tabicada		30
5.5.3. Estructura de madera		31
5.5.4. Acabado exterior		36
5.5.5. Acabado interior		36
5.5.6. Sección completa de la cúpula		37
6. Análisis estructural		
6.1. Cúpula tabicada		38
6.1.1. Mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico		38
6.1.2. Aplicación del método de Análisis Límite planteado por Heyman		44
6.1.2.1. Hipótesis 1		46
6.1.2.2. Hipótesis 2		52
6.1.2.3. Hipótesis 3		58
6.1.2.4. Hipótesis 4		68
6.1.2.5. Hipótesis 5		76
6.1.3. Análisis de los resultados		82
6.1.4. Aplicación del Análisis de Membrana de Rankine		84
6.2. Estructura de madera de la cúpula		87
6.2.1. Planteamiento general		87
6.2.2. Comprobación de las tensiones		88
6.2.2.1. Comprobación a flexocompresión		89
6.2.2.2. Comprobación a cortante		89
6.2.2.3. Comprobación de la unión par-estribo		90
7. Conclusiones		
7.1. Análisis de los resultados		91
7.2. Futuras líneas de investigación		91
Anexo A: Toma de datos		92
8. Bibliografía		94
9. Referencias de figuras y tablas		95

1. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de los elementos estructurales que componen la cúpula de la iglesia del Sagrario de Granada, así como el análisis arquitectónico y la modelización geométrica del elemento estudiado, con el fin de realizar una aproximación a los criterios constructivos y estructurales que podrían haberse considerado en su diseño. También se incluirá en el estudio una estimación cuantitativa de la seguridad de la cúpula mediante la aplicación de las metodologías desarrolladas por el profesor J. Heyman, a partir de la aplicación a estructuras de fábrica de los teoremas del análisis límite.

Para ello será necesario realizar previamente un análisis histórico que englobe la propia historia del monumento, los diferentes aspectos económicos y socioculturales de la Granada del S.XVIII, la figura de José de Bada y Navajas (principal arquitecto de la obra), así como cualquier otro elemento que pudiese haber sido relevante en la concepción arquitectónica del Sagrario.

2. Metodología seguida

En primer lugar se llevó a cabo una recopilación general de información acerca de la iglesia del Sagrario, visitando el Archivo Histórico Provincial de Granada, el Archivo de la Real Chancillería de Granada, el Archivo del Arzobispado de Granada y el Archivo Catedralicio de Granada (al cual no tuve acceso debido a trabajos de mantenimiento que se estaban llevando a cabo durante esta etapa de recopilación de información), así como a diversas bibliotecas de la Universidad de Granada. Una vez recopilada toda la información posible, se procedió a la elaboración del análisis general histórico y arquitectónico de la iglesia.

En segundo lugar, puesto que la planimetría encontrada de la cúpula del Sagrario fue insuficiente y poco detallada, se llevó a cabo un levantamiento lo más completo y fiel posible basado en mediciones tanto con cinta métrica como con distanciómetro laser y estación total. Posteriormente se realizó una modelización geométrica del elemento estudiado.

Una vez realizado el modelo geométrico de la cúpula y junto con los datos históricos y constructivos obtenidos durante la primera fase del trabajo, se planteó la hipótesis constructiva más probable en base a los datos analizados y a los métodos constructivos empleados en la misma época y por el propio arquitecto.

Por último, se llevó a cabo una estimación cuantitativa de la seguridad de la cúpula mediante la aplicación de las metodologías desarrolladas por el profesor J. Heyman a partir de la aplicación a estructuras de fábrica de los teoremas del análisis límite.

3. Análisis histórico

3.1. La mezquita zirí de Granada

El Sagrario de la Catedral de Granada se levanta en el mismo lugar que en su día ocupó la antigua mezquita zirí de la capital granadina.

La mezquita fue construida por los ziríes cuando la ciudad comenzaba a extenderse fuera del recinto de la Alcazaba Vieja y a desarrollarse por las orillas del río Darro, la izquierda ocupada por el barrio judío y la derecha por los musulmanes y mozárabes. El edificio se debió construir bajo el mandato del segundo y tercer rey taifa, es decir, Habus (1025-1038) y su hijo Badis (1038-1075), ya que durante el reinado de este último se construiría el mimbar o púlpito, usado para la predicación; luego la aljama zirí se debió finalizar en 1055, al dotarla del mobiliario religioso.

La siguiente noticia que se tiene de la mezquita es del año 1115 y hace referencia a las obras de remodelación que se efectuaron bajo la soberanía del emir almorávide Ali ibn Yusuf ibn Tasufin, las cuales enriquecieron y ennoblecieron la mezquita, pues se realizó una ampliación de la parte techada desde el patio, se cambiaron los pilares de obra por columnas de mármol, capiteles y cimacios, elementos diversos de acarreo traídos de los despojos del arte emiro-califal de Córdoba y se soló su patio de piedra rocosa.

Con motivo de la incursión victoriosa de Juan II en la Vega en 1431 y ante Granada, se pintó un lienzo detallado con la Batalla de la Higuera, en donde se hallan representados la ciudad, la Alhambra, el Generalife, los Aljares, etc. Este lienzo de 130 pies de largo se guardó en los palacios reales castellanos. En época de Felipe II se encontraba arrinconado, roto y en mal estado de conservación, en el alcázar de Segovia. Este monarca mandó que se copiara en la sala de las Batallas en el sector palatino del Real Monasterio del Escorial, gracias a lo cual ha llegado la pintura del siglo XV a nuestros días. En su relativa exacta representación de Granada destaca la mezquita Mayor con sus naves abiertas al patio (Figura 1). Esta representación pictórica es el único testimonio medieval de cómo sería la mezquita zirí de Granada en alzado¹.

Además de la representación de la mezquita en el fresco de la Batalla de la Higuera, podemos hacernos una idea de cómo era ésta en época medieval gracias a algunos relatos como el que realiza Jerónimo Münzer tras su visita a la ciudad de Granada en octubre de 1494, en el que comenta:

“El 22 de octubre, después de mediodía, entramos en la grande y gloriosa ciudad de Granada, [...], deseosos de visitar la mezquita mayor, que es la más amplia y suntuosa de aquel pueblo. Para entrar en ella tuvimos que descalzarnos, aunque el tiempo era lluvioso y estaba el piso lleno de barro. Todo el pavimento de la mezquita hállase cubierto de esteras tejidas de blandos juncos; tiene de ancho sesenta y seis pasos; de largo ciento trece; en el centro, un patio con fuente para las abluciones; nueve órdenes de columnas, trece exentas en cada uno de los lados, y ciento treinta arcos. Vimos numerosas lámparas encendidas y los sacerdotes que cantaban las Horas a su modo, aunque aquello, más bien que canto, parecía tristísimo clamor. El templo, en suma, está hecho con riqueza extraordinaria. Hay en la ciudad otras muchas mezquitas, porque exceden de doscientas, pero son más pequeñas [...] Junto a la mezquita de que vengo hablando hay una pequeña casa, y en su centro, una pila de mármol de veinte pasos de longitud, en donde se lavan antes de entrar en el templo. Alrededor de esta casa vense varias conducciones de agua para las

secretas y las cloacas, las cuales tienen a flor de tierra una ranura, larga de un codo, ancha de un palmo y agua corriente en la parte superior. También hay una especie de urna que sirve de mingitorio, y un buen pozo de agua potable, todo ello admirablemente ordenado para el objeto a que se destina”².

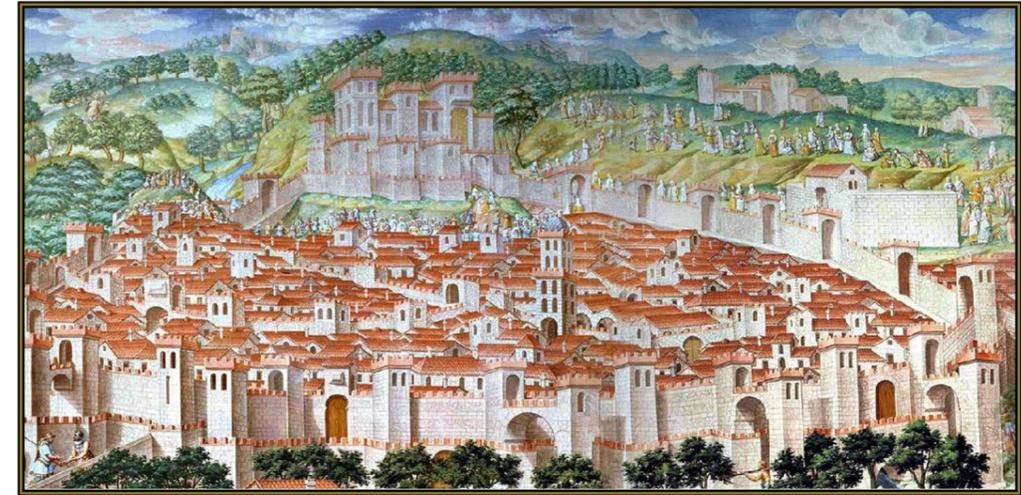


Figura 1: Fragmento del lienzo de la Batalla de la Higuera.

Justo un siglo después de la descripción que realiza Jerónimo Münzer, Juan de la Vega levanta en 1594 un plano de la Mezquita Mayor (lo que aún se conservaba) y la Catedral de Granada, la cual se encontraba en pleno proceso de construcción (Figura 3 Dcha.).

También podemos ver una representación de la mezquita en la famosa plataforma que Ambrosio de Vico realizara en el año 1613, en la que se pueden observar tres naves paralelas con dirección N-S, independientes, con tejados con cuatro faldones o a cuatro aguas. Las naves están separadas de la Alcaicería por la actual calle de los Oficios y la primera hacia el Oeste presenta una puerta con arco de medio punto y tres huecos de ventanas (Figura 2 Dcha.).

Existe también un grabado del alminar zirí, realizado por Heylan en 1614. Lo hizo sobre un dibujo de 1588. Muestra que estuvo hecho de sillares de la Malahá trabados a soga y tizón. Tiene como puerta de acceso un arco de medio punto de ladrillo. En la parte alta hay cinco hombres que a pico demuelen la torre y sueltan el cascajo con espuerta al vacío. En la base a la derecha hay tres obreros y a la izquierda dos grupos de tres personas con planos, al parecer los técnicos que supervisan la demolición (Figura 2 Izda.).

Si comparamos la planta de la mezquita realizada por José Sánchez en 1705 (Figura 3 Izda.) con la de 1594 de Juan de la Vega se ve que está dibujada con mucha mayor exactitud y detalle. En la del siglo XVI se han representado nueve filas de arquerías y no diez como en la planta de 1705. Delatan el cuidado con que se hizo esta planta la precisión de la ubicación de columnas aisladas o reforzadas por contrafuertes en la nave E-O (hechos al colocar en el testero oriental la Capilla Mayor de la Catedral), los textos que especifican todas las capillas, patios, sacristías, puertas, pilas, sepulturas, etc.³.

A lo largo de todos estos años han sido multitud los estudiosos que han realizado hipótesis sobre la morfología y métodos constructivos empleados en la mezquita, destacando las realizadas por M. Gómez-

¹ Antonio Fernández Puertas, en *“La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II”*, Granada, 2007, p.421-423.

² Jerónimo Münzer, *“Viaje por España y Portugal en los años 1494 y 1495”*, versión del latín por Julio Puyol, p. 85, 86.

³ Antonio Fernández Puertas, en *“La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II”*, Granada, 2007, p.428-429.

Moreno González (1892), M. Gómez-Moreno Martínez (1907), Leopoldo Torres Balbás (1945), Antonio Gallego y Burín (1961) o Antonio Fernández Puertas, las cuales se encuentran perfectamente expuestas en *“La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II (2007) p.429-436*, y, que por ser demasiado extensas en su explicación y no ser el objeto principal de este trabajo, remito a esta referencia bibliográfica para su consulta.

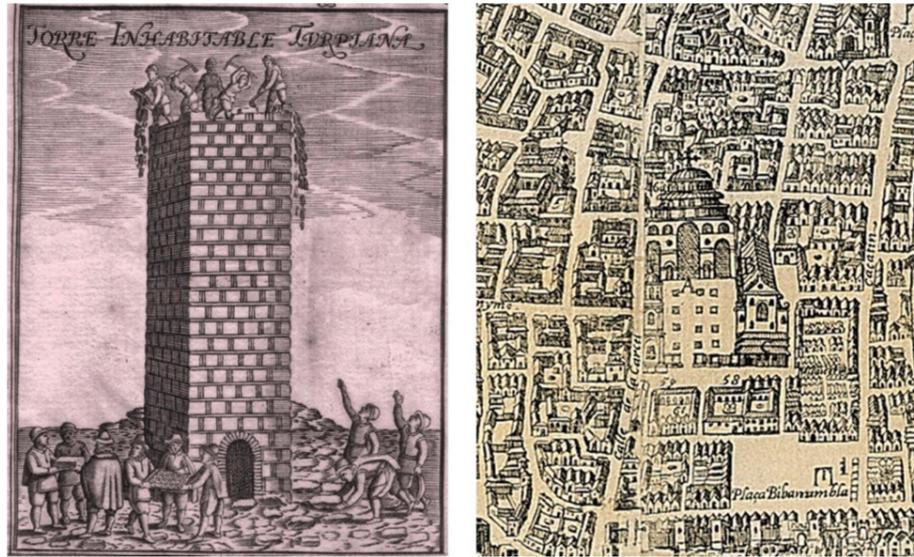


Figura 2: (Izda.) Grabado de Heylan de 1614 de la torre Turpiana o alminar de la Mezquita Mayor de Granada. Fuente: <http://legadonazari.blogspot.com.es> (Dcha.) Fragmento de la plataforma de Ambrosio de Vico de 1613.

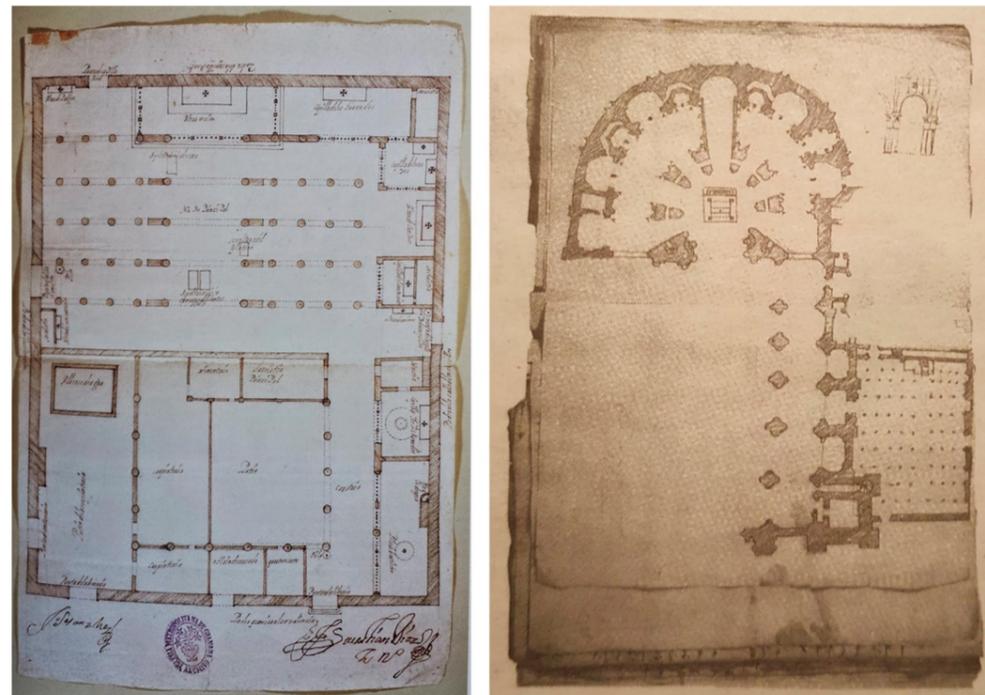


Figura 3: (Izda.) Plano de la mezquita aljama de Granada, dibujado por José Sánchez y Sebastián Díaz en 1704. Fuente: <http://legadonazari.blogspot.com.es> (Dcha.) Plano de la Mezquita Mayor y la Catedral de Granada en construcción por Juan de la Vega (1594). Fuente: <http://legadonazari.blogspot.com.es>

3.2. La Reconquista de Granada y los primeros emplazamientos de la Catedral

Tras la toma de Granada por los Reyes Católicos el 2 de Enero de 1492, el primer emplazamiento de la Catedral se situó en la pequeña mezquita de la Alhambra, tal y como Jerónimo Münzer describe en su libro tras su viaje a Granada:

*“En la Alhambra hay una rica mezquita, que ahora es iglesia dedicada a Nuestra Señora y sede episcopal, con cuarenta canónigos y ciento cuarenta racioneros, y, asimismo, un monasterio de Menores de San Francisco”.*⁴

Aunque este emplazamiento de la Catedral duraría poco tiempo, pues el propio Münzer describe la construcción de un nuevo edificio destinado a estos fines, en el lugar donde hoy está el MADOC (Mando de Adiestramiento y Doctrina Militar). Este edificio resultó ser, en poco tiempo, demasiado pequeño para la población, por lo que pasaría a destinarse a monasterio de San Francisco, mientras que los reyes ordenaban la construcción de la nueva Catedral en su ubicación actual:

*“El rey don Fernando ha mandado ensanchar muchas calles, derribar algunas casas y hacer mercados. Ordenó, además, demoler la judería, donde habitaban más de veinte mil judíos, construyendo a sus expensas en el lugar que ocupaba un gran hospital y una magnífica iglesia en honor de la Virgen, destinada a sede episcopal, templo que alcanzamos a ver terminado hasta las bóvedas y ya con el tejado puesto”.*⁵

Fue en 1501 cuando la mezquita Mayor de Granada pasó a ser parroquia de Santa María de la O, debido a la forzosa conversión de los moriscos en el año 1500, ordenada por el cardenal Cisneros a causa de su primera rebelión. El 8 de Octubre de 1502 el Papa Alejandro VI autorizó el traslado de la Catedral al santuario musulmán, aunque no se haría efectivo hasta finales del año 1507, debido al fallecimiento del arzobispo-cardenal de Granada fray Hernando de Talavera⁶. La mezquita siguió conservando en sus rasgos generales el mismo aspecto que tenía antes de su incorporación a la corona castellana, de acuerdo a la política tradicional de los Reyes Católicos de utilizar las mezquitas como sede de las nuevas parroquias y organismos religiosos sin apenas intervenciones en ellas, salvo las necesarias e imprescindibles para los nuevos ritos y usos cristianos. La mezquita granadina acogería la sede catedralicia en espera de la terminación de las obras de la Catedral iniciadas en los primeros años del S.XVI, y se mantendría en pie hasta comienzos del S.XVIII, momento en el que fue mandado construir el Sagrario. Como curiosidad, cabe decir que ésta se encontraba erigida por entonces bajo la advocación de Santa María de la O, en alusión a una de las empresas militares de Hernán Pérez del Pulgar, quien el 18 de diciembre de 1490, festividad de Nuestra Señora de la O, consiguió adentrarse intramuros de la ciudad con un reducido grupo de hombres con la intención de llegar hasta el centro mismo de ella, plantándose hasta las puertas de su mezquita aljama, en las que dejó clavado un pergamino alumbrado por un hacha encendida en el que en nombre de sus soberanos tomaba posesión de ella como primera iglesia cristiana de la ciudad incluso antes de que fuera reconquistada. Esta empresa le valdría a Pérez del Pulgar, ya en tiempos del Emperador Carlos V, la concesión de una de las capillas de la Iglesia del Sagrario para enterramiento suyo y el de su familia, en concreto la situada en el punto de conexión de la iglesia con la Capilla Real a través del pasadizo abierto en 1717 por José de Bada con la intención de conectar ambos organismos religiosos⁷.

⁴ Jerónimo Münzer, *“Viaje por España y Portugal en los años 1494 y 1495”*, versión del latín por Julio Puyol, p. 90.

⁵ Jerónimo Münzer, *“Viaje por España y Portugal en los años 1494 y 1495”*, versión del latín por Julio Puyol, p.95.

⁶ Antonio Fernández Puertas, en *“La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II”*, Granada, 2007, p.427.

⁷ Juan Manuel Martín García, en *“La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II”*, Granada, 2007, p.439.

3.3. La Catedral de Granada, la Capilla Real y la necesidad de construir el Sagrario

El 13 de septiembre de 1504 los Reyes Católicos decretaron su deseo de ser enterrados en la capital granadina, ordenando la construcción de una capilla funeraria próxima a la catedral, por entonces la antigua mezquita medieval. De este modo, el rey Fernando de Aragón mandó la construcción de la Capilla Real en 1505, para la cual contrató al maestro Enrique Egas. Las obras finalizaron en 1521, ya bajo el mandato del emperador Carlos V.

La construcción de la Capilla Real conllevó la idea de levantar una nueva catedral junto a él, ya que la mezquita de Santa María de la O ofrecía unas prestaciones limitadas, aunque el proyecto no comenzaría a realizarse hasta finalizadas las obras de la Capilla Real. Mientras tanto, la mezquita seguiría asumiendo los cultos centrales de la sede arzobispal⁸. El propio Enrique Egas fue también el maestro elegido para proyectar la nueva catedral, siguiendo el modelo de la de Toledo. En 1523 se comenzó con la apertura de las zanjas de cimentación y la colocación de la primera piedra del templo metropolitano. Sin embargo, tras la estancia del emperador Carlos V en Granada en 1526, comienza a cobrar fuerza la idea del monarca de emplazar el gran mausoleo real en la nueva catedral. Aparece entonces la figura de Diego de Siloé, que pasará a ser el nuevo responsable de la obra y autor de un proyecto alternativo en 1528.

La inauguración de la Capilla Mayor y girola de la catedral se produciría el 17 de agosto de 1560. El aspecto que presentaban entonces las obras y que podemos ver en la Plataforma de Ambrosio de Vico (Figura 2 Dcha.), era el de una gran rotonda abierta por el arco toral, preparada para acoger los enterramientos imperiales, que por entonces funcionaba alrededor de una concepción ritual eucarística centrípeta, completamente autónoma del cuerpo basilical, que en la Plataforma aparece tímidamente iniciado, aunque claramente definido en sus naves⁹. Tras la inauguración de la Capilla Mayor y girola, la antigua mezquita pasó a acoger el sagrario, aunque su estado de conservación era cada vez más precario debido a las obras de la vecina catedral. (Figura 3 Izda.) De este modo, sería el arzobispo Ascargorta el que acabaría decidiendo su derribo, promoviendo sobre el mismo solar la construcción de un sagrario de nueva planta, con el fin de completar el programa de la Iglesia Mayor en su funcionamiento institucional y simbólico¹⁰.

Aunque las obras del Sagrario transcurrieron entre 1705 y 1759, la idea de su construcción se venía debatiendo desde finales del siglo XVI, ya que sería en 1666 cuando se decidiría no construir una segunda torre igual a la existente en el extremo norte de la catedral y sustituirla por la pequeña torre de San Miguel, además de reducir la profundidad de las capillas laterales de mediodía previstas en los diseños renacentistas, que las proyectaban iguales y simétricas a las levantadas en el lado septentrional. De este modo se conseguiría dejar libre toda la superficie necesaria para la posterior construcción del Sagrario. Los ideales renacentistas de dos torres gemelas, un claustro en el lado sur y capillas laterales simétricas (o una capilla Sagrario integrada en la Catedral), fueron abandonados en favor de la alternativa barroca de levantar un templo específico dedicado al Santísimo, lo que suponía no sólo una alteración muy importante de los proyectos renacentistas en su vertiente estrictamente arquitectónica, sino también de la concepción religiosa sobre la que aquellos diseños se asentaban, basada en el culto a la Eucaristía centralizado en la Capilla Mayor de la Catedral¹¹.

En la siguiente figura (Figura 4) se puede apreciar la evolución del conjunto catedralicio desde el comienzo de las obras de la catedral en 1523 hasta la finalización de la construcción del Sagrario.

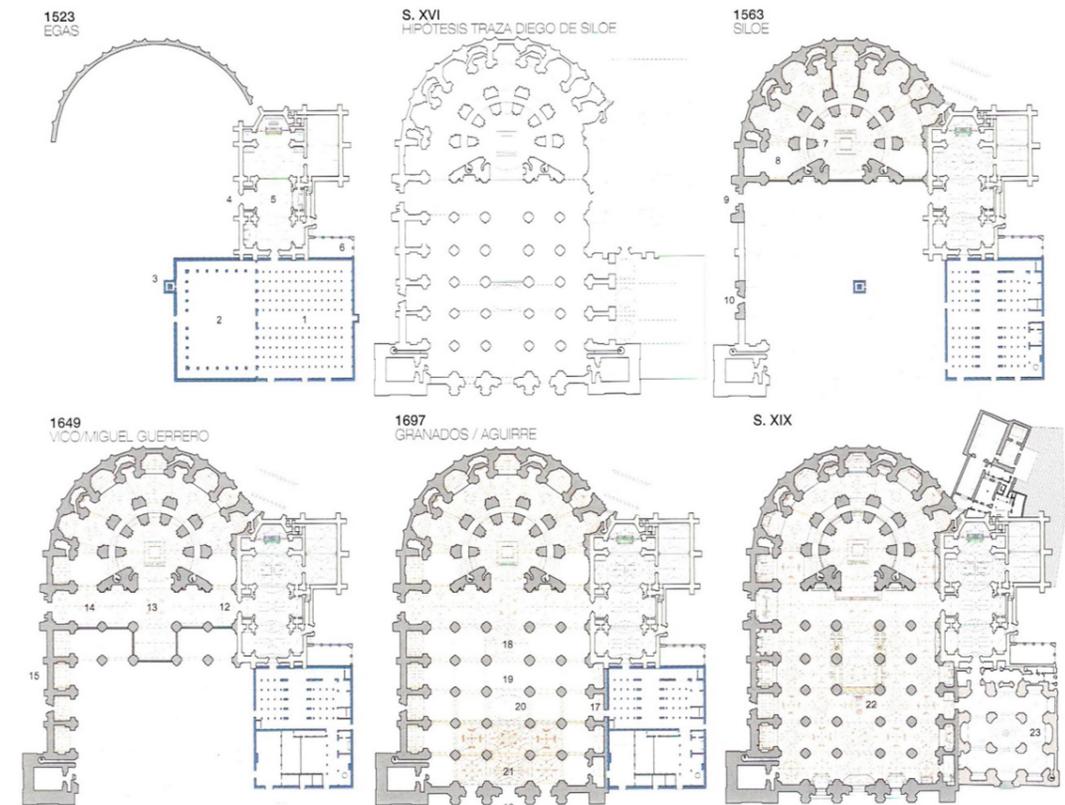


Figura 4: Evolución en planta del conjunto catedralicio. Fuente: P. Salmerón Escobar, D. Garzón Osuna y R.M Pérez de la Torre, "Guía de la Catedral de Granada", 2016, p.48.

3.4. La construcción del Sagrario

Como he mencionado anteriormente, sería el arzobispo Martín de Ascargorta el iniciador de las obras en cuanto a mecenazgo. Encargaría las obras a Francisco Hurtado Izquierdo, por aquel entonces maestro mayor de la Catedral de Córdoba.

Las obras comenzarían en 1705 a partir de las trazas dadas por Hurtado Izquierdo, las cuales destacaban por tratarse de un modelo de templo escasamente representado en la arquitectura religiosa granadina, ya que se trataba de una iglesia de planta central. Algunos estudiosos afirman que podría haberse inspirado en las trazas que Bramante realizara para el Vaticano. Esta elección de una iglesia de planta central llevaba implícita una solución para las cubiertas en las que prevalecía el empleo de una gran cúpula, objeto de estudio en este trabajo¹².

A pesar de presentar una planta novedosa, el edificio en general tenía una significación historicista, ya que el arzobispo Ascargorta daría unas estrictas instrucciones al maestro para que el nuevo Sagrario se adecuara al estilo de la Catedral, con perfecta coincidencia de las significaciones políticas y religiosas¹³.

⁸ Pedro Salmerón Escobar, Diego Garzón Osuna y Rosa María Pérez de la Torre, "Guía de la Catedral de Granada", 2016, p.27.

⁹ Pedro Salmerón Escobar, Diego Garzón Osuna y Rosa María Pérez de la Torre, "Guía de la Catedral de Granada", 2016, p.20,21.

¹⁰ Ignacio Henares Cuéllar, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.I", 2007, p.77.

¹¹ Emilio Ángel Villanueva Muñoz, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.I", 2007, p.147-148.

¹² J. M. Martín García, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II", 2007, p.440-441.

¹³ Ignacio Henares Cuéllar, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.I", 2007, p.77.

Las obras avanzaban con buen ritmo hasta que en torno a 1714 comenzó a agotarse el dinero necesario para su ejecución, momento en el cual quedó paralizado todo el proceso constructivo. Esto justificó las cada vez mayores ausencias de Hurtado Izquierdo de Granada, lo que unido a la muerte del arzobispo Ascargorta, hicieron que se desentendiera por completo del proyecto¹². En ese momento el edificio alcanzaba unas ocho varas de altura, por lo que el Sagrario debía encontrarse hecho más o menos hasta las bóvedas de la cripta, por lo que Hurtado no debió realizar nada del alzado correspondiente al templo. No obstante, el proyectista dejó junto con la traza una maqueta de madera realizada por él mismo, la cual se conservó en la Contaduría de la Catedral hasta 1732, año en el que fue mandada destruir por considerarse que las obras continuadas por José de Bada eran un fiel reflejo de las trazas originales de Hurtado¹⁴.

Tras la paralización de las obras, sería el Cabildo el que se hiciera cargo de su continuación, la cual no se haría efectiva hasta 1722, momento que coincide con el nombramiento de un nuevo maestro mayor, José de Bada y Navajas. Por tanto, aunque Hurtado sería el inspirador primero de la obra, no será él, sino Bada, el artífice y encargado de materializar el proyecto a través de una interpretación del original¹².

A pesar de la fidelidad mostrada por Bada al proyecto de Hurtado, no hubo entre él y el proyectista unanimidad de criterios como no lo había de estilo. Bada se encontró con una obra empezada y llena de condicionamientos referidos a la vecina catedral. La riqueza imaginativa de Hurtado había planteado un edificio apenas iniciado, cuyas dificultades no se habían puesto aún en evidencia, lo que ocurriría después sobre todo en el momento de tender las bóvedas. Aun así, los únicos cambios que Bada introduce respecto al proyecto de Hurtado, enumerados por él mismo, se refieren fundamentalmente a los exteriores del templo y, en concreto, al cambio de concepción de la portada principal, a la reducción del número de puertas de acceso (en principio iban a ser seis) y a la reducción de la altura de la torre, veinte varas más baja que la del proyecto de Hurtado. La única modificación exterior que afectaría al interior del templo sería la del cuerpo de luces, del se hablará con más detalle en el apartado correspondiente al análisis constructivo de la cúpula¹⁵.

En los años siguientes hasta la muerte del arquitecto en 1755 se procedió a completar la obra, la cual no sería inaugurada y consagrada hasta el 29 de septiembre de 1759. En la Sacristía del Sagrario podemos encontrar una lápida que señala las fechas de inicio y fin de las obras (Figura 5).



Figura 5: Lápida de la Sacristía del Sagrario con las fechas de inicio y fin de las obras. Fuente: Elab.propia.

3.5. Resumen cronológico

- 1055: Finalización de la construcción de la mezquita ziri bajo el mandato del rey Badís.
- 1115: Obras de remodelación de la mezquita para enriquecerla y ennoblecerla.
- 1492: Conquista de Granada por los Reyes Católicos y establecimiento de la primera Catedral en la Mezquita de la Alhambra.
- 1494: Visita de Jerónimo Münzer a Granada.
- 1495: Traslado de la Catedral a la ciudad baja, en concreto al lugar que luego ocuparía el Monasterio de San Francisco Casa Grande.
- 1501: La antigua mezquita ziri de Granada pasa a ser parroquia de Santa María de la O.
- 1505: Fernando el Católico contrata al maestro Enrique Egas la traza gótica y dirección de las obras de la Capilla Real.
- 1507: Nuevo traslado de la Catedral, esta vez a la parroquia de Santa María de la O.
- 1521: Finalización de las obras de la Capilla Real, ya bajo el mandato de Carlos V.
- 1523: Comienzo de las obras de la Catedral de Granada. Apertura de las zanjas de cimentación y colocación de la primera piedra conforme al proyecto que Enrique Egas diseña años antes siguiendo el modelo de la Catedral de Toledo.
- 1528: Diego de Siloé asume la dirección de las obras de la Catedral y plantea un proyecto alternativo, en respuesta a la demanda del emperador Carlos V de emplazar el gran mausoleo real en la nueva catedral.
- 1560: Inauguración de la Capilla Mayor y la Cripta. La parroquia de Santa María de la O pasa a convertirse en nuevo Sagrario.
- 1588: Demolición de la Torre Turpiana o antiguo alminar de la mezquita ziri, bajo la dirección de Ambrosio de Vico.
- 1594: Juan de la Vega realiza un plano de la Catedral en construcción y de la antigua mezquita.
- 1613: Plataforma de Ambrosio de Vico.
- 1666: Construcción de muros pantalla laterales de la catedral y torre de San Miguel (en lugar de torre gemela). Reducción de profundidad de las capillas en previsión de la construcción de un nuevo Sagrario.
- 1667: Alonso Cano diseña la fachada principal de la Catedral.
- 1705: José Sánchez realiza un plano detallado de la antigua mezquita ziri reconvertida a Sagrario.
- 1705: Comienzo de las obras del Sagrario, con Francisco Hurtado Izquierdo como Maestro Mayor.
- 1714: Paralización de las obras del Sagrario por escasez de presupuesto.
- 1722: Nombramiento de José de Bada y Navajas como Maestro Mayor y continuación de las obras.
- 1755: Muerte de José de Bada.
- 1759: Inauguración del Sagrario.

¹⁴ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.122-123.

¹⁵ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.124-127.

4. Descripción arquitectónica

4.1. Planimetría

Para el trazado de las plantas del Sagrario me he basado en planimetrías ya publicadas, como por ejemplo la que trazara Otto Schubert en su obra "Historia del Barroco en España" o la trazada por el equipo dirigido por Pedro Salmerón y que aparece en publicaciones como la "Guía de la Catedral de Granada" o "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario". También me he basado en las mediciones que he realizado personalmente dentro del templo, tanto con cinta métrica como con distanciómetro láser y estación total.

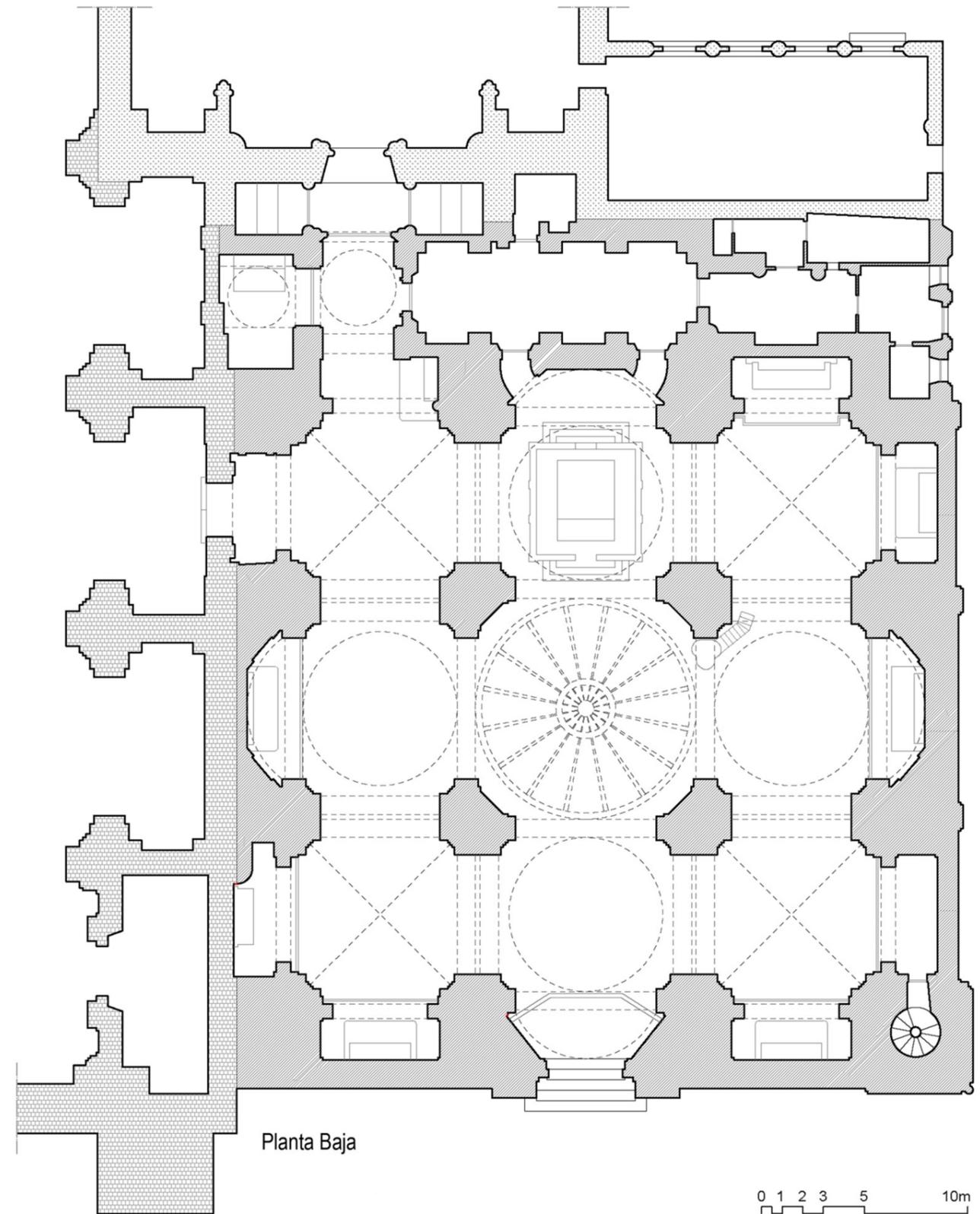
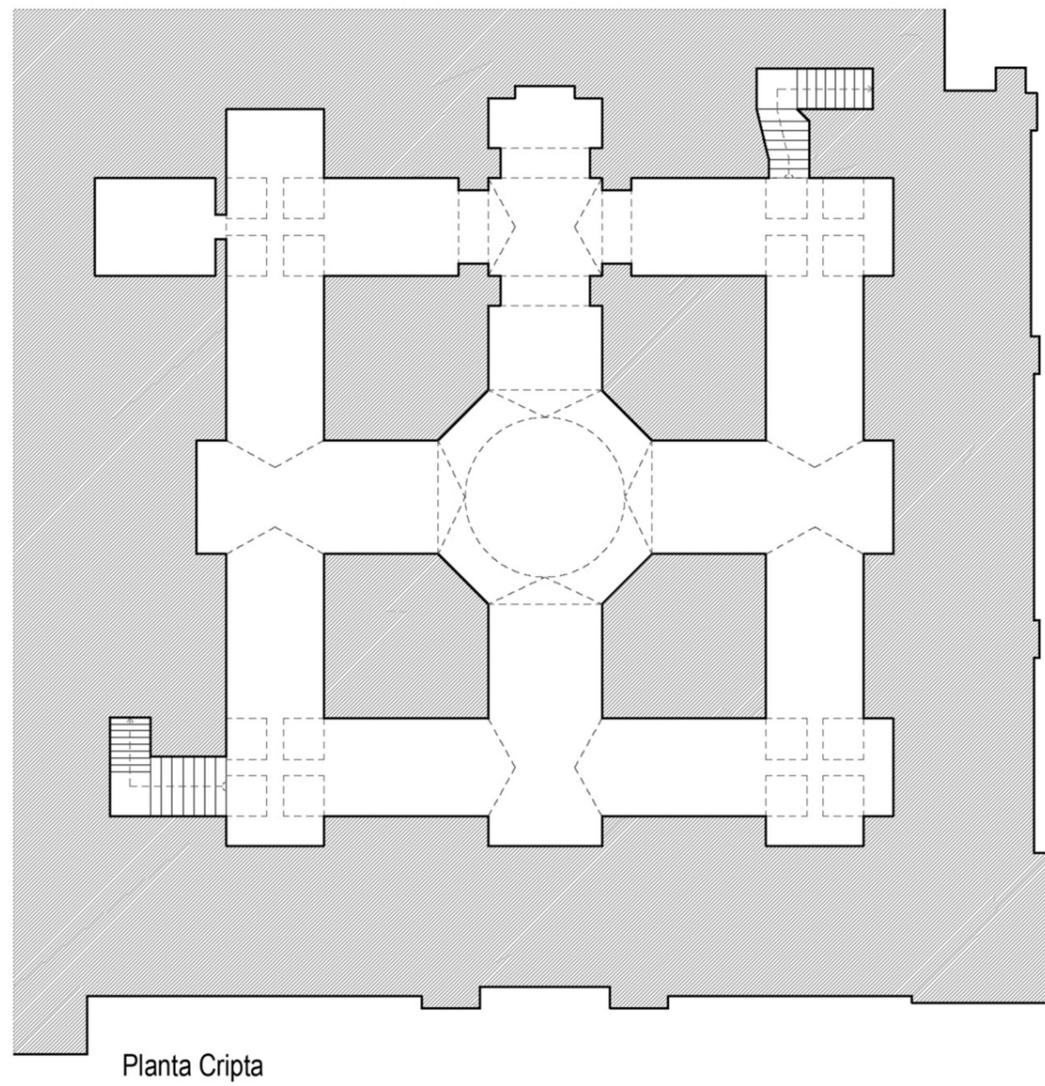


Figura 6: (Izda.)Planta de la cripta del Sagrario. (Dcha.) Planta baja del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Generalidades

La iglesia del Sagrario es un templo en el que el maridaje entre la basílica y el plan centralizado se manifiesta a través de una iglesia de planta de cruz griega inscrita en un cuadrado de unos cuarenta metros de lado (Figura 6 Dcha.). La elección de este tipo de planta, muy valorada en el Renacimiento por ser el modelo que mejor se adaptaba a las exigencias racionalistas de la arquitectura de esa época (ya que representaba la perfección simbólica y formal y el dominio del ideal de simetría absoluta de todos los ejes de un edificio), convierte a Hurtado en un exponente del clasicismo arquitectónico muy poco común para las fechas en que se construyó el edificio, aunque también hay que aclarar que su traza estuvo muy condicionada por las directrices marcadas por el arzobispo Ascargorta para que el nuevo Sagrario se adecuara al estilo de la Catedral, y también por la propia forma del solar de la antigua mezquita. Sin embargo, el hecho de imponer al crucero un gran dinamismo a partir de la gran cúpula semiesférica apoyada sobre pechinas, que a su vez descansan en cuatro grandes pilares de sección triangular, así como el remate de los cuatro brazos de la cruz mediante capillas poligonales, sitúan al autor de las trazas del Sagrario en el marco de un barroquismo finisecular que se puede apreciar en otras de sus obras, como por ejemplo en el tabernáculo del sagrario de la iglesia del monasterio de la Cartuja de Granada.



Figura 7: Imagen general del interior del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8: Imagen general de las bóvedas del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Cripta

Se trata de un espacio ubicado bajo el edificio cuya construcción se fundamentó por la necesidad de alojar los restos de las personas que fueron enterradas en el antiguo Sagrario, así como por el simple hecho de que en esta época aún no existían los cementerios públicos y los fieles tenían que enterrarse dentro del recinto de la iglesia.

Aparte de las funciones de enterramiento, aislamiento respecto al terreno y cimentación del edificio, las cuales prevalecen sobre cualquier otra cuestión, este espacio también cobra un importante valor simbólico dentro del conjunto, pues cripta, iglesia y cúpula como elemento más notable, simbolizan la iglesia paciente, militante y triunfante¹⁶.

La planta de la cripta reproduce de forma simplificada la del templo construido sobre ella, por lo que nos encontramos también con una cruz griega con doble simetría bordeada por cuatro naves perimetrales. Al igual que en la iglesia, el espacio central de la cruz es de planta ochavada.

Su construcción es de una gran sencillez. Los muros son lisos, con una simple moldura que recorre todo el edificio perimetralmente a la altura del arranque de las bóvedas, las cuales son de cañón muy rebajado y realizadas de cantería, a excepción de las realizadas en las intersecciones de las naves de las esquinas (resueltas con arcos fajones de piedra labrada y plementos de ladrillo y mampostería), en las intersecciones de las naves laterales con las centrales (en las que se producen lunetos simples) y la bóveda central, que es vaída de base octogonal (Figura 11). Las bóvedas están perforadas e incorporan unos respiraderos con rejillas metálicas que comunican con la iglesia.

Toda la cripta está rodeada por nichos, a excepción de los muros de los extremos de los brazos del crucero. Los accesos a la cripta se sitúan diagonalmente en dos capillas de la iglesia (la de las Ánimas y la de Fátima).



Figura 10: Imagen general de la bóveda bajo el crucero. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9: Imágenes generales de la cripta. Fuente: Elaboración propia.

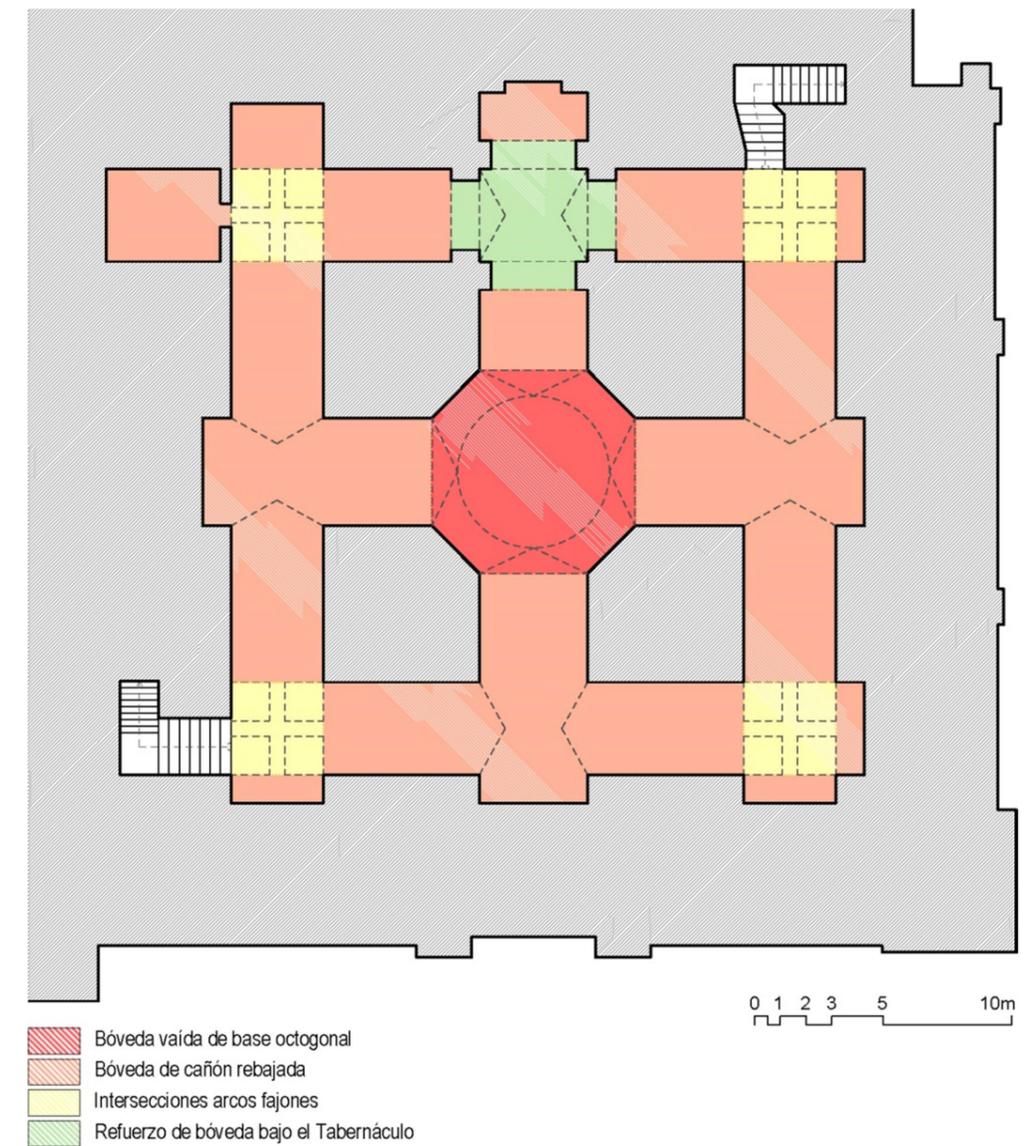


Figura 11: Esquema de bóvedas de la cripta. Fuente: Elaboración propia.

¹⁶ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.139.

4.4. Planta principal

Como ya he comentado, la planta de la iglesia es un cuadrado de unos cuarenta metros de lado en el que se inscribe una cruz griega. El centro de la cruz queda reservado para una gran cúpula semiesférica apoyada sobre pechinas, que a su vez descansan en cuatro grandes pilares de sección triangular, que dan al crucero un marcado carácter octogonal. La planta tiene muchas similitudes a la que Bramante trazara para San Pedro de Roma y que luego sería modificada por Miguel Ángel (Figura 12). De hecho, algunos maestros de la época, como el jesuita Hno. Gómez, no dudan en comparar ambas construcciones e incluso llegan a establecer relaciones entre las proporciones y la seguridad de ambas¹⁷.

El crucero de la iglesia queda flanqueado por cuatro espacios rectangulares, cuyos lados mayores tocan tangencialmente al espacio central. De este modo se consigue potenciar la preponderancia de la cúpula central como símbolo de lo celeste (a partir de Alberti, la arquitectura religiosa dejó de tener significaciones cristológicas relacionadas con la cruz, para empezar a evocar la idea de Cristo como esencia de la perfección y armonía). Por tanto, las bóvedas vaídas que cubren estos cuatro espacios dejan de ser regulares, mientras que las cuatro bóvedas de arista que cubren las esquinas del templo son cuadradas. La planta cuadrada se completa con las capillas, con una disposición de tres en cada lado, siendo las del centro de mayor altura que las demás. Estas capillas, que no son apreciables desde el exterior del edificio, se acusan poderosamente en los alzados, de forma que llegan a completar la forma cúbica del conjunto arquitectónico. Las zonas de los ángulos (las que están cubiertas por las bóvedas de arista), son las más bajas y las más oscuras del templo, de forma que se produce una transición a partir de la configuración espacial y del empleo de la luz entre las esquinas y la zona central del crucero, la más iluminada. La zona intermedia, correspondiente a la forma de cruz griega, queda configurada como un espacio de transición en el que predomina el claroscuro (Figura 13).

Los accesos a la Sacristía, situados justo detrás del Tabernáculo en la cabecera del templo, se resuelven de una forma curiosa, pues los dos huecos se abren en el fondo de un espacio o planta triangular y se cubren con bóvedas también de esta forma (Figura 14 Izda.) También curiosa es la desviación que presenta la puerta que comunica al Sagrario con la Catedral, apreciable a simple vista tanto en el acceso propiamente dicho como en su decoración, pues se encuentra desplazada unos 35cm hacia la izquierda (si miramos desde el interior del Sagrario) (Figura 14 Dcha.). Seguramente fueron las necesidades de adaptación del nuevo templo a la vecina Catedral y el deseo de mantener la regularidad en las capillas laterales, las causas que llevaron a Hurtado a adoptar esta solución.

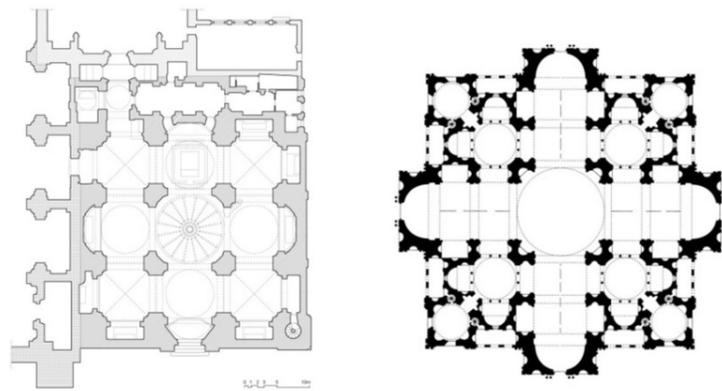


Figura 12: Comparación entre las plantas del Sagrario de Granada y San Pedro de Roma.
Fuente: Sagrario, elaboración propia. San Pedro, <https://contemplalaobra.blogspot.com>

¹⁷ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.81.

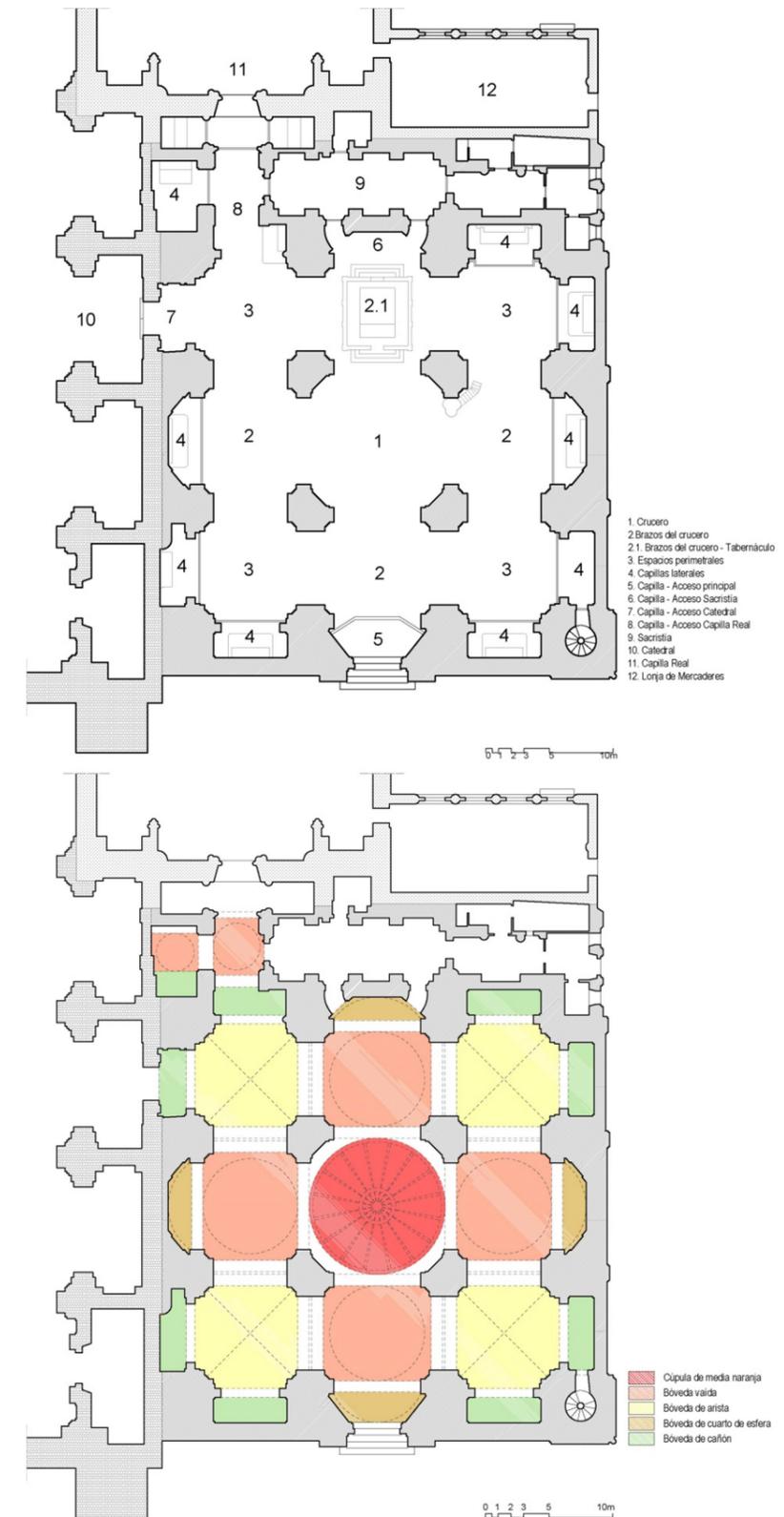


Figura 13: Espacios que componen el Sagrario (arriba) y esquema de bóvedas (abajo).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 14: Accesos a la Sacristía (Izda.) y Puerta que comunica con la Catedral (Dcha.). Fuente: Elaboración propia.

4.5. Lenguaje empleado en la iglesia

José de Bada emplea dos órdenes diferentes en las columnas del Sagrario. Por un lado utiliza el dórico romano en las dieciséis columnas que soportan las bóvedas de arista (muy sencillas, con basa ática, fuste cilíndrico acanalado hasta un tercio de su altura y capitel dórico) y por otro, emplea el orden corintio en los elementos con mayor importancia del templo (Figura 21).

Los soportes centrales se componen de unos grandes pedestales de algo más de dos metros de altura, sobre los que cargan las columnas. Estos grandes pedestales aparecen “partidos” en toda su altura, acusando la separación entre las columnas que cargan sobre ellos. A partir del pedestal se configura el alzado del pilar a base de medios fustes de columnas corintias, las cuales llevan plinto y basa para asemejarse a las de la Catedral, y tres ángulos en las esquinas. Una vez pasado este cuerpo, que es sobre el que descargan los arcos de las bóvedas de las esquinas, comienza el segundo, en el que los medios fustes de las columnas han sido sustituidos por secciones de pilar, casi carentes de decoración, en contraste con el primero. Este segundo cuerpo es algo más ligero, ya que sostiene cuatro bóvedas menos que el primero (Figura 17).

El entablamento está presente tanto en los cuatro pilares exentos como en todo el perímetro de la iglesia. El arquitrabe es de bandas y acaba en un resalte de ovas a manera de pequeña cornisa. El friso, con ausencia total de elementos decorativos, nos conduce a una cornisa superior muy saliente y con un gran juego de volúmenes y zonas de claroscuro. En los encuentros que se producen en los resaltes de las esquinas, el arquitecto emplea una especie de dentellones colgantes a modo de estalactitas que nos pueden recordar a ciertos elementos de la decoración musulmana.

Los arcos, todos de medio punto, destacan por su perfección formal. Están decorados en sus frentes mediante resaltes y algunos pequeños motivos (ovas, cuentas, hojas de laurel, etc). Los arcos bajos de los ángulos del edificio tienen el intradós decorado con cuarterones, mientras que los arcos superiores no tienen decoración alguna (Figura 22).

La cúpula, una media naranja sobre cuerpo de luces ochavado, dispone de un anillo continuo y en el lugar en el que originalmente se instaló la linterna se levanta ahora una cupulilla redonda (de esta característica hablaré más extensamente en el apartado dedicado al análisis constructivo). Está decorada a base de yesería, dividida por radios convergentes con la forma denominada “cintas de melón”, entre los que se colocan motivos florales iguales que los que adornan la base de los pilares exentos (Figura 15).

Las bóvedas vaídas, de planta rectangular, se decoran también con yesería, empleando como elemento fundamental un anillo que toca tangencialmente las claves de los arcos de sus lados mayores. Ocho falsos nervios que parten del anillo central dividen a las bóvedas, hasta acabar bifurcándose en dos espirales convergentes, cuyo espacio central es ocupado por un mascarón (Figura 22). Las bóvedas de arista de las esquinas están decoradas a partir de dos falsos nervios que se cruzan en el centro, entre los que se rellena el resto de superficie con motivos de vegetación y una superficie elíptica rodeada por una greca (Figura 23).

Las cuatro capillas situadas en los extremos de la cruz griega disponen de tres arcos de medio punto, algo más alto el central, sobre los que se eleva una bóveda semiesférica con siete falsos nervios acabados en pinjantes (Figura 24).



Figura 15: Cúpula central sobre pechinas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 16: Detalle de una de las pechinas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 17: Detalle de uno de los soportes centrales. Fuente: Elaboración propia.



Figura 18: Detalle de una de las bóvedas vaídas y de la bóveda de cuarto de esfera de una de las capillas. Fuente: Elab. propia.



Figura 19: Detalle de una de las bóvedas de arista. Fuente: Elaboración propia.

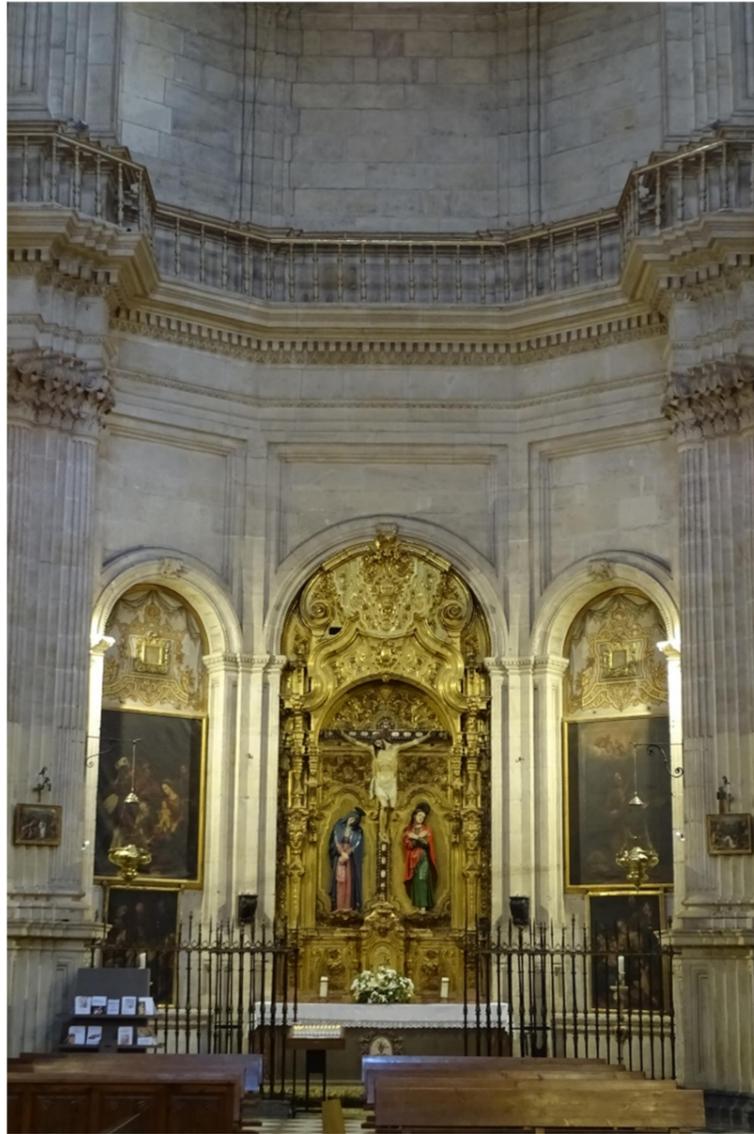


Figura 20: Detalle de una de las capillas laterales del crucero. Fuente: Elaboración propia.

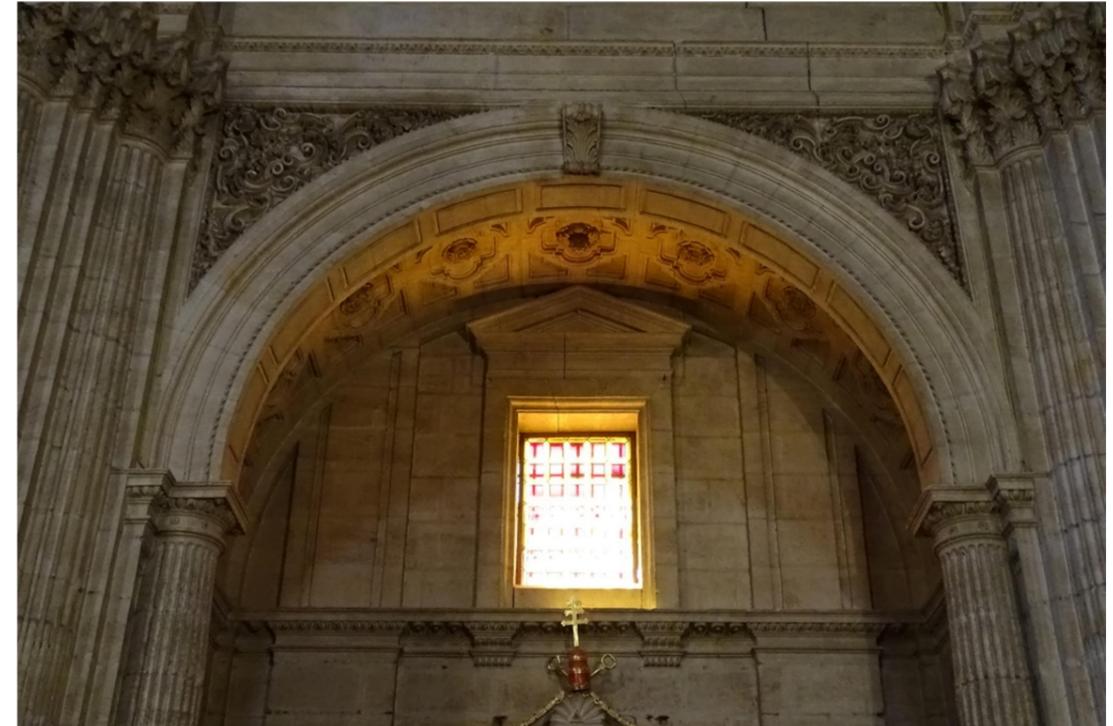


Figura 22: Detalle de un arco de medio punto de las capillas laterales. Fuente: Elaboración propia



Figura 21: Detalle de los distintos tipos de capiteles. Fuente: Elaboración propia.



Figura 18: Detalle de las basas de los soportes centrales. Fuente: Elaboración propia.

4.6. Alzados exteriores

De las cuatro fachadas del Sagrario únicamente resultan visibles la principal, abierta a los pies del templo, y la que da a la calle Oficios, ya que las dos restantes las comparte con la Catedral y con la Capilla Real (Figura 24).

La fachada principal está compuesta por cinco paramentos lisos (correspondientes a las tres naves interiores y a las dos capillas laterales). En el vano central se alza la portada principal de la iglesia, hecha en mármol gris de Sierra Elvira (Figura 25). En el lateral derecho se alza una torre de base cuadrada que compensa en cierta medida la verticalidad de la vecina torre de San Miguel de la Catedral. En el primer paño de la fachada se abren dos huecos a distintas alturas: uno más bajo, liso y sin apenas pretensiones artísticas; y un balcón, más elevado y que es bastante parecido a los que Bada pusiera en la fachada de San Juan de Dios de Granada (Figura 28 Izda.). También en este paño aún se pueden apreciar unos sillares colocados de distinta forma a los del paramento principal y que corresponderían al cerramiento de una antigua puerta que comunicaba el exterior con la capilla de las Ánimas. En el resto de paños, incluido el de la torre y a excepción de la portada principal, el único ornamento son dos ventanas cuadradas situadas una encima de otra y decoradas con unos resaltes a modo de placas en sus cuatro esquinas.

Las dos caras visibles del cuerpo inferior de la torre siguen la misma decoración a base de ventanas que el resto de la fachada y es a partir de la cubierta del edificio cuando su forma cambia a octogonal. Esta parte de la torre consta de dos cuerpos: el inferior, reforzado por contrafuertes de forma cúbica colocados alternativamente y terminado en cornisa; y el superior, también octogonal y liso, decorado con placas y pilares esquinados y que acaba en arquitrabe, friso y cornisa. La torre se remata con una cúpula de media naranja de cantería y con una linterna octogonal ciega cubierta con un cupulín (Figura 27).

De la portada principal se conoce que Bada no se ajustó a las trazas dadas por Hurtado Izquierdo en el proyecto original. La portada consta de dos cuerpos. El primero y más bajo está formado por un gran pedestal sobre el que apoyan dos columnas a cada lado de orden corintio, con basa ática y fuste estriado relleno hasta un tercio de su altura, rematadas por un arquitrabe de bandas (Figura 26). Remata este primer cuerpo la puerta con un arco de medio punto flanqueado por dos pilastras cuyos capiteles hacen a su vez de impostas del arco. En el segundo cuerpo volvemos a encontrar un zócalo, pero esta vez discontinuo en todas sus partes, sobre el que apoyan también columnas de orden corintio, rematadas igual que las inferiores. El remate superior está dividido en tres partes, las dos laterales acabadas con frontones triangulares y la central compuesta por tres hornacinas de distintas alturas (la central tiene la misma traza que la puerta del cuerpo inferior y las laterales acaban en concha) coronadas por un frontón curvo.

El entablamento, que corre a lo largo de toda la fachada, presenta un friso de florones entre los que se intercalan una serie de ménsulas muy salientes que sostienen la cornisa.

La fachada que da a la calle Oficios, mucho menos visible debido a la estrechez de la propia calle, cuenta con una portada más modesta. Sobre la portada de la Sacristía se superponen otros dos cuerpos, correspondientes al Archivo y a la vivienda respectivamente. La puerta de la Sacristía tiene dos vanos a los lados (Figura 28 Dcha.), al igual que el balcón superior del Archivo, con mayor profusión decorativa, mientras que el último cuerpo parece trabado en el balcón del Archivo y cuenta con dos ojos de luz a los lados.

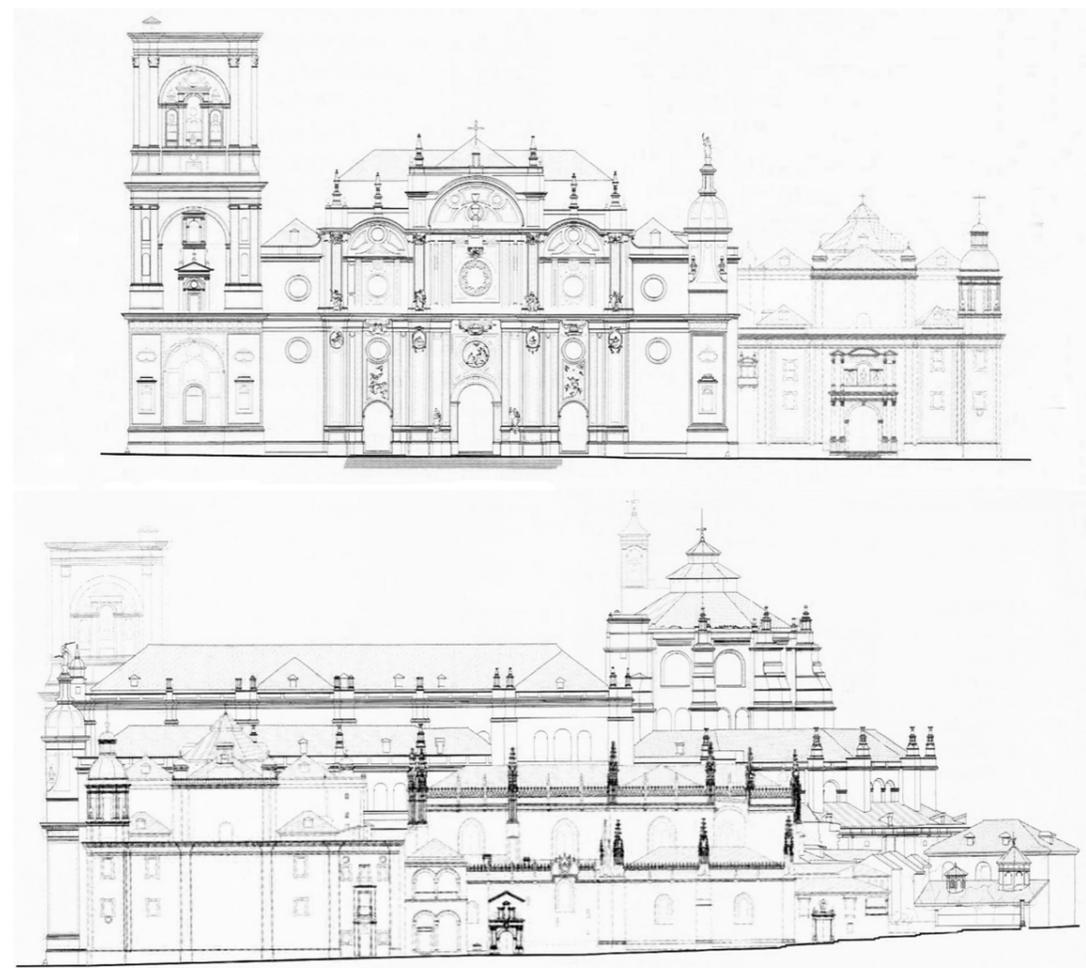


Figura 24: Alzado principal (arriba) y alzado desde la calle Oficios (abajo).
Fuente: Pedro Salmerón Escobar, Diego Garzón Osuna y Rosa María Pérez de la Torre, "Guía de la Catedral de Granada", 2016, p.86-87.



Figura 25: Portada principal del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.



Figura 27: Torre del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.



Figura 19: Detalles de capiteles y basas de la portada. Fuente: Elaboración propia.

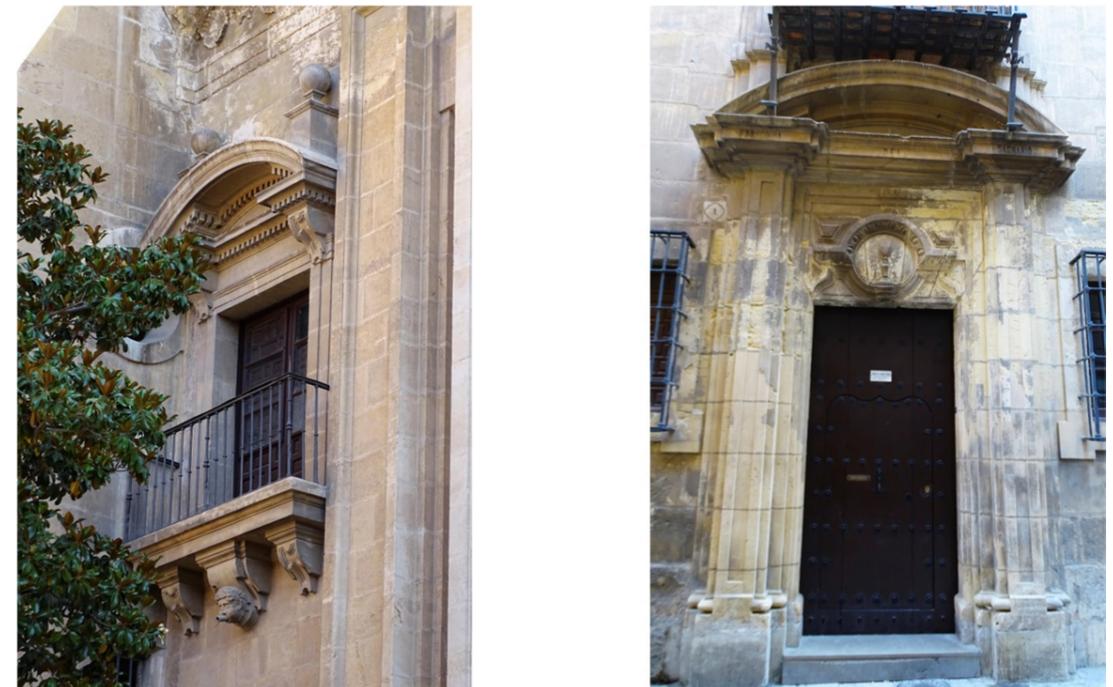


Figura 28: Balcón de la fachada principal (izda.) y portada de la calle Oficios (dcha.). Fuente: Elaboración propia.

5. Análisis constructivo

5.1. Historia y evolución de la construcción tabicada

5.1.1. Los precedentes

Al igual que la mayoría de avances constructivos, las bóvedas tabicadas nacen como resultado de un largo proceso en el que confluyen y evolucionan otras técnicas que actúan como ideas previas. Estas técnicas tienen en común algunas características, como son el hecho de que todas se desarrollan en torno a la zona mediterránea y que en cada una de ellas se utiliza alguno de los elementos básicos de la técnica tabicada. Así, por ejemplo, podemos destacar la técnica del empleo de armaduras de ladrillo empleada en las bóvedas romanas, la idea de construir sin cimbra en las bóvedas bizantinas, el empleo de pequeñas piezas unidas con yeso en las bóvedas de tubos huecos o el uso generalizado del ladrillo aglomerado con yeso en la arquitectura islámica. A continuación, paso a describir brevemente cada una de estas técnicas constructivas:

a. Armaduras de ladrillo en las bóvedas romanas

En la arquitectura romana era muy habitual la construcción de bóvedas empleando hormigón romano, para lo cual era necesario el empleo de fuertes cimbras hasta que éste fraguaba. Debido a la escasez de madera en la mayoría del territorio controlado por Roma, siempre fue una prioridad reducir su uso en las cimbras, para lo cual se empleaba el método de construcción de armaduras de ladrillo (Figura 29). A menudo se ha citado este procedimiento como antecedente de la construcción tabicada, pero cabe destacar que ni las piezas cerámicas empleadas eran capaces de sostenerse sin cimbra ni eran consideradas como un elemento estructural¹⁸.

Posteriormente este método evolucionaría, sobre todo en Italia, hacia un tipo de bóvedas muy similares a las tabicadas, conocidas como “volte a la volterrana” o “volte a foglio”, cuyos primeros ejemplos datan de la época renacentista y que se diferenciarían de las bóvedas españolas en el empleo de gruesos rellenos sobre las hojas de ladrillo.

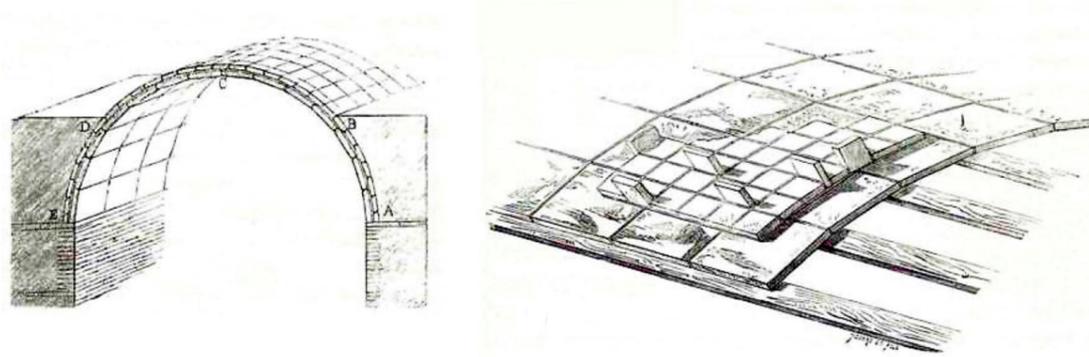


Figura 20: Armaduras tabicadas empleadas por los romanos. Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.13.

¹⁸ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral “La bóveda tabicada en España en el siglo XIX”, 2013, p.12-13.

b. Bóvedas bizantinas sin cimbra

Las bóvedas que se solían construir en el imperio romano de oriente eran muy diferentes en su concepción a las de occidente, debido fundamentalmente a que para su construcción no era necesario el empleo de cimbras. Esto era posible gracias al empleo de ladrillos más pequeños que los romanos y a su forma de colocación en las bóvedas. Éstas eran levantadas por hojas, de forma que la superficie de contacto entre ladrillo y mortero fuese la máxima posible y además inclinaban y curvaban dichas hojas de ladrillo para mejorar la adherencia y evitar el deslizamiento, a pesar del empleo de morteros de fraguado lento, principalmente de cal y arena (Figura 30).

Esta técnica bizantina no tiene un gran parecido con la técnica tabicada, ya que los ladrillos ni se colocan de plano ni se emplea el yeso para recibirlos, pero sí que sienta un precedente a partir de su evolución con las técnicas constructivas árabes¹⁹.

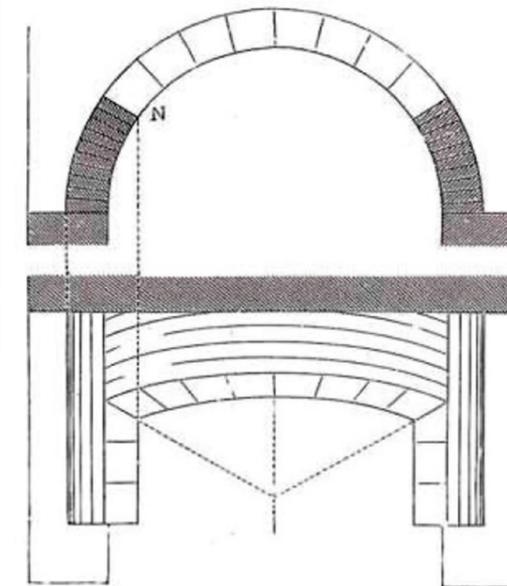


Figura 30: Bóveda bizantina. Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.15.

c. Bóvedas de tubos huecos

El sistema de bóvedas de tubos huecos nace en las provincias romanas del norte de África en torno al siglo II y llega a las costas del sur de Europa donde empieza a desarrollarse, especialmente en Italia, durante la época paleocristiana (siglos IV a V). De esta época son algunos edificios como San Vitale y el baptisterio de la catedral, ambos en Rávena (Figura 31).

Se trata de un sistema constructivo que emplea unas piezas cerámicas aglomeradas con yeso y que no forman sólo la cimbra de la bóveda, sino que son realmente el elemento resistente, ya que no se emplea el hormigón romano en su parte superior. Entre sus ventajas respecto al método tradicional romano destacan la

¹⁹ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral “La bóveda tabicada en España en el siglo XIX”, 2013, p.15-16.

reducción al mínimo de medios auxiliares de obra, el aligeramiento de los abovedamientos y la consiguiente disminución de los sistemas de contrarresto, así como el empleo de materiales abundantes y de muy fácil manejo. Aunque las piezas cerámicas empleadas no son ladrillos ni rasillas, la puesta en obra es idéntica a la de las bóvedas tabicadas, ya que se hace uso del yeso como aglomerante y es la adherencia entre las ligeras piezas cerámicas y el yeso lo que hace posible una construcción sin cimbras²⁰.

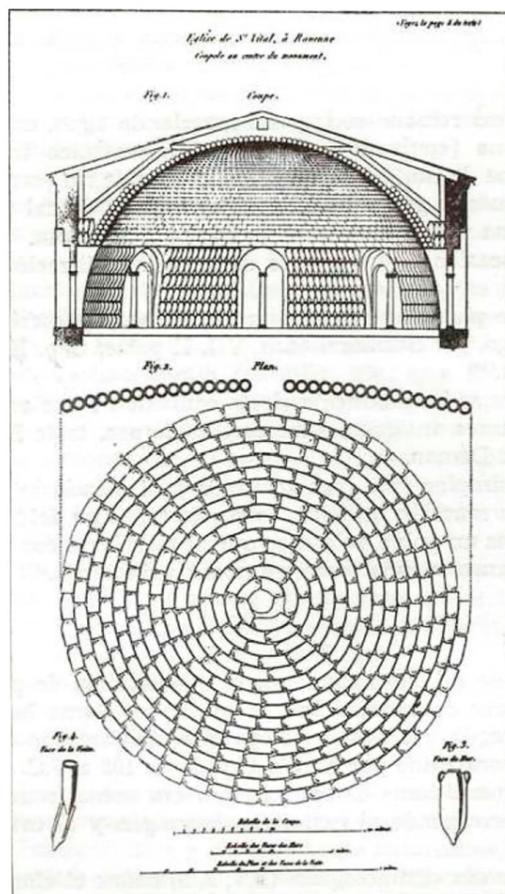


Figura 31: Planta y secc. de la cúpula de la iglesia de San Vitale de Rávena. Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.17.

d. La construcción islámica de yeso y ladrillo

En la zona de Persia e Irak, debido a la escasez de madera, el yeso y el ladrillo eran empleados desde época sasánida. Desde esa zona y a través de la expansión árabe, esta costumbre se acabaría extendiendo por el Mediterráneo. En concreto, en España el yeso se utilizaría con especial frecuencia en la arquitectura musulmana y posteriormente en la mudéjar, empleándose como aglomerante en fábricas de ladrillo, para construir revoltones entre viguetas en los forjados de madera y también como revestimiento²¹.

Su uso en la arquitectura musulmana se mezclaría con las bóvedas sin cimbra de origen bizantino, dando lugar a un tipo de bóvedas construidas mezclando roscas y hojas de ladrillo que empleaban el yeso como aglomerante. Un ejemplo destacado es la torre de Romilla, en la vega de Granada, construida hacia el siglo XIV, en época nazarí.

²⁰ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.16-18.

²¹ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.19.

5.1.2. Aparición en España

A pesar de no existir ningún dato que nos indique que las primeras bóvedas tabicadas fuesen construidas en España, de lo que no hay duda es de que aquí alcanzaron un grado de desarrollo mucho mayor que en ningún otro país, lo que puede deberse en gran parte al largo periodo de ocupación árabe, durante el cual los musulmanes extendieron su tradición constructiva, lo que incluía el uso masivo del ladrillo y el yeso como aglomerante, así como los procesos constructivos que no implicaban el uso de cimbras. Además, el yeso es un material muy abundante en nuestro país, sobre todo en su mitad oriental, que coincide con las zonas donde aparecen las primeras bóvedas tabicadas y donde este tipo de construcciones alcanzaron un mayor nivel de desarrollo (Valencia, Cataluña y Aragón)²².

Las primeras bóvedas tabicadas de las que se tiene constancia en nuestro país y en la arquitectura cristiana son las de la capilla de los Jofre, anexa al claustro del convento de Santo Domingo de Valencia, obra del maestro Juan Franch en 1382 (Figura 32 Izda.). De la misma época y del mismo maestro es también el Palacio Real de Valencia, que aunque actualmente está desaparecido, se tiene constancia de que se cubrió masivamente de bóvedas tabicadas, probablemente sólo de ladrillo, sin nervios de piedra²³. Otro ejemplo es la capilla real en la catedral de Barcelona, obra de Arnau Bagués en 1407, cuya bóveda no se conserva actualmente debido a unas obras realizadas en 1880, pero se pueden apreciar aún las rozas dejadas en la pared, a partir de las cuales se puede determinar que se trataba de una bóveda semicircular, rebajada y compuesta por tres hojas de ladrillos²⁴ (Figura 32 Dcha.).



Figura 32: Bóvedas de la capilla de los Jofre (Izda.) y Huella de bóveda en la catedral de Barcelona (Dcha.). Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.26-27.

A partir de estos primeros ejemplos parece ser que la técnica tabicada se extendió con una gran rapidez por todo el territorio del reino de Aragón. En Valencia, se tiene constancia de su uso generalizado a lo largo de los siglos XIV y XV y aunque primero se empleaba sólo como plemento entre nervios de piedra, va evolucionando hasta llegar a componer bóvedas completas. Uno de los primeros ejemplos en los que los nervios son de piedra y los plementos son tabicados es la capilla de San Martín en la Cartuja de Valdecris (Alta, Castellón, 1385) (Figura 33 Dcha.). Como ejemplo de bóveda tabicada completa sin el empleo de nervios de piedra podemos citar por ejemplo la capilla de la reina María, anexa al claustro del convento de la Trinidad en Valencia, que data de los últimos años del siglo XV²⁵ (Figura 33 Izda.).

²² Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.22-23.

²³ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.25.

²⁴ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.26-27.

²⁵ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.28-29.



Figura 33: Bóveda de la capilla de la reina María en el convento de la Trinidad de Valencia (Izda.) y bóvedas de la capilla de San Martín (Dcha.). Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.28-29.

En la zona de Cataluña se pueden destacar dos ejemplos: el claustro del hospital de Santa Cruz (1406-1417) y la sala capitular del monasterio de Pedralbes (1418-1420). Ambos se encuentran en Barcelona y son obra del maestro Guillem Abiell. El sistema empleado en los dos casos es similar, basado en el uso de nervios de piedra y plementos tabicados²⁶.

En Aragón todo parece indicar que el desarrollo de la técnica tabicada fue algo más tardío que en Cataluña y Valencia. Los ejemplos más tempranos en los que se emplean bóvedas tabicadas son las naves de la iglesia de Cervera de la Cañada (Zaragoza, 1426) y en las capillas laterales de la iglesia de Santiago de Montalbán (Teruel, 1443)²⁷.

5.1.3. Siglos XVI-XVIII: Generalización del sistema y cambio al lenguaje clásico

En el siglo XVI la construcción tabicada ya se había extendido por buena parte de España. Además, es un momento en el que comienza a introducirse en nuestro país el lenguaje renacentista, pero también se siguen manteniendo las formas del gótico. Las bóvedas tabicadas jugarán un importante papel en este cambio de estilo, ya que las tradicionales bóvedas semicirculares renacentistas de piedra empujan más que las apuntadas, por lo que al comenzar a construirlas con ladrillo y ser mucho más ligeras permiten a los maestros abandonar el uso de pilares y grandes contrafuertes góticos para emplear en su lugar columnas y así despreocuparse del aspecto estructural y centrarse en la decoración y las proporciones, además de liberar visualmente el espacio interior de los templos²⁸.

Debido a la progresiva introducción del lenguaje renacentista y al abandono del estilo gótico durante esta época, aún es posible visualizar el empleo de las estructuras tabicadas de diversas formas y empleando distintas soluciones, entre las que cabe destacar:

- Como plemento entre nervios de piedra, generalmente en iglesias menores que aún emplean el estilo gótico, como pueden ser las iglesias de San Andrés (Valencia, 1602) o la de San Esteban (Valencia, 1608) y también el monasterio de San Miguel de los Reyes, este ya en la segunda mitad del siglo XVI. También tabicadas pero con nervios resistentes de ladrillo son las bóvedas de la Lonja de Zaragoza (1541-1551) (Figura 34), las de la iglesia de El Pozuelo de Aragón (Zaragoza, 1545) y las del monasterio de Trasobares (Zaragoza, 1563).

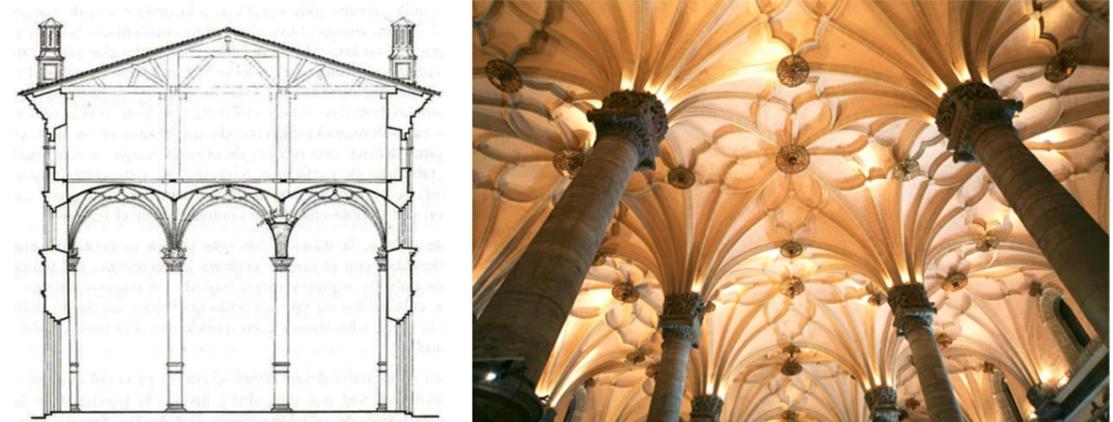


Figura 34: Sección y vista general de las bóvedas de la Lonja de Zaragoza. Fuente: <https://www.zaragoza.es>

- Bóvedas construidas completamente en ladrillo a las que se añaden posteriormente nervios de yeso o ladrillo aplanillado, como por ejemplo la iglesia de la Compañía de los Jesuitas (Valencia, 1621), las celdas de día del Monasterio de Pedralbes (Barcelona, siglo XVI) o la última ampliación llevada a cabo en la Seo de Zaragoza (quarto nuevo, 1546-1550).
- Bóvedas de ladrillo en las que se emplea por completo un lenguaje propiamente renacentista, como en el Hospital General de Valencia (1588) (Figura 35).



Figura 35: Vista general de las bóvedas del Hospital General de Valencia. Fuente: <https://esthisart.blogspot.com>

²⁶ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.31-32.

²⁷ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.33.

²⁸ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.34.

Aparte de comenzar a emplear la construcción tabicada como un elemento resistente completo y no únicamente como plementería, los espacios que se logran cubrir son cada vez mayores. Por ejemplo, en la iglesia de los jesuitas de Valencia, las bóvedas tabicadas del crucero forman cuadrados de 10m de lado, pero la evolución de la técnica constructiva continuaría y ya en el año 1700 se levantó una cúpula oval de ejes 19 y 15m y únicamente 8cm de espesor en la basílica de los Desamparados de Valencia²⁹.

Otra aplicación interesante que se dio a la construcción tabicada, sobre todo en la zona de Valencia, fue su empleo durante el siglo XVII para cambiar el aspecto interior de los primitivos templos góticos y adaptarlos al estilo barroco limitando al máximo los costes. Por ejemplo, en la iglesia de los Santos Juanes de Valencia se decide en 1693 la construcción de una gran bóveda tabicada de 16m de luz y 10cm de espesor bajo las bóvedas de crucería originales, que sirven de soporte parcial para la nueva bóveda (Figura 36). Del mismo tipo es la bóveda de la basílica de los Desamparados de Valencia (citada en el párrafo anterior)³⁰.

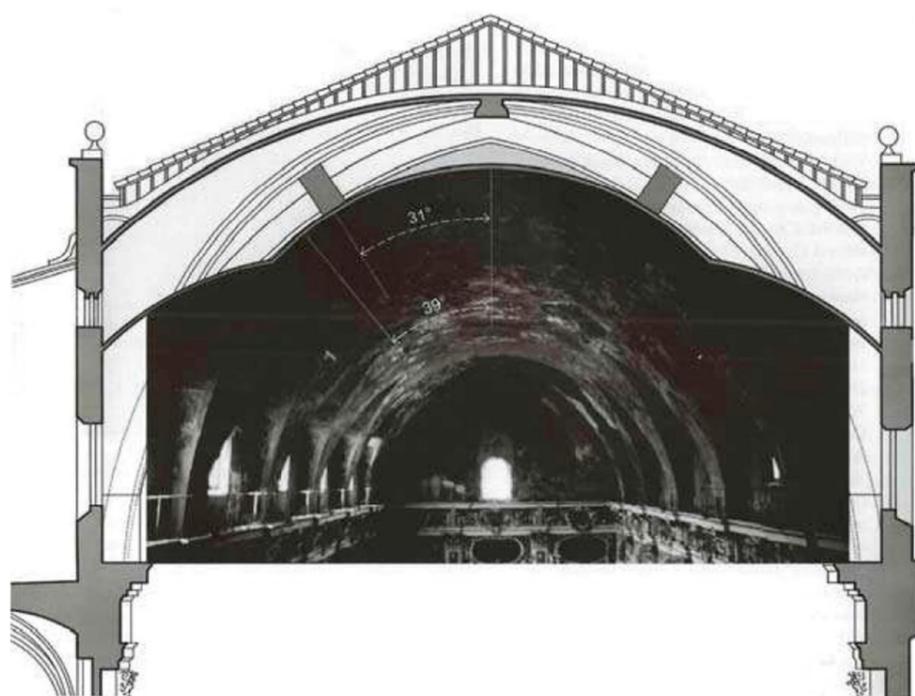


Figura 36: Sección de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia. Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.37.

En la zona de Castilla el empleo de este sistema fue algo más tardío, en torno a la primera mitad del siglo XVI y pasó a sustituir a las falsas bóvedas de yeso y cañizo que se empleaban principalmente en obras de arquitectura civil. La primera referencia de bóvedas tabicadas, en este caso con nervios resistentes y plementos tabicados, fueron las que el maestro Alonso de Covarrubias construye en el convento de Nuestra Señora de la Piedad (Guadalajara, 1526). El mismo Covarrubias construye también las bóvedas, aunque estas ya de estilo renacentista, en las galerías de los patios del Hospital de Tavera (Toledo, 1540). Otros ejemplos un poco más tardíos son la iglesia del monasterio de Santo Domingo el Antiguo (Toledo, 1576-79), el colegio Bernardo de los Jesuitas (Oropesa, 1590-1613) y la iglesia del monasterio de San Pedro Mártir (Toledo, 1605-1611)³¹.

²⁹ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.36.

³⁰ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.37-38.

³¹ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.42-43.

5.1.4. Andalucía

En Andalucía, la primera referencia conocida de una bóveda tabicada es la de la capilla del cementerio de Aznalcollar, fechada hacia el año 1400, pero al no conservarse ninguna documentación acerca de su construcción podría tratarse del resultado de una remodelación posterior. El siguiente texto es muy posterior, del año 1614 y hace referencia a la construcción de la catedral de Granada, en la que las capillas de la nave mayor se proyectan con nervios de piedra y plementos tabicados, queriéndose construir posteriormente sólo de ladrillo³². En el siguiente texto se pueden apreciar las reticencias que provocaban las bóvedas tabicadas como estructura resistente completa:

Pregunta... si el crucero se podría cubrir de ladrillo y no de cantería... Respuesta: se podían hacer bóvedas de ladrillo porque la crucería son de piedra, pero todo de ladrillo, de ninguna manera. Otro dice que se podría hacer de ladrillo todo el casco liso de la capilla y después de cerrado liso hacerle unos repartimientos (...) y será menos carga para los estribos, paredes y pilares y estará muy fuerte. Otro dice que se puede reducir el cerramiento de estas bóvedas a lo romano y se pueden cubrir de ladrillo y yeso y estarían muy fuertes (...) Con ello estará muy fuerte y muy seguro y de menos costa y riesgo que podría tener con el mucho peso y empuje de la piedra. Así está cerrada la iglesia mayor de Córdoba y la de la Compañía de la misma ciudad; la iglesia del Escorial que su majestad hizo en el pueblo, tiene 50 pies de hueco y es de tabique. Lo mismo otros muchos templos importantes en Madrid, Valladolid, Toledo y Andalucía son de bóvedas de ladrillo y están muy fuertes y seguras (Rosenthal 1990, Documento 214).

Otro ejemplo importante, también en la ciudad de Granada, son los abovedamientos construidos a partir del siglo XVII en la iglesia y el sagrario de la Cartuja. En la iglesia hay tres bóvedas de arista con paños de doble curvatura y una cúpula oval, reforzadas por el trasdós con lengüetas y con los riñones sin relleno. En la sacristía, comenzada en 1732, hay una cúpula esférica tabicada de dos hojas conectadas por lengüetas radiales y unidas en la base y en la coronación, siguiendo el sistema de doble cúpula tan habitual en Valencia³³ (Figura 37).

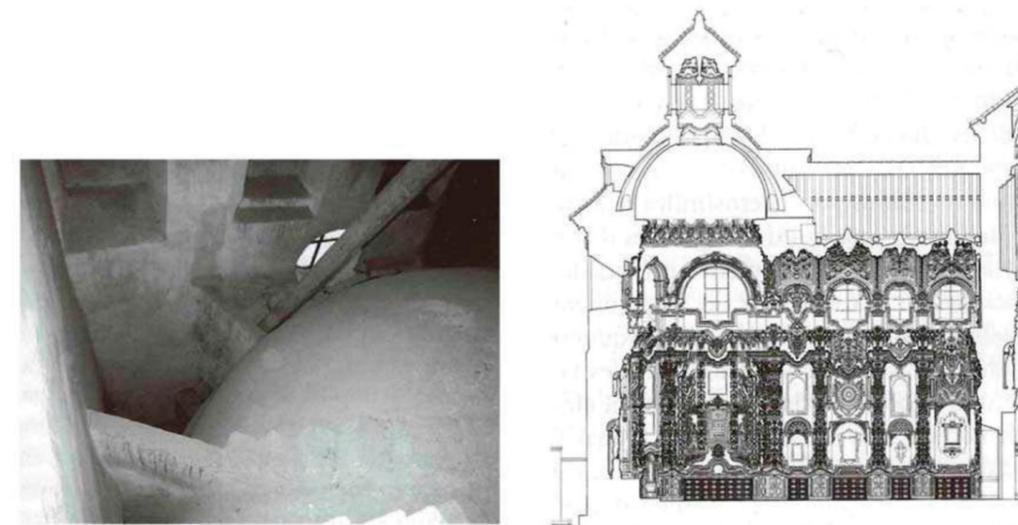


Figura 37: Cúpula tabicada de la sacristía de la Cartuja de Granada. Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral, p.45.

³² Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.44.

³³ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", 2013, p.44-45.

5.2. Evolución histórica de la construcción del Sagrario

5.2.1. La etapa de Francisco Hurtado Izquierdo (1705-1719)

Como ya adelanté en el apartado 3.4 de este trabajo, en el que realicé un breve resumen cronológico de las diferentes etapas que se sucedieron durante la construcción del Sagrario, la persona encargada de iniciar las obras, en lo referente a mecenazgo, sería el arzobispo Martín de Ascargorta, el cual realizaría el encargo al que por entonces era el Maestro Mayor de la Catedral de Córdoba, Francisco Hurtado Izquierdo.

Las obras comenzarían el 30 de abril 1705 a partir de las trazas dadas por Hurtado Izquierdo, las cuales destacaban por tratarse de un modelo de templo escasamente representado en la arquitectura religiosa granadina, ya que se trataba de una iglesia de planta central (Figura 38). Algunos estudiosos afirman que podría haberse inspirado en las trazas que Bramante realizara para el Vaticano. Esta elección de una iglesia de planta central llevaba implícita una solución para las cubiertas en las que prevalecía el empleo de una gran cúpula³⁴. A pesar de que la planta de la iglesia resultaba bastante novedosa, el edificio en general tenía una significación historicista, debido a las estrictas instrucciones que daría el arzobispo Ascargorta a Hurtado para que el nuevo Sagrario se adecuara al estilo de la vecina Catedral³⁵.

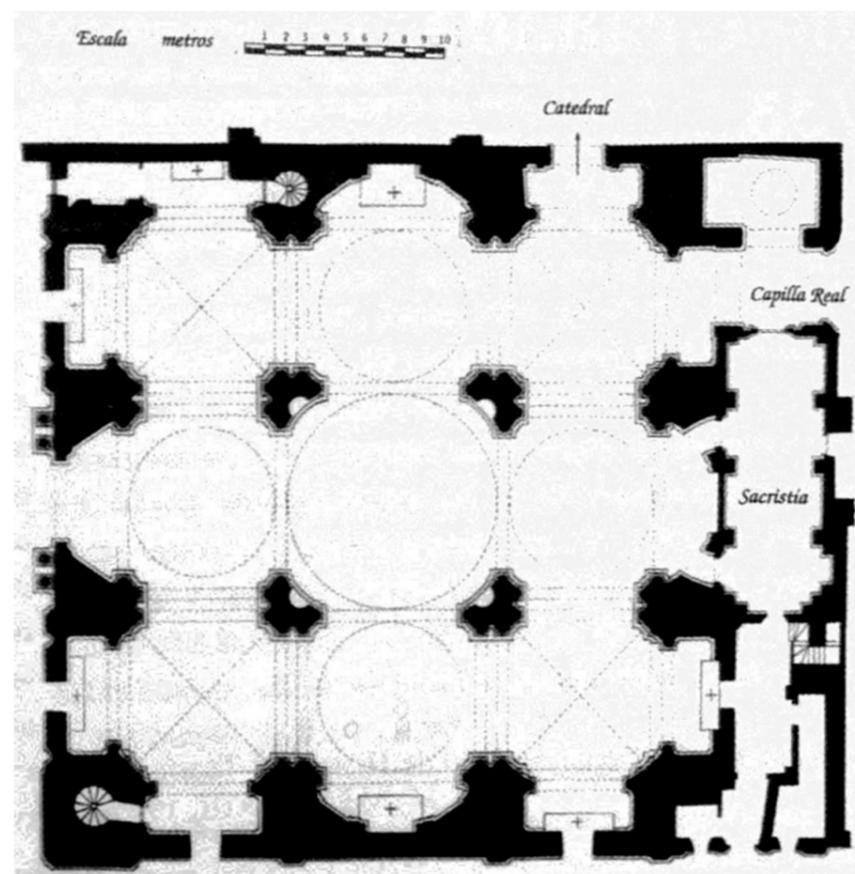


Figura 38: Recreación de la planta diseñada por Hurtado Izquierdo. Fuente: René Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.150.

³⁴ J. M. Martín García, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II, 2007, p.440-441.

³⁵ Ignacio Henares Cuéllar, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.I, 2007, p.77.

Las obras avanzarían con buen ritmo hasta llegado el año 1714, momento en el cual comenzó a agotarse el dinero necesario para su ejecución, lo que provocó la paralización de todo el proceso constructivo. Esto justificaría las prolongadas y cada vez mayores ausencias de Hurtado Izquierdo de Granada, lo que unido a la muerte del arzobispo Ascargorta el 25 de febrero de 1719, hicieron que Hurtado se desentendiera por completo del proyecto³⁶.

En ese momento el edificio alcanzaba unas ocho varas de altura, por lo que debía encontrarse levantado aproximadamente hasta las bóvedas de la cripta. Se podría deducir que Hurtado no realizó por tanto nada relacionado con el alzado del templo, aunque sí dejaría, junto con las trazas de la iglesia, una maqueta de madera realizada por él mismo, la cual se conservó en la Contaduría de la Catedral hasta 1732, año en el que fue mandada destruir por considerarse que las obras continuadas por José de Bada eran un fiel reflejo de las trazas originales de Hurtado³⁷.

Tras la paralización de las obras, sería el Cabildo el que se hiciera cargo de su continuación, la cual no se haría efectiva hasta el año 1722, momento que coincide con el nombramiento de un nuevo Maestro Mayor, José de Bada y Navajas. Por tanto, aunque Hurtado sería el inspirador primero de la obra, no será él, sino Bada, el artífice y encargado de materializar el proyecto a través de una interpretación del original³⁸.

5.2.2. La primera etapa de José de Bada y Navajas (1722-1738)

José de Bada se encontró con un proyecto ya comenzado que además tenía múltiples condicionamientos y unas rígidas directrices marcadas desde el arzobispado en referencia a la vecina catedral. A pesar de ello y de la diferencia de criterios y de estilos que había entre Hurtado Izquierdo y Bada, éste se mantuvo lo más fiel posible al proyecto original. Como veremos en los siguientes apartados, toda la riqueza imaginativa que Hurtado había planteado en su proyecto, pondría en serias dificultades al nuevo Maestro Mayor, sobre todo a la hora de comenzar a construir las bóvedas³⁹.

Aun así, los únicos cambios que Bada introduce respecto al proyecto de Hurtado, enumerados por él mismo, se refieren fundamentalmente a los exteriores del templo y, en concreto, al cambio de concepción de la portada principal, a la reducción del número de puertas de acceso (en principio iban a ser seis y al final quedaron reducidas a un solo vano y a un pequeño portillo abierto junto a la Catedral que estuvo abierto hasta el año 1753) y a la reducción de la altura de la torre, veinte varas más baja que la del proyecto de Hurtado⁴⁰. La única modificación que afectaría al interior del templo sería la referente al cuerpo de luces, que pasaremos a analizar en los siguientes apartados.

³⁶ J. M. Martín García, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II, 2007, p.440-441.

³⁷ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.122-123.

³⁸ J. M. Martín García, en "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario, vol.II, 2007, p.440-441.

³⁹ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.124.

⁴⁰ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.126.

5.2.3. La quiebra del pilar y la Junta de Maestros de 1738

Las obras continuaban avanzando con rapidez hasta que en 1738, cuando la obra había alcanzado ya una altura de unas cuarenta y seis varas y se estaba trabajando en el anillo de la media naranja, aparece un nuevo problema en la construcción de la iglesia. El 10 de abril de ese mismo año dieron aviso al arzobispado y al cabildo de la aparición de una grieta en un pedestal de uno de los machones centrales, en concreto el del sureste (Figura 39). A pesar de que la grieta no parecía muy profunda sí que tenía cierta extensión, ya que se desarrollaba desde el centro del pedestal hasta la base de la semicolumna que arrancaba sobre éste, por lo que se mandó suspender la obra y se procedió a la colocación de marcadores para comprobar si la grieta se seguía abriendo. Finalmente se comprobaría que la grieta se mantenía inmóvil⁴¹.

La paralización de las obras supuso la convocatoria de una junta de maestros con la finalidad de dar una solución al problema que había aparecido. Los maestros que fueron convocados fueron José Gallego, (maestro mayor de las catedrales de Jaén, que firmaría su escrito junto con los maestros de albañilería Miguel Gallardo y Miguel López), Simón López de Rojas (maestro mayor de la catedral de Almería), Alfonso del Castillo (maestro mayor de la Real Intendencia de Granada), Vicente de Acero (maestro mayor de la Real Fábrica de Tabacos de Sevilla y de la catedral de Guadix), el hermano de la Compañía de Jesús Francisco Gómez y por último Isidoro Albo y José de Bada (aparejador y maestro mayor, respectivamente, del Sagrario). A continuación expondré brevemente las opiniones y soluciones que plantearon cada uno de ellos al problema mencionado y que recoge perfectamente René Taylor en su artículo, aunque también se pueden encontrar estos informes en el Archivo de la Catedral.

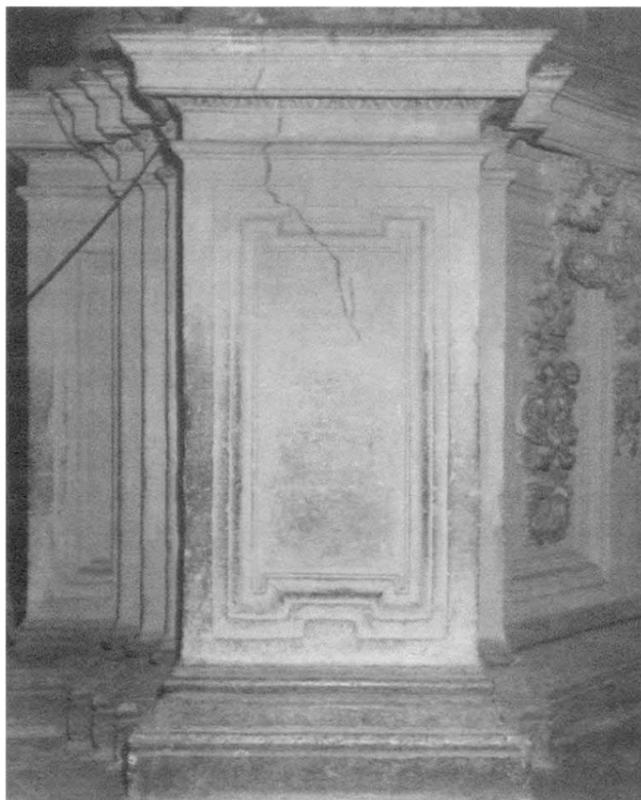


Figura 39:Grieta del pedestal. Fuente: R.Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.150.

⁴¹ René Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.149.

José Gallego

Gallego realiza quizás el informe más crítico de todos los maestros que reconocieron la obra. En él señala algunos problemas de gravedad que apreciaba en la construcción del Sagrario, como por ejemplo una elección inadecuada en el tipo de cimientos empleados en los cuatro machones centrales del templo, así como que a éstos les faltaba una tercera parte del grueso que deberían tener. También destacaba que la carga de las bóvedas y los arcos era excesiva y que el anillo de la media naranja estaba fundado sobre vuelos. Por último comenta que no sería posible construir el conjunto formado por el cuerpo de luces, la media naranja y su linterna de piedra del modo en que se habían proyectado debido a su enorme peso.

El informe no se queda ahí, sino que Gallego propone una serie de medidas para intentar corregir estos errores. En primer lugar, se deberían encadenar los cimientos de acuerdo con un dibujo que dejó (Figura 40). Posteriormente se deberían reforzar los machones centrales transformando su sección de triangular a cuadrada, empotrando en ellos nueva piedra de cantería. También se tendrían que desmontar los arcos del anillo y las bóvedas circundantes para reducir su espesor y de esta forma su peso y, por último, se debería rematar el conjunto con una cúpula encamionada del mismo tipo que describe Fray Lorenzo de San Nicolás en su libro "Arte y Uso de la Arquitectura"⁴².

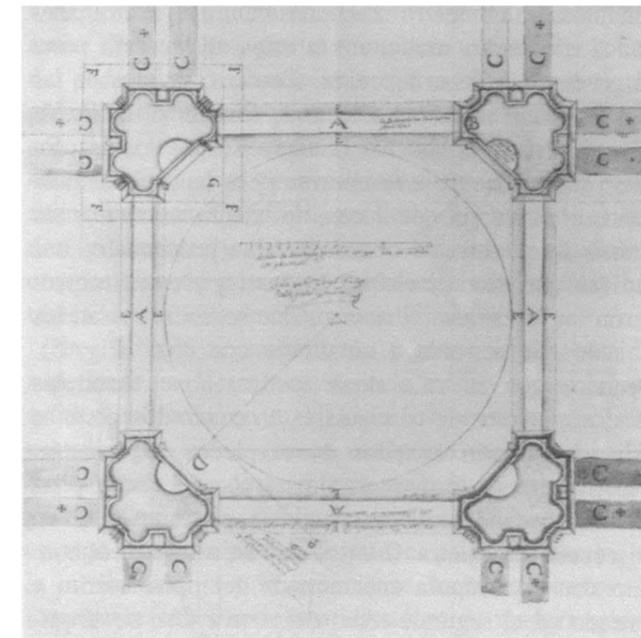


Figura 40:Dibujo de José Gallego para el encadenado de los cimientos del Sagrario. Fuente: René Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.150.

Simón López de Rojas

López de Rojas atribuye la grieta en a un leve asentamiento de la cimentación o a que el enchapado del propio pedestal estuviese incorrectamente colocado, advirtiendo que de ser así se podría volver a reproducir el problema en los demás machones. Al igual que Gallego, coincide en que la solución podría ser la de encadenar los cimientos y posteriormente reforzar la sección de los machones centrales transformándolos en

⁴² René Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.150-152.

cuadrados. Para aligerar el peso que descargaría sobre ellos, propone construir las bóvedas restantes empleando el ladrillo. Con el mismo motivo, también recomienda suprimir el tambor de la cúpula y arrancar ésta directamente sobre el anillo⁴³.

Alfonso del Castillo

Castillo no duda en criticar los informes de Gallego y López de Rojas por atribuir la aparición de la grieta a un asentamiento de la cimentación. Afirma que de haber sido así hubiera repercutido en la clave de los arcos, cosa que no se produjo en ningún momento. También se muestra completamente contrario a la idea de reforzar la sección de los machones haciéndola cuadrada y a la recomendación de Gallego de desmontar el anillo, las pechinas y las bóvedas para hacerlas más livianas. En cambio, no pone ninguna objeción a que se encadenen los cimientos, ya que esto no perjudicaría al edificio y el único inconveniente que tendría sería el de la pérdida de superficie destinada a enterramientos en la cripta, con la objeción de que no ve necesario echar tantas cadenas como arcos hay en el interior, como proponía Gallego, sino que sólo veía necesarias las de los cuatro arcos torales.

En cuanto al empleo de una cúpula encamionada con una estructura de madera y plomo, Castillo está completamente en contra por considerar que su uso en zonas con cierta climatología como la de Granada, podría estar contraindicado por el rápido deterioro que las altas temperaturas provocarían en los materiales empleados. Cita como ejemplos los problemas que habían aparecido en otras cúpulas de esta ciudad, como la de Santo Domingo o las torres de Nuestra Señora de las Angustias. También menciona obras de otras ciudades, como la Basílica del Pilar de Zaragoza, en la que fue necesario quitar el plomo de dos de sus cinco cimborrios y sustituirlo por cubiertas de azulejos.

En su informe también habla Castillo de un importante incidente que había tenido lugar unos ocho meses antes y que para él era el verdadero origen de la aparición de la grieta. Una piedra de casi ciento cuarenta arrobas se había caído desde una altura de veinte varas matando a dos peones. Basándose en el capítulo que trata de Estática en el *"Compendio Mathematico"* del padre filipense Vicente Tosca, Castillo pasa a demostrar la fuerza con que la piedra impactó en el suelo.

Por último, no cree que las bóvedas superiores no se puedan construir de la forma en que estaban proyectadas, aunque recomienda que se rebaje algo la altura de la media naranja y la linterna para aligerar un poco su peso. Propone construir el interior de la media naranja y la linterna mediante un tabicado y cubrir el exterior con una armadura de madera enchapada con azulejos⁴⁴.

José de Bada y Navajas

Bada no tenía ninguna duda de que la grieta que se había producido se debía a la caída de la piedra y que no tendría posteriores consecuencias. Su verdadera preocupación era la cúpula que había proyectado Hurtado Izquierdo, ya que lo había hecho para que fuese de piedra y que incluyese un cuerpo de luces y una linterna. Su temor se reducía al excesivo peso que estos elementos pudiesen suponer para ser sostenidos por los cimientos y machones centrales. Incluso antes de la aparición de la grieta ya había mostrado su

preocupación al Obrero D. Antonio Ayala, a su sucesor D. Mateo Enríquez y a Vicente de Acero, que había sido aparejador del Sagrario durante la maestría de Hurtado.

En su informe Bada analiza el asunto de la caída de la piedra de una manera muy similar a como lo hizo Castillo, aunque de una forma más metódica, lo que nos puede dar a entender que entre ambos debió existir una estrecha relación. No emplea cifras teóricas o aproximadas como sí lo hiciera Castillo, sino que hace una descripción exacta del sillar, su peso y la fuerza con la que impactó en el suelo: *"Según las tres dimensiones de dha. Piedra que eran 108 dedos de largo, 37 dedos de ancho y 34 de grueso que producen dhas. Tres dimensiones 31 pies cúbicos y pesando como pesa cada un pie quatro arrovas y media tenía la piedra 139 ½ arrovas. La altura de donde cayó según contestan los que se hallaron presentes fue de veinte varas, y dividiendo esta altura... en 20 partes iguales... quando dio el golpe avia dicha piedra adquirido y acumulado 400 sólidos o graves más de los que en su entidad tenía en el primer grado de su descenso, el que siendo de 139 arrovas, en el infimo grado de su descenso tuvo de aumento 44600 arrovas"*⁴⁵. Afirma que al aguantar el golpe y no sufrir la grieta cambios posteriores quedaba demostrado que los machones y los cimientos tenían la robustez y la estabilidad suficientes.

Bada continúa explicando que para que los arcos subsistieran sería necesario cargarlos de algún peso, lo que se conseguiría levantando sobre ellos los muros que posteriormente sostendrían las armaduras de madera que cubrirían las bóvedas y cúpulas. Finaliza su informe sugiriendo al arzobispo que si deseaba concluir las obras del Sagrario con mayor rapidez, se podrían cubrir las bóvedas que faltaban con tabicado. De todas formas se suprimiría el tambor y la media naranja seguiría el modelo de la catedral, recibiendo su orden de ventanas de la misma forma. Termina Bada diciendo que si el arzobispo deseaba ver el Sagrario concluido con rapidez, se podrían cubrir las bóvedas que faltaban de tabicado. De todas maneras se suprimiría el tambor. La media naranja seguiría el modelo de la catedral, "recibiendo su orden de ventanas en la misma forma"⁴⁶.

Isidoro Albo

Isidoro Albo ya había trabajado anteriormente en la construcción de las bóvedas de la catedral bajo los órdenes de Melchor Aguirre. Según sus propias palabras fue el encargado de labrar la primera piedra de labor del Sagrario en 1705, en el que continuaría trabajando hasta que fue nombrado primer aparejador.

Albo rechazaba las críticas que algunos maestros habían hecho referentes a la cimentación del Sagrario. Su informe resulta muy interesante puesto que en él describe la forma en que ésta fue construida. Según él, Hurtado excavó una profundidad de unas diez a once varas, hasta llegar a un suelo pedregoso y seco. Explica que no fue necesario recurrir a reforzar el terreno empleando estacas de madera ni otros métodos y que Hurtado levantó los pilares centrales utilizando sillares de piedra de Alfacar de buena magnitud y bien trabados y asentados. Confirma que la cimentación de los machones centrales se hizo de forma escalonada y que a su parecer se encontraba en buen estado en toda la edificación. De todas formas, no se opone a lo que habían señalado ya los otros maestros en lo referente al encadenado de los cimientos con hiladas de sillares de piedra de Alfacar de testas a testas. En cuanto a la grieta que había aparecido, culpa también a la caída de la piedra⁴⁷.

⁴³ René Taylor, *"El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738"*, 1996, p.152.

⁴⁴ René Taylor, *"El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738"*, 1996, p.153-154.

⁴⁵ Encarnación Isla Mingorance, *"José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz"*, 1977, p.127.

⁴⁶ René Taylor, *"El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738"*, 1996, p.154-155.

⁴⁷ René Taylor, *"El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738"*, 1996, p.156.

Vicente de Acero

Vicente de Acero había sido aparejador del Sagrario, además de ser maestro mayor de la Real Fábrica de Tabacos de Sevilla y de la catedral de Guadix, por lo que se puede decir que fue el más prominente y experimentado de los maestros que examinaron el Sagrario. En el momento de producirse la grieta se encontraba en Granada dirigiendo las obras que se estaban acometiendo en la sacristía de la Cartuja de Granada, por lo que fue el primer maestro de fuera en reconocer la obra.

En su informe quitó importancia a la aparición de la grieta, al considerar que ésta era superficial y que sólo había afectado al pedestal y no había penetrado en el corazón de la columna. Además, consideraba que no era consecuencia de un problema de cimientos ni de grueso de pilares, ya que de haber sido así, el asentamiento de los cimientos se hubiese manifestado en la zona de los arcos que arrancan de los machones, hecho que no se había producido. En lo referente al grueso de los pilares, de haberse producido por esta causa, la grieta no hubiese aparecido en el pedestal, que era la parte más gruesa, sino justo debajo de los capiteles, por ser ésta la zona más delgada.

En su opinión la grieta se debía a una mala fijación de las piedras, por haberse introducido lajas entre ellas y haber dejado algunos vacíos. Para solucionar el problema sugiere retirar las partes afectadas del pedestal y sustituirlas por obra nueva, aunque sería una operación que habría que realizar con mucho cuidado. En esta operación no se deberían emplear lajas de piedra, sino que se debería macizar el conjunto empleando una lechada que él denomina como "catalana".

Sobre el problema de la cúpula, afirma que ésta se podría finalizar tal y como la había proyectado Hurtado, ya que existían ejemplares o precedentes ya realizados que justificarían el empleo de la piedra en este elemento⁴⁸.

Francisco Gómez

Tanto el arzobispo como el cabildo se encontraban totalmente desconcertados ante la diversidad de criterios y consejos (muchos de ellos contradictorios) que los distintos maestros habían plasmado en sus informes, por lo que decidieron realizar una última consulta al hermano coadjutor Francisco Gómez, esperando que éste reconciliase de alguna manera las divergencias y les indicase el camino que debían seguir.

El hermano jesuita era conocedor del contenido de los informes y los pareceres del resto de maestros que le habían precedido en el reconocimiento de la grieta y, además, se encargó de comprobar personalmente que la fábrica del Sagrario concordaba con las trazas originales de Hurtado, como Bada mantenía, lo cual resultó ser cierto.

En el tema referente a la cimentación, el hermano expresó su preferencia por los cimientos de forma cúbica, recomendados por Fray Lorenzo de San Nicolás, frente al tipo piramidal o escalonado de Vitrubio, sobre todo teniendo en cuenta la alta sismicidad del terreno de la ciudad. Por tanto, recomendó también que se encadenaran los cimientos empleando piedra de Alfacar. El cabildo estuvo de acuerdo con esta recomendación y mandó que se procediera a encadenarlos.

Del mismo modo que Alfonso del Castillo, Vicente de Acero y el propio Bada, Francisco Gómez rechazó por completo la idea de que la grieta aparecida fuese consecuencia de un hundimiento del subsuelo o de una cimentación deficiente. Debido a que ésta no había mostrado signos de abrirse más en todo el tiempo transcurrido, recomendó simplemente que se llenara de mezcla. Así se haría y el pedestal ha durado en ese estado hasta nuestros días.

Gran parte del informe del jesuita se dedica al tema de la robustez de los machones centrales en relación al peso que éstos debían sostener. Coincide completamente con la opinión de Acero, al señalar que si los machones no hubiesen tenido una debida solidez, la grieta se hubiese manifestado justo en la zona bajo los capiteles, por ser ésta la de menor espesor y por tanto estar más dispuesta a sufrir un resquebrajamiento. El hermano mandó incluso levantar un andamio para realizar un examen visual de la parte superior de los machones, pero no encontró ninguna deficiencia en ellos⁴⁹.

En su informe cabe destacar un aporte muy interesante desde nuestro punto de vista y según el análisis que se realiza en este trabajo, ya que realiza una comparación entre las medidas y proporciones del Sagrario y de la basílica de San Pedro de Roma y su relación con la seguridad y estabilidad de ambas edificaciones (Figura 41). Para ello parte del ancho de la nave en relación con el diámetro del anillo de la cúpula y luego comparando el diámetro con la altura de la misma. Según sus cálculos, la primera de las proporciones es casi equivalente con la diferencia de algunos dedos a favor de San Pedro. La proporción entre las dos dimensiones de la cúpula es cuatro veces y un tercio en San Pedro y tres veces y dos tercios en el Sagrario, siendo ésta la mayor diferencia que hay entre un ejemplo y otro⁵⁰.

El hermano Gómez continúa su informe comparando la proporción nave-pilar por lo que se refiere a cimientos de éste, que es mitad en ambos edificios respecto a aquella con 1/16 de diferencia en perjuicio del Sagrario. En cuanto a los pilares, y a pesar de la grieta aparecida, acaba considerando que son más fuertes los granadinos por el hecho de no tener tantos huecos como los romanos, los cuales cuentan con tres en cada uno de sus tres lados, más dos capillas dentro del macizo del pilar. Esta comparación, unida a la resultante de hacer lo propio con el peso de ambas cúpulas y bóvedas colaterales, llevan al hermano Gómez a concluir en su informe que el Sagrario tiene mayor seguridad que la basílica de San Pedro de Roma⁵¹ y que por tanto la cúpula se podía hacer de piedra tal y como estaba proyectada.

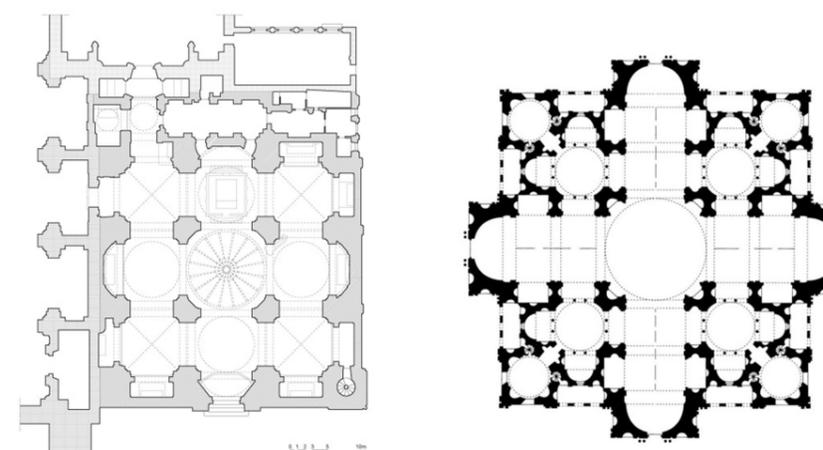


Figura 41: Ídem. Figura 12. Comparación entre las plantas del Sagrario de Granada y San Pedro de Roma.

⁴⁸ René Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.157-158.

⁴⁹ René Taylor, "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738", 1996, p.158-159.

⁵⁰ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.81.

⁵¹ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.82.

5.2.4. Decisiones adoptadas tras la Junta de Maestros de 1738

Tras la Junta de Maestros, el arzobispo y el cabildo se muestran desconcertados ante las diferencias de opiniones y criterios expuestos por éstos, por lo que acabaron inclinándose por la opción que planteaba el que entonces era maestro mayor del Sagrario, José de Bada, el cual acabaría demostrando su maestría eliminando la mayor parte de las dificultades señaladas por el resto de maestros y reduciéndolas todas al defecto de cimentación que casi todos indicaban. Bada hizo caso omiso a las sugerencias de quitar muros sobre los arcos, cuadrar los pilares centrales, levantar arcos de refuerzo bajo la cúpula y otras propuestas planteadas, consiguiendo de esta manera mantener los elementos y alzados con que el edificio había sido proyectado por Hurtado. A continuación paso a enumerar las principales decisiones que tomó Bada:

a) Relativas a la cimentación.

A pesar de que Bada y Acero mostraron en sus informes que no era necesario encadenar los cimientos, las opiniones contrarias del resto de maestros hicieron que el cabildo se decantase por esta opción, a la que Bada no tuvo más remedio que adaptarse. De este modo, en 1739 se procedió al mencionado encadenado de los cimientos, mediante la disposición de tres hiladas de sillares de piedra de Alfacar⁵².

Otra modificación que se llevó a cabo en la cripta fue el refuerzo de la bóveda situada bajo el tabernáculo. Aunque en un principio el cabildo era partidario de macizar todo el espacio situado bajo el mismo, Bada se negó a realizarlo, por considerar que no era necesario y porque suponría un gran desembolso económico, optando finalmente por la solución de reforzar los pilares que sostienen la mencionada bóveda⁵³ (Figura 42).



Figura 42: Refuerzos de la bóveda de la cripta situada bajo el tabernáculo. Fuente: Elaboración propia.

b) Relativas a la cúpula central.

La desconfianza que presentaba José de Bada al proyecto original de Hurtado, en el que la cúpula, el cuerpo de luces y el tambor estaban proyectados en piedra, queda patente desde antes incluso de producirse el problema de la grieta en uno de los machones centrales y celebrarse la Junta de Maestros de 1738, como así lo demuestran las sucesivas consultas que Bada realiza antes de esta fecha. Así por ejemplo, es sabido que debido a sus temores por el excesivo peso que tendrían que soportar los pilares, Bada solicita en 1732 a don Antonio Ayala celebrar una Junta de Maestros para dictaminar

sobre el asunto. Al hacerse cargo de la obra el Sr. Enríquez, Bada vuelve a plantear la cuestión y realiza una consulta a Vicente de Acero, el cual dictamina que no habría ningún problema en construir la cúpula y el cuerpo de luces tal y como estaban proyectados⁵⁴.

A pesar de ello, Bada continúa con sus temores y tras cerrar las bóvedas laterales en 1745, el arquitecto decide finalmente suprimir el cuerpo de luces y hacer la cúpula central de ladrillo tal y como se había construido la cúpula de la Capilla Mayor de la Catedral. Así pues, la estructura se reduce a un anillo de cuatro pies de grueso sobre el que apoya el banquillo exterior, de dos varas de alto y cinco cuartas de grueso⁵⁵. El cuerpo de luces, que inicialmente sólo tenía cuatro ventanas, se construyó finalmente con ocho ventanas, correspondientes a cada uno de los lados del octógono sin tambor e incluido en la media naranja mediante un sistema de lunetos que cobijan a los vanos⁵⁶.

La media naranja quedaba rematada por una linterna que posteriormente hubo que retirar por problemas de recalos en la cúpula, hecho que se describe con más detalle en el siguiente apartado. Todo el conjunto se cubrió mediante una techumbre de madera fabricada a base de ocho palos de hacha sobre los que descansaba la primera y más exterior armadura de madera, que también tuvo que ser retirada junto con la linterna. Sobre la estructura de madera se levantaba una cubierta de pizarras⁵⁷.

c) Relativas a las bóvedas laterales.

Al contrario que las cuatro bóvedas de arista de las esquinas, que fueron construidas en piedra, las bóvedas vaídas laterales no hubieran podido ser levantadas con el mismo material por razón de empujes, por lo que, al igual que la cúpula central, el material elegido para su construcción fue el ladrillo, empleando la técnica tabicada y con un espesor de una cuarta (dos hojas de ladrillo más el mortero intermedio), lo cual es aún perceptible si se echa un vistazo a su interior a través de alguno de los respiraderos que se abren en la armadura de las cubiertas que las cobijan (Figuras 43 y 44). El hecho de poder visualizar el interior de éstas cúpulas laterales a través de los respiraderos, nos puede dar una idea del sistema constructivo empleado en la cubrición de la cúpula principal, ya que fueron ejecutados al mismo tiempo, como veremos en el siguiente apartado.

Como hemos visto, la Junta de Maestros celebrada en 1738 no haría que Bada cambiara demasiado su parecer respecto a la resolución de los problemas que presentaba el Sagrario, pero sí que pudo tener influencia en otras obras realizadas por el maestro, como por ejemplo en la iglesia de San Juan de Dios de Granada. La opinión dada por Vicente de Acero en referencia a cuadrar los pilares del Sagrario parece verse reflejada en la solución constructiva que Bada da a los pilares centrales de San Juan de Dios, ya que éstos son de sección cuadrada y sobre ellos se levantan dobles arcos torales que sustentan una gran cúpula con linterna y tambor (Figura 45).

⁵² Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.124.

⁵³ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.127-128.

⁵⁴ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.154.

⁵⁵ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.155.

⁵⁶ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.113.

⁵⁷ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.154.



Figura 43: Vistas del extradós de una de las cúpulas vaídas laterales a través del respiradero de la cubierta. Fuente: Elab. propia.



Figura 44: Vistas de las armaduras de cubierta de una de las cúpulas vaídas laterales a través del respiradero. Fuente: Elab. propia.



Figura 45: Cúpula de la basílica de San Juan de Dios de Granada. Fuente: <https://www.sjd.es>

5.2.5. El recalco de las bóvedas y la sustitución de la linterna

Como he comentado anteriormente, la linterna de la cúpula principal figuraba en el proyecto de Hurtado y, aunque llegó a realizarse, tuvo una vida muy efímera. Aprovechando una de las frecuentes ausencias de Bada, alguien ofreció al Diputado de la obra (Mateo Enríquez) y al aparejador cierta cantidad de pizarra para cubrir la cúpula y la linterna, los cuales aceptaron sin tener en cuenta la opinión de Bada y sin que éste pudiese reconocer el material, que al parecer no era de muy buena calidad. A pesar de que era un material que se estaba empleando en la construcción del Escorial, en Granada no era muy conocido, pero Bada terminó aceptando colocarlo, pensando utilizar para unir las piedras a las armaduras el plomo proveniente de las canales viejas de la Catedral. Finalmente el plomo le fue negado al maestro, debido al afán de acabar cuanto antes las obras, por lo que debido a que las pizarras no eran apropiadas a las condiciones climatológicas de Granada y a que fueron colocadas con falta de sujeción, empezaron a desprenderse de la linterna y a recalarse la cúpula. Ello provocó que en 1753 el arquitecto decidiera finalmente demoler la linterna, empleando su armadura en hacer la garganta o anillo del cupulín existente actualmente, que en cierta manera es una continuación de la media naranja⁵⁸.

El cupulín que sustituyó a la linterna siguió por su intradós los motivos ornamentales de la cúpula, a base de yesería y siguiendo la forma denominada "cintas de melón", que divide todo el conjunto mediante unos radios convergentes en los que Bada colocó motivos florales iguales a los que adornan la base de los pilares (Figura 46). El cupulín queda finalmente rematado por un florón de conchas, acantos, curvas y contracurvas⁵⁹.

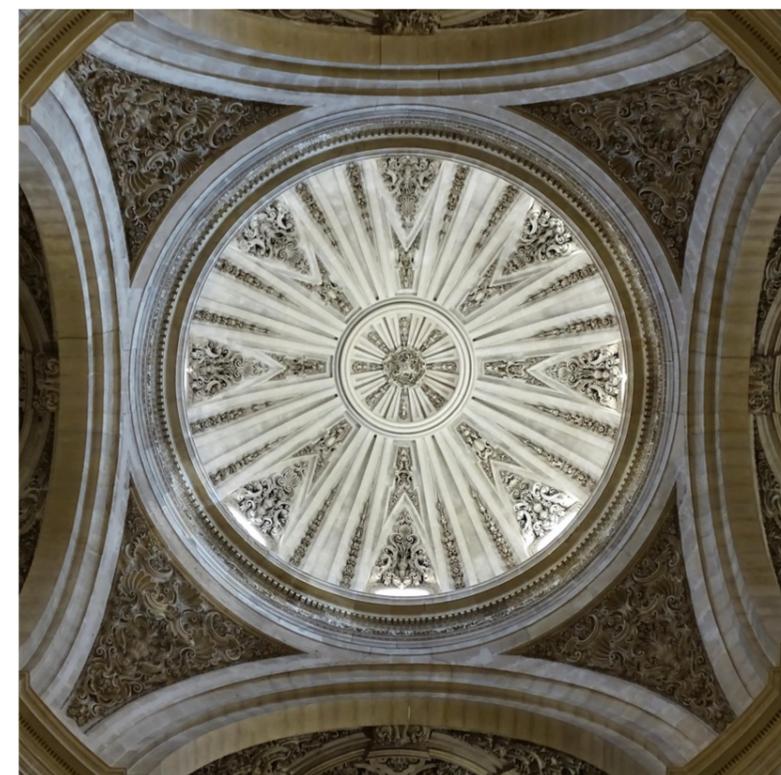


Figura 46: Decoración de la cúpula y el cupulín por su intradós. Fuente: Elaboración propia.

⁵⁸ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.147-148.

⁵⁹ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.146.

Pero la sustitución de la linterna por el cupulín no sería la última modificación que sufriría la cúpula principal del Sagrario. El amazón de madera que cubría la cúpula había sufrido algunos daños tras los recalos sufridos, por lo que tras la muerte de Bada sería Gaspar Cayón (amigo de Bada y por aquel entonces Maestro Mayor de la Catedral de Guadix) el que decidiera y llevara a cabo la cubrición del trasdós de la cúpula del Sagrario con tejas multicolores (Figuras 47 a 50). Este problema no era único en Granada, sino que ya se había repetido en los templos de Santo Domingo y de la Magdalena, y fue la causa de que las medias naranjas empezasen a ser recubiertas de teja vidriada⁶⁰.



Figura 47: Muros exteriores y cubierta vidriada de la cúpula principal. Fuente: Elaboración propia.



Figura 48: Detalle de respiraderos de las cubiertas. Cúpula principal (izda.) y cúpula lateral (dcha.). Fuente: Elaboración propia.



Figura 49: Cubierta vidriada de la cúpula principal. Fuente: Elaboración propia.



Figura 50: Cubierta cerámica de una de las bóvedas laterales. Fuente: Elaboración propia.

⁶⁰ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.113.

5.3. Materiales empleados en su construcción

La mayor parte del Sagrario se construyó con calcarenita de Santa Pudía (comúnmente conocida como piedra franca y que proviene de la cantera de la Escribana en el cortijo de Santa Pudía de Escúzar), aunque se tiene constancia de que para la cimentación también fue empleado el travertino o piedra toba de Alfacar, por su mejor comportamiento ante la acción del agua⁶¹. Los sillares de los cimientos no eran muy regulares en su forma, ya que fueron necesarias lajas de piedra fraguadas con mortero a base de cal y arena para rellenar los huecos que quedaban entre ellos. Este modo de construir contrasta con la forma en que fueron levantados los muros del templo, en los que destaca la perfección en el trabajo de los sillares, los cuales muestran tal ensamblaje y acomodo que incluso resulta difícil distinguir unas piezas de otras⁶².

El barro cocido aparece en varias formas, como por ejemplo en forma de ladrillo para cerrar la cúpula principal y las bóvedas laterales, o también como teja común y teja vidriada, que tras la muerte de Bada fueron empleadas para cubrir las bóvedas debido a los problemas de recalos que aparecieron en el templo. También aparece el barro cocido en forma de tinajas y pequeños cascotes, empleados fundamentalmente en el relleno entre lengüetas de las bóvedas de arista de las esquinas⁶³.

La teja común empleada en el Sagrario provenía primeramente de Gabia, concretamente del tejedor Antonio Díaz de la Guardia, mientras que la teja vidriada empleada en la cúpula principal provenía de Granada, del tejedor Manuel Alonso, al que Bada encargó personalmente su fabricación. De este tejedor parecen ser también los caños vidriados utilizados como bajantes de las aguas recogidas en los tejados, de los cuales hay constancia de su fabricación ya en el año 1723. Un tercer tejedor, perteneciente a Juan Ruiz, fue el que fabricó la teja vidriada empleada en las espigas de las cubiertas de las bóvedas laterales tras la muerte de Bada⁶⁴.

En lo referente a la madera, no pueden generalizarse su calidad y procedencia, ya que las necesidades de la obra eran diversas. Por ejemplo, la madera de fresno y pino, árboles que abundaban en los alrededores de la ciudad, fue empleada principalmente en entramados, muebles y puertas. La madera procedente de Huéscar y Jayena comenzó a llegar a Granada a partir de 1758 y seguramente fue empleada en las armaduras de la cubierta que hizo Nicolás de Moya en enero de 1759⁶⁵.

La piedra gris de Elvira fue destinada principalmente a la portada principal, altar del Tabernáculo, solerías y frontales secundarios. Era de una gran calidad, igual a la llamada piedra de Santa Pudía (empleada también en exteriores por el maestro), ya que incluso admitía el tallado de bajos relieves y su gran dureza queda manifestada en su excelente estado de conservación actual a pesar de encontrarse a la intemperie (la de la portada). Fueron varios los canteros que se ocuparon de su saca, entre los que destacan Francisco Rodríguez Navajas, que se ocupó de sacar la piedra para la portada, o Luis de Arévalo y Juan de Villar, que se encargarían de los frontales colocados entre 1747 y 1753⁶⁶.

Entre los materiales empleados en la ornamentación, principalmente los empleados en el Tabernáculo, las mesas de altar y las estatuas, podemos destacar el jaspe rojo, muy conocido por Bada por provenir de su

región de origen. Es un material muy abundante en la Sierra de Cabra y era traído hasta Granada por Mateo Hueso, quien también se ocupaba de su saca. Debido a la lejanía de esta cantera y al aumento de precio que conllevaba su transporte hasta Granada, las obras del Sagrario también se surtieron de este material del que procedía del Cerro del Esparragal. También destaca el mármol blanco de Macael, que por ser un material de grano fino, apto para la talla y el pulimento, fue empleado fundamentalmente en las estatuas de los Evangelistas del templo y en general en toda la estatuaria del mismo, así como en la cúpula, columnillas, balaustrada y esculturas del Tabernáculo. El jaspe negro, procedente de El Tocón, fue menos empleado, aunque se puede ver en embutidos y pequeñas porciones del Tabernáculo⁶⁷.

5.4. Planteamiento y justificación de la hipótesis de cúpula encamionada

Debido a la imposibilidad de encontrar documentación gráfica referente al sistema constructivo empleado en la cúpula del Sagrario, para realizar el planteamiento y justificación del mismo he tenido que servirme de la documentación escrita existente, la cual es abundante pero contradictoria en ocasiones. Durante mis visitas a la iglesia he podido comprobar in situ lo descrito en los escritos mencionados, aunque me hubiese gustado realizar una inspección del espacio entre la cúpula y la cubierta de madera. Esto último no ha sido posible debido a la altura a la que se encuentran los respiraderos de la cubierta, a través de los cuales se hubiese podido observar con claridad el sistema constructivo empleado. En cambio, sí pude hacerlo con una de las bóvedas laterales, tal y como describo en el apartado 5.2.4, lo que me ayudó a resolver algunas de mis dudas.

También es necesario comentar que, al contrario de lo que sucede con la cúpula de San Juan de Dios de Granada, que se ha mantenido prácticamente igual desde su construcción, la cúpula del Sagrario ha sufrido múltiples cambios incluso desde su concepción, sobre todo debido a los problemas de estabilidad y posteriormente a los recalos sufridos, como explico a partir del apartado 5.2.3, por lo que la formulación de la hipótesis constructiva ha sido algo más complicada.

Por tanto, la lectura de la documentación escrita existente, las numerosas visitas realizadas por mí mismo, la toma de datos y medidas in situ y todo el estudio histórico del templo y de los sistemas constructivos que se empleaban en la época y que quedan expuestos en todos los apartados anteriores de este trabajo, me llevan a plantear la hipótesis de que se trata de una cúpula tabicada con cupulín y un sistema de lunetos que cobijan a los vanos del cuerpo de luces, sobre la que se levanta una estructura superior de madera que la protege exteriormente y que sustenta el acabado exterior de la cúpula conformado por tejas cerámicas vidriadas.

A continuación, procedo a detallar las vías que me han llevado a plantear esta hipótesis constructiva:

1. En el libro "José de Bada y Navajas: arquitecto andaluz (1691-1755), monografía sobre la vida y obra del arquitecto publicada por Encarnación Isla Mingorance, profesora del Departamento de Historia del Arte de la Universidad de Granada, la autora escribe: "En cuanto a las cúpulas, tanto la del Sagrario como la de San Juan de Dios de Granada y Lucena, son tabicadas. El proyecto para la única cúpula que iba a realizar Bada en cantería, la del Sagrario, fracasó por miedo a la falta de cimentación de los pilares centrales. Al fin fue realizada en ladrillo, sin tambor y con el cuerpo de luces incluido en la media naranja mediante un sistema de lunetos que cobijan a los vanos [...]"

⁶¹ Encarnación M^a Ruiz Agudo, Tesis Doctoral "Prevención del daño debido a la cristalización de sales en el Patrimonio Histórico construido mediante el uso de inhibidores de la cristalización", 2007, p.54.

⁶² Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.128-130.

⁶³ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.130-131.

⁶⁴ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.131-132.

⁶⁵ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.132.

⁶⁶ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.133.

⁶⁷ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.133-134.

Estas cúpulas llevan armazón de madera y se hacían a base de una doble armadura solada encima a partir del anillo y siguiendo las hiladas hasta la clave o garganta de la linterna, si la había. La destrucción de las armaduras de madera que resultaron afectadas por los recalos ocurridos en la techumbre del Sagrario, motivó el que Gaspar Cayón decidiera y llevara a cabo la cubrición del trasdós de la cúpula del Sagrario con tejas multicolores⁶⁸. En el mismo libro, la autora también escribe: “La techumbre está fabricada a base de ocho palos de hacha sobre los que descansa la primera y más exterior armadura de madera que hubo que levantar por haberse podrido la primitiva con el recalo de las pizarras. Esta cubierta se cubrió de betún provisionalmente antes de tejlarla con tejas multicolores. Más al interior estaba el tabicado de ladrillo que se puede observar desde la iglesia al que Bada dio después el color de la piedra misma⁶⁹”.

En la misma monografía de Isla Mingorance podemos encontrar también que el propio Bada, en una carta dirigida al Cabildo acerca de la quiebra del pilar del Sagrario, le aconseja a éste: “Y por conclusión de todo digo a V.S.Illma. que si quiere ahorrarse de temores de gastos de tiempo, puede hacer las cinco bóvedas que faltan de tabicado y sobre ellas sus armaduras de madera para las aguas, y en poco más de un año puede ver concluida la obra. De este modo y aligerando quatro bobedas de piedra, sale con el mismo peso que aora tiene sin estar enteramente cubierta. La bobeda o cúpula principal será de la misma forma y contextura que es la de esta Sta. Iglesia, recibiendo su orden de ventanas en la misma forma; y por ser dha bobeda si se executa de tabique mui ligera será menester aligerar las bobedas hasta aquí executadas por tener estas el peso que correspondía a el abance y empujo de la cúpula si fuera de piedra⁷⁰”.

Por último, la prueba más contundente de que las bóvedas no son de cantería la da Cayón con motivo de registrar la cubierta del Sagrario ya acabado, antes de poner las armaduras del tejado.

- Según la monografía de Isla Mingorance mencionada en el punto anterior, el modo de construir de José de Bada y su aparejador Isidoro Albo estaba muy influenciado por el tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás (Arte y uso de la Arquitectura). El mencionado tratado, uno de los principales manuales de construcción de todos los tiempos, fue el más influyente en España durante los siglos XVII y XVIII y en él se reproduce el amplio conocimiento constructivo que tenía el fraile, que trabajó como maestro de obras durante su larga vida profesional construyendo un buen número de iglesias y conventos. Fray Lorenzo proponía el empleo de las cúpulas encamonadas de ladrillo y madera como alternativa a las construidas en piedra debido a su menor coste (el coste de una cúpula tabicada se estimaba que era cuatro veces menor que una de piedra) y a la difícil situación económica que atravesaba el país en aquella época. En su tratado explica con detalle el modo de realizar la estructura de madera de una cúpula encamonada y cómo ejecutar, entre otras, la bóveda de media naranja tabicada (o como él la llamaba “de yeso tabicado”), además de justificar las ventajas del empleo de este tipo de cúpulas frente a las de fábrica de piedra, entre las que destaca:

- Menor coste de ejecución y mayor ligereza.
- Mejor comportamiento de las fábricas de ladrillo frente a los movimientos sísmicos (a tener muy en cuenta en una zona sísmica como Granada).
- Mayor rapidez de ejecución.
- Mayor disponibilidad de materiales debido a la escasez de piedra en estas tierras y al mal uso que de ella se hace.
- Mayor facilidad para su reparación. Es más fácil sustituir paños o tramos de fábrica de ladrillo que de piedra, debido al espesor del material y su traba.

- De las numerosas visitas que he realizado a la iglesia he podido extraer algunas conclusiones que me hacen corroborar todo lo expuesto a lo largo de este trabajo y mantener la hipótesis planteada:

- La forma del interior de la cúpula es diferente a la del exterior. Mientras que en el interior podemos observar una cúpula semiesférica, en el exterior ésta se manifiesta con una forma poligonal consecuencia del empleo de una estructura de madera dividida en ocho paños que da cobijo a la cúpula semiesférica tabicada que se manifiesta en el interior del templo.
- El acceso al espacio entre la cubierta de madera y el tabicado de una de las bóvedas vaídas laterales me permitió comprobar el sistema constructivo empleado, que podría considerarse similar al de la cúpula principal del crucero por haber sido construidas las cubiertas en la misma época. Este sistema empleado lo expongo con mayor claridad en el apartado 5.2.4.
- El achaflanado de los pilares del crucero, aunque no sea un hecho determinante, ya que inicialmente fueron proyectados con esa forma para soportar una cúpula de piedra, nos podría hacer pensar que están ideados de esta forma para soportar un peso más reducido, como es el de una cúpula tabicada. Además comporta otras ventajas, como una mejor visibilidad de la capilla mayor y la disponibilidad de más espacio para colocar retablos, esculturas u otra clase de ornamentos.

- Por último, he podido extraer mucha información y sacar conclusiones a través del estudio que realiza Francisco Gallego Sánchez en su Trabajo Fin de Grado “Análisis constructivo y estructural de la cúpula de San Juan de Dios en Granada”, en el que expone con claridad el sistema constructivo empleado en dicha cúpula que, por ser obra también de Bada y tener unas características muy parecidas a la del Sagrario, emplean unas técnicas y unos razonamientos constructivos similares.

5.5. Decisiones constructivas adoptadas

Para el desarrollo de este apartado ha sido necesario el estudio de diversos textos, libros, artículos y tesis doctorales de autores que han investigado en profundidad el modo en que se ejecutaban, en la España de los siglos XVI-XVIII, tanto las estructuras tabicadas como las cubiertas de madera que se levantaban sobre ellas a modo de protección. Como consecuencia, he podido conocer mejor las diferentes disposiciones constructivas, modo de ejecución y materiales empleados en este tipo de estructuras. De entre todos los textos estudiados me han resultado de especial ayuda los siguientes:

⁶⁸ Encarnación Isla Mingorance, “José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz”, 1977, p.114.

⁶⁹ Encarnación Isla Mingorance, “José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz”, 1977, p.156.

⁷⁰ Encarnación Isla Mingorance, “José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz”, 1977, p.531.

- "Arte y uso de la Arquitectura", tratado escrito por Fray Lorenzo de San Nicolás (Vol.1 en 1639 y Vol.2 en 1665).
- "La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia", texto escrito por Carlos Martín Jiménez para las Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Valencia, octubre de 2009.
- "El cimborrio de madera del antiguo convento de San Pablo de Sevilla", texto escrito por Francisco Pinto Puerto para las Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, enero de 2005.
- "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo", Tesis Doctoral de Esther Redondo Martínez, 2013.
- "¿Cúpulas o cimborrios? Las medias naranjas con nervios y lunetos en la arquitectura española del siglo XVIII", texto escrito por Federico Iborra Bernad para las Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, octubre de 2013.

A partir de las conclusiones extraídas de este estudio, en los siguientes apartados iré exponiendo la disposición constructiva, forma de ejecución y materiales empleados de los diferentes elementos que componen la estructura completa de la cúpula del Sagrario, aunque cabe señalar que algunas de estas conclusiones son hipótesis por no haber podido comprobar visualmente el interior de la estructura en ninguna de las visitas realizadas.

5.5.1. Muro exterior

El muro en el que apoya la cúpula tabicada se levanta sobre el anillo de sillares encargado de contrarrestar los empujes horizontales de la zona central de la estructura del templo. Según la profesora Encarnación Isla Mingorance, este muro estaría compuesto en su parte inferior por una base de sillares de dos varas de alto y cinco cuartas de grueso⁷¹, con forma ochavada en su extradós y circular en el intradós, para adaptarse al trazado de la cúpula. Estos sillares, además de aportar un extra de resistencia a la base del muro, permitirían un mejor comportamiento de éste frente a la humedad en su base (recalos y ascenso por capilaridad) de las aguas de lluvia que discurren por la cubierta.

Sobre esta base de sillares se levanta la parte del muro que contiene las ventanas, construida con fábrica de ladrillo hasta llegar a la altura de la cornisa superior, que vuelve a ser de piedra y de una altura de una tercia (aproximadamente 28cm). Aunque en el proyecto inicial el cuerpo de luces apareciese únicamente con cuatro ventanas⁷², finalmente fueron ocho las que se construyeron, una por cada uno de los lados del octógono, rematadas por un arco de medio punto en el extradós y ligeramente rebajado en su intradós.

El acabado exterior del muro se limita a un enfoscado de mortero de cal sobre el que se ha aplicado una pintura que trata de imitar a un muro de sillería. Se puede apreciar el mal estado de conservación del revestimiento exterior a simple vista, pues en algunas zonas del muro se ha desprendido y se ha intentado frenar el deterioro mediante un parcheado de las zonas afectadas empleando mortero de cemento (ver Figuras 47 y 49).

Para una mejor comprensión de la forma en que se construye este muro, sugiero consultar la Figura 51, en la que intento detallar gráficamente su composición.

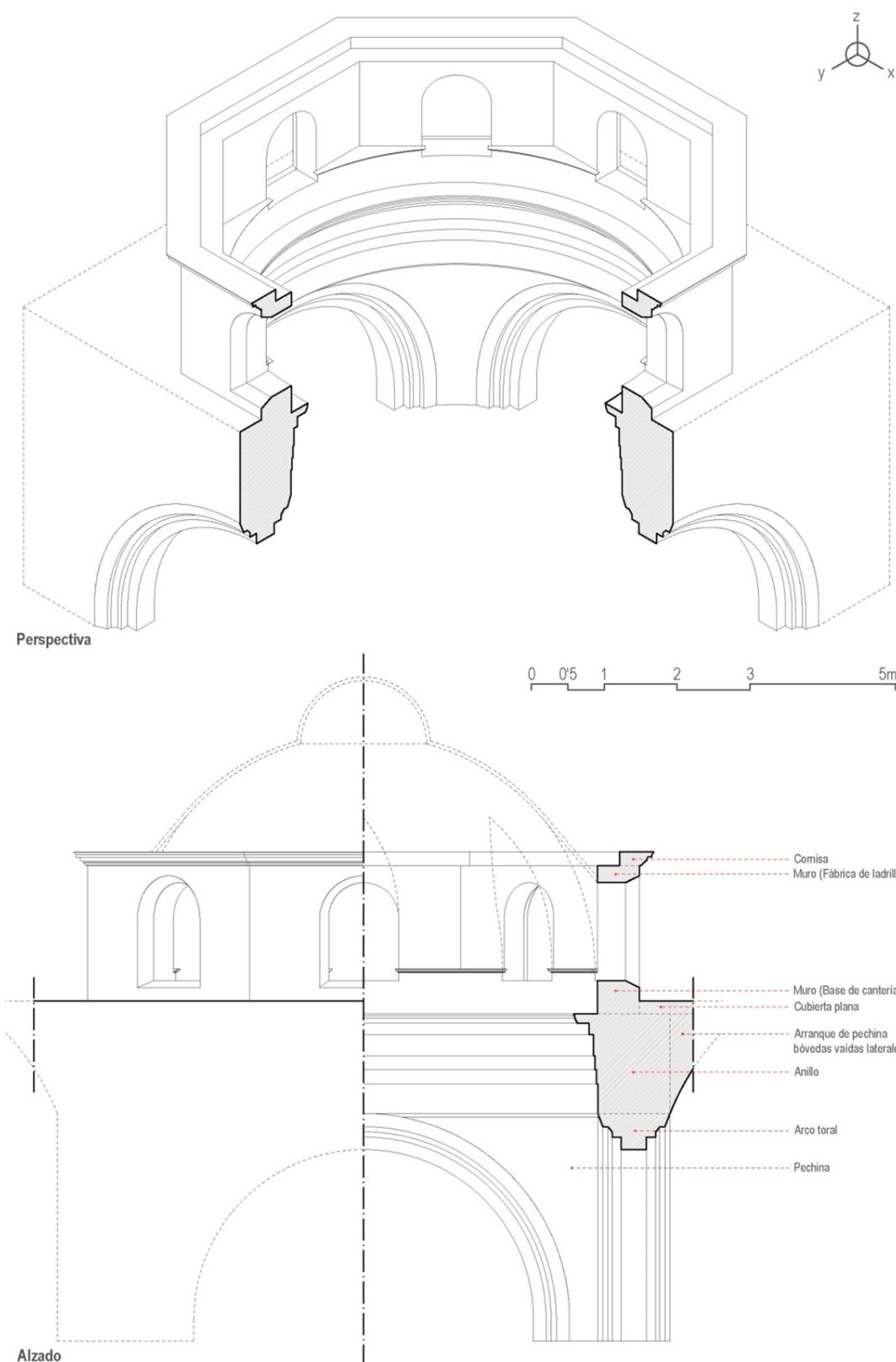


Figura 51: Perspectiva y alzado del muro exterior de la cúpula. Fuente: Elaboración propia.

⁷¹ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.155.

⁷² Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.155-156.

5.5.2. Cúpula tabicada

Las cúpulas tabicadas son elementos que se construyen empleando ladrillos ligeros colocados de plano y recibidos con un aglomerante de fraguado rápido, normalmente yeso. La rapidez de fraguado del yeso y el bajo peso propio de los ladrillos hacen posible que su construcción pueda realizarse sin el empleo de cimbras, siendo únicamente necesario el uso de algunos elementos o utensilios para mantener controlada la forma de la bóveda.

Fray Lorenzo de San Nicolás describiría de forma precisa en el Capítulo 49 (*Trata de la disposición y orden de hacer la media naranja*) de su Tratado el proceso para construir una media naranja esférica de ladrillo tabicado: "Siendo tabicada, no necesita de cimbra ninguna: y así en el centro del anillo, a nivel del asiento de la media naranja, fixa un reglon, con un muelle que ande al rededor; y el reglon así fixo, ha de servir de punto ó cintrel para labrar la media naranja, teniendo al fin del punto una empalmada del grueso del ladrillo, para que en ella misma descansa cada ladrillo asentado, en el interin que otro asienta; y haciendo así en todas las hiladas acabarás la media naranja con toda perfeccion"⁷³. Lo que proponía Fray Lorenzo era básicamente emplear una regla rígida a la que él llama "reglon" con una pieza de madera en su extremo o "empalma" en la que apoyarían los ladrillos hasta que fraguase el yeso. En la Figura 52 se puede apreciar en qué consistía este método constructivo.

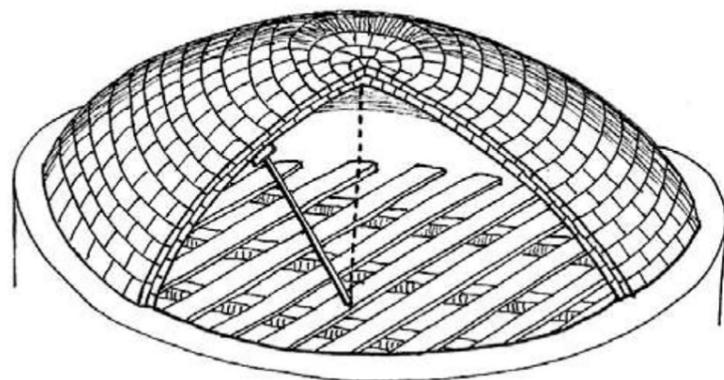


Figura 52: Procedimiento para construir una media naranja esférica de ladrillo tabicado, según Fray Lorenzo de San Nicolás. Fuente E. Redondo Martínez, "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo", p.73.

El espesor de las cúpulas tabicadas es muy pequeño, ya que únicamente deben soportar su propio peso. Cabe recordar que sobre ellas se levanta la estructura de madera, que es la encargada de soportar el peso del acabado exterior de la cúpula, el peso de la linterna (si la hubiera) y las distintas sobrecargas que pueden afectar a la estructura (mantenimiento, viento, nieve, etc.). Este tipo de estructuras se suelen ejecutar con dos hojas de ladrillo, aunque en ocasiones pueden llegar a ejecutarse únicamente con una hoja. En nuestro caso, consideraré que para la construcción de la cúpula del Sagrario se emplearon dos hojas de ladrillo y estimaré que cuenta con un espesor de 8cm, incluyendo los recubrimientos y la capa intermedia de mortero. El motivo de considerar el empleo de dos hojas de ladrillo en lugar de una, se basa en la hipótesis

⁷³ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.1", 1639, cap.XLIX.

de que la primitiva linterna, en su día sustituida por el cupulín actual, apoyaba su tabicado interior sobre la corona superior de la cúpula, por lo que he considerado que el tabicado de ésta no podía estar formado por una única hoja de ladrillo. Además, esta disposición constructiva, en la que el tabicado interior de la linterna (actualmente del cupulín) era totalmente independiente del acabado exterior de la misma, impedía que los movimientos típicos de la estructura de madera superior afectasen a la estructura tabicada originando grietas y fisuraciones. Una solución constructiva similar se puede observar por ejemplo en la documentación existente acerca de la restauración de la cúpula de San Juan de la Penitencia⁷⁴.

En lo referente a los refuerzos de la cúpula tabicada, Fray Lorenzo era muy claro en su Tratado, en el que mencionaba la necesidad de macizar los riñones hasta 1/3 de la altura de la cúpula y construir lo que él llamaba "lengüetas" (costillas de ladrillo por el extradós) hasta alcanzar los 2/3 de la altura⁷⁵. Estos tipos de refuerzos son muy importantes en las estructuras tabicadas, ya que incrementan su pequeño espesor con un material de comportamiento similar al ladrillo y les permite resistir cargas móviles, concentradas o asimétricas. En el caso de la cúpula del Sagrario, se considerará que se encuentra macizada hasta una altura ligeramente superior al tercio de altura de la misma, concretamente hasta la altura de 2'21m, debido a la presencia de los ocho lunetos que se abren para dar cobijo a las respectivas ventanas. En este caso el macizado se realizaría hasta dicha altura, con continuidad en todo el perímetro de la cúpula y además desaparecerían las lengüetas, ya que en caso contrario, la altura del muro perimetral debería llegar a la misma cota, cosa que no ocurre en el Sagrario. No sería la única estructura de este tipo que prescinde del refuerzo de las lengüetas, ya que por ejemplo en la cúpula de San Juan de Dios de Granada, obra también de José de Bada, ocurre lo mismo, e incluso en la cúpula mencionada anteriormente de San Juan de la Penitencia de Madrid (Figura 53).

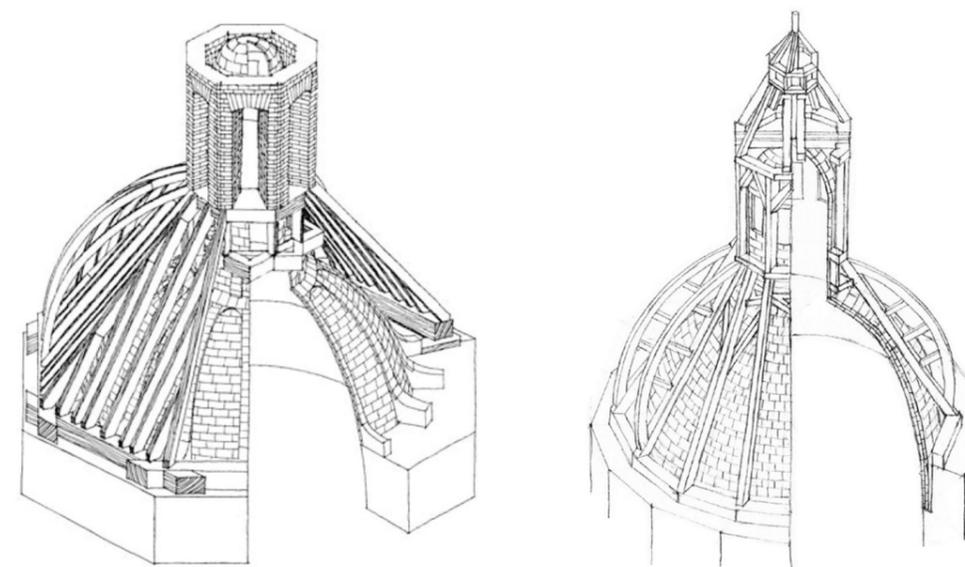


Figura 53: (Izda.) Croquis de la cúpula de San Juan de la Penitencia. Fuente: Carlos Martín Jiménez, "La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia", p.829. (Dcha.) Croquis de la cúpula de San Juan de Dios de Granada. Fuente: Francisco Gallego Sánchez, "Análisis constructivo y estructural de la cúpula de San Juan de Dios en Granada", p.21.

⁷⁴ Carlos Martín Jiménez, "La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia", Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia, Valencia, 2009.

⁷⁵ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.1", 1639, cap.XLIX.

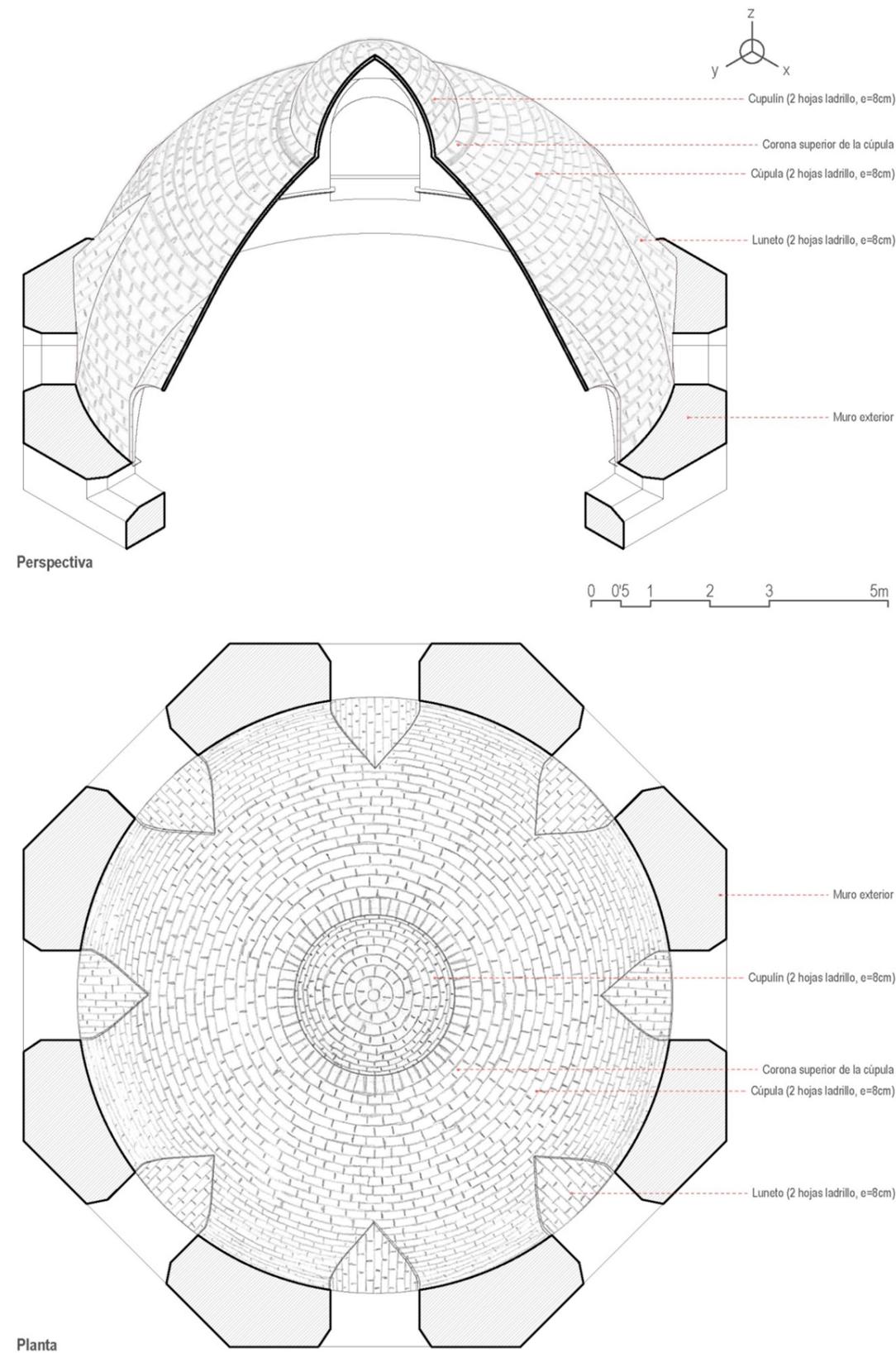


Figura 54: Perspectiva y planta de la estructura tabicada del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.

5.5.3. Estructura de madera

Como ya se ha comentado varias veces a lo largo de este trabajo, José de Bada conocía a la perfección el Tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás y seguía sus indicaciones y recomendaciones fielmente. Es por ello que, a pesar de no haber podido visitar el espacio comprendido entre el tabicado de la cúpula y la cubierta de teja cerámica, podemos pensar que, para materializar la estructura de madera que protege a la cúpula, el maestro siguió las indicaciones que el fraile reflejaba en su obra. Es en el capítulo 52 del segundo volumen de su Tratado, titulado "Trata de otro género de cubrir las capillas grandes o pequeñas con madera", donde Fray Lorenzo describe con precisión la forma de acometer este tipo de estructuras de madera, la forma de disponer las diversas armaduras y refuerzos, los gruesos de los maderos a emplear en función de su cometido, etc⁷⁶. Acompaña sus explicaciones con un esquema bastante aclaratorio de la disposición y forma de construcción de este tipo de cubiertas (ver Figura 55).

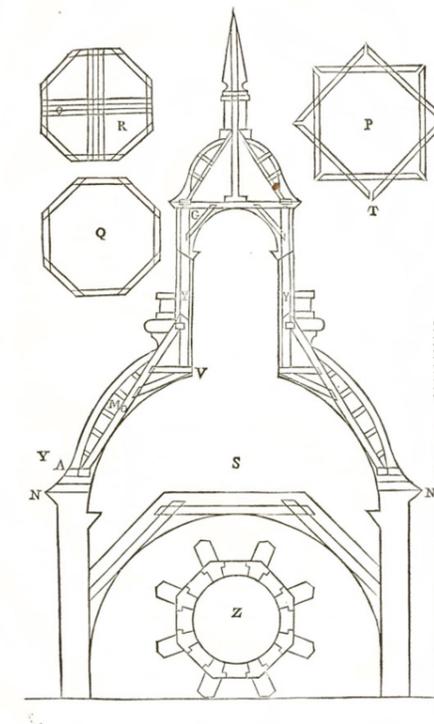


Figura 55: Cubierta de madera para una bóveda encamonada con linterna, según Fray Lorenzo de San Nicolás. Fuente: Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura", vol.2 ,p.153.

Además de lo descrito por Fray Lorenzo, para llegar a comprender cómo está construida la cubierta de la cúpula del Sagrario, me han sido de gran utilidad los artículos de la restauración de la cúpula de San Juan de la Penitencia en Madrid (ya mencionado anteriormente) y especialmente el dedicado al cimborrio de madera del antiguo convento de San Pablo de Sevilla, de Francisco Pinto Puerto, en el que se realiza una descripción detallada del sistema constructivo empleado (ver Figura 56), así como una comparación con la propuesta realizada por Fray Lorenzo. Ambos ejemplos, tanto el de San Juan de la Penitencia como el de San Pablo, basan su esquema estructural en una serie de piezas rectas o pares que se disponen sobre un estribo de forma poligonal, sobre las que se levantan unos "camones" que son los encargados de definir el contorno curvo de la cubierta.

⁷⁶ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.2", 1665, cap.LII.

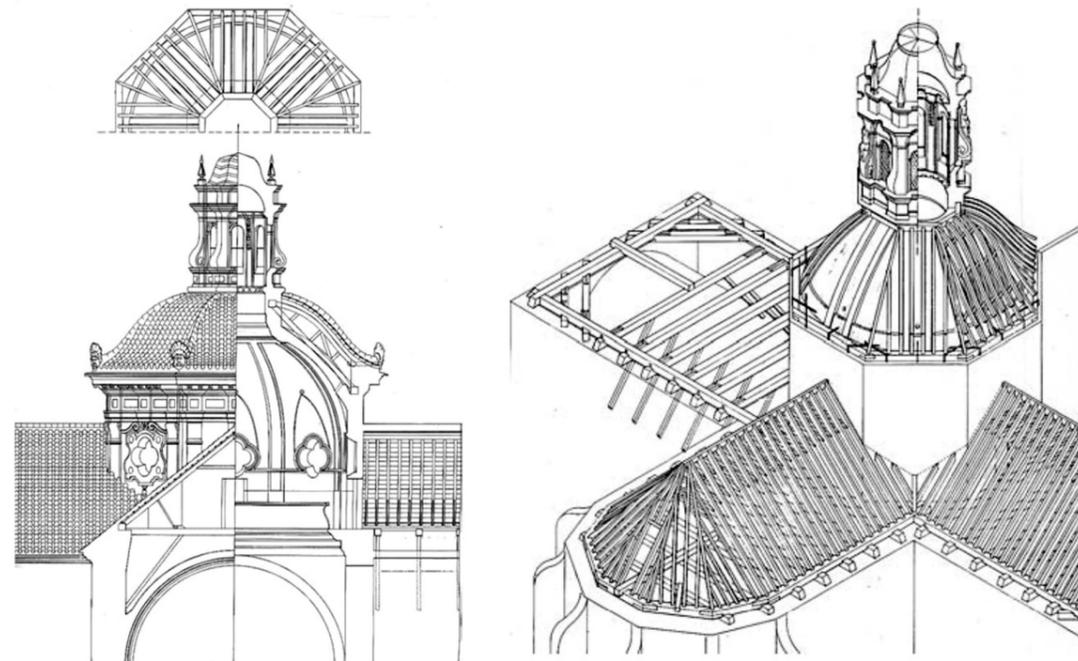


Figura 56: Cubierto de madera del cimborrio del antiguo convento de San Pablo de Sevilla. Fuente: Francisco Pinto Puerto, "El cimborrio de madera del antiguo convento de San Pablo de Sevilla", p.866-69.

Para ejecutar esta estructura, se fijan en primer lugar los zoquetes a la fábrica del muro exterior de la cúpula mediante unos cajones de encofrado en los que se recibirán con colada de yeso. Los estribos se colocarán de tabla sobre los zoquetes, y entre ellos se realizarán uniones a media madera sobre las que se echarán unas escuadras de hierro con la planta del ochavo, con el fin de contrarrestar de un mejor modo los esfuerzos horizontales que transmitirá la cubierta⁷⁷. Posteriormente se dispondrán los pares y partorales sobre los estribos hasta llegar al ochavo o corona inferior de la base de la linterna (en nuestro caso del cupulín, al haber sido retirada la linterna original). Originalmente nuestra cúpula llevaba adosados a los pares unos cerchones curvos o camones, que eran los encargados de dar la forma curva característica a la cubierta, pero fueron retirados al producirse los recalos, por lo que actualmente estas piezas no existen. Un tablero de madera de 2'5cm de espesor es el encargado de formar el plano de asiento de las tejas, además de servir como sistema de arriostramiento entre los pares y partorales y dotar de cierto monolitismo al conjunto⁷⁸. El ochavo o anillo octogonal de la base del cupulín se une a otro superior de iguales características mediante ocho péndolas cortas situadas en sus ángulos. Por último, en la parte inferior del ochavo, concretamente a una altura de dos tercios del partoral, se instala un ochavo de fortificación⁷⁹. El funcionamiento estructural de esta estructura de madera se analizará de una manera más pormenorizada en el apartado 6.2.

⁷⁷ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.2", 1665, p.151-152.

⁷⁸ Francisco Pinto Puerto, "El cimborrio de madera del antiguo convento de San Pablo de Sevilla", p.871.

⁷⁹ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.2", 1665, p. 152.

Como ya comenté en el apartado 5.3, la madera empleada para las armaduras de las cubiertas podría tratarse de madera de pino procedente de Huéscar y Jayena⁸⁰. No he podido comprobar las escuadrías y medidas empleadas por José de Bada, por lo que para el planteamiento de mi hipótesis me basaré en las medidas que Fray Lorenzo propone en el capítulo 52 del Volumen 2 de su Tratado (ver Tabla 1). Para comprobar la relación que existe entre las medidas empleadas en el S.XVIII (vara castellana, pie y palmo) con las del Sistema Métrico Decimal, me ha resultado de gran utilidad el artículo "La construcción de una armadura, I" que Javier de Mingo escribe en www.albanecar.es (Figura 57).

Escuadrías recomendadas por Fray Lorenzo de San Nicolás ⁸¹		
Elemento	Medidas antiguas	Medidas S.M.D
Estribos	Media vara y tercia	0'42x0'28cm
Limatesas o pares	Pie y cuarto y tercia	0'35x0'28cm
Partorales	Tercia y cuarta	0'28x0'21cm
Péndolas largas	Tercia y cuarta	0'28x0'21cm
Demás péndolas	Vigueta de cuarta y sesma	0'21x0'14cm
Ochavos	Vigueta de cuarta y sesma	0'21x0'14cm
Ochavo de fortificación	Vigueta de cuarta y sesma	0'21x0'14cm
Elementos menores	Vigueta de sesma y octava	0,14x0,105cm

Tabla 1: Escuadrías recomendadas por Fray Lorenzo de San Nicolás.

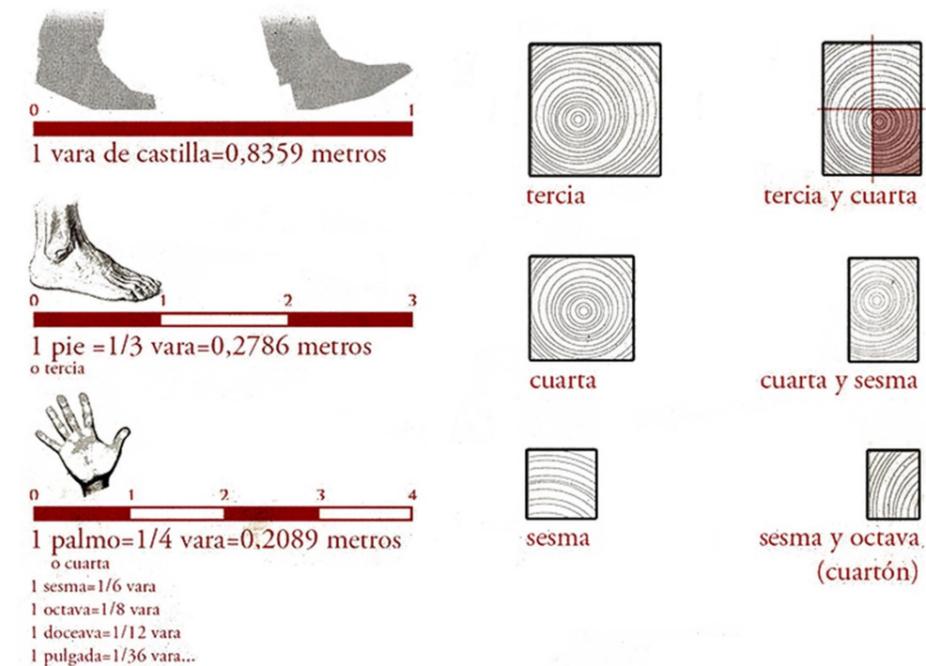


Figura 57: Medidas y escuadrías más usuales en estructuras de madera. Fuente: Javier de Mingo, "La construcción de una armadura, I", www.albanecar.es.

⁸⁰ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.132.

⁸¹ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.2", 1665, p.151-153.

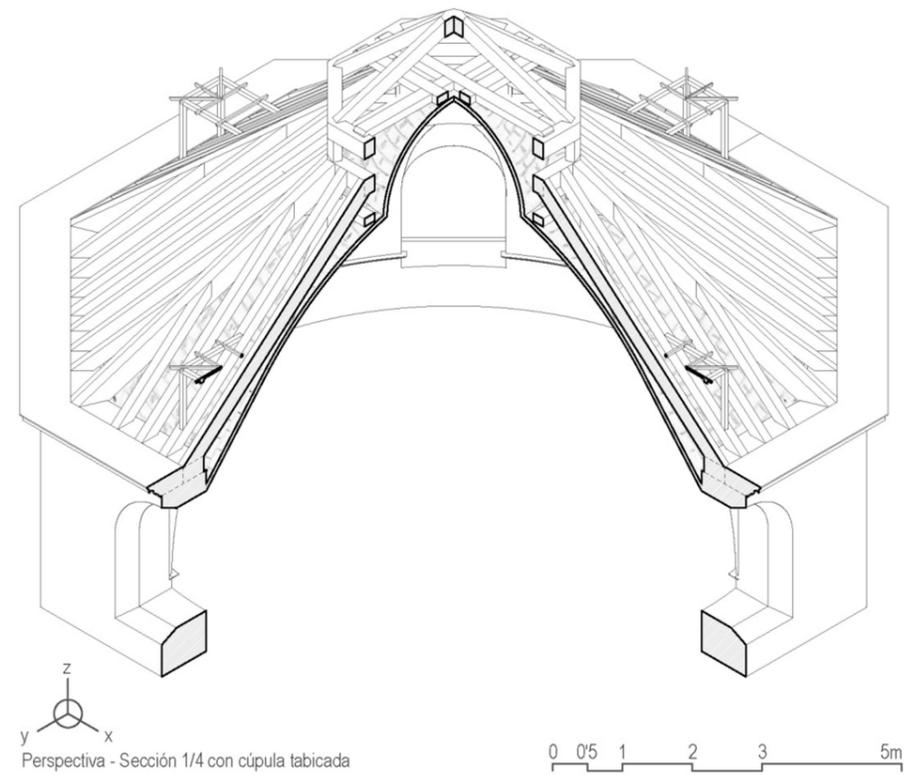
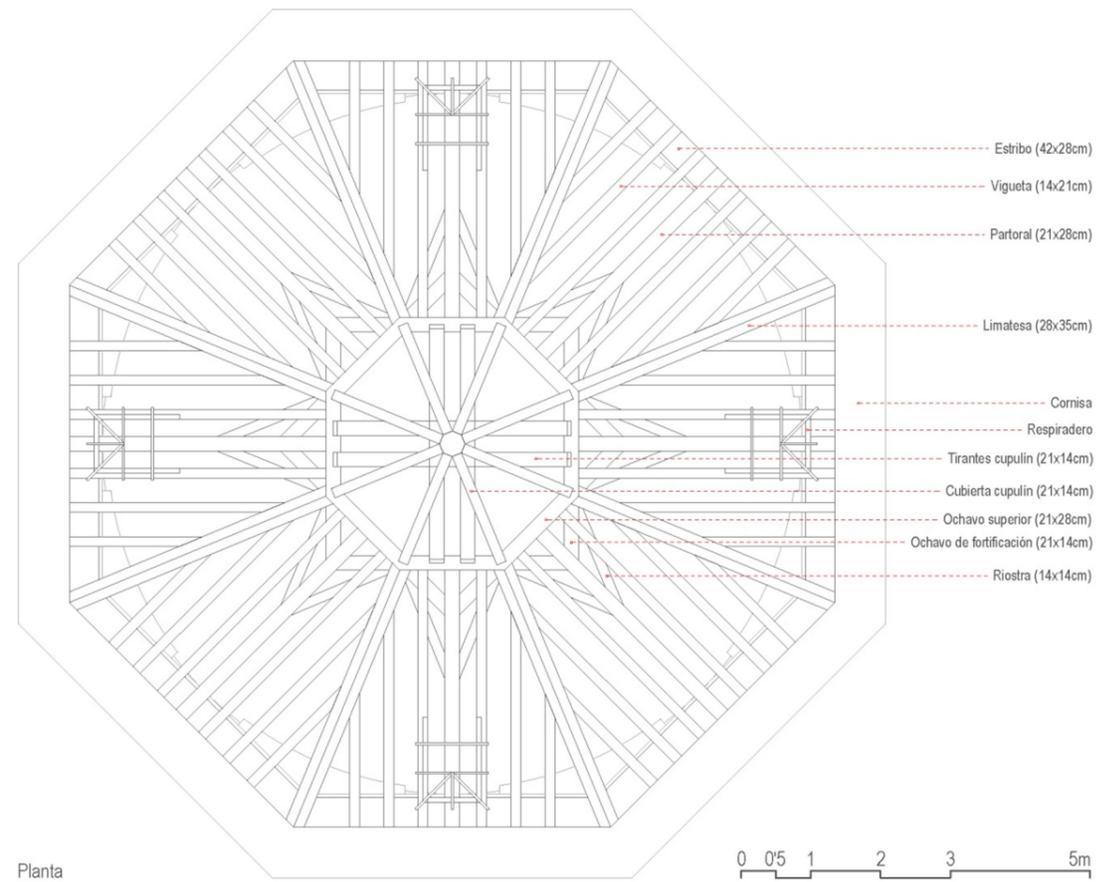
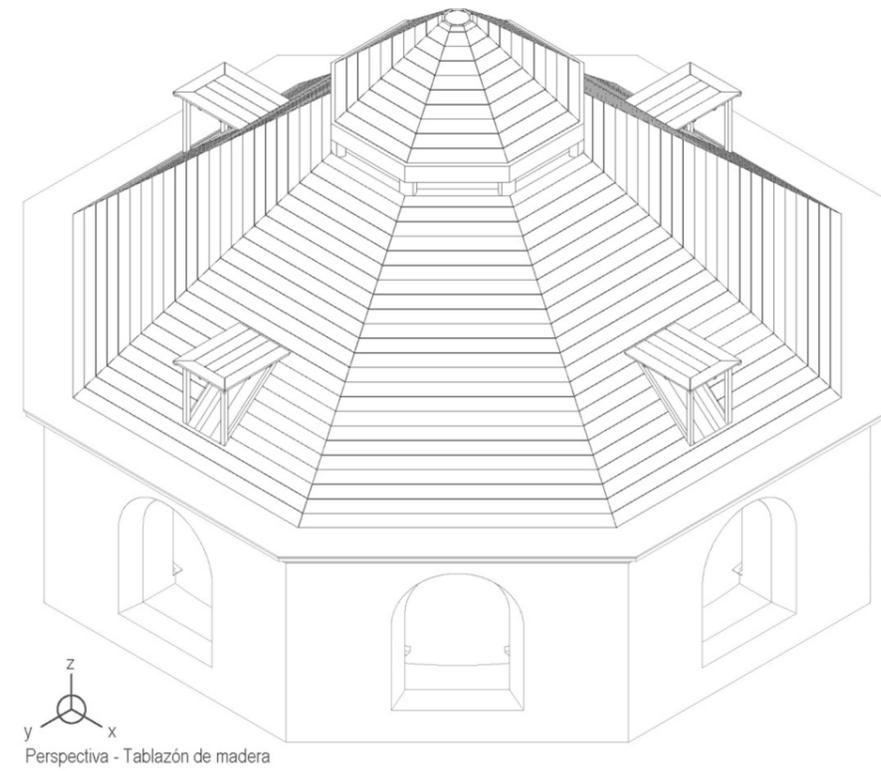
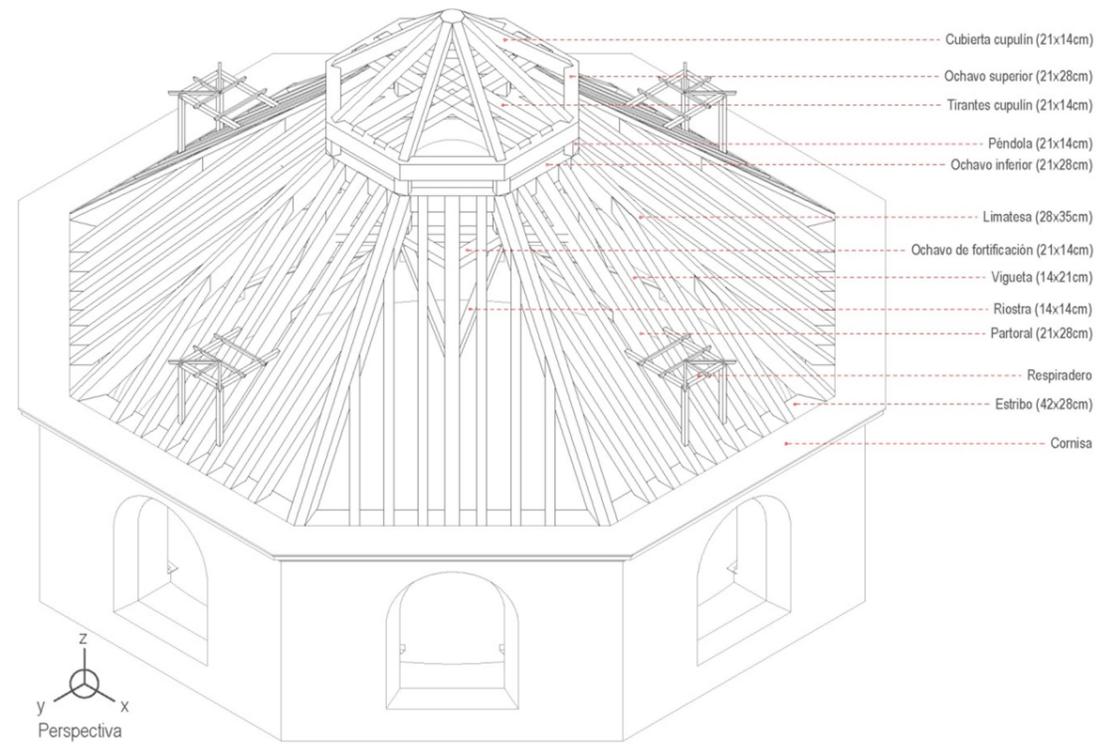
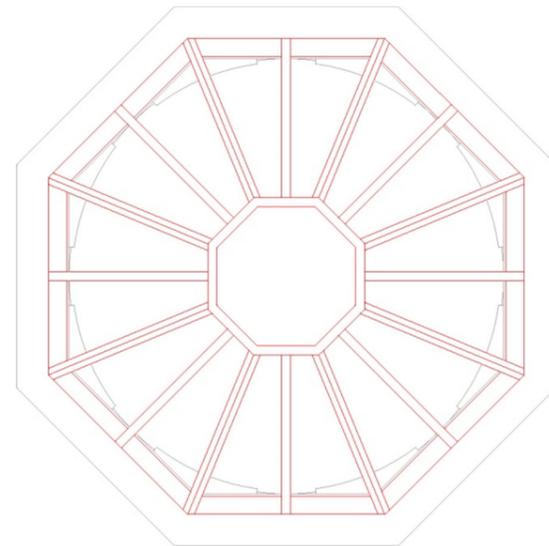
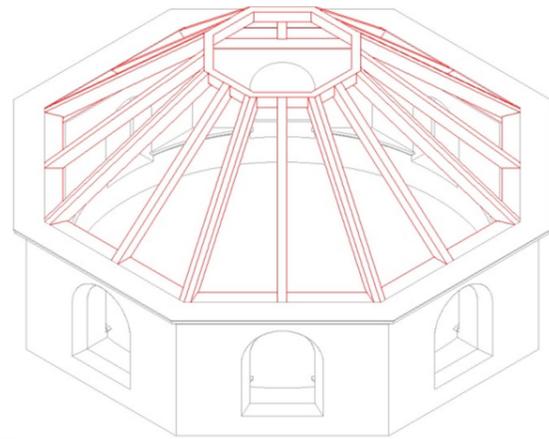


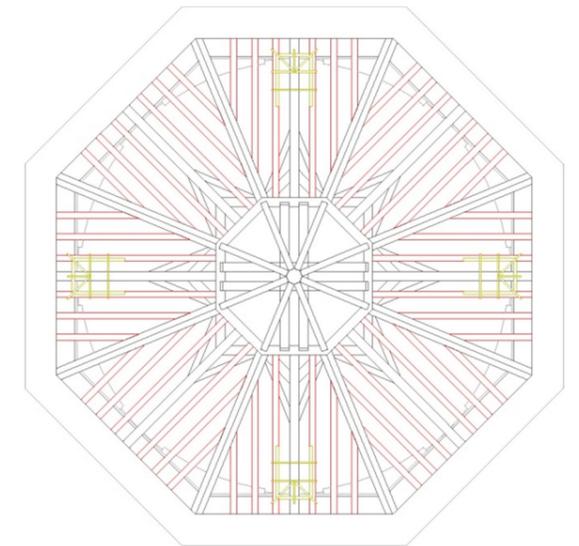
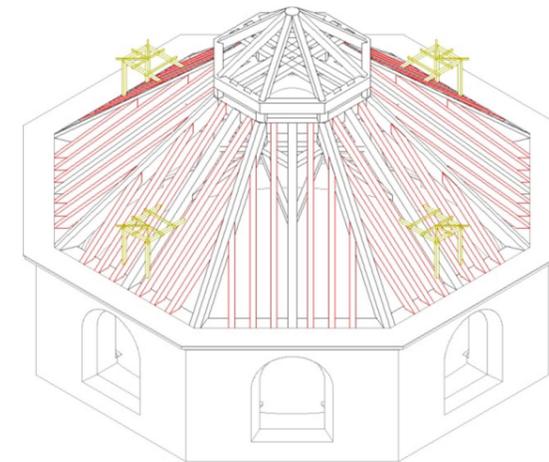
Figura 58: (Arriba) Perspectiva de la estructura de madera que cubre la cúpula. (Abajo) Planta de la estructura. Fuente: Elab. propia.

Figura 59: (Arriba) Perspectiva de la estructura de madera que cubre la cúpula incluyendo el tablazón. (Abajo) Sección de la estructura incluyendo la cúpula tabicada. Fuente: Elab. propia.



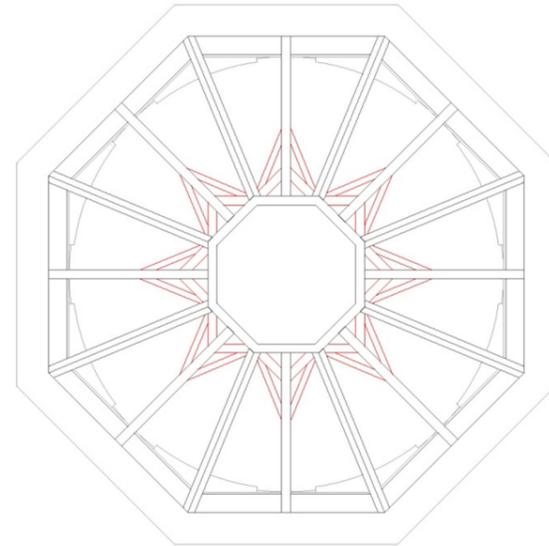
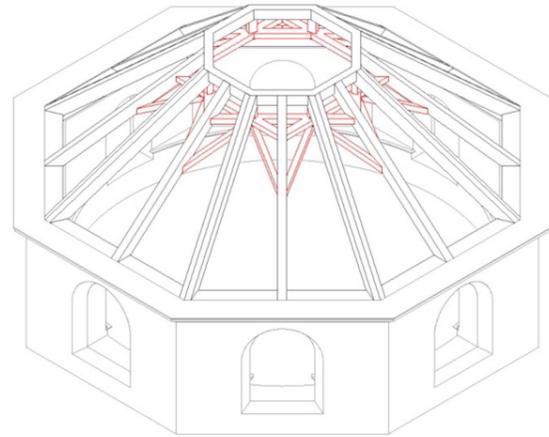
1. Estribos - Limatesas y partorales - Ochavo inf. cupulín.

En primer lugar se fijan los zoquetes a la fábrica del muro exterior de la cúpula mediante unos cajones de encofrado en los que se recibirán con colada de yeso. Los estribos se colocarán de tabla sobre los zoquetes, y entre ellos se realizarán uniones a media madera sobre las que se echarán unas escuadras de hierro con la planta del ochavo. Posteriormente se dispondrán los pares y partorales sobre los estribos hasta llegar al ochavo o corona inferior de la base del cupulín.



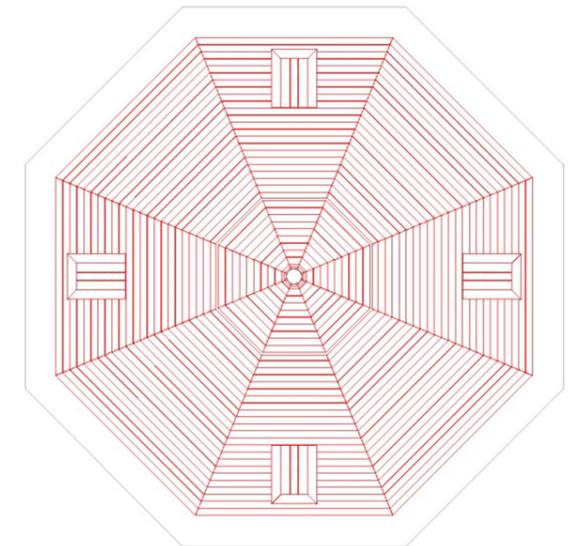
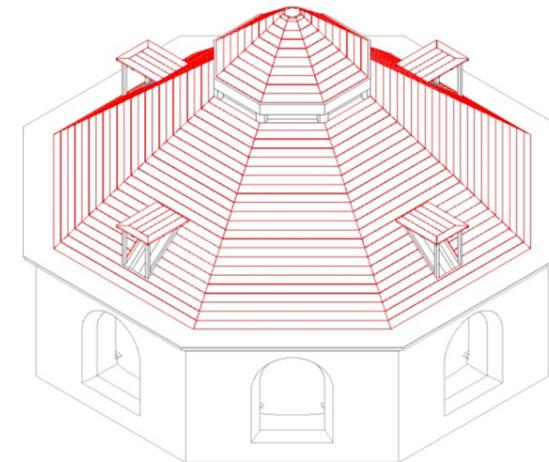
4. Viguetas y respiraderos.

Las viguetas se colocan separadas entre sí a una distancia de un pie y cuarto (aproximadamente 35cm). Los respiraderos están conformados por una estructura muy sencilla de madera y se colocan enfrentados entre sí en cuatro de los paños que componen la cubierta.



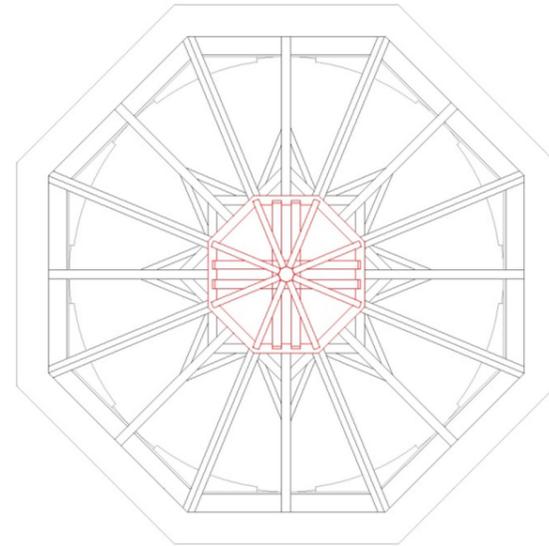
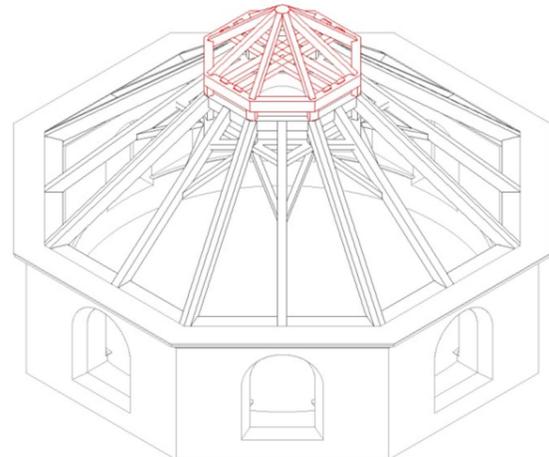
2. Ochavo de fortificación.

A continuación se instalará el ochavo de fortificación, consistente en una serie de tirantes con forma de estrella de ocho puntas, que unen las distintas limatesas y partorales entre sí a una altura de 2/3. Bajo él se instalarán unas riostras y se conectará superiormente con el ochavo del cupulín mediante ocho péndolas cortas colocadas en cada una de las esquinas del ochavo.



5. Tablazón.

Por último, sobre todo el conjunto anterior, se coloca la tablazón. Estará formada por tablas de madera con un espesor de 25cm, lo que provocará que actúen como elemento de arriostamiento de viguetas, partorales y limatesas, dando cierto monolitismo al conjunto. Serán las encargadas de recibir el acabado final de la cubierta, consistente en teja cerámica vidriada recibida sobre el propio tablazón mediante mortero.



3. Estructura de la cubierta del cupulín.

La estructura que conforma la cubierta del cupulín se asemeja a la de un chapitel. Se basa en un ochavo conectado al anterior mediante ocho péndolas, sobre el que se levantan sendas viguetas en forma piramidal, que dan forma a la cubierta. En su parte inferior se refuerza mediante dos parejas de tirantes.

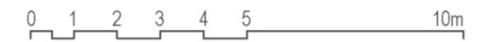


Figura 60: Proceso constructivo de la estructura de madera de la cubierta. Fuente: Elaboración propia.

A partir del estudio de las obras mencionadas anteriormente en este capítulo he podido conocer el modo en que podrían estar ejecutadas algunas de las uniones entre los diversos elementos que componen la estructura de madera que se levanta sobre la cúpula. Para aquellos casos en los que la información no era lo suficientemente detallada y no tenía certeza de cómo podrían estar resueltas las uniones, he decidido resolverlas de la forma más lógica posible, tratando de que la solución constructiva fuese lo más coherente posible con las técnicas empleadas en la época.

Así por ejemplo, tengo constancia de que los estribos se asientan de tabla sobre los zoquetes o nudillos, empleando entre ellos una unión a media madera y dos clavos o estacas. Por último se refuerza la unión con una escuadra de hierro con la forma del ochavo, bien clavada a los estribos, con el fin de resistir los empujes horizontales de la cubierta⁸² (ver Figura 62, Detalle 1).

Las piezas inclinadas que conforman los faldones (limatesas, partorales y viguetas) se asientan sobre los estribos mediante una unión o ensamble de barbilla a tope simple. En su parte superior se apoyan sobre el ochavo o anillo octogonal empleando el mismo tipo de unión. Las piezas que componen el ochavo de fortificación se unen a ambos lados de los partorales mediante uniones con clavos⁸³ (ver Figura 62, Detalle 2).

Las péndolas y, en general, todas las piezas verticales que componen la armadura, se unen a las piezas horizontales de madera mediante ensambles de caja y espiga recta, en las que la espiga (tallada en la pieza vertical) penetra dentro del cajeadado realizado en la pieza horizontal. Las uniones de otros elementos de la estructura se realizan empleando ensambles de espera simples o ensambles de caja de simple o doble entalladura, como por ejemplo en los elementos que conforman la estructura de los respiraderos (ver Figura 62, Detalle 3).

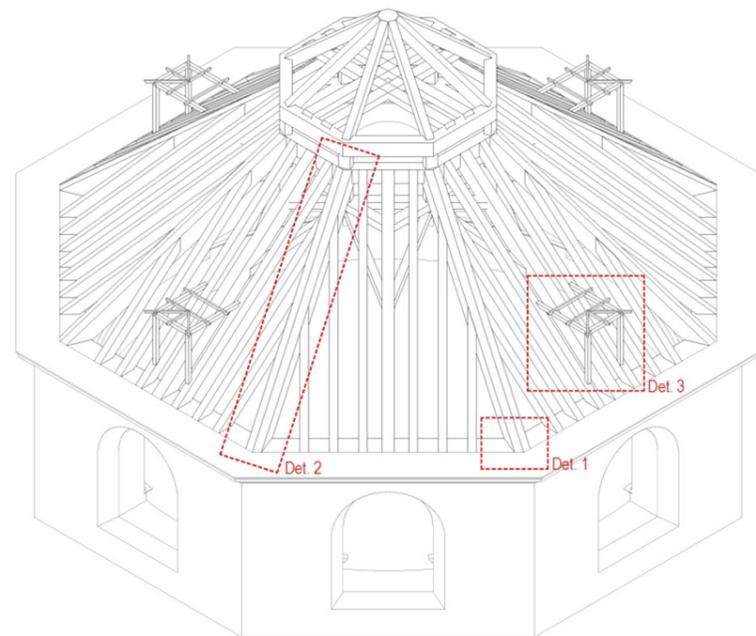


Figura 61: Esquema de detalles constructivos analizados. Fuente: Elaboración propia.

⁸² Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.2", 1665, p.149.

⁸³ Fray Lorenzo de San Nicolás, "Arte y uso de la Arquitectura, Vol.2", 1665, p.150.

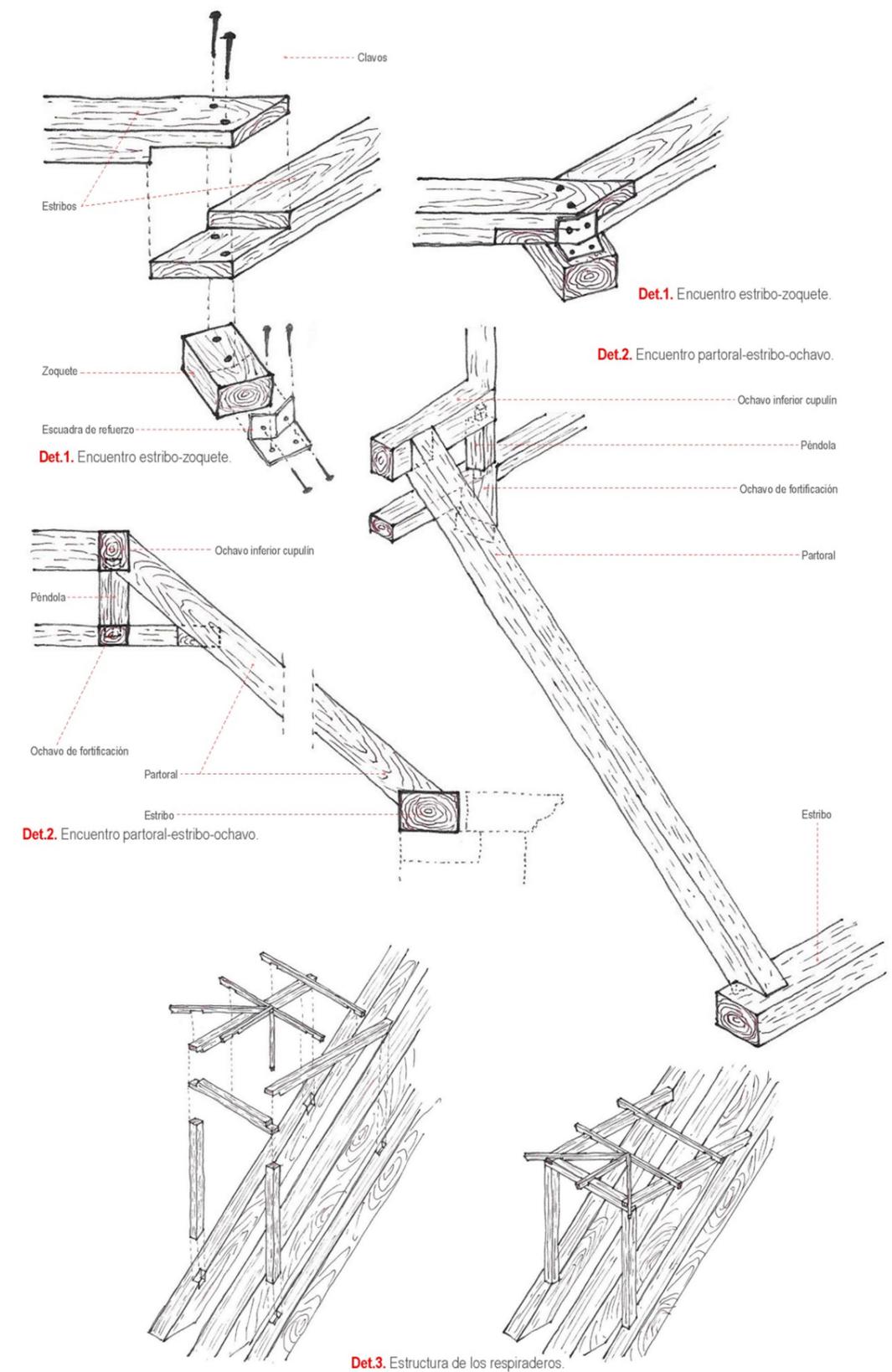


Figura 62: Detalles constructivos de la estructura de madera. Fuente: Elaboración propia.

5.5.4. Acabado exterior

El acabado exterior de la cúpula es de tejas cerámicas vidriadas blancas y verdes, las cuales se asientan con una base de mortero sobre la tablazón de la estructura de madera (Figura 63), aunque, como ya he comentado anteriormente en el Apartado 5.2.5, el acabado original era completamente distinto.

Originalmente la cúpula contaba con una linterna y todo el conjunto se cubría con pizarras fijadas con plomos a la estructura de madera, tal y como recomendaba Fray Lorenzo en su Tratado. Pero la pizarra empleada, de muy mala calidad, no pudo ser reconocida por José de Bada por encontrarse en ese momento fuera de Granada y terminó instalándose en la cubierta. El hecho es que por tratarse de un material de mala calidad y no apto para las condiciones climatológicas de la ciudad, comenzaron a desprenderse de la linterna y a recalarse la cúpula, lo que provocó que en 1753 el maestro decidiera finalmente demoler la linterna, empleando su armadura en hacer la garganta o anillo del cupulín que existe actualmente⁸⁴.

Tras los recalos sufridos, el armazón de madera que cubría la cúpula había sufrido algunos daños, por lo que tras la muerte de Bada sería Gaspar Cayón, por aquel entonces Maestro Mayor de la Catedral de Guadix, el que decidiera y llevara a cabo la cubrición del trasdós de la cúpula con tejas multicolores. Además, cabe destacar que este problema no había aparecido únicamente en el Sagrario, sino que ocurrió lo mismo en los templos de Santo Domingo y de la Magdalena, y fue la causa de que las medias naranjas empezasen a ser recubiertas de teja vidriada⁸⁵.



Figura 63: Acabado exterior de la cúpula con teja cerámica vidriada. Fuente: Elaboración propia.

⁸⁴ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.147-148.

⁸⁵ Encarnación Isla Mingorance, "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz", 1977, p.113.

5.5.5. Acabado interior

Por último, tras el acabado de la obra de fábrica de la media naranja y el cupulín, se procede al tendido de los yesos, comenzando en la parte superior y terminando en el arranque de la cúpula. La decoración consiste en una serie de nervios que siguen la forma denominada de "cintas de melón", que divide todo el conjunto mediante unos radios convergentes entre los cuales Bada colocó motivos florales iguales a los que adornan la base de los pilares (Figura 64). Dichos nervios solían ejecutarse con ladrillo ligero, adosados al intradós de la media naranja de ladrillo, para ser posteriormente revestidos con el yeso. En el caso del Sagrario, desconozco el tipo de ladrillo empleado para la realización de estos nervios, pero por ejemplo en la restauración de la cúpula de San Juan de la Penitencia se empleó ladrillo hueco simple para este menester⁸⁶. Es evidente que en el Sagrario no se utilizó el ladrillo hueco simple, ya que su invención no llegaría hasta el siglo XIX, pero podemos pensar que los ladrillos empleados destacaban por su ligereza. Finalmente, el cupulín se remata en su parte superior con un florón de conchas, acantos, curvas y contracurvas.



Figura 64: Detalles de las yeserías del acabado interior de la cúpula. Fuente: Elaboración propia.

⁸⁶ Carlos Martín Jiménez, "La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia", 2009, p.830.

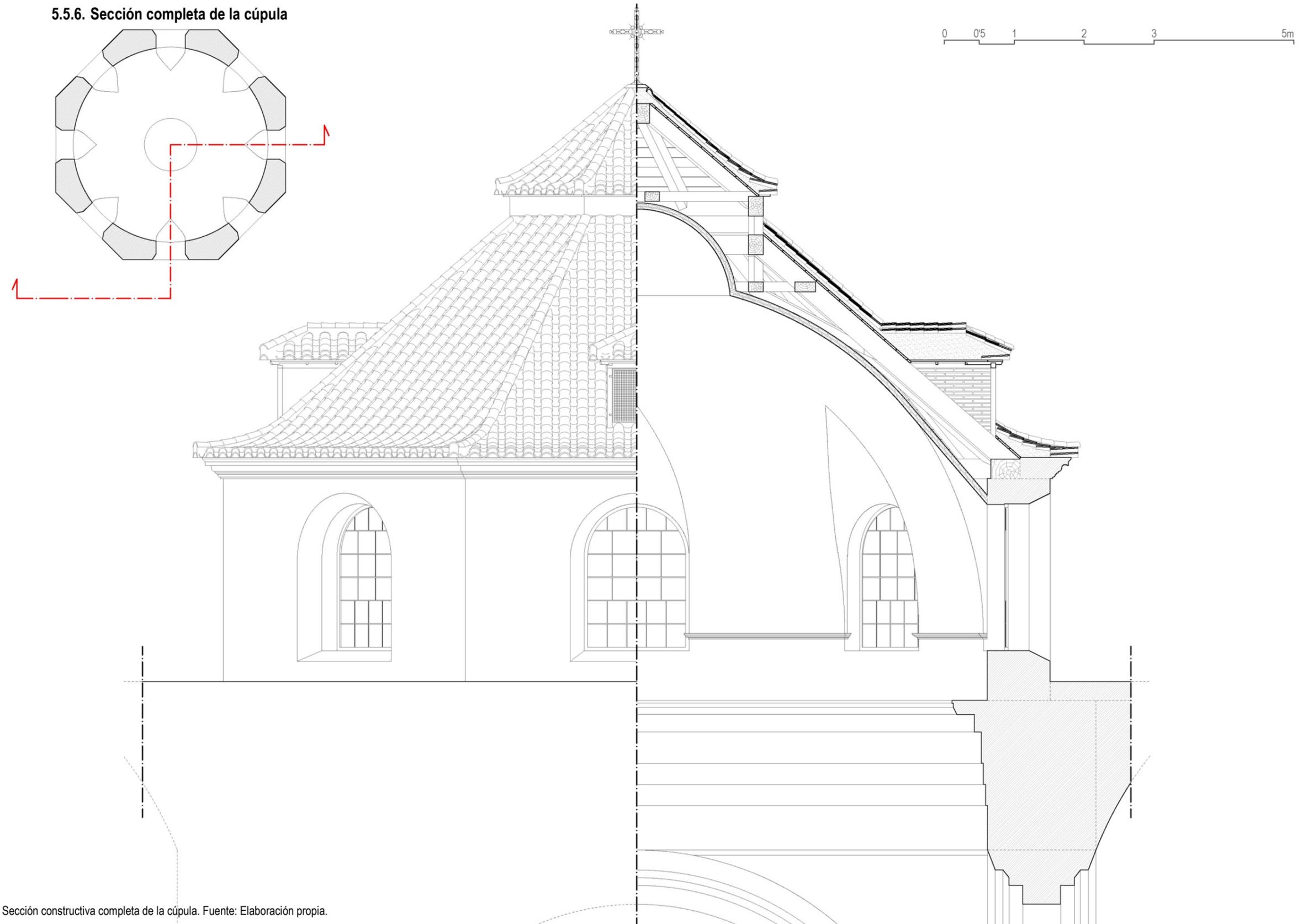


Figura 65: Sección constructiva completa de la cúpula. Fuente: Elaboración propia.

6. Análisis estructural

Este apartado del trabajo se centrará en la realización de un análisis estructural tanto de la cúpula tabicada como de la estructura de madera que se alza sobre ella, una vez que ya hemos planteado una hipótesis constructiva de los diferentes elementos de los que se compone este elemento arquitectónico en el apartado anterior.

6.1. Cúpula tabicada

6.1.1. Mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico

Antes de llevar a cabo el análisis estructural de la cúpula del Sagrario considero necesario hacer un breve resumen de los diferentes métodos y técnicas que se han empleado a lo largo de la historia para la construcción de elementos tabicados y la forma en que éstos se han analizado estructuralmente, con el objetivo de poner en contexto y comprender los análisis que se van a realizar posteriormente. Para ello me basaré en el artículo de Santiago Huerta *“La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino”*.

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, hechas con ladrillo y mortero, que basan su singularidad en que no es necesario el empleo de cimbras para su construcción. Los ladrillos se van disponiendo cerrando arcos o anillos sucesivos y deben su sujeción durante el proceso constructivo al uso de morteros de fraguado rápido. Pese a no ser necesario el empleo de cimbras, cuando la bóveda sobrepasaba ciertas dimensiones o precisaba una ejecución esmerada, solían emplearse ciertos elementos para controlar su forma (camones o cerchas ligeras). Otra de las características fundamentales de las bóvedas tabicadas es que son elementos con espesores muy pequeños, ya que lo más habitual es emplear dos hojas de ladrillo con una capa intermedia de mortero (unos 10cm), aunque también se emplea en ocasiones una única hoja (5cm)⁸⁷.

Históricamente las bóvedas tabicadas se habían empleado fundamentalmente para cubrir naves de iglesias, para formar forjados y para construir escaleras, pero a partir de mediados del siglo XIX comenzaron a emplearse también para la construcción de cubiertas y suelos de edificios industriales. Llegaron a conseguir una gran popularidad en la Cataluña de finales del siglo XIX y principios del XX e incluso Rafael Guastavino llegó a “exportarlas” a América, donde se emplearon en la construcción de algunos de los edificios más importantes de la época.

Pese a que la técnica de construcción tabicada era sobradamente conocida, no ocurría lo mismo en lo referente a su comportamiento estructural. A partir del siglo XVIII este tipo de estructuras comenzaron a ser miradas con desconfianza aludiendo a su falta de seguridad y durabilidad, llegando a considerar que tenían un funcionamiento estructural distinto al de las bóvedas de piedra o de rosca de ladrillo. Cabe decir que esta desconfianza no fue siempre así, como lo demuestran los tratados y escritos de épocas anteriores que hablan de este tipo de construcción, los cuales no establecen ninguna diferencia entre la construcción tabicada y el resto⁸⁸.

Los primeros documentos conocidos sobre la construcción tabicada datan de los siglos XIV y XV, aunque el más relevante y conocido de ellos es el tratado de arquitectura de Fray Lorenzo de San Nicolás

(1639), el cual describe la construcción de los tipos principales de bóveda en piedra, rosca de ladrillo y tabicada, sin hacer distinciones en cuanto a la mayor o menor bondad del empleo de un tipo de material u otro, por considerar los tres procedimientos igualmente buenos constructivamente.

Fray Lorenzo señalaba en su tratado que, con independencia del material empleado para la construcción de la bóveda, era preciso dotar a ésta de un trasdosado o refuerzo que permitiese transmitir los empujes hacia los estribos. Así, indica la necesidad de macizar el trasdós de las bóvedas desde su arranque hasta el primer tercio de altura, además de disponer muros o tabiques de estribo (conocidos como lengüetas) hasta alcanzar el segundo tercio. Todos estos refuerzos, además de servir para soportar un suelo horizontal sobre las bóvedas, juegan un destacado papel estructural, ya que les permiten a éstas resistir sobrecargas asimétricas o cargas móviles⁸⁹.

La bóveda tabicada, aunque en menor medida que la de rosca de ladrillo o la de piedra, también produce empujes, por lo que requiere el empleo de un sistema de contrarresto. Los antiguos constructores eran perfectamente conocedores de este hecho y de que la única diferencia entre una bóveda tabicada respecto a una de rosca de ladrillo o de piedra era el menor empuje que ésta producía debido a su reducido peso. De hecho, el propio Fray Lorenzo realiza una serie de cálculos para asignar la dimensión del sistema de contrarresto en función del material empleado para la construcción de la bóveda (Figura 66).

material	muro de sección constante	muro + contrafuertes
piedra	L/3	L/6 $\geq L/3$
rosca de ladrillo	L/4	L/7 L/3
tabicada	L/5	L/8 L/4

Figura 66: Estribos para bóvedas de cañón según Fray Lorenzo de San Nicolás. Fuente: Santiago Huerta Fernández, *“Las bóvedas de Guastavino en América”*, 2001, p. 89.

En la región francesa del Rosellón comenzó a existir una tradición tabicada, influencia de la española. Hacia el año 1700 el duque de Belle Isle construyó un castillo en el Languedoc francés en el que empleó bóvedas tabicadas, las cuales llamaron mucho la atención por su gran ligereza, llegando incluso a ser discutidas en la Académie Royale d'Architecture. El Conde d'Espie se desplazó personalmente para conocerlas in situ, ya que estaba interesado en la posibilidad de construir forjados y cubiertas de este tipo debido a su resistencia al fuego. Continuó viajando para conocer más ejemplos de este tipo de construcción e incluso llegó a construir él mismo un edificio dotado con este tipo de estructuras. Recogió todas sus experiencias y opiniones en un pequeño libro titulado *“Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briquete”*, que fue publicado en 1754 y recibió una atención tan inusual que en pocos años llegó a publicarse traducido al inglés, al alemán y al español⁹⁰.

En uno de los capítulos de su libro, Espie compara las bóvedas tabicadas con las bóvedas ordinarias y acaba llegando a la conclusión de que las primeras se comportan de una forma monolítica con la consiguiente ausencia de empujes laterales. También hace especial hincapié en su resistencia al fuego, su ligereza y su adaptabilidad a todo tipo de espacios. Estas ideas fueron aceptadas prácticamente sin crítica por la mayoría de autores posteriores, por lo que debido a la gran difusión que tuvo su libro por toda Europa,

⁸⁷ Santiago Huerta, *“Las bóvedas de Guastavino en América”*, 2001, p.87.

⁸⁸ Santiago Huerta, *“Las bóvedas de Guastavino en América”*, 2001, p.88.

⁸⁹ Santiago Huerta, *“Las bóvedas de Guastavino en América”*, 2001, p.88.

⁹⁰ Santiago Huerta, *“Las bóvedas de Guastavino en América”*, 2001, p.89.

las hipótesis planteadas de monolitismo y ausencia de empujes llegaron a formar el marco de referencia oficial para aproximarse a este tipo de estructuras.

Joaquín de Sotomayor tradujo al castellano el libro de Espie en 1776 y le incorporó también sus propias opiniones y experiencias, pero cabe resaltar que esta traducción va precedida de una Censura de Ventura Rodríguez, Arquitecto Mayor de Madrid, el cual critica las ideas de monolitismo y falta de empujes de Espie. El propio Ventura Rodríguez cita varios casos de agrietamientos y desplomes de edificios ya construidos que demuestran el empuje de este tipo de bóvedas e insiste en la necesidad de dotarlas de algún tipo de sistema de contrarresto⁹¹.

A pesar de las opiniones de Ventura Rodríguez, en el siglo XIX se puede seguir apreciando la influencia de Espie en dos de los tratados más importantes de la época en cuanto a construcción tabicada se refiere, como son el de Benito Bails (1796) y el de Manuel Fornés y Guerra (1841-1846)⁹². No sería hasta bien entrado el siglo XIX cuando se intentase formular una teoría que explicase de forma científica el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. El pionero en tratar de resolver este problema sería Rafael Guastavino Moreno, cuyas ideas quedaron recogidas en su libro "*Essay on the theory of cohesive construction, applied especially to the timber arch*", publicado en 1892.

En su etapa barcelonesa se había convertido en el mejor constructor de bóvedas tabicadas del momento. Su primera obra importante, la enorme fábrica Batlló (Figura 67), le sirvió como banco de pruebas. A esta obra le siguieron otras muchas, como el teatro Vilasar, con una gran cúpula rebajada de casi 20m de luz, pero el propio Guastavino reconoce que la estructura de todas estas obras fue proyectada de forma empírica. Estaba empleando reglas (principalmente geométricas) y métodos tradicionales que había aprendido durante sus estudios y experiencia profesional, pero ya a finales del siglo XIX, con la teoría de estructuras bien desarrollada, era una exigencia ineludible justificar las dimensiones de los elementos de una estructura en base a cálculos basados en la teoría de estructuras y en la resistencia de materiales (teoría elástica, Navier, 1826). De hecho los arcos de fábrica ya habían comenzado a calcularse elásticamente a partir de 1870⁹³.



Figura 67: Sala de telares de la fábrica Batlló. Fuente: <http://historico.oepm.es/museovirtual/index.php>.

⁹¹ Santiago Huerta, "*Las bóvedas de Guastavino en América*", 2001, p.90.

⁹² Santiago Huerta, "*Las bóvedas de Guastavino en América*", 2001, p.91.

⁹³ Santiago Huerta, "*Las bóvedas de Guastavino en América*", 2001, p.92.

Guastavino dividía las construcciones de fábrica en dos grupos distintos en función de su comportamiento mecánico. Por un lado se refería a la "construcción mecánica" como aquella que se basa en la resistencia de cualquier sólido a la acción de la gravedad cuando es contrarrestado por otro sólido, originando un conjunto de fuerzas más o menos opuestas entre sí que resultan en el equilibrio de la masa total, sin tener en cuenta el poder cohesivo del material existente entre los sólidos. Y por otro lado se refería a la "construcción cohesiva" como aquella que tiene por fundamento las propiedades de cohesión y asimilación de distintos materiales que, por una transformación más o menos rápida, imitan el proceso de formación de conglomerantes en la Naturaleza⁹⁴.

Tras esta división, basada en el comportamiento estructural, aporta una definición que tiene que ver más con lo constructivo. La construcción mecánica es aquella en la que todos los elementos pueden separarse uno a uno y después recomponerse de la misma forma o similar. En cambio, en la construcción cohesiva no se pueden separar los componentes sin destruir la masa en su integridad. Si atendemos a una definición y otra, queda bastante claro que Guastavino situaba a las bóvedas tabicadas dentro del grupo de las construcciones cohesivas.

Con la intención de mostrar las ventajas de las bóvedas tabicadas respecto a las tradicionales, Guastavino dedica un apartado en su *Essay* en el que las compara, llegando a la conclusión de que las bóvedas tabicadas, cuando tienen más de una hoja y los ladrillos se disponen a juntas encontradas, son capaces de resistir momentos flectores, además de disponer de un menor número de juntas que reducirían la aparición de grietas (Figura 68).

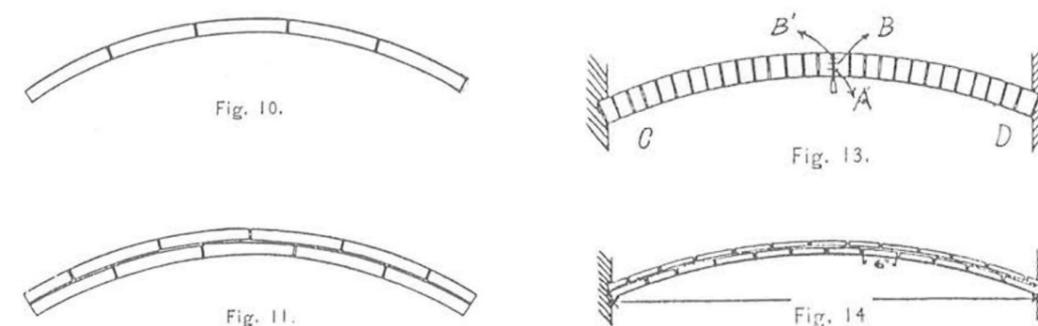


Figura 68: Comparación entre arco mecánico y cohesivo (izda.) y comparación de agrietamientos (dcha.).

Fuente: Santiago Huerta, "*Las bóvedas de Guastavino en América*", 2001, p.94-95.

Debido a la desconfianza que generaban las estructuras tabicadas entre los arquitectos y constructores americanos, Guastavino decidió llevar a cabo una serie de ensayos científicos con el fin de obtener unos valores de las tensiones de rotura a compresión, tracción, cortante y flexión, que le permitieran verificar la seguridad de sus bóvedas por comparación de las tensiones de trabajo (Figura 69). Los ensayos fueron realizados tanto sobre probetas como sobre estructuras (bóvedas de cañón tabicadas) y los resultados obtenidos aparecen resumidos en la Tabla 2. También realizó algunos ensayos de incendios, para probar la invulnerabilidad al fuego del sistema tabicado. Para contrastar estos resultados con estructuras reales, realizó ensayos de rotura sobre bóvedas tabicadas escarzanadas, con una flecha de 1/10 de la luz (Figura 70).

⁹⁴ Santiago Huerta, "*Las bóvedas de Guastavino en América*", 2001, p.93.

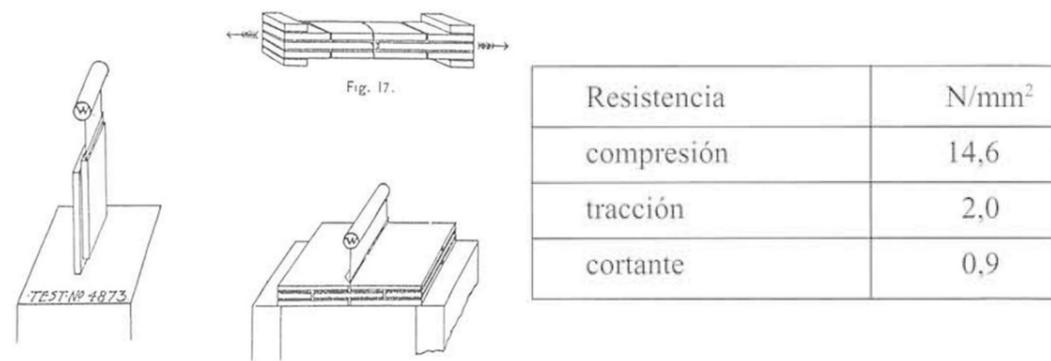


Figura 69 (izda.): Ensayos de tracción, flexión y cortadura realizados por Guastavino. Tabla 1 (dcha.): Tensiones de rotura obtenidas en los ensayos. Fuente: Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.95.



Figura 70: Ensayos de resistencia sobre una bóveda de cañón tabicada. Fuente: <https://chrismielost.blogspot.com>

Prácticamente la única información que podemos encontrar sobre los métodos de cálculo empleados por Guastavino, referentes a los empujes y las tensiones en bóvedas de cañón y cúpulas tabicadas, se encuentra en su Essay, en el que propone algunas fórmulas:

Para un arco o bóveda escarzano $\rightarrow A\sigma_{rot} = \frac{Wl}{8f}$ Para una bóveda de cañón $\rightarrow A\sigma_{rot} = \frac{Wl^2}{8f}$

Donde:

A = área por unidad de longitud transversal a la bóveda en la clave.

σ_{rot} = tensión de rotura a compresión.

W = carga total (peso propio más relleno y sobrecarga que actúa sobre la bóveda por unidad de longitud transversal).

l = luz de la bóveda.

f = flecha de la bóveda.

Estas fórmulas, que permiten hallar el espesor en la clave, son aproximadas, aunque suficientemente buenas, y relacionan (para un arco de luz l y flecha f dados) la carga W, con el área A (espesor) y la tensión de rotura σ_{rot} .

Guastavino solía considerar que la tensión de trabajo admisible era 1/10 de la tensión de rotura, lo que parece excesivo incluso para un material irregular como la fábrica tabicada. Más adelante reconoce que se podría considerar como tensión de trabajo 1/4 ó 1/5 de la tensión de rotura⁹⁵.

Para el caso de las cúpulas, a las que Guastavino considera la forma por excelencia, emplea otra aproximación. Realiza una comparación geométrica entre las áreas de una esfera y un semicilindro de la misma directriz, desarrollados en planta, llegando a considerar que el peso de la cúpula es la mitad que el de la correspondiente bóveda de cañón y que, por tanto, el empuje será la mitad. Si en el caso de los arcos rebajados la fórmula daba una buena aproximación del empuje, en este caso puede haber desviaciones notables, como él mismo reconoce⁹⁶.

Guastavino consideraba a los arcos tabicados "no como un arco de dovelas, sino como un arco de simple fundición que trabaja como una pieza maciza arqueada de piedra o hierro". Se entiende que trataba de pensar dentro del marco de referencia del monolitismo, la cohesividad, la resistencia a tracción y flexión y la ausencia de empujes, lo que contrasta claramente con su forma de ejecutar en obra las bóvedas, ya que en cualquier sección constructiva de alguna de sus cúpulas se pueden observar los zunchos y refuerzos metálicos que empleaba para contrarrestar dichos empujes (Figura 71). Pareciera como si contara con la intuición de que el verdadero problema de este tipo de construcciones no fuese la resistencia, sino su geometría⁹⁷.

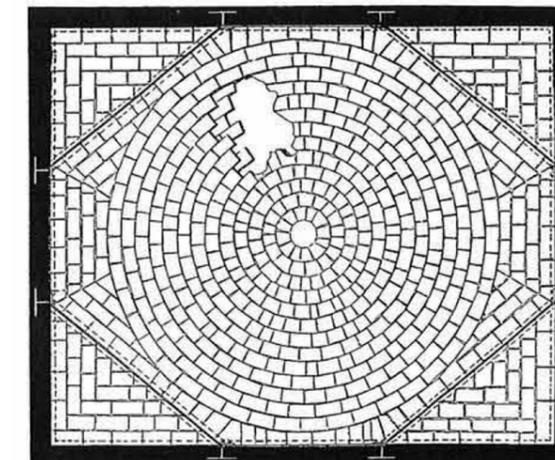
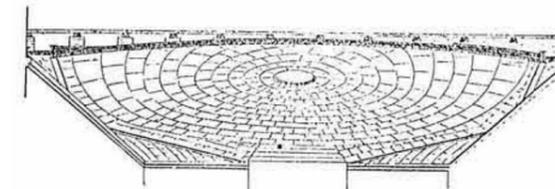


Figura 71: Cúpula tabicada rebajada con refuerzos metálicos. Fuente: Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.97.

⁹⁵ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.96.

⁹⁶ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.97.

⁹⁷ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.97-99.

Rafael Guastavino Expósito trabajó desde los quince años de edad con su padre, simultaneando esta tarea con estudios sobre arte, arquitectura y estructuras, realizados de forma autodidacta. Se le pueden atribuir tres innovaciones respecto al proyecto de cáscaras delgadas de fábrica:

- Fue el primero en aplicar de forma sistemática la teoría de la membrana a la hora de calcular los esfuerzos internos en bóvedas tabicadas, en particular en las cúpulas.
- Ideó un sistema de proyecto de la directriz de las cúpulas para evitar la aparición de tracciones basado en la teoría de la membrana.
- Realizó, al parecer, una de las primeras patentes de cerámica armada (con casi cincuenta años de antelación a Dieste), y aplicó esta técnica cuando lo consideró necesario.

El análisis de membrana de cáscaras de fábrica, propuesto por primera vez por Rankine en 1858 consistía en la búsqueda de una solución de equilibrio con los esfuerzos contenidos dentro de la superficie media de la cáscara. También Schwedler en 1866 desarrolló un método analítico para cúpulas de barras que puede extrapolarse a cáscaras y el primer método gráfico fue propuesto por Eddy en 1878 (Figura 72).

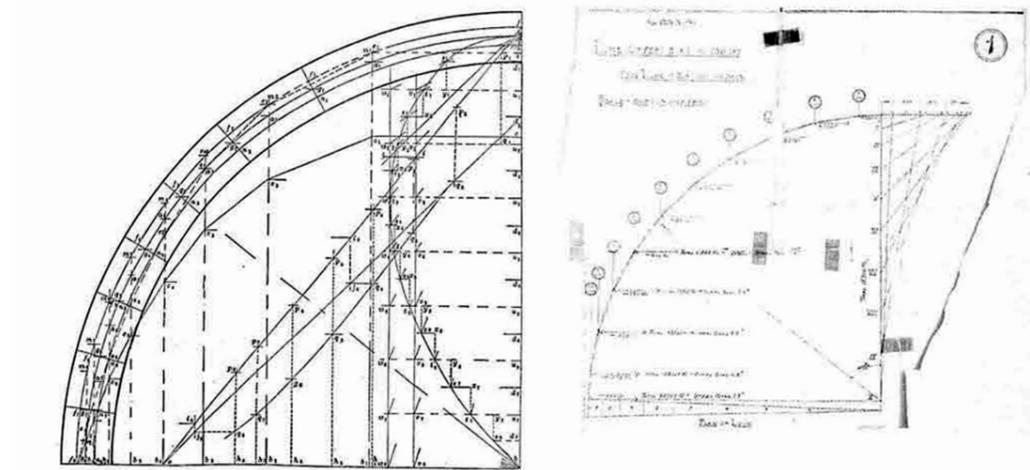


Figura 72: Método gráfico propuesto por Eddy. Fuente: Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.100.

La idea de Eddy consistía en dividir la cáscara en anillos horizontales, calcular sus pesos y dibujar las fuerzas correspondientes de forma ordenada sobre una línea vertical. Posteriormente se trazan rectas horizontales por el extremo de cada una de las fuerzas y, finalmente, por el extremo superior de la línea de fuerzas se trazan paralelas a las tangentes a los extremos inferiores de cada uno de los anillos, de forma que cada triángulo obtenido representa el equilibrio de fuerzas de un anillo. Eddy se percataría de que a partir de cierta altura (unos 52° a partir de la clave para una cáscara semiesférica) comienzan a aparecer tracciones, las cuales no serían soportadas por el material en el caso de una cáscara de fábrica, separándose la superficie de empujes de la superficie media, manteniéndose el empuje horizontal constante a partir de este momento. Esta observación de Eddy, recogida por Dunn (1904) de que a partir del punto de aparición de las tracciones el empuje se mantenía constante, permitió el desarrollo de un método de proyecto de cúpulas sin tracciones⁹⁸.

La técnica gráfico-analítica de Eddy permitía calcular de una manera sencilla las resultantes de tensiones en una cúpula de revolución, por lo que se podían localizar fácilmente las zonas traccionadas y

disponer armaduras metálicas. Este hecho fue aprovechado por Guastavino hijo, el cual llegó a patentar un procedimiento de armado para los elementos de fábrica tabicados en 1910 (Figura 73).

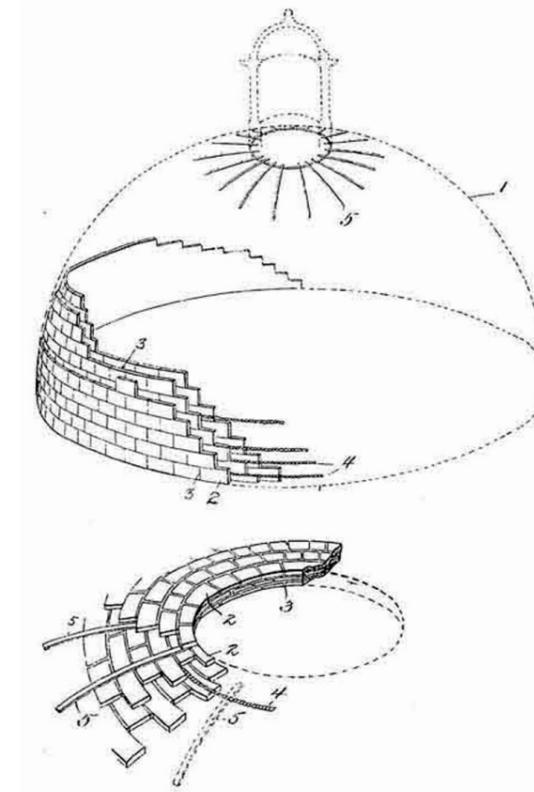


Figura 73: Disposición de armaduras metálicas en cúpulas tabicadas. Fuente: Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.101.

No sería hasta finales del siglo XIX cuando la teoría elástica se consolidaría como método de cálculo para las estructuras tabicadas. A partir de entonces, los métodos clásicos de equilibrio y rotura, aunque se seguirían aplicando, pasaron a formar parte de la "antigua teoría de bóvedas". En España, las publicaciones sobre estos métodos de cálculo eran muy escasas. La primera en la que se discute la necesidad de considerar la resistencia a flexión de las bóvedas tabicadas fue la realizada por Domenech en 1900. Para él no había dudas de que este tipo de estructuras eran capaces de resistir flexiones, pudiendo llegar a anular los empujes horizontales (como vemos, sigue vigente la idea del monolitismo rígido de Espie)⁹⁹.

Domenech hace un análisis del funcionamiento de los arcos tabicados, tomando como ejemplo el caso de un arco cargado uniformemente. En este caso la línea de empujes dibuja una parábola, por lo que señala que si la forma del arco se ajustase a esta forma, únicamente habría compresiones. Pero como por lo general esto no suele suceder, acaba determinando que es necesaria la aparición de tensiones de tracción en los materiales que componen la estructura (Figura 74). Domenech comete aquí un error muy frecuente, que es el de considerar únicamente como estructura a la cáscara que conforma la bóveda, olvidándose de los rellenos en los arranques y de los tabiquillos transversales o lengüetas. Y es que estos elementos forman parte de la estructura y se encargan de ofrecer caminos alternativos de los empujes hacia los contrarrestos¹⁰⁰.

⁹⁸ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.99-100.

⁹⁹ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.99-102.

¹⁰⁰ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.103.

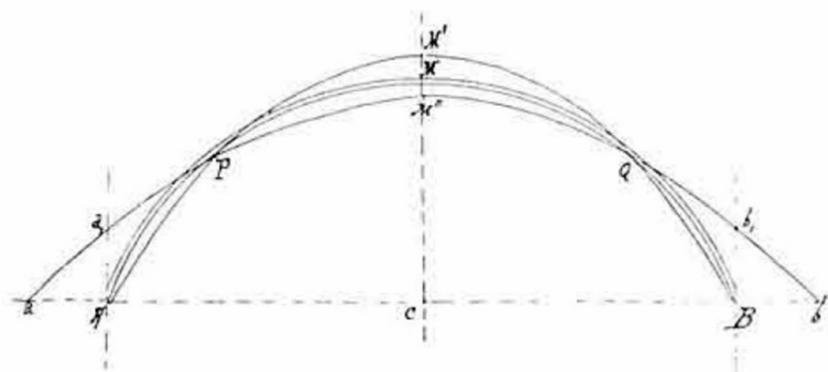


Figura 74: Posiciones de la línea de empujes en un arco tabicado. Fuente: Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.103.

Jaime Bayó sería el primero en proponer el análisis elástico en las bóvedas tabicadas. Asimila este tipo de estructuras a arcos metálicos biarticulados, por lo que considera que empujan, pero este empuje es el del arco biarticulado elástico correspondiente. Para él el problema se reduce en encontrar una línea de empujes que, además de estar en equilibrio con las cargas, cumpla las condiciones de compatibilidad elástica de deformación¹⁰¹.

Esteve Terradas, un gran ingeniero y matemático, recibió un encargo de Puig a Cadafalch en 1919, consistente en resolver el problema que por entonces planteaba el cálculo de las bóvedas tabicadas en elementos más complejos que las bóvedas tradicionales, en concreto en una bóveda de escalera, por lo que fue el primero en intentar un análisis elástico de este tipo en una estructura algo más compleja que las habituales. Terradas intentó realizar un análisis elástico de la bóveda y examinó problemas elásticos que él conocía muy bien, en particular el de pandeo, pero fracasa en su intento, ya que el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio elástico para una estructura espacial de este tipo es muy complejo. Este fracaso tuvo como consecuencia reforzar aún más la idea de la imposibilidad de calcular ciertos tipos de bóvedas tabicadas¹⁰².

De este modo, mientras los teóricos discutían sobre la imposibilidad de calcular bóvedas tabicadas, los arquitectos e ingenieros seguían construyéndolas, realizando los cálculos necesarios para determinar las dimensiones de los elementos principales, como podían ser el espesor de las bóvedas o las dimensiones de los sistemas de contrarresto. Es evidente que desde siempre los constructores pensaban que las bóvedas tabicadas producían empujes, como así lo demuestra la existencia de los sistemas de contrarresto¹⁰³.

Luis Moya (1957), un gran constructor de bóvedas tabicadas, reconoce de igual forma la insuficiencia del cálculo debido a la falta de datos sobre las constantes elásticas de éstas, pero a la hora de proyectar este tipo de estructuras emplea cálculos de equilibrio basados en las líneas de empujes. Bosch (1947) idea un método para calcular el empuje de las bóvedas tabicadas vaídas, que busca encontrar un estado posible de compresiones dentro de la fábrica a partir de la formación de un sistema imaginario de nervios cruceros sobre los que apoyarían a su vez unos arcos elementales obtenidos dando cortes paralelos a los arcos del contorno¹⁰⁴.

En la actualidad se ha empleado también el Método de los Elementos Finitos (MEF) para el análisis de estructuras tabicadas. Este método, al igual que el cálculo elástico tradicional, asimila la fábrica a un continuo al que atribuye ciertas propiedades elásticas y tiene que prefijar unas condiciones rígidas de contorno (las condiciones en los apoyos tienen que ser establecidas). Estas condiciones, junto con las de equilibrio estático, forman un sistema de ecuaciones del que se obtiene una solución única. Pero este enfoque de análisis presenta varios problemas. En primer lugar, la resolución del sistema es muy sensible a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno (por ejemplo un pequeño asentamiento o giro de uno de los apoyos), conduciendo a variaciones notables del sistema de esfuerzos internos. En segundo lugar, la fábrica tabicada dista mucho de ser un continuo y está, por norma general, agrietada¹⁰⁵.

Si analizamos las obras de fábrica, podemos ver que se componen de un material heterogéneo que resiste bien la compresión, mal la tracción y en el que el rozamiento entre sus partes impide casi siempre el deslizamiento. De este modo, este tipo de estructuras resisten las cargas mediante esfuerzos de compresión que deben estar contenidos en su interior para evitar la aparición de tracciones. Las estructuras de fábrica también tienen la capacidad de adaptarse muy bien a las pequeñas variaciones en las condiciones de contorno formando grietas, las cuales no son peligrosas si no crecen progresivamente con el tiempo. Es más, es la capacidad de formar grietas la que da plasticidad a estas estructuras.

Pues bien, las anteriores afirmaciones se pueden hacer también para las bóvedas tabicadas, si bien la resistencia a compresión de éstas es menor que las de fábrica por su tendencia a deshojarse, por lo que no son adecuadas para grandes cargas. Es cierto que las estructuras tabicadas presentan cierta resistencia a tracción que permite una ligera flexión, pero la resistencia de cargas mayores o por largos periodos de tiempo se debe fundamentalmente a la existencia de otros elementos resistentes como los rellenos o las lengüetas transversales, los cuales funcionan dando una vía de escape a los empujes cuando sea necesario. Al igual que las bóvedas de fábrica, las tabicadas pueden resistir una perforación sin llegar a colapsar y los fallos por deslizamiento son también excepcionalmente raros. Además, ambos tipos de estructura presentan el mismo tipo de patologías¹⁰⁶.

Por tanto, podemos concluir que el carácter cohesivo de las estructuras tabicadas no llega a ser una cualidad fundamental en cuanto a su comportamiento estructural, ya que interviene principalmente durante el proceso constructivo, permitiendo la construcción sin cimbra. Una vez que la bóveda está terminada, ésta empuja, se agrieta y funciona exactamente igual que una bóveda de fábrica.

Todas estas afirmaciones sobre las estructuras tabicadas y las de fábrica fueron sistematizadas por el profesor Heyman con la finalidad de poder englobar la teoría de estructuras de fábrica dentro del marco más general del Análisis Límite. Heyman considera que la estructura de fábrica está formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no tracciones (es decir, imagina la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso). También considera que las tensiones son bajas, por lo que no habría peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre los bloques es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres hipótesis dan lugar a los Principio del Análisis Límite de las Fábricas:

1. La fábrica presenta una resistencia a compresión infinita.
2. La fábrica tiene una resistencia a tracción nula.
3. El fallo por deslizamiento es imposible.

¹⁰¹ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.103.

¹⁰² Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.104.

¹⁰³ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.105.

¹⁰⁴ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.105.

¹⁰⁵ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.105.

¹⁰⁶ Santiago Huerta, "Las bóvedas de Guastavino en América", 2001, p.106-107.

Por tanto, la condición para que una fábrica construida con un material que cumpla los tres principios anteriores exige que la trayectoria de las fuerzas o línea de empujes esté contenida dentro de la estructura¹⁰⁷.

Por norma general una estructura de este tipo será hiperestática, por lo que podremos encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro de la fábrica. Siempre que se cumplan los principios mencionados anteriormente, se pueden demostrar los Teoremas Fundamentales del Análisis Límite, aunque el que nos interesa en particular es el Teorema Fundamental de la Seguridad, que establece que si en una estructura es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición límite del material (que no aparezcan tracciones), ésta no colapsará. Si se aplica este teorema a las fábricas se puede decir que la estructura no se hundirá siempre y cuando sea posible dibujar una línea de empujes en equilibrio con las cargas contenidas dentro de la estructura. La potencia de este teorema radica en que la línea de empujes puede ser elegida libremente. Una vez escogida la línea, se pueden aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico¹⁰⁸.

El problema de la seguridad en las fábricas se reduce por tanto a un problema de estabilidad al vuelo. Este criterio conduce a una visión de las estructuras de fábrica basada firmemente en la geometría, siendo la forma de la estructura la que hace posible que las líneas de empuje se mantengan siempre dentro de los límites de la fábrica. Por otra parte, el análisis límite admite la aparición de grietas como algo natural, ya que siempre que la forma general de la estructura no se vea distorsionada excesivamente, ésta no verá reducida su seguridad¹⁰⁹.

Si tenemos en cuenta estas afirmaciones, es posible analizar y proyectar estructuras de fábrica simplemente empleando las ecuaciones de equilibrio y sin tener que hacer afirmaciones dudosas sobre el material (las únicas son las citadas anteriormente) y las condiciones de contorno (únicamente hay que tener en cuenta que en el caso de haber movimiento, éstos serán pequeños para que las ecuaciones de equilibrio se mantengan igual).

Se puede concluir, por tanto, afirmando que el problema de la seguridad de una bóveda de fábrica se reduce a un problema de la forma geométrica de la estructura. Las formas estables contienen líneas de empujes en equilibrio con las cargas. Por tanto, los análisis de equilibrio de la "antigua teoría" de bóvedas, las fórmulas simplificadas de Guastavino padre, el análisis de membrana de estados de compresión de Guastavino hijo e incluso las reglas tradicionales de proyecto de bóvedas y estribos como las de Fray Lorenzo, son todas perfectamente seguras.

¹⁰⁷ Santiago Huerta, *"Las bóvedas de Guastavino en América"*, 2001, p.107.

¹⁰⁸ Santiago Huerta, *"Las bóvedas de Guastavino en América"*, 2001, p.107.

¹⁰⁹ Santiago Huerta, *"Las bóvedas de Guastavino en América"*, 2001, p.108.

6.1.2. Aplicación del método de Análisis Límite planteado por Heyman

Esta parte del trabajo va dirigida fundamentalmente a la realización de un estudio de la estabilidad de la cúpula del Sagrario, empleando para ello el método de los cortes. Se trata de un procedimiento que se ha utilizado desde mediados del siglo XVIII para analizar bóvedas de fábrica y que debe su nombre y su rigor técnico al análisis límite para estructuras de fábrica desarrollado por Jacques Heyman¹¹⁰.

Para buscar soluciones de equilibrio con esfuerzos de compresión se ha empleado tradicionalmente la idea de imaginar la cúpula de fábrica como formada por una serie de semiarcos, que se obtienen al cortar la cúpula por planos meridianos. Estos semiarcos se asemejan a los gajos de una naranja y cada dos semiarcos opuestos forman un arco completo. Si es posible dibujar una línea de empujes en su interior, el arco se sostendrá y del mismo modo lo harán el resto de arcos en los que se divide la cúpula, por lo que la cúpula real será estable también. De hecho, el primer análisis de equilibrio de este tipo fue realizado por Poleni en el año 1748 para la cúpula de San Pedro de Roma, empleando un modelo colgante (Figura 75). Poleni dividió la cúpula en cincuenta gajos y, a su vez, dividió cada uno de estos gajos en dovelas. Posteriormente calculó el peso de cada una de estas dovelas y formó una cadena, teniendo en cuenta el peso de la linterna. Al invertir la cadena, comprobó que ésta quedaba dentro de la obra de fábrica, por lo que demostró que la cúpula era estable¹¹¹.

Una cúpula de un espesor finito puede acomodar en su interior infinitas líneas de empujes en los arcos formados por gajos opuestos. La gran ventaja del empleo de este método es que podemos analizar la estabilidad de una cúpula como si se tratase de un arco, por lo que reducimos el problema “espacial” de la primera al problema “plano” del segundo¹¹².

Aunque este método de los cortes se justifica por el teorema de la seguridad (un arco de fábrica es seguro si es posible dibujar una línea de empujes en su interior) y la elección de cortes meridianos resulta cómoda por su analogía con los arcos, existe una justificación para la elección de este tipo de divisiones, que tiene que ver con la forma que tienen de agrietarse las cúpulas de fábrica debido a los pequeños movimientos del sistema de estribo del que dispongan. Si el reparto de pesos es uniforme, el estribo cederá ligeramente hacia afuera del mismo modo en todas direcciones, por lo que la cúpula deberá agrietarse para adaptarse a este movimiento¹¹³. Las grietas que aparecerán serán como las de la Figura 76. Como se puede observar, la cúpula se compone realmente por un sistema de arcos.

De entre las infinitas líneas de empuje que pueden representar el estado de equilibrio del conjunto, debemos buscar aquella para la que se obtenga un coeficiente de seguridad geométrico mayor, resultado de dividir el espesor del arco real por el espesor del arco límite. Cuanto mayor sea la holgura que tenga la línea de empujes entre el trasdós y el intradós del arco, mayor será dicho coeficiente y, por tanto, el grado de seguridad de la cúpula.

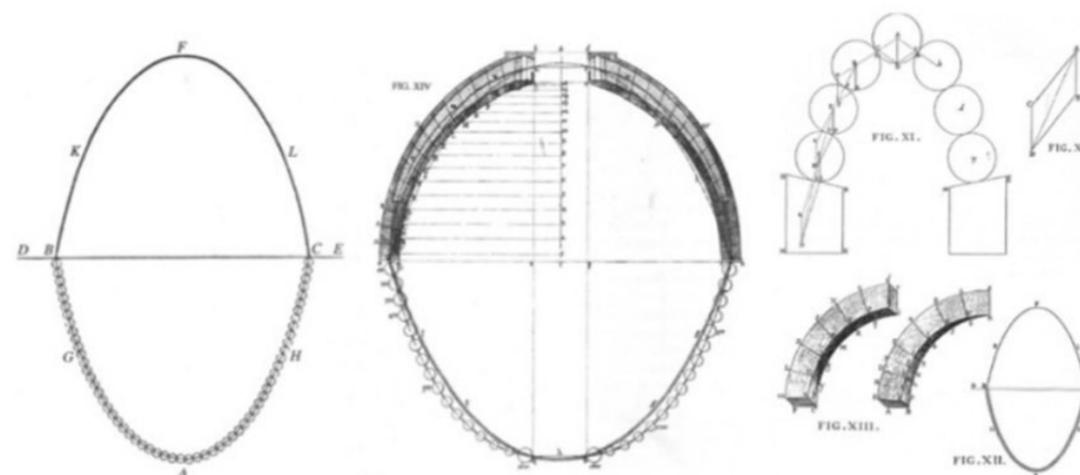


Figura 75: Modelo colgante de Poleni para verificar la estabilidad de la cúpula de San Pedro. Fuente: Santiago Huerta Fernández, “Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”, 2004, p. 531.

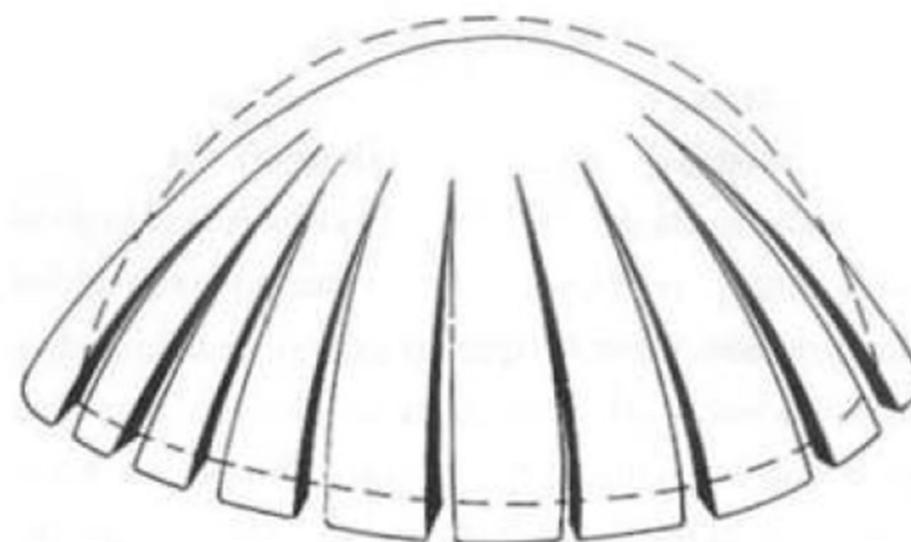


Figura 76: Agrietamientos usuales en una cúpula de fábrica que la convierten en una sucesión de gajos. Fuente: Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral “La bóveda tabicada en España en el S.XIX: la transformación de un sistema constructivo”, 2013, p.271.

¹¹⁰ Esther Redondo Martínez, Tesis Doctoral “La bóveda tabicada en España en el S.XIX: la transformación de un sistema constructivo”, 2013, p.268.

¹¹¹ Santiago Huerta Fernández, “Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”, 2004, p. 444,445.

¹¹² Santiago Huerta Fernández, “Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”, 2004, p. 444.

¹¹³ Santiago Huerta Fernández, “Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”, 2004, p. 446.

El análisis se va a realizar sobre la cúpula central del Sagrario, para la que he supuesto un espesor de 8cm, que equivaldría a dos hojas de rasilla más la capa de mortero intermedia, introduciendo el efecto del tabicado del cupulín a través del peso que éste transmite a la corona superior de la cúpula. El cupulín he supuesto que está construido del mismo modo que la cúpula principal, es decir, con un espesor de 8cm, que serían igualmente dos rasillas y la capa de mortero intermedia.

Para llevar a cabo el análisis he dividido la cúpula en 50 gajos y he centrado el estudio sobre uno de estos sectores que comprende 1/50 de la parte total de la cúpula, con un ángulo de $7^{\circ}2'$. He hecho coincidir el sector objeto del estudio con una de las partes de la cúpula en la que no se incluye ningún luneto, por tener estas partes unas características específicas que se analizarán en el apartado dedicado a la Hipótesis 5. También he dividido cada sector o semiarco en 10 dovelas para la realización de los cálculos y he estimado que el gajo simétrico tiene exactamente las mismas características. Del mismo modo, he considerado que la sección a analizar no cuenta con más sistema de contrarresto que el propio muro en el que se apoya.

Con el fin de encontrar una línea de empujes contenida dentro de la sección analizada con el mayor coeficiente geométrico de seguridad posible y dado que no conozco con certeza absoluta las características del relleno interior de los riñones de la cúpula, así como su grado de compactación, voy a plantear cuatro hipótesis posibles:

- **Hipótesis 1:** Cúpula tabicada sin relleno alguno en el tercio inferior.
- **Hipótesis 2:** Cúpula tabicada con un relleno sobre las dovelas hasta una altura de 1'85m, coincidiendo con la altura de los lunetos correspondientes al cuerpo de luces (un poco más de 1/3 de la altura que recomendaba Fray Lorenzo de San Nicolás en su tratado). El relleno se considera que no está compactado, por lo que no tiene capacidad de transmisión de cargas y únicamente actúa añadiendo un peso extra a las dovelas situadas bajo él.
- **Hipótesis 3:** Cúpula tabicada con un relleno a partir del extradós de la misma de 20cm de ancho, hasta una altura de 1'85m al igual que en la hipótesis 2. En este caso se considera que el relleno presenta una mayor compactación y tiene capacidad para transmitir las cargas.
- **Hipótesis 4:** Cúpula tabicada con un relleno a partir del extradós de la misma igual al ancho del muro en el que se apoya y hasta una altura de 1'85m. El relleno tendrá capacidad de transmisión de cargas, por lo que en este caso la cúpula se calculará como si se tratase de una cúpula rebajada.

Como he comentado anteriormente, para analizar las secciones coincidentes con los lunetos del cuerpo de luces, plantearé una última hipótesis en la que se obtendrá como resultado la carga que se transmitirá desde la clave de los lunetos hacia los laterales de los mismos:

- **Hipótesis 5:** Estudio particular de una de las secciones coincidentes con alguno de los lunetos.

Además, dentro de cada una de estas hipótesis se comprobarán diferentes casos, en los que se variará la posición de los empujes tanto en la corona superior de la cúpula como en el arranque de la misma. Para determinar y calcular los volúmenes, centros de gravedad y pesos de cada una de las dovelas en las que he dividido los semiarcos objeto de estudio, he realizado un modelado tridimensional de las diferentes secciones de la cúpula con el programa informático AutoCAD. El peso específico que he considerado para la rasilla es el que considera el CTE DB SE-AE en la tabla C.1 para una fábrica de ladrillo cerámico macizo, que en este caso es de 18 KN/m^3 . Para los rellenos he supuesto un peso específico también de 18 KN/m^3 , aunque éste quizá sería algo mayor, pero dada la dificultad para estimarlo se ha considerado este valor que podría ir de este modo un poco a favor de la seguridad.

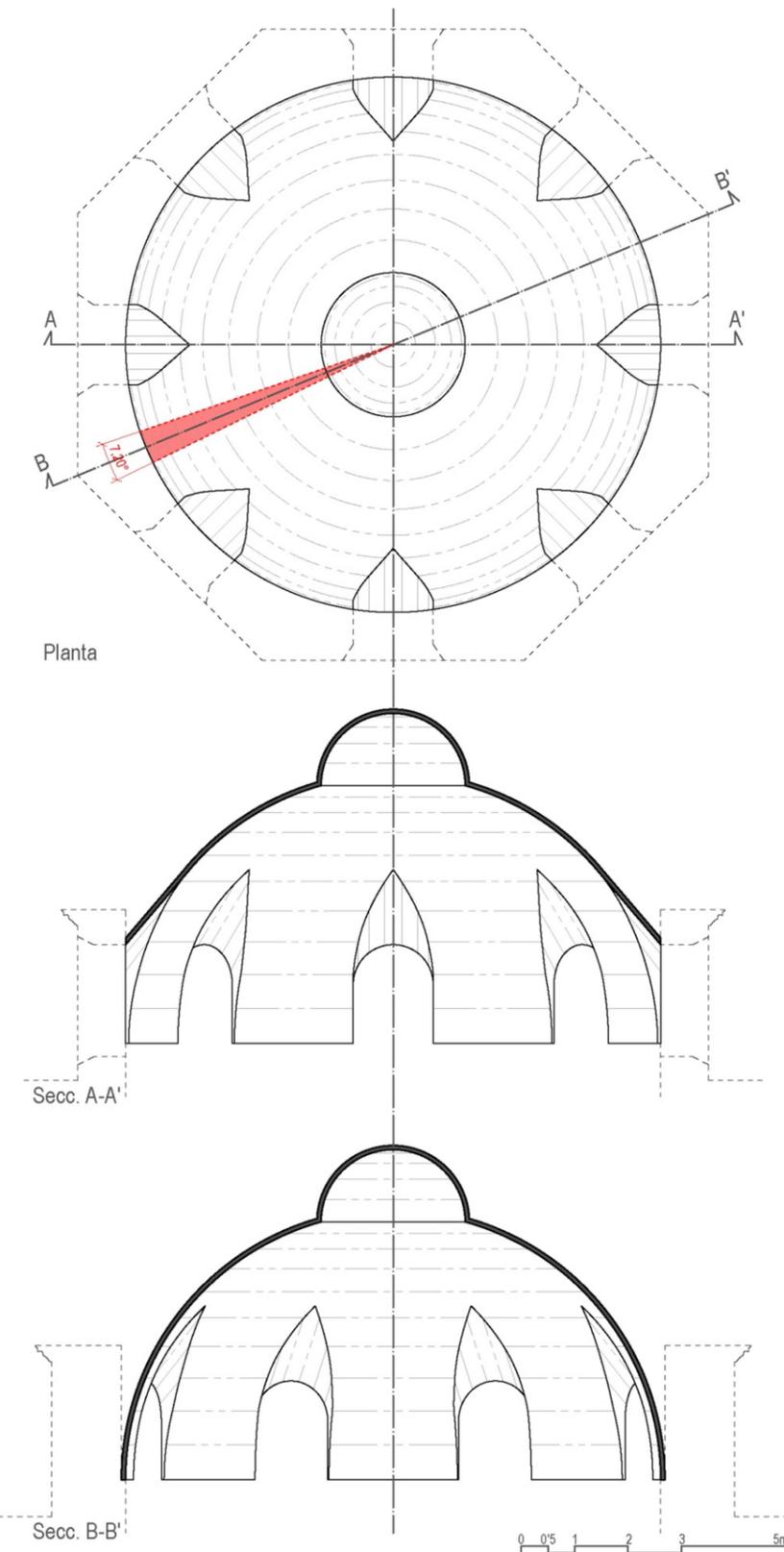


Figura 77: Planta y secciones de la cúpula. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.1. Hipótesis 1

Obtención de la línea de empujes de la cúpula, considerando para el cálculo uno de los cincuenta gajos en los que se ha dividido la misma, con un ángulo de 7.2° . Para esta hipótesis, el sector elegido no coincidirá con las partes de la cúpula en las que aparecen los lunetos, ya que estos serán objeto de estudio en el apartado dedicado a la Hipótesis 5. El sector que se va a estudiar en este apartado se ha dividido a su vez en 10 dovelas. Se considera que sobre la corona superior de la cúpula descansa todo el tabicado del cupulín, que tiene las mismas características que el de la cúpula principal, es decir, se considera que está conformado por dos hojas de rasilla más el mortero intermedio entre ambas, con un espesor total de 8cm. Por tanto, la cáscara de la cúpula soportará el peso transmitido por el tabicado del cupulín. El gajo o sector simétrico al que estamos estudiando tendrá exactamente las mismas características.

Por otro lado, en esta hipótesis se considera que la cúpula carece de relleno alguno en su extradós hasta una altura de $1/3$, tal y como recomendaba Fray Lorenzo de San Nicolás.

A partir de este modelo y con la estimación de cargas y centros de gravedad que aparecen en la Tabla 1, se efectúan los cálculos para la obtención de una línea de empujes con la que conseguir una situación de equilibrio con el mayor coeficiente de seguridad geométrico posible. Para ello será necesario hacer sucesivas variaciones en la posición de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje horizontal en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_a , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro punto es el de aplicación de la resultante en la dovela situada en la base 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.

Hipótesis 1: Cúpula e=8cm SIN MACIZADO en el 1/3 inferior					
Dovelas	Volumen (m³)	P _{esp} fábrica ladrillo (KN/m³)	Peso (KN)	X _g (m)	Y _g (m)
1	0'0112	18	0'2016	1'6860	4'7617
2	0'0150	18	0'2700	2'2867	4'5037
3	0'0187	18	0'3366	2'8471	4'1717
4	0'0221	18	0'3978	3'3610	3'7694
5	0'0252	18	0'4536	3'8192	3'3036
6	0'0278	18	0'5004	4'2137	2'7823
7	0'0299	18	0'5382	4'5376	2'2141
8	0'0316	18	0'5688	4'7855	1'6087
9	0'0327	18	0'5886	4'9532	0'9762
10	0'0333	18	0'5994	5'0377	0'3272
1/50 cupulín	0'0194	18	0'3492	--	--

Tabla 3: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 1.

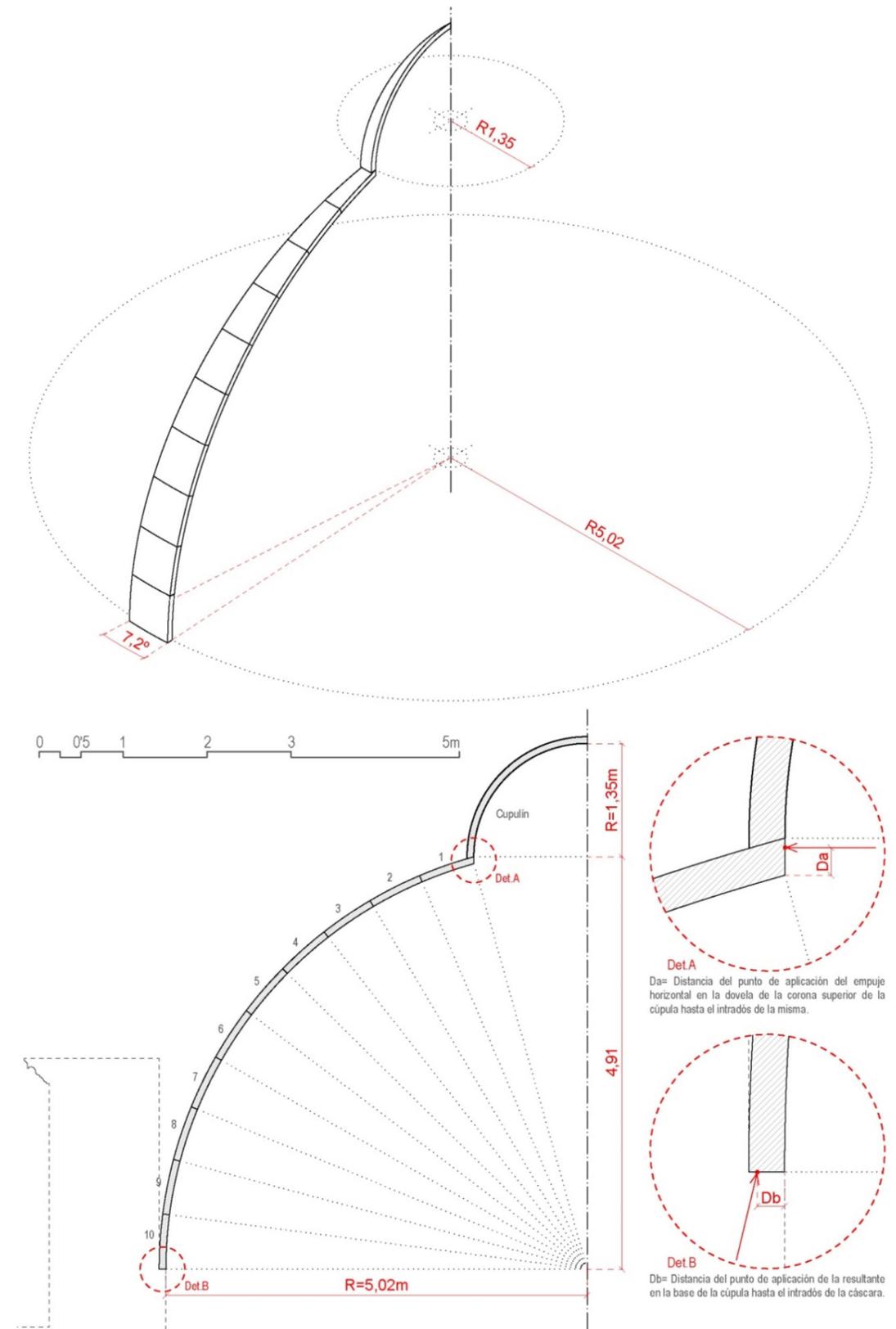


Figura 78: Representación gráfica de la Hipótesis 1. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 1. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

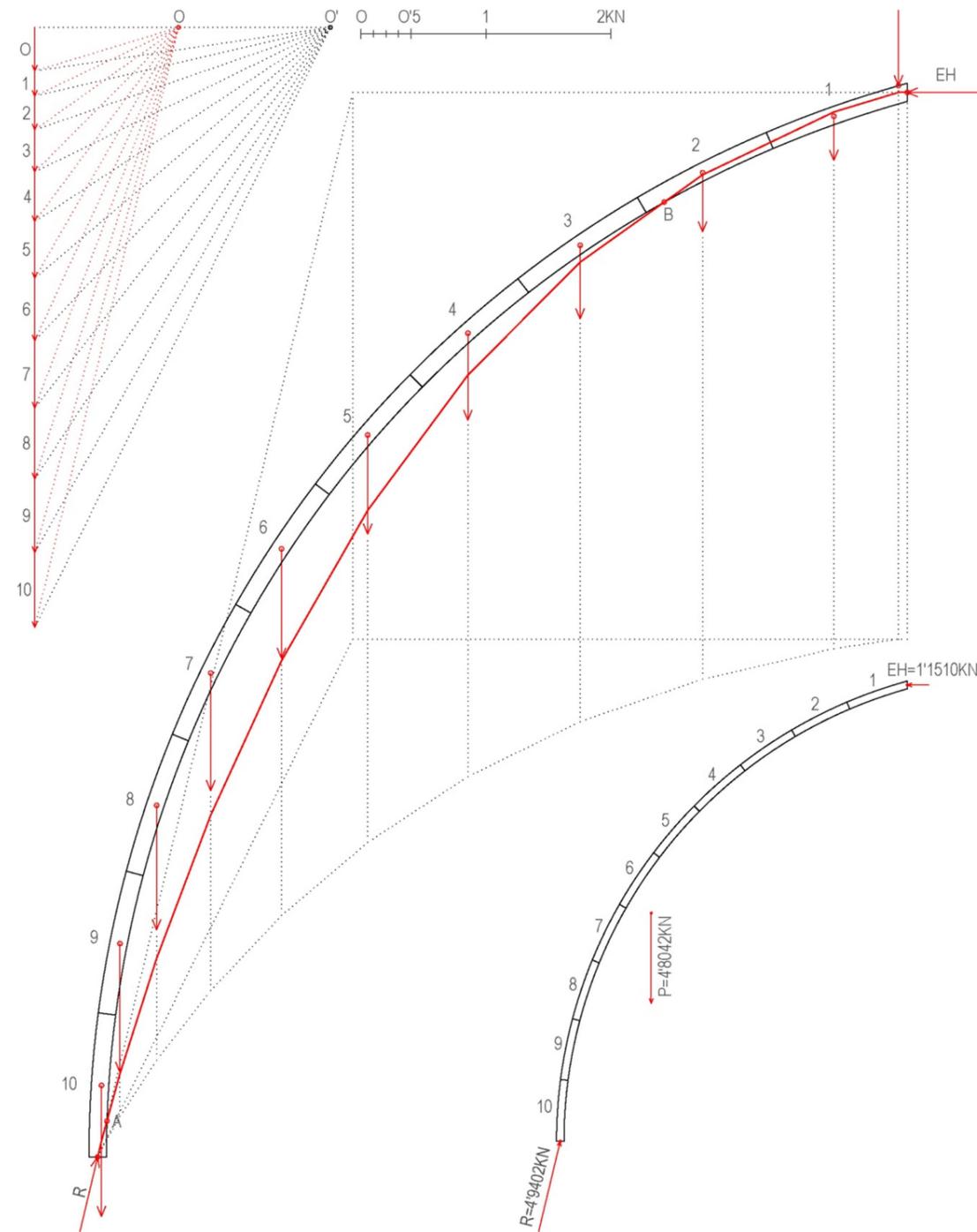


Figura 79: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 1. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 2. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

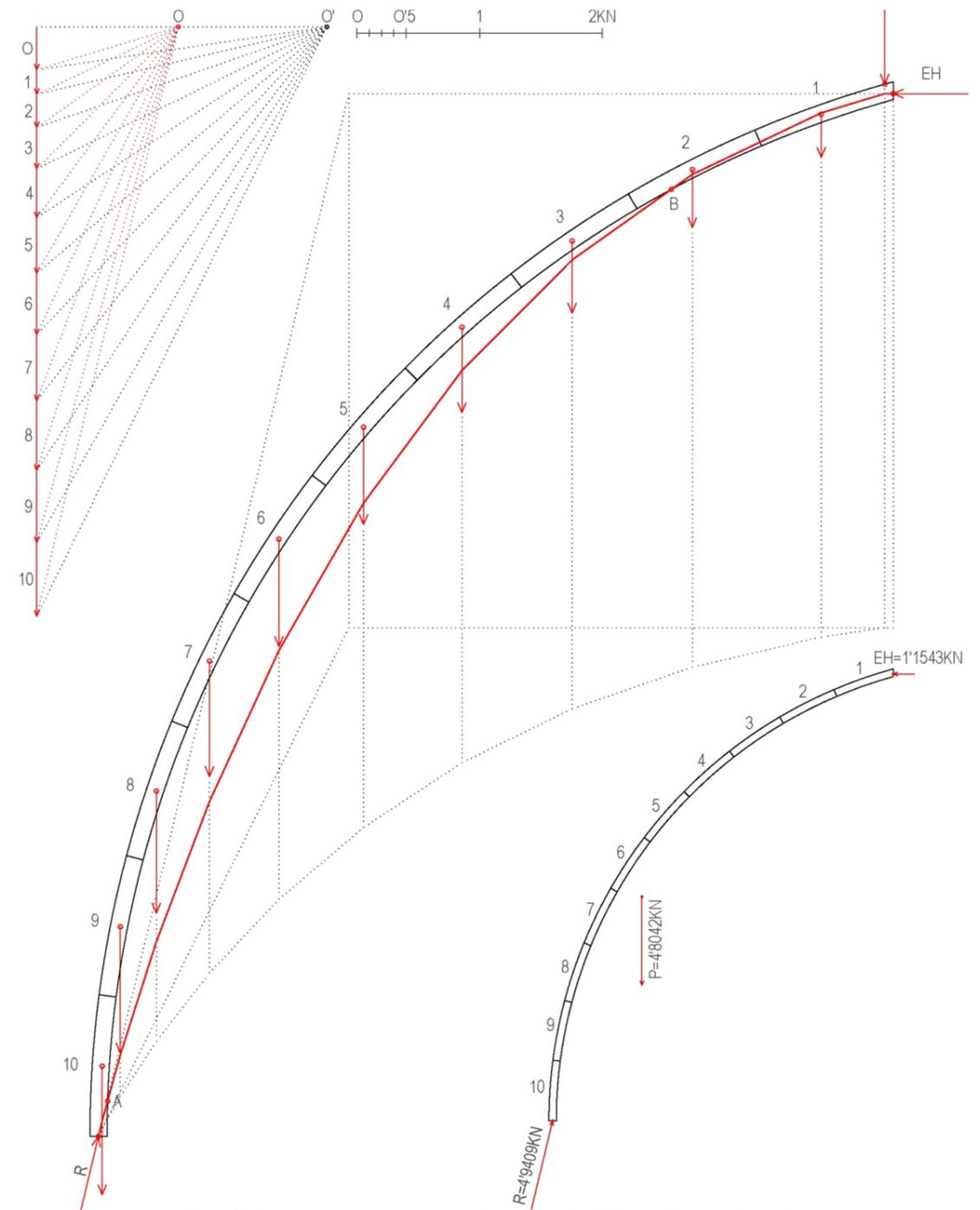


Figura 80: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 2. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 3. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

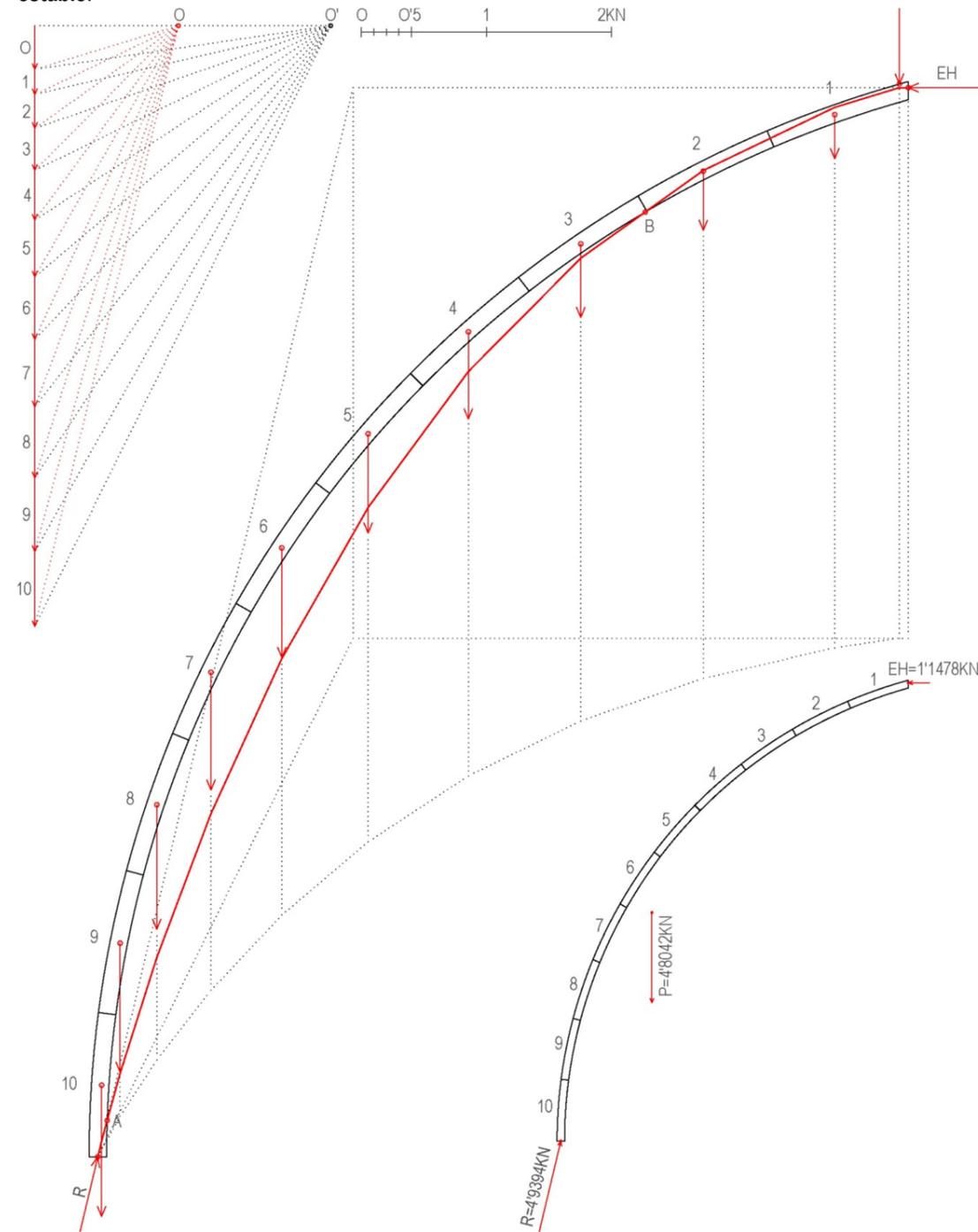


Figura 81: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 3. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 4. ($D_a=0'0800m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0800m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B, y por el extradós entre los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

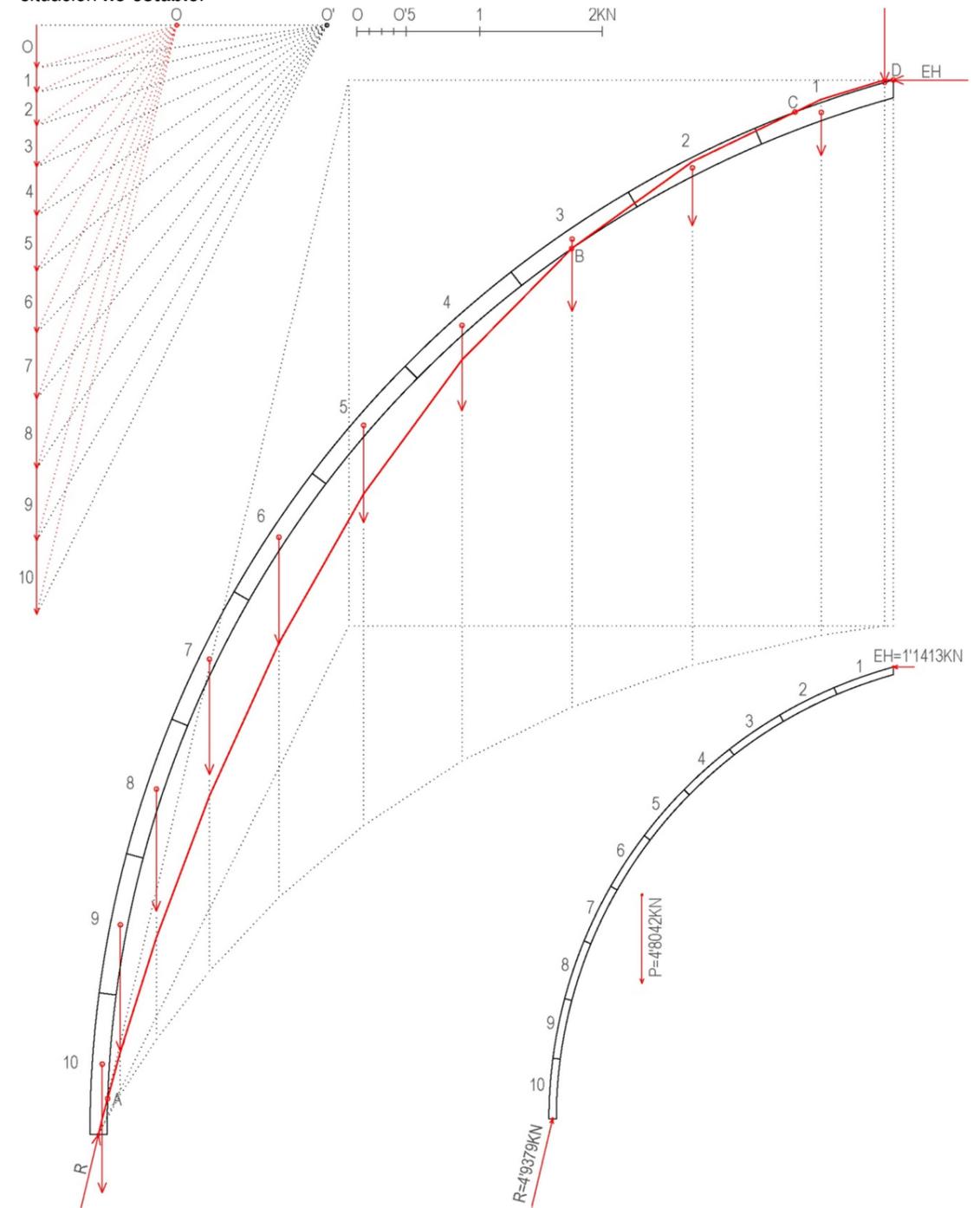


Figura 82: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 4. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 5. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0533m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0533m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

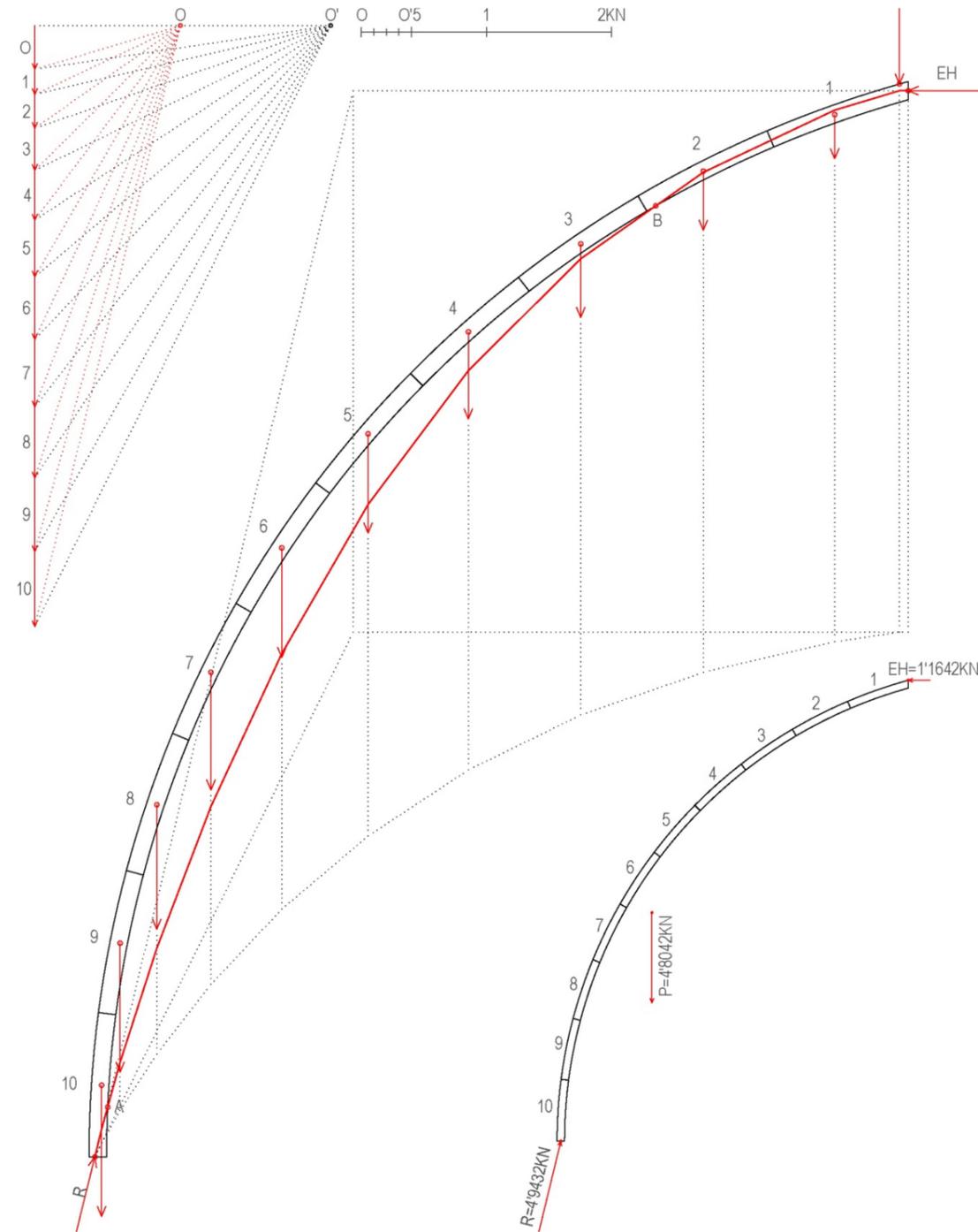


Figura 83: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 5. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 6. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

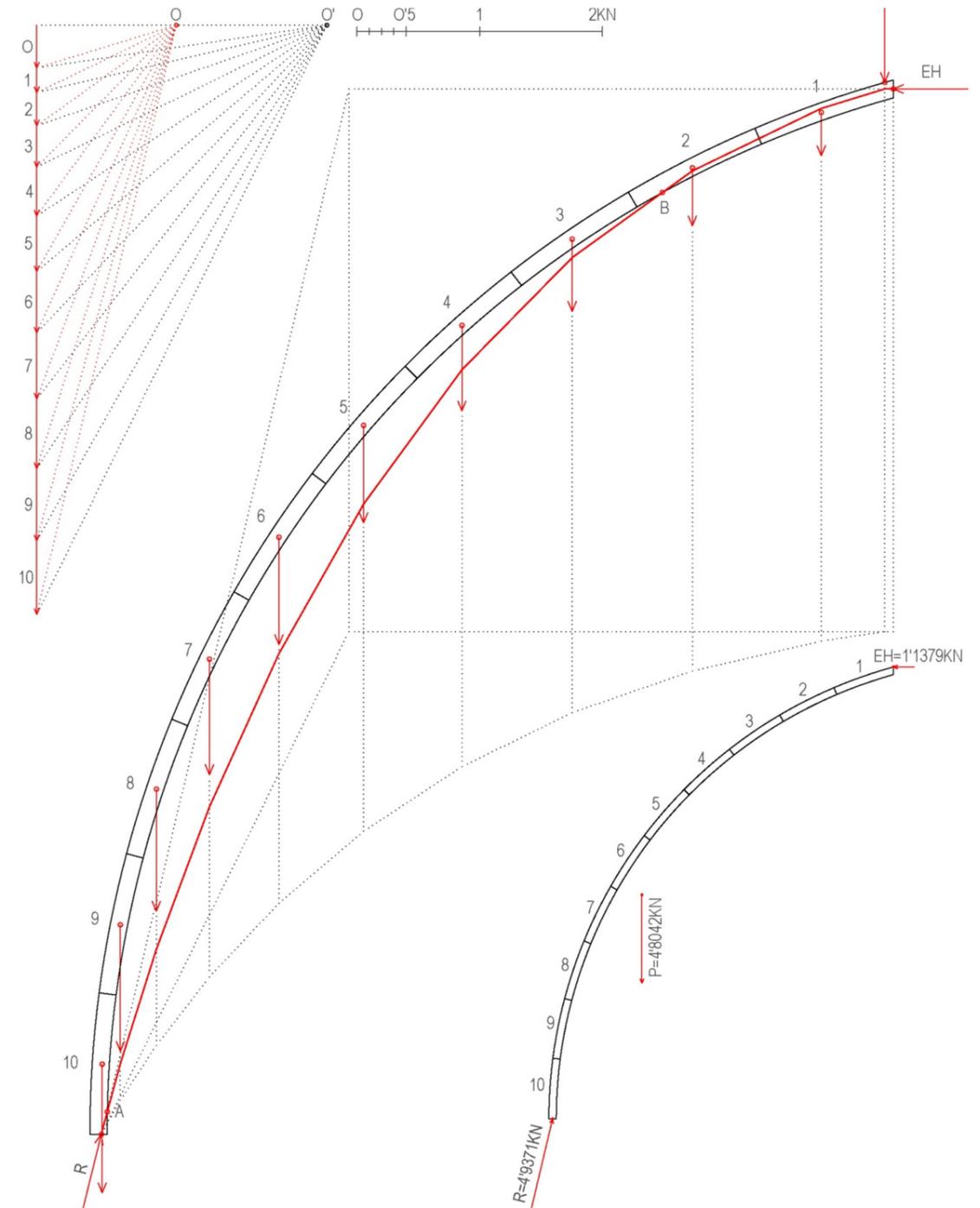


Figura 84: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 6. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 7. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0800m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de la sección en la base ($D_b=0'0800m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

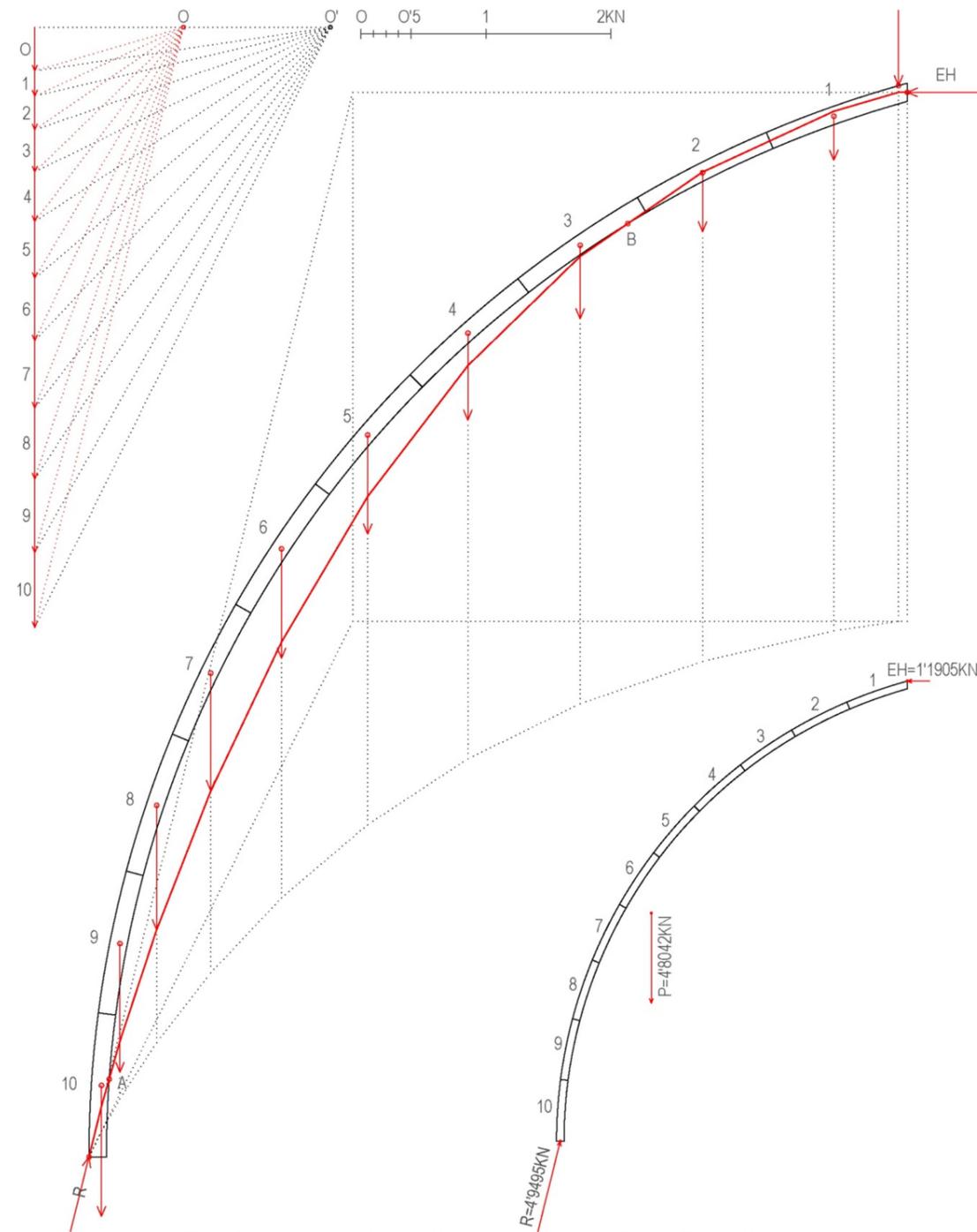


Figura 85: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 7. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 8. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0800m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de la sección en la base ($D_b=0'0800m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

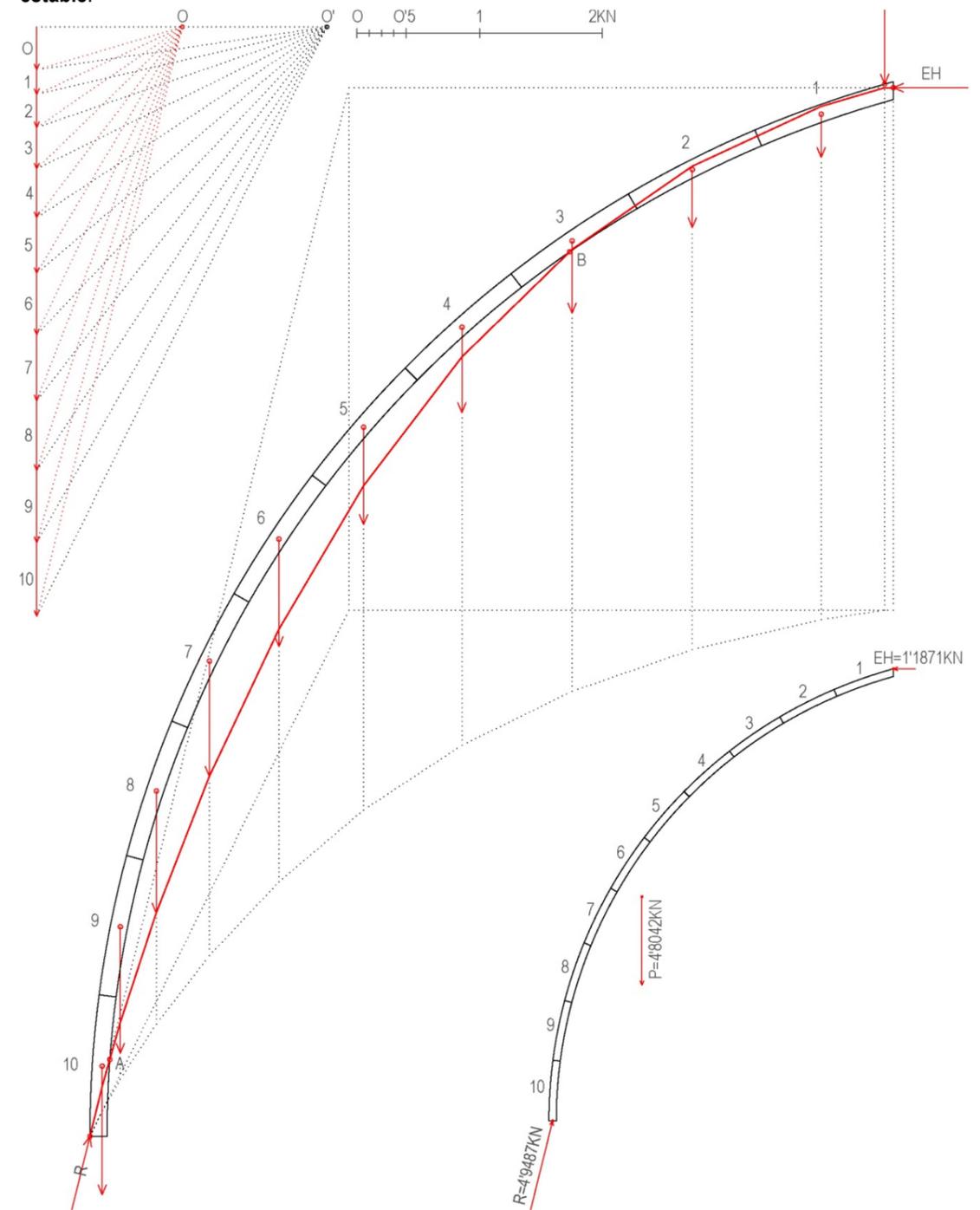


Figura 86: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 8. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 1. Situación 9. ($D_a=0'0800m$ $D_b=0'0800m$)

Cúpula tabicada sin relleno alguno. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de la sección en la base ($D_b=0'0800m$) y que el empuje pase también por el límite exterior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0800m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B, y por el extradós entre los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

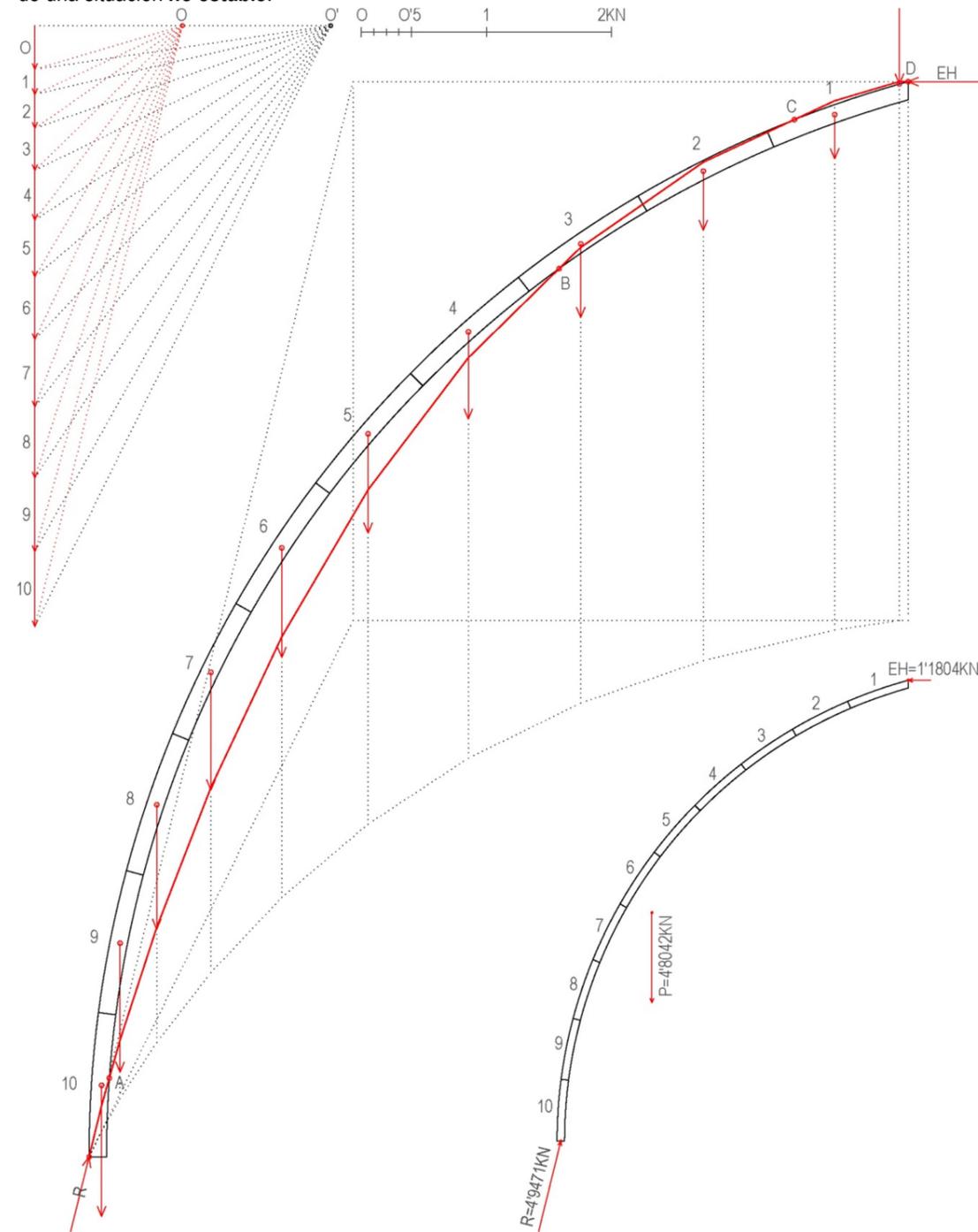


Figura 87: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 9. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.2. Hipótesis 2

Obtención de la línea de empujes de la cúpula, considerando para el cálculo uno de los cincuenta gajos en los que se ha dividido la misma, con un ángulo de 7'2°. Para esta hipótesis, el sector elegido no coincidirá con las partes de la cúpula en las que aparecen los lunetos, ya que estos serán objeto de estudio en el apartado dedicado a la Hipótesis 5. El sector que se va a estudiar en este apartado se ha dividido a su vez en 10 dovelas. Se considera que sobre la corona superior de la cúpula descansa todo el tabicado del cupulín, que tiene las mismas características que el de la cúpula principal, es decir, se considera que está conformado por dos hojas de rasilla más el mortero intermedio entre ambas, con un espesor total de 8cm. Por tanto, la cáscara de la cúpula soportará el peso transmitido por el tabicado del cupulín. El gajo o sector simétrico al que estamos estudiando tendrá exactamente las mismas características.

Por otro lado, en esta hipótesis se considera que la cúpula tiene un relleno en su extradós hasta una altura de 1'85m, coincidiendo con la altura de los lunetos correspondientes al cuerpo de luces (un poco más de 1/3 de la altura que recomendaba Fray Lorenzo de San Nicolás en su tratado). El relleno se considera que tiene un bajo grado de compactación, por lo que no tiene capacidad de transmisión de cargas y únicamente actúa añadiendo un peso extra a las dovelas situadas bajo él.

A partir de este modelo y con la estimación de cargas y centros de gravedad que aparecen en la Tabla 2, se efectúan los cálculos para la obtención de una línea de empujes con la que conseguir una situación de equilibrio con el mayor coeficiente de seguridad geométrico posible. Para ello será necesario hacer sucesivas variaciones en la posición de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje horizontal en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_a , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro punto es el de aplicación de la resultante en la dovela situada en la base 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.

Hipótesis 2: Cúpula e=8cm MACIZADO sin compactar en el 1/3 inferior					
Dovelas	Volumen (m³)	P _{esp} fábrica ladrillo (KN/m³)	Peso (KN)	X _g (m)	Y _g (m)
1	0'0112	18	0'2016	1'6860	4'7617
2	0'0150	18	0'2700	2'2867	4'5037
3	0'0187	18	0'3366	2'8471	4'1717
4	0'0221	18	0'3978	3'3610	3'7694
5	0'0252	18	0'4536	3'8192	3'3036
6	0'0278	18	0'5004	4'2137	2'7823
7	0'0299	18	0'5382	4'5376	2'2141
8	0'0591	18	1'0638	4'7855	1'6087
9	0'0993	18	1'7874	4'9532	0'9762
10	0'0719	18	1'2942	5'0377	0'3272
1/50 cupulín	0'0194	18	0'3492	--	--

Tabla 4: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 2.

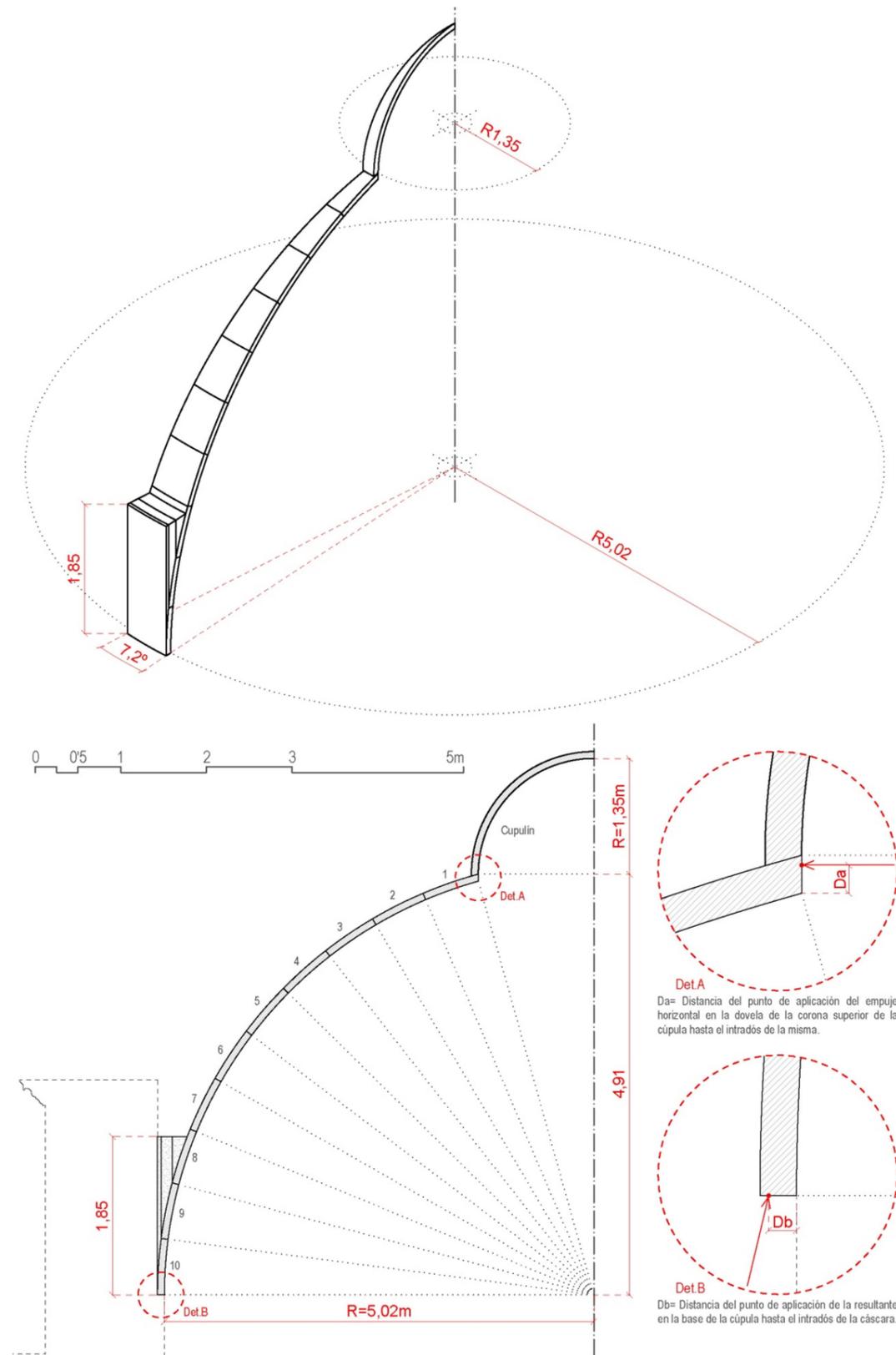


Figura 88: Representación gráfica de la Hipótesis 2. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 1. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

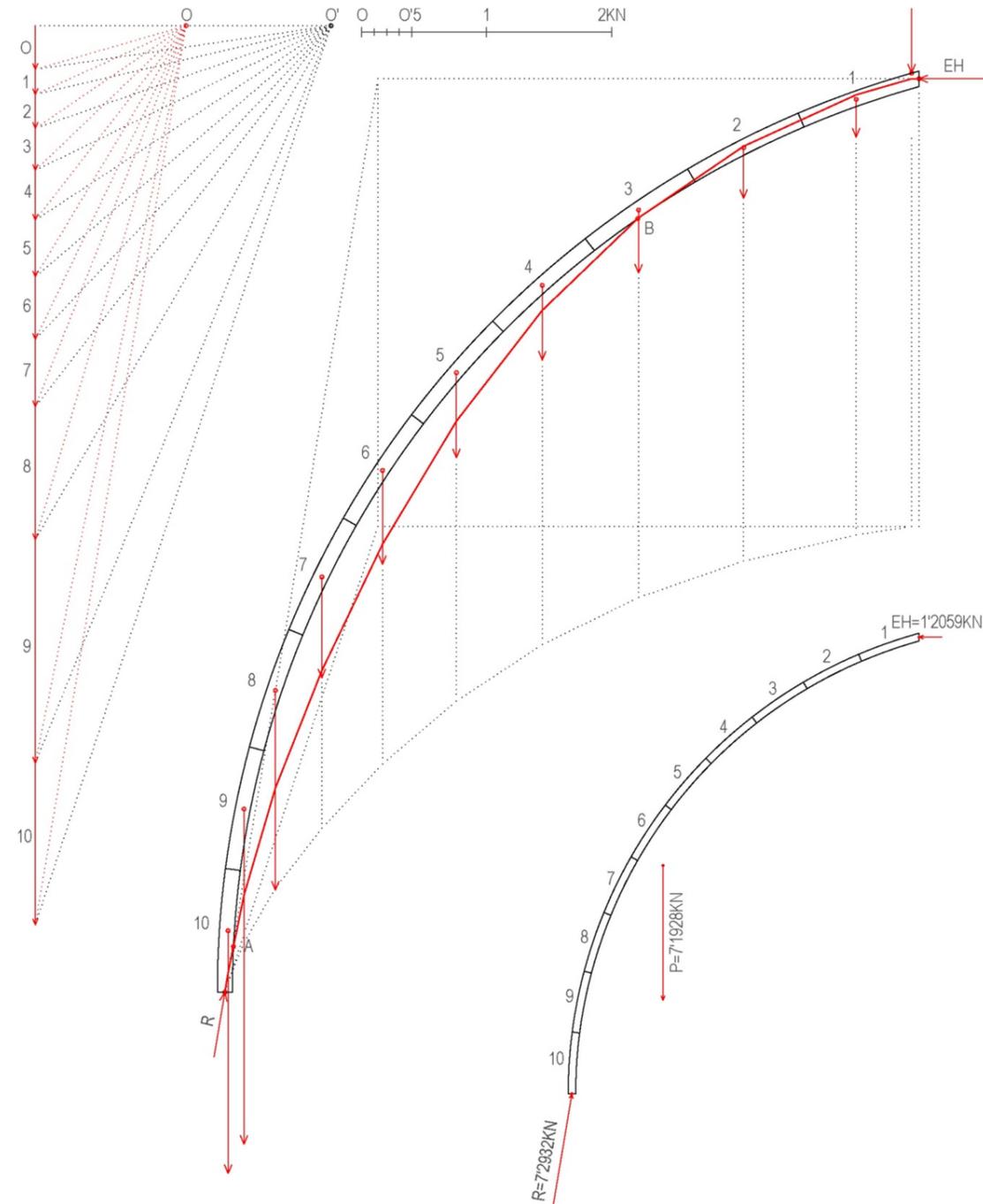


Figura 89: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 1. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 2. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

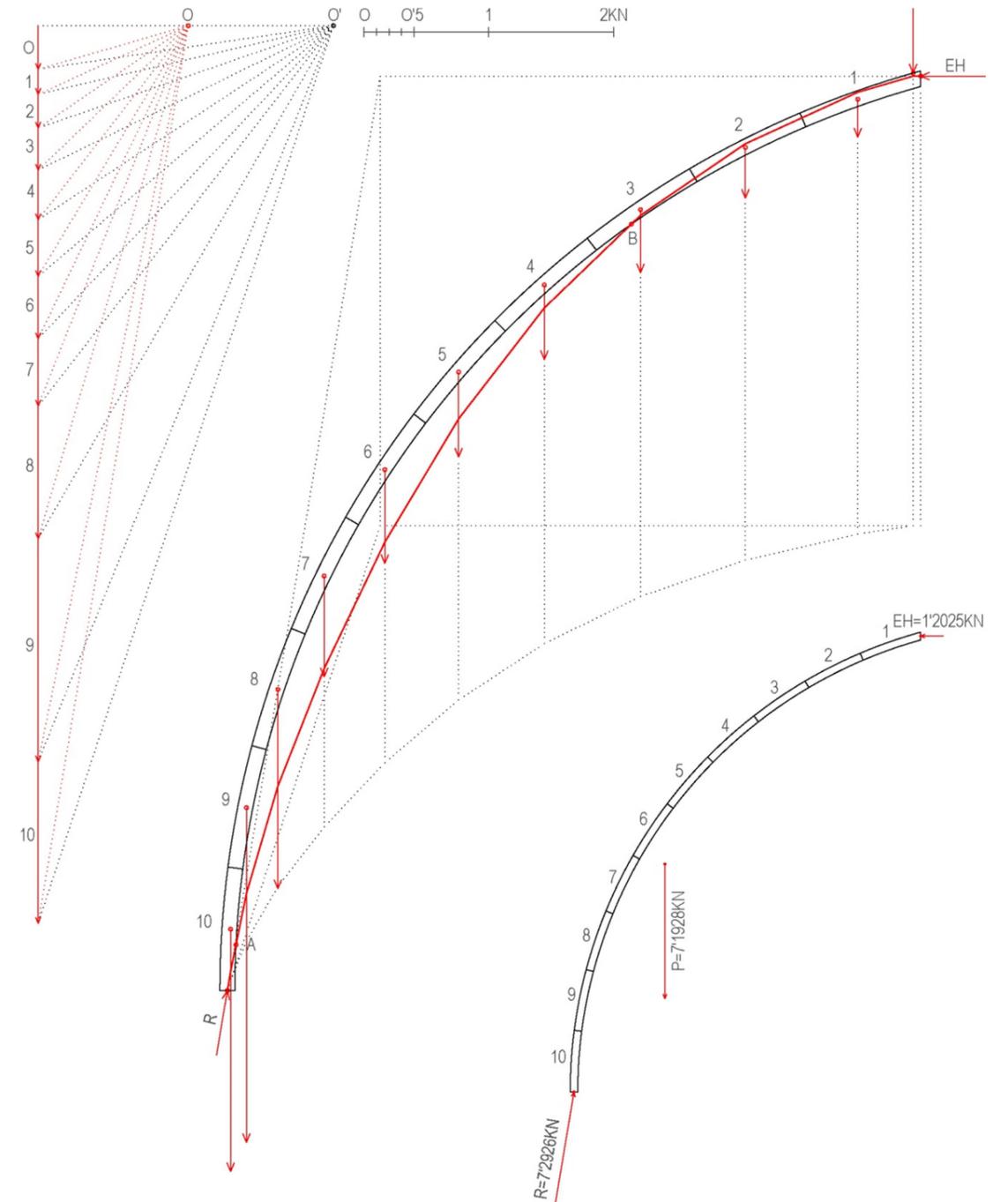


Figura 90: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 2. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 3. ($D_a=0'0800m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0800m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B y entre los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

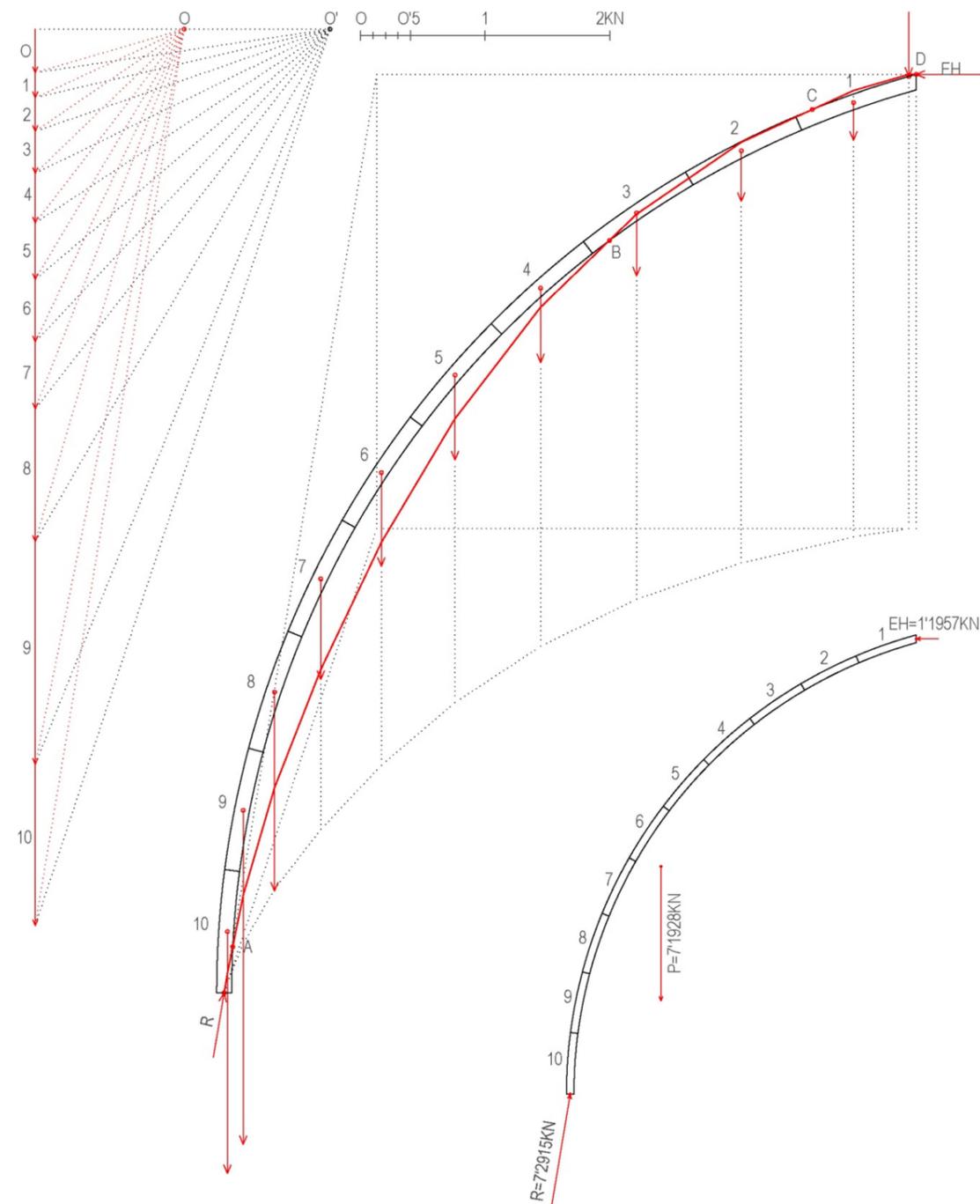


Figura 91: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 3. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 4. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

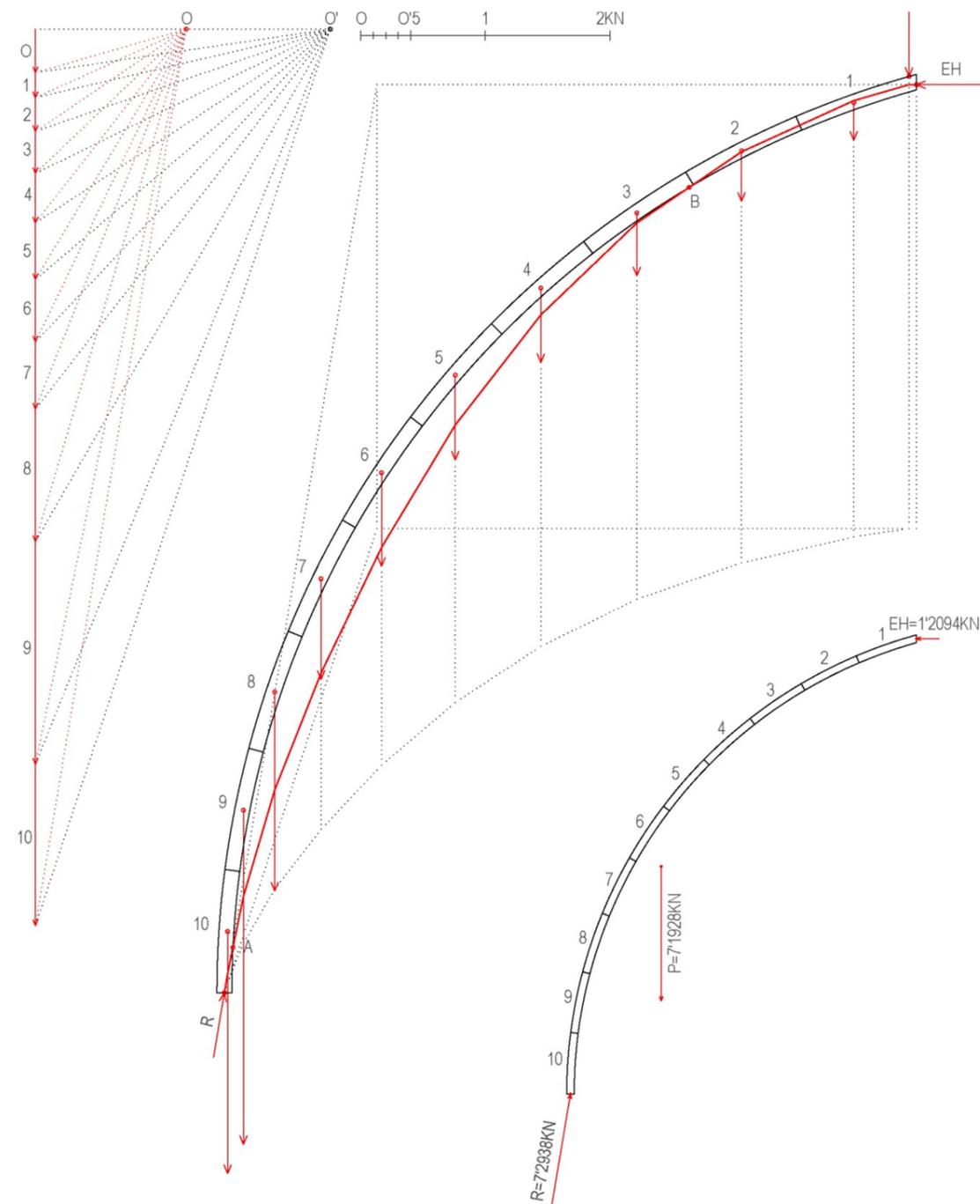


Figura 92: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 4. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 5. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B y entre los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

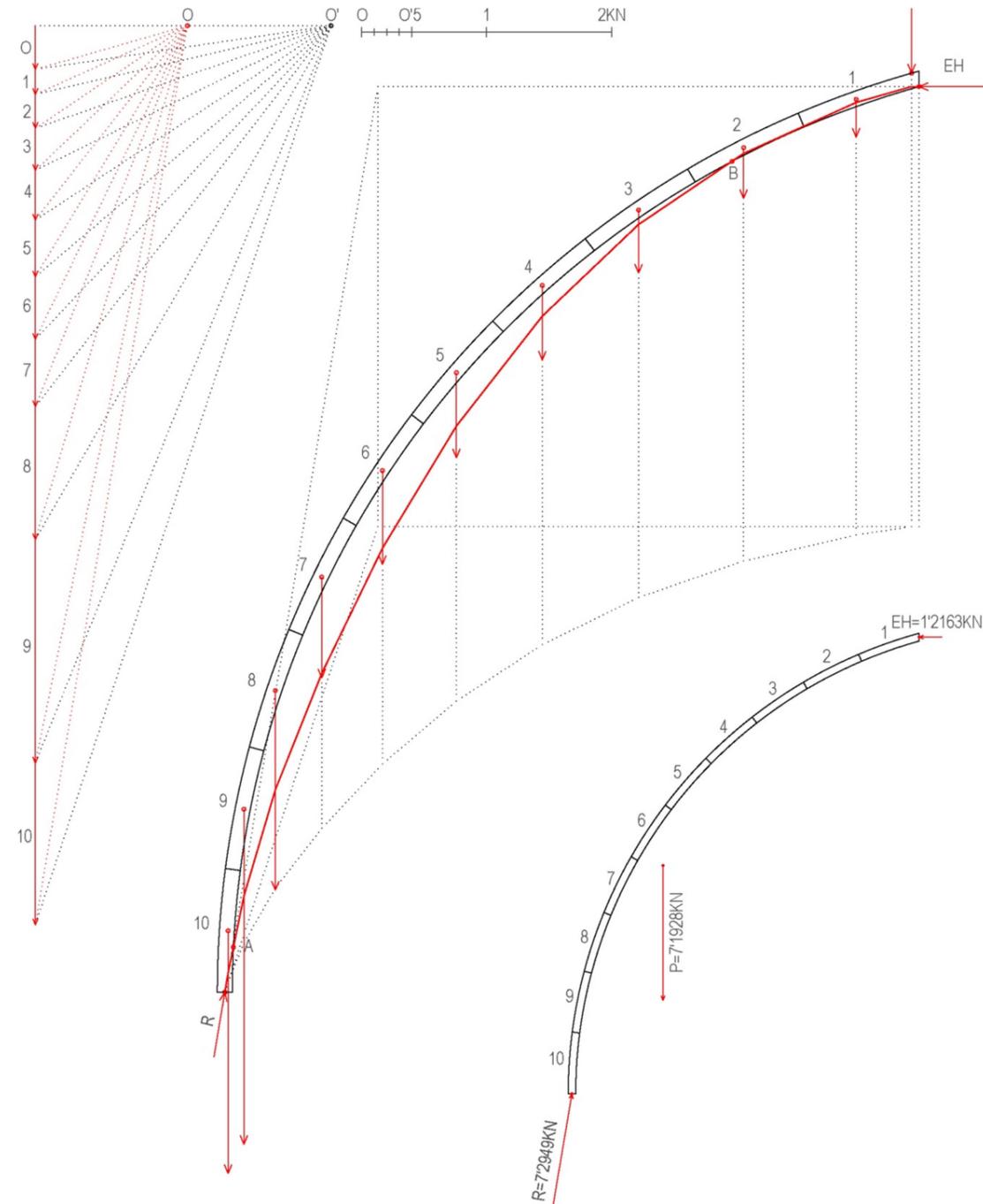


Figura 93: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 5. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 6. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0533m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0533m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

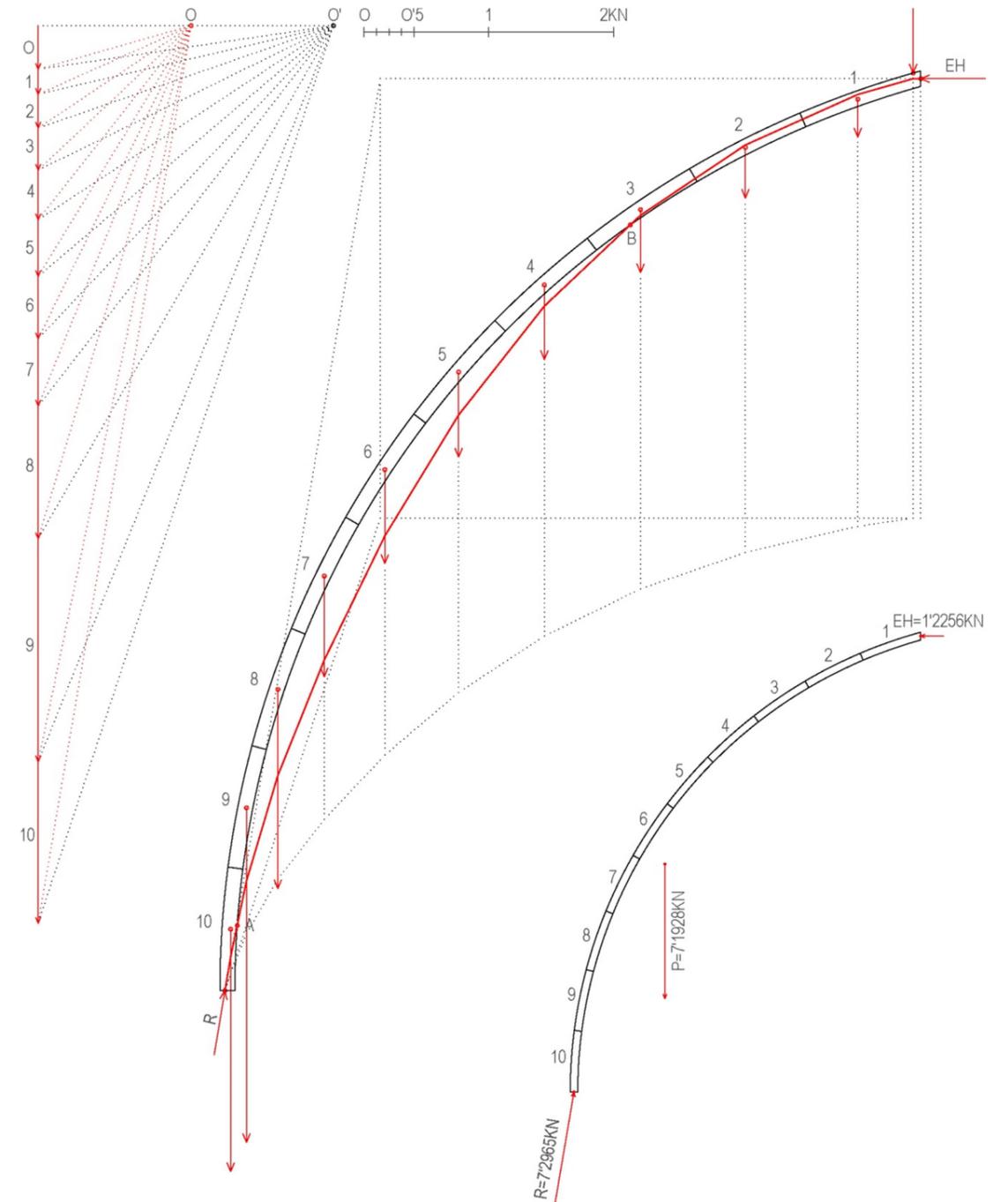


Figura 94: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 6. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 7. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_a=0'0267m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

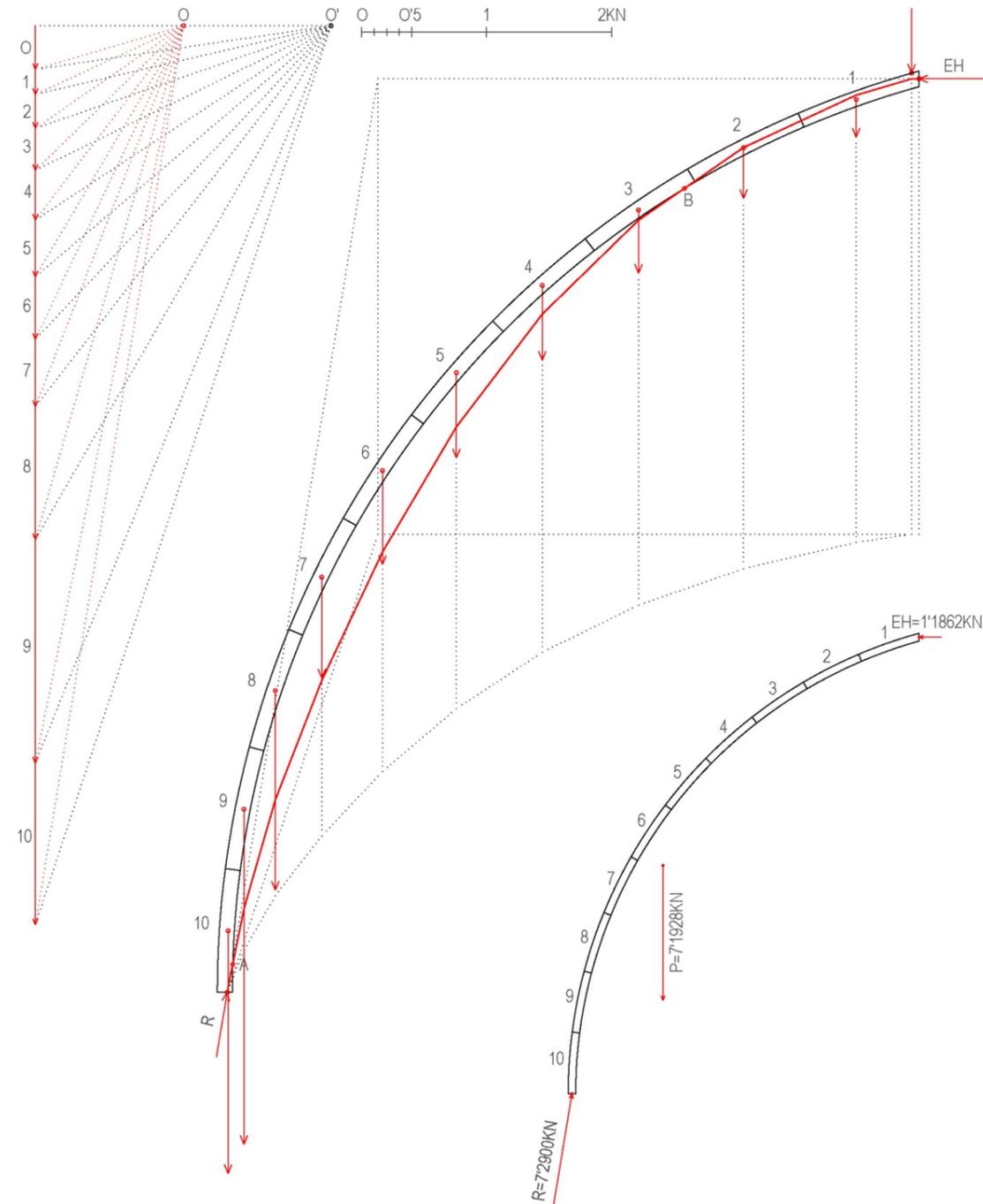


Figura 95: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 7. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 8. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0800m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de la sección en la base ($D_b=0'0800m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

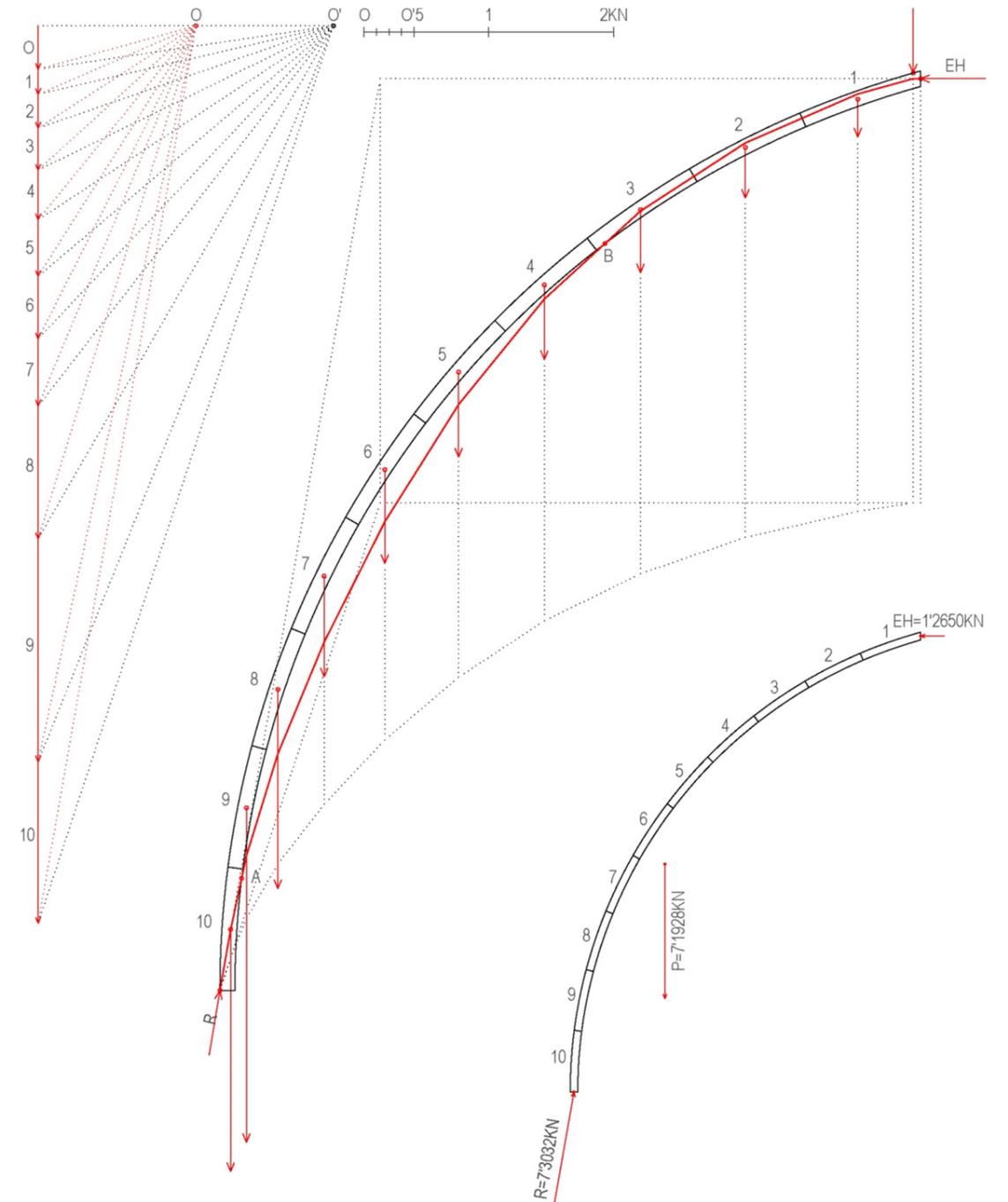


Figura 96: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 8. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 2. Situación 9. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0800m$)

Cúpula tabicada con relleno sin compactar hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de la sección en la base ($D_b=0'0800m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

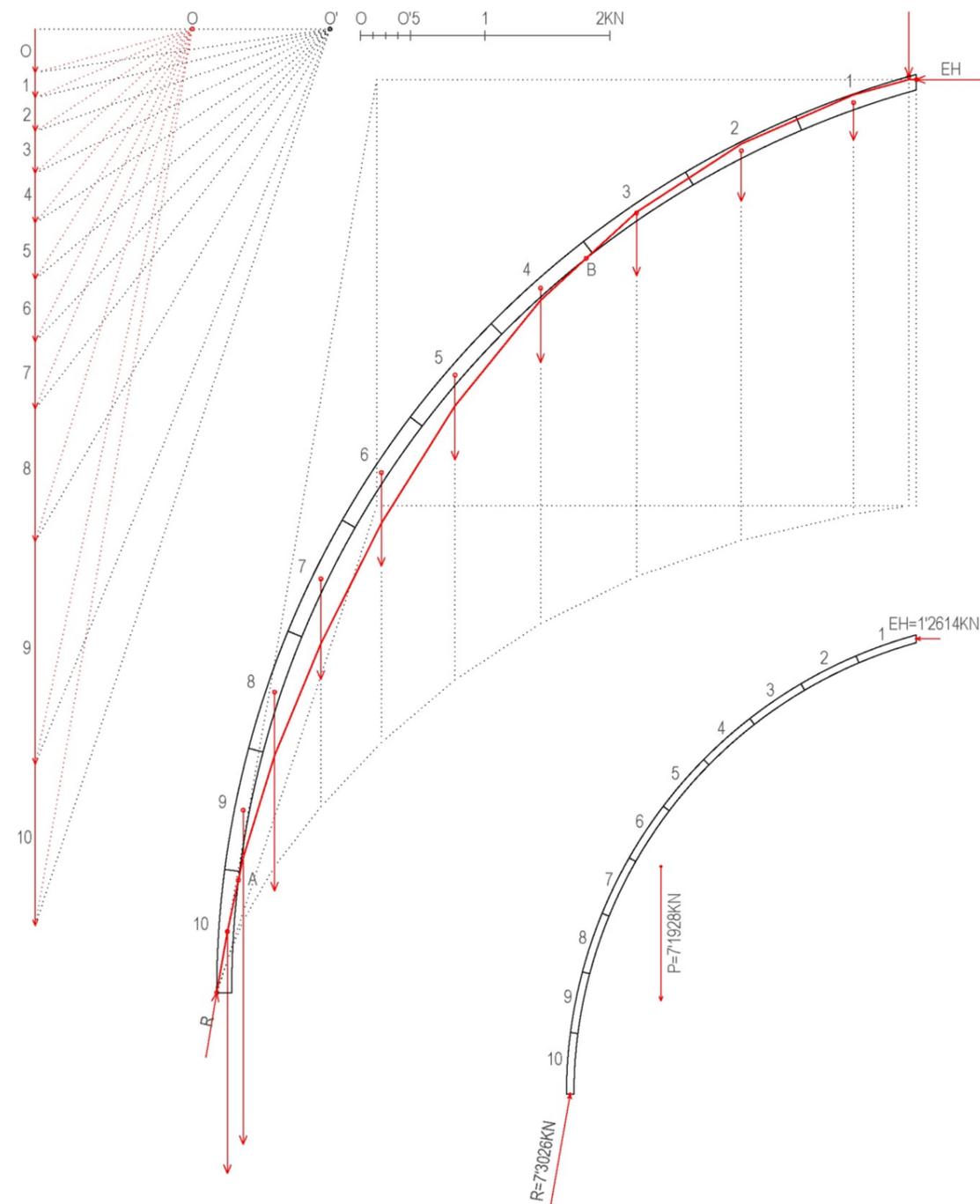


Figura 97: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 9. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.3. Hipótesis 3

Obtención de la línea de empujes de la cúpula, considerando para el cálculo uno de los cincuenta gajos en los que se ha dividido la misma, con un ángulo de 7'2°. Para esta hipótesis, el sector elegido no coincidirá con las partes de la cúpula en las que aparecen los lunetos, ya que estos serán objeto de estudio en el apartado dedicado a la Hipótesis 5. El sector que se va a estudiar en este apartado se ha dividido a su vez en 10 dovelas. Se considera que sobre la corona superior de la cúpula descansa todo el tabicado del cupulín, que tiene las mismas características que el de la cúpula principal, es decir, se considera que está conformado por dos hojas de rasilla más el mortero intermedio entre ambas, con un espesor total de 8cm. Por tanto, la cáscara de la cúpula soportará el peso transmitido por el tabicado del cupulín. El gajo o sector simétrico al que estamos estudiando tendrá exactamente las mismas características.

Por otro lado, en esta hipótesis se considera que la cúpula tiene un relleno a partir del extradós de la misma de 20cm de ancho, hasta una altura de 1'85m al igual que en las dos primeras hipótesis de cálculo. El relleno se considera que tiene un mayor grado de compactación que el de la segunda hipótesis, por lo que se considera que tiene capacidad de transmisión de cargas.

A partir de este modelo y con la estimación de cargas y centros de gravedad que aparecen en la Tabla 3, se efectúan los cálculos para la obtención de una línea de empujes con la que conseguir una situación de equilibrio con el mayor coeficiente de seguridad geométrico posible. Para ello será necesario hacer sucesivas variaciones en la posición de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje horizontal en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_a , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro punto es el de aplicación de la resultante en la dovela situada en la base 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.

Hipótesis 3: Cúpula e=8cm MACIZADO 20cm compactado en el 1/3 inferior					
Dovelas	Volumen (m ³)	P _{esp} fábrica ladrillo (KN/m ³)	Peso (KN)	X _g (m)	Y _g (m)
1	0'0112	18	0'2016	1'6860	4'7617
2	0'0150	18	0'2700	2'2867	4'5037
3	0'0187	18	0'3366	2'8471	4'1717
4	0'0221	18	0'3978	3'3610	3'7694
5	0'0252	18	0'4536	3'8192	3'3036
6	0'0278	18	0'5004	4'2137	2'7823
7	0'0299	18	0'5382	4'5376	2'2141
8	0'1764	18	3'1752	5'0085	1'6150
9	0'1674	18	3'0132	5'1054	1'0286
10	0'1278	18	2'3004	5'1471	0'3434
1/50 cupulín	0'0194	18	0'3492	--	--

Tabla 5: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 3.

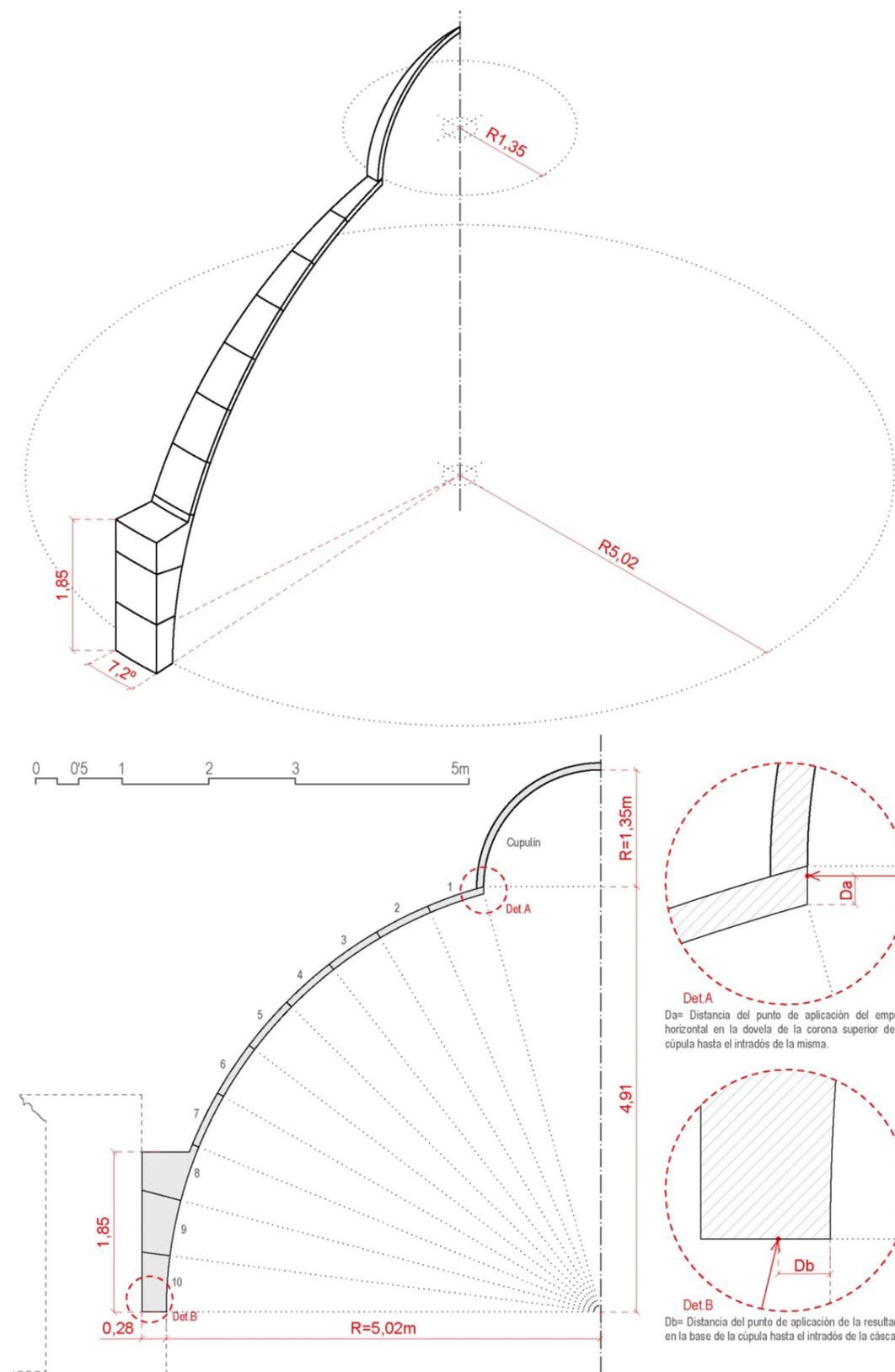


Figura 98: Representación gráfica de la Hipótesis 3. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 1. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'1400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'1400m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

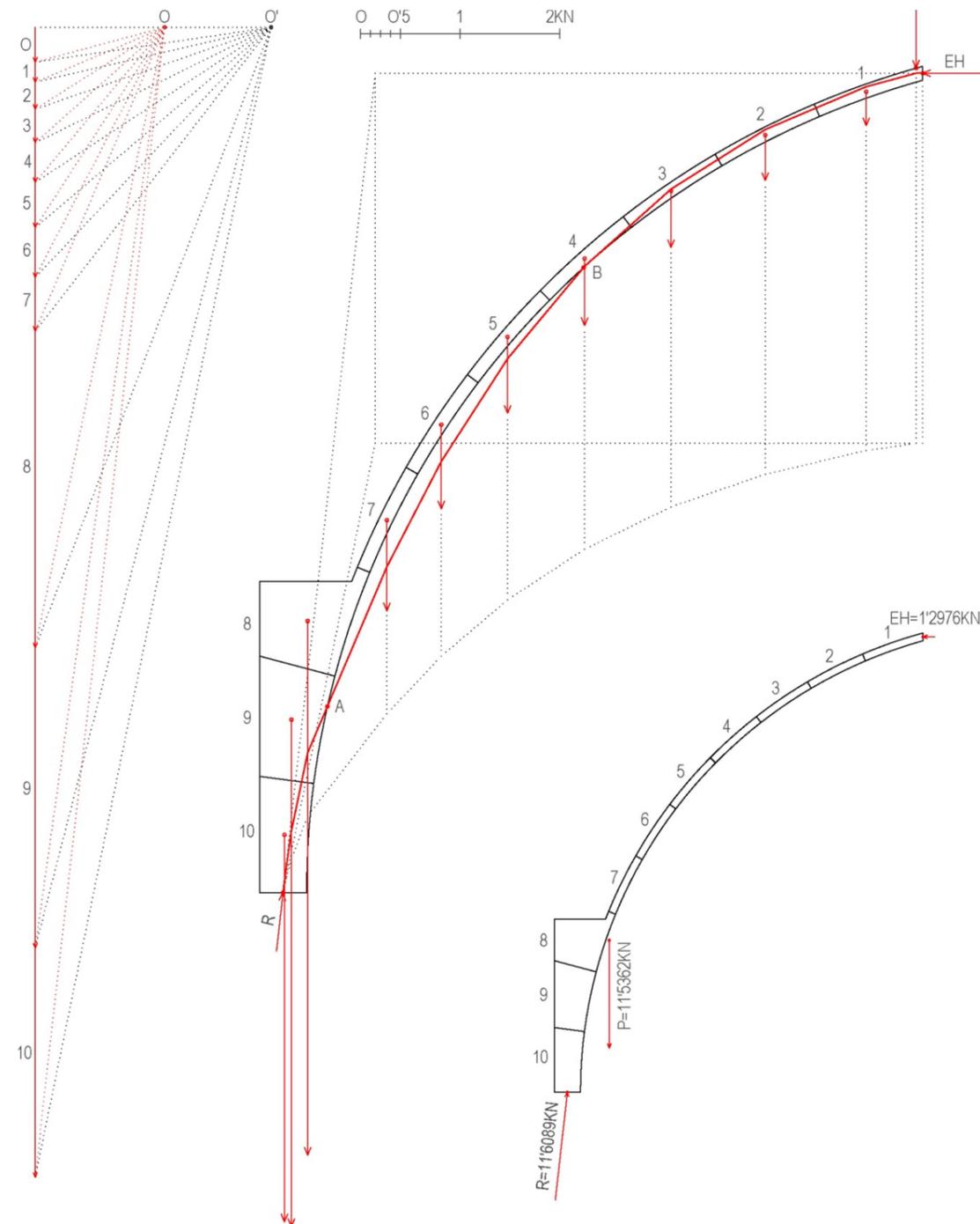


Figura 99: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 1. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 2. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'1400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'1400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

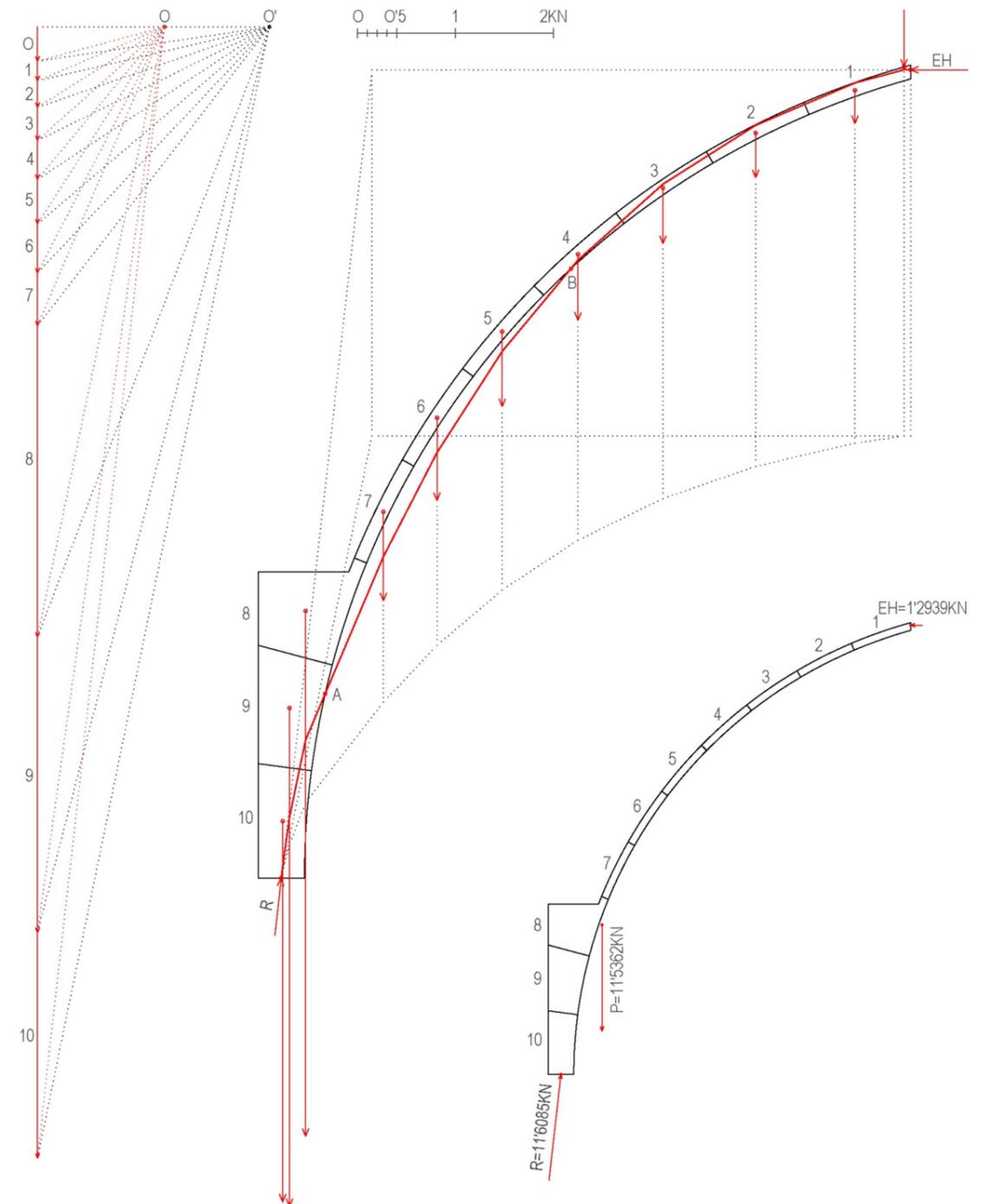


Figura 100: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 2. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 3. ($D_a=0'0800m$ $D_b=0'1400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'1400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0800m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B y por el extradós entre los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

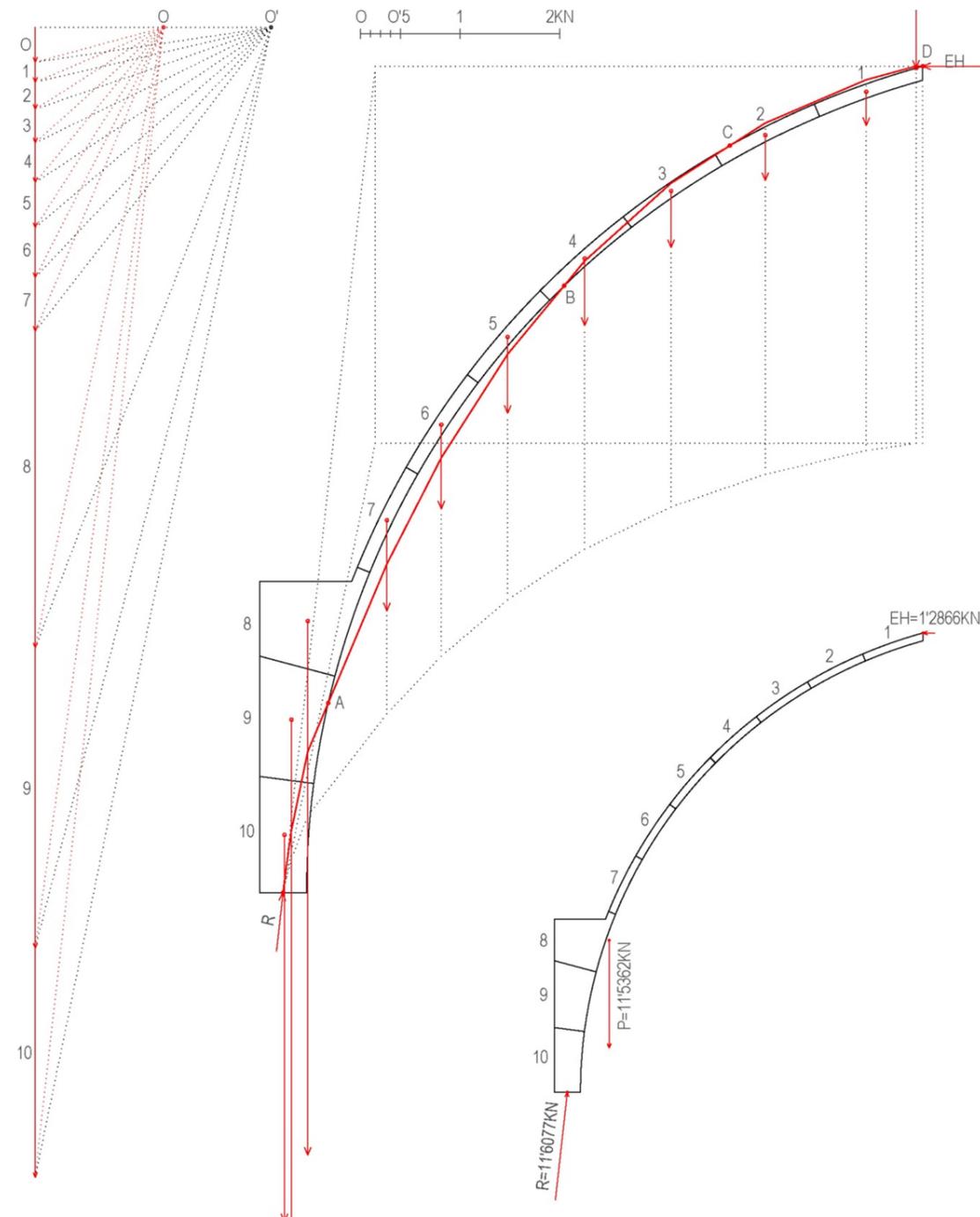


Figura 101: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 3. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 4. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'1400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'1400m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

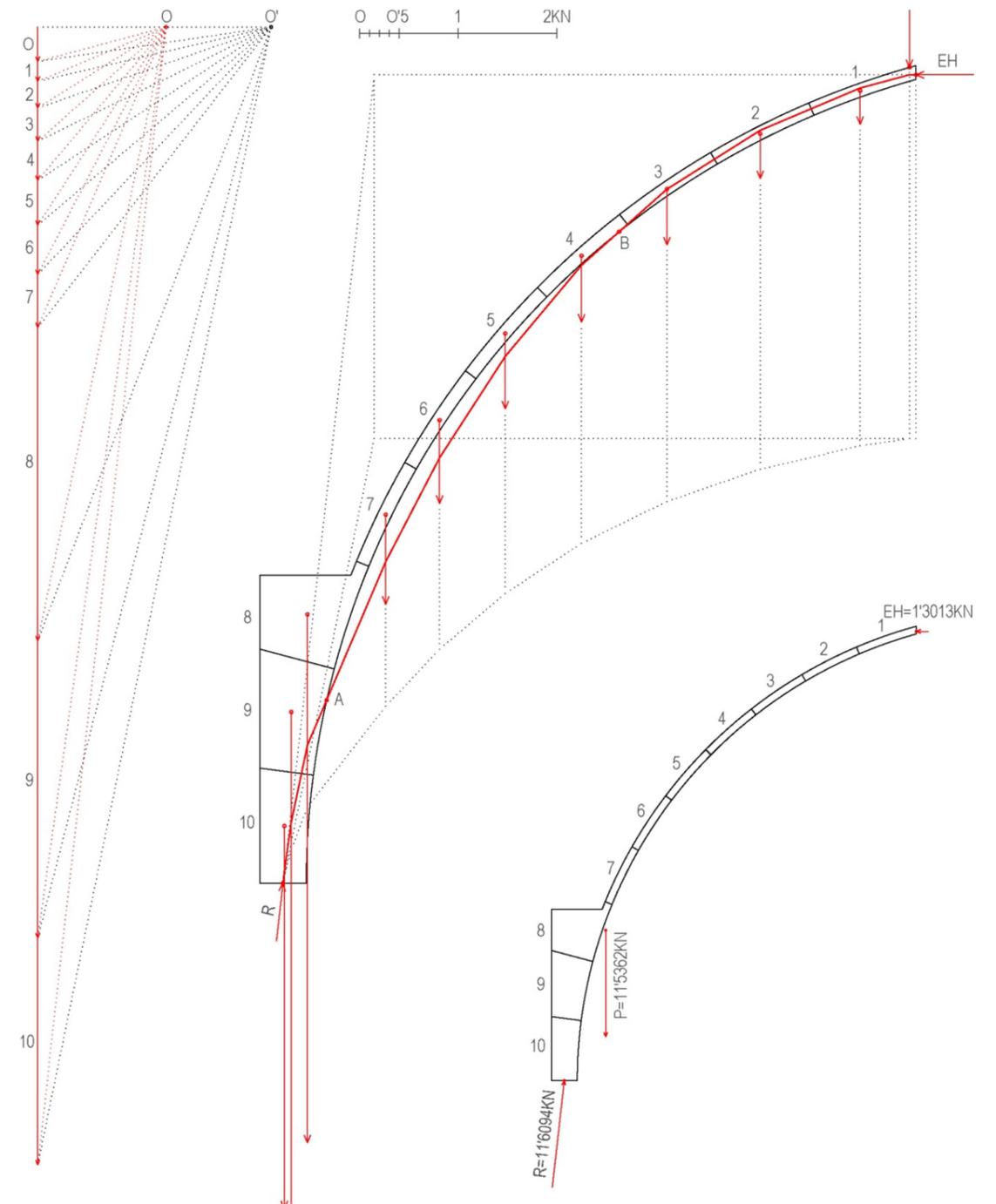


Figura 102: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 4. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 5. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'1400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'1400m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

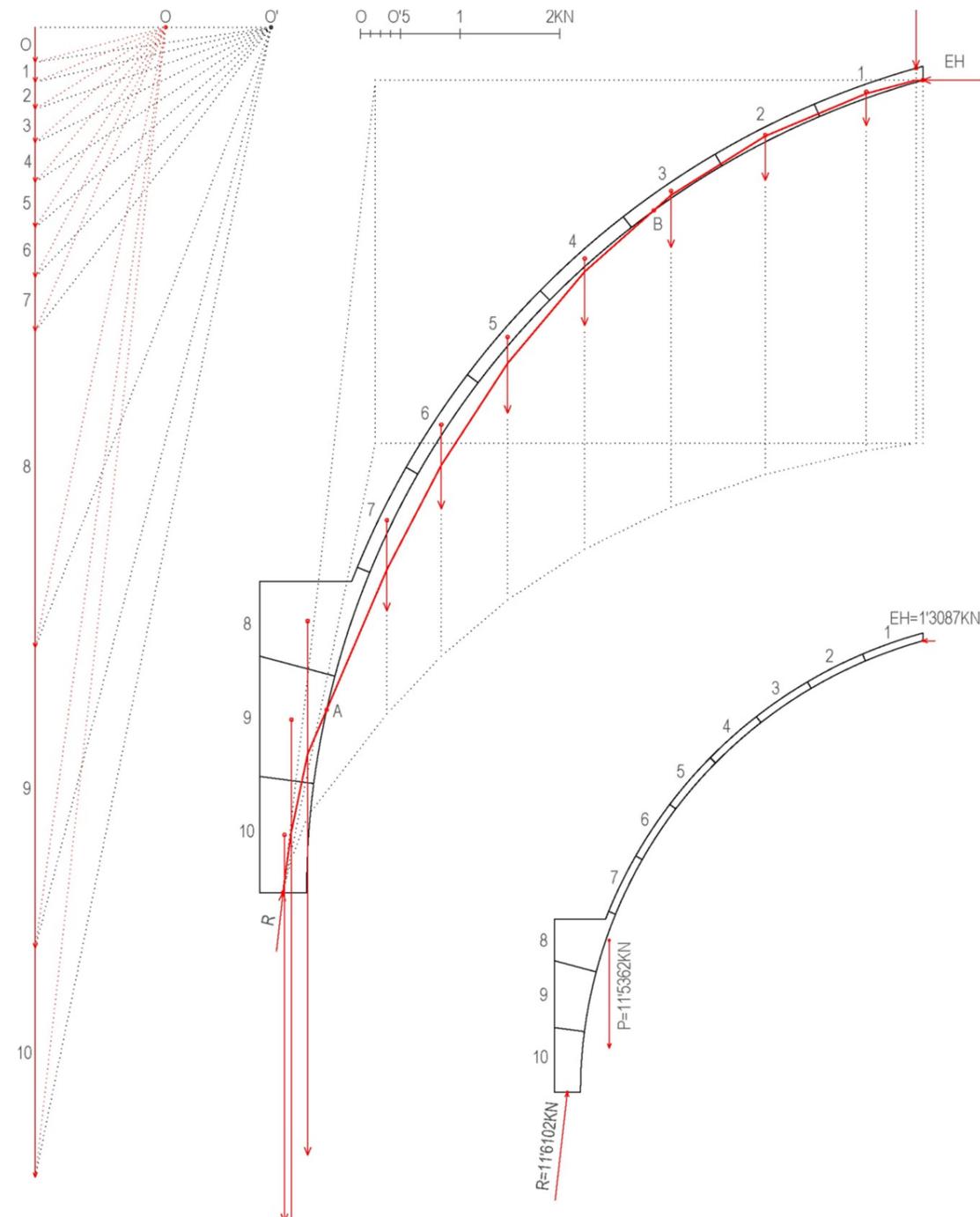


Figura 103: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 5. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 6. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'1867m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'1867m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B y los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

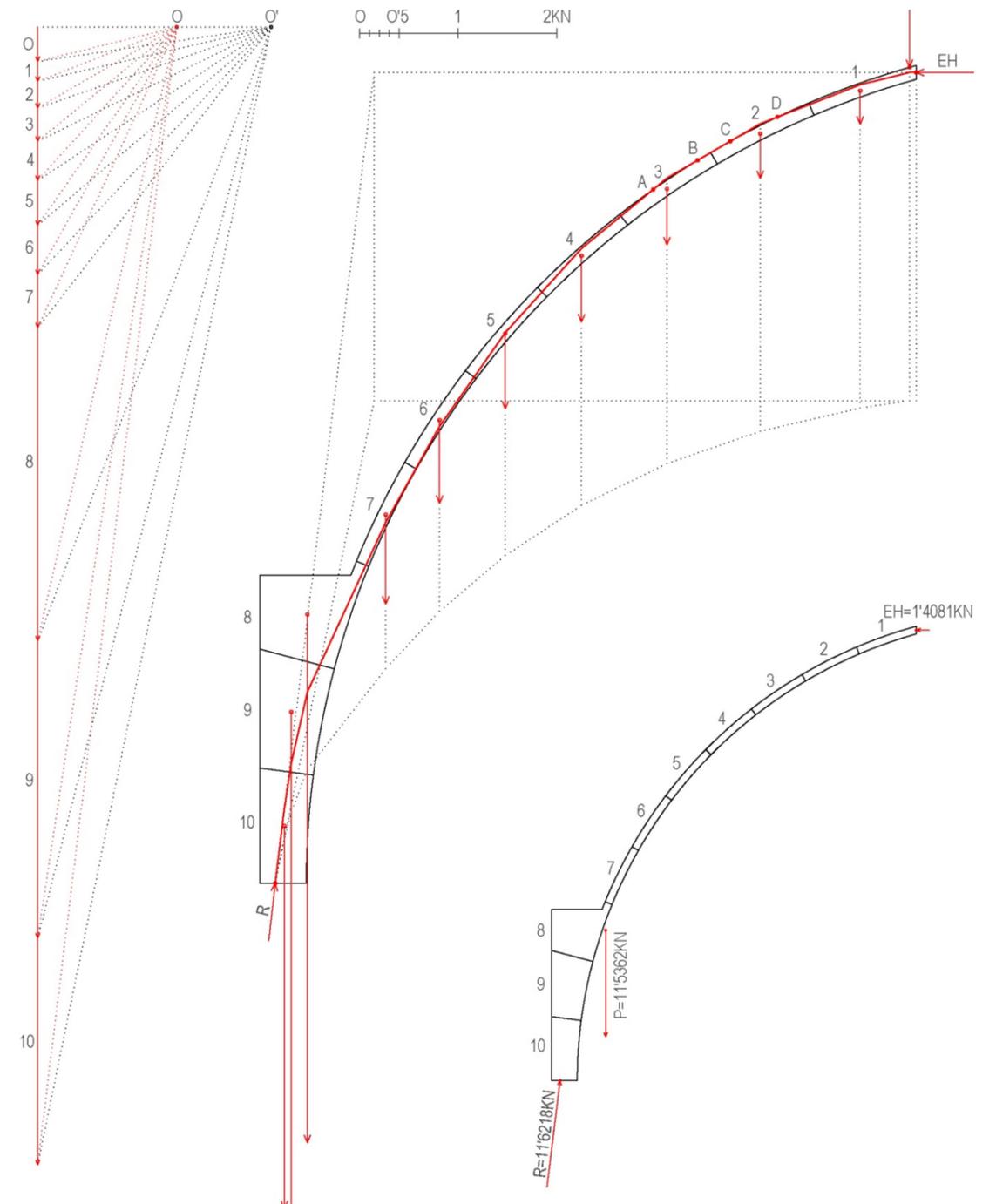


Figura 104: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 6. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 7. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'1867m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_a=0'1867m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

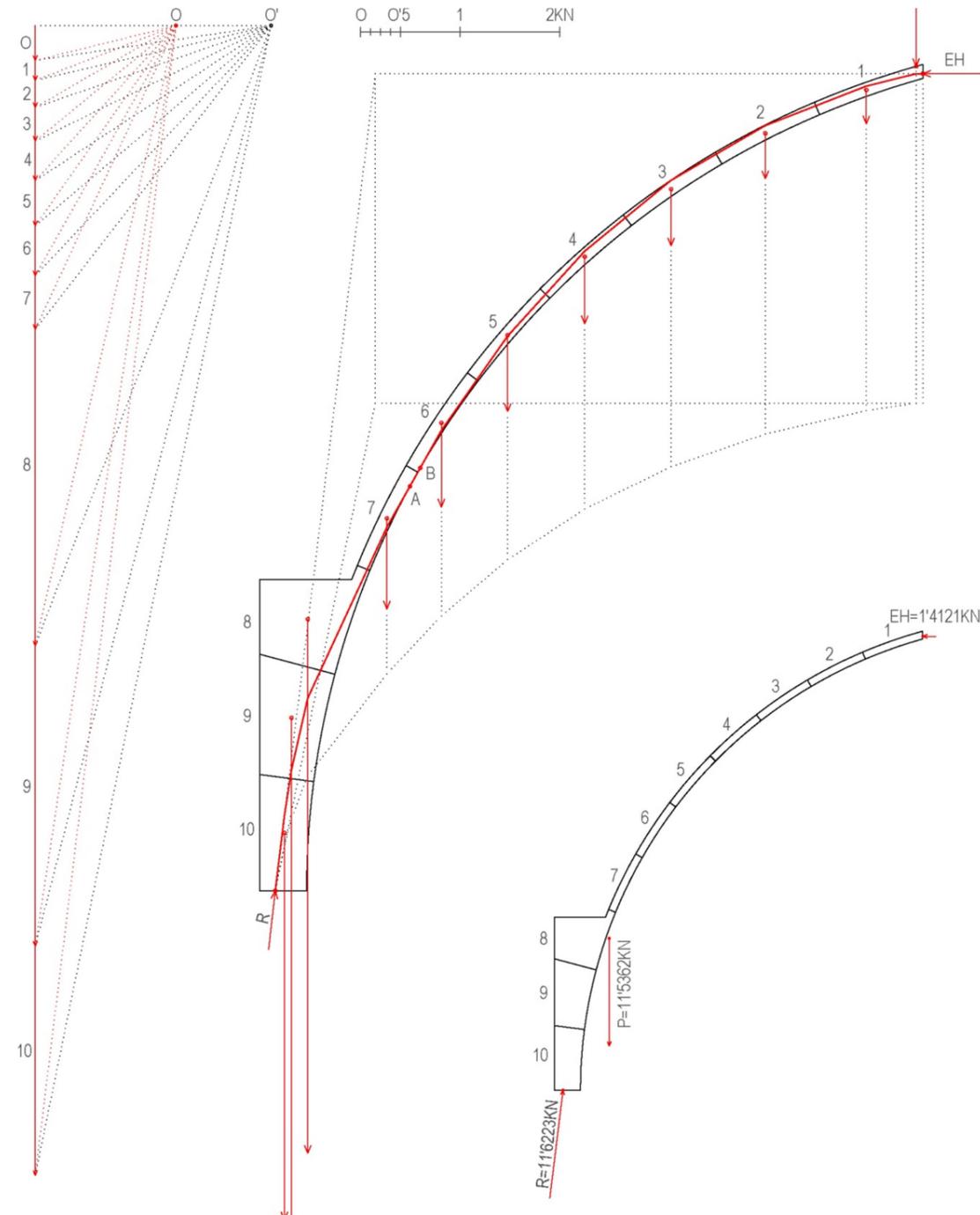


Figura 105: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 7. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 8. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'1867m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_a=0'1867m$) y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el intradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

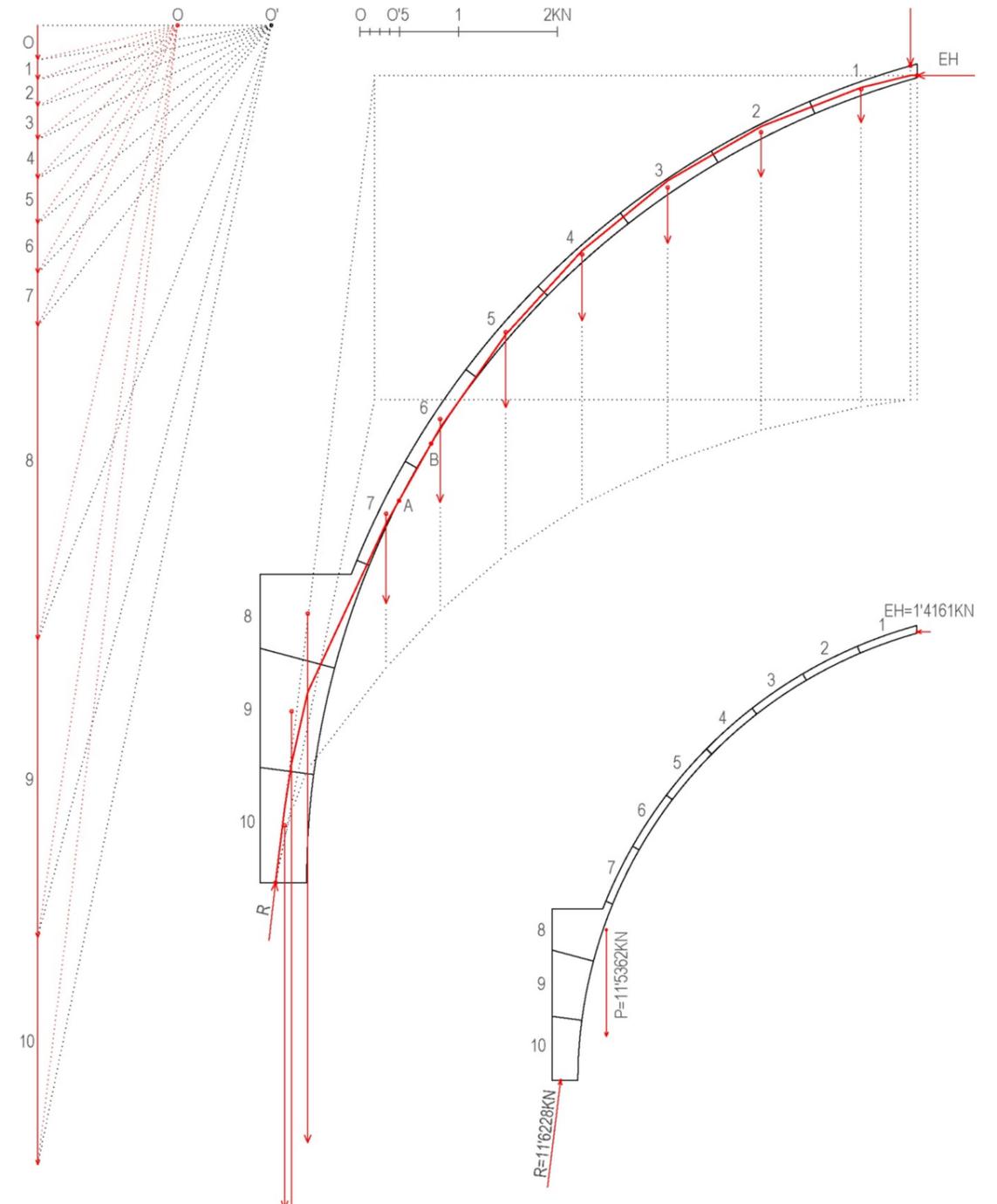


Figura 106: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 8. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 9. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'2800m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de la sección en la base ($D_b=0'2800m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

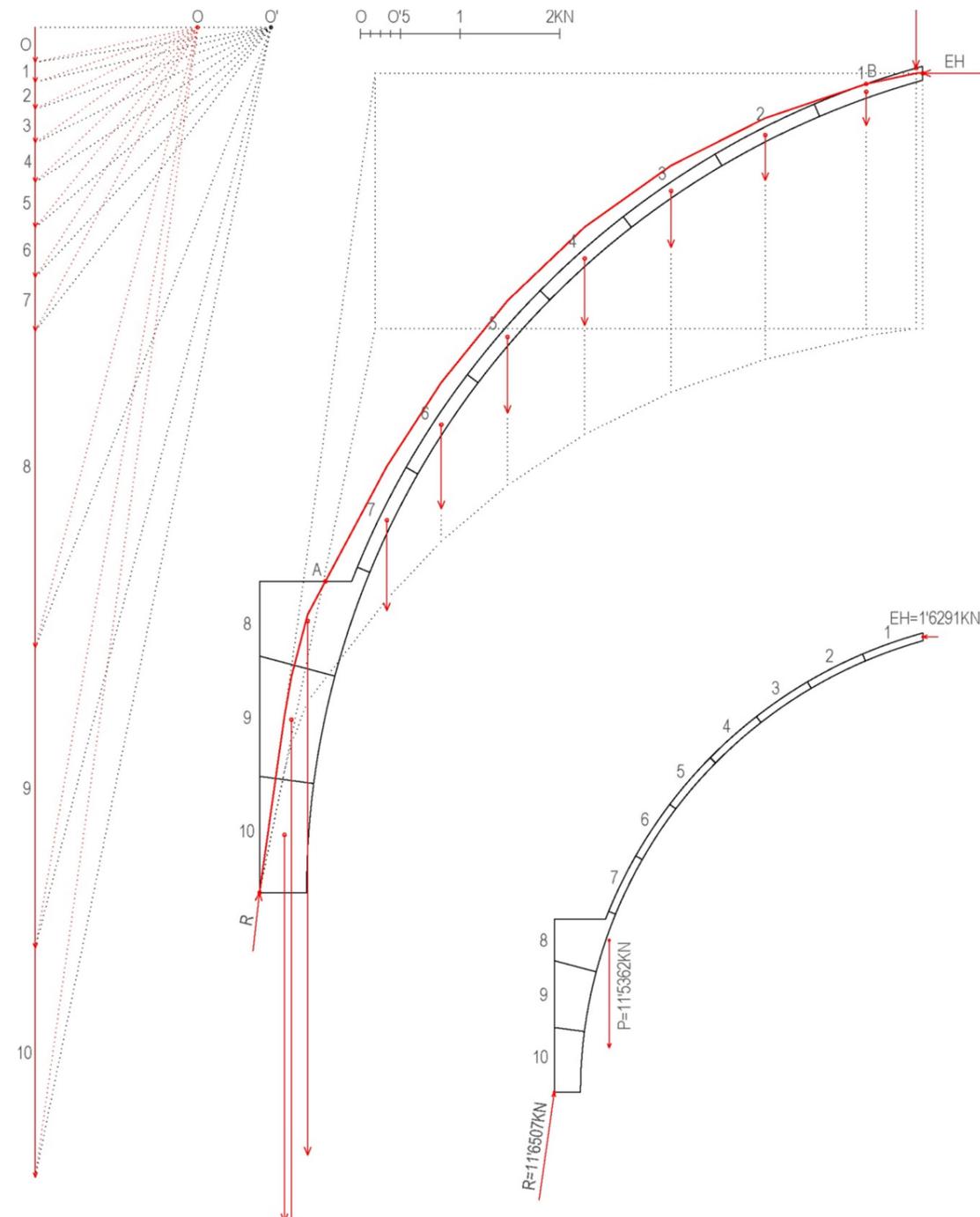


Figura 107: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 9. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 10. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'2333m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'2333m$ en la base y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

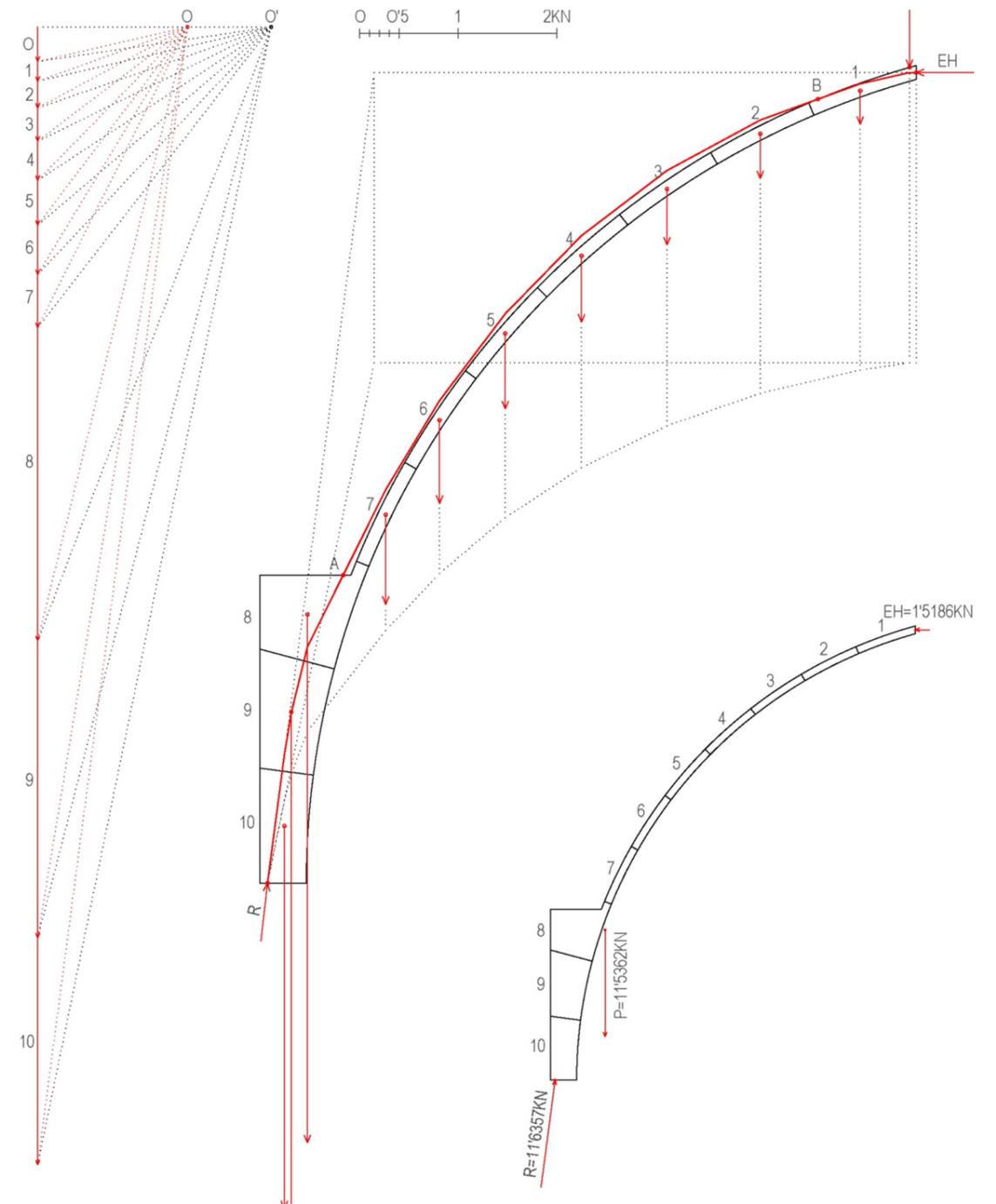


Figura 108: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 10. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 11. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'2100m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'2100m$ en la base y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

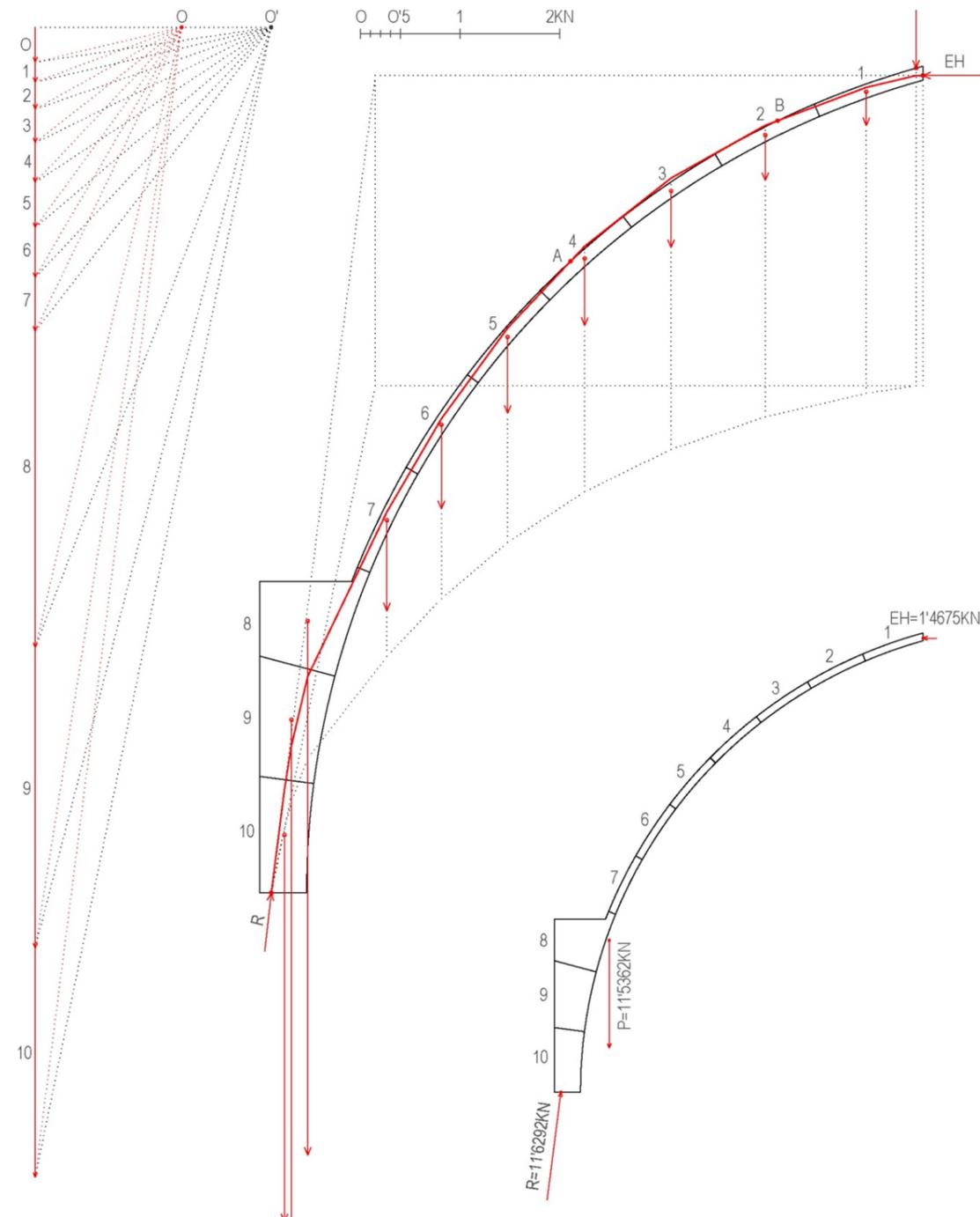


Figura 109: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 11. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 12. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'2100m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'2100m$ en la base y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B y los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

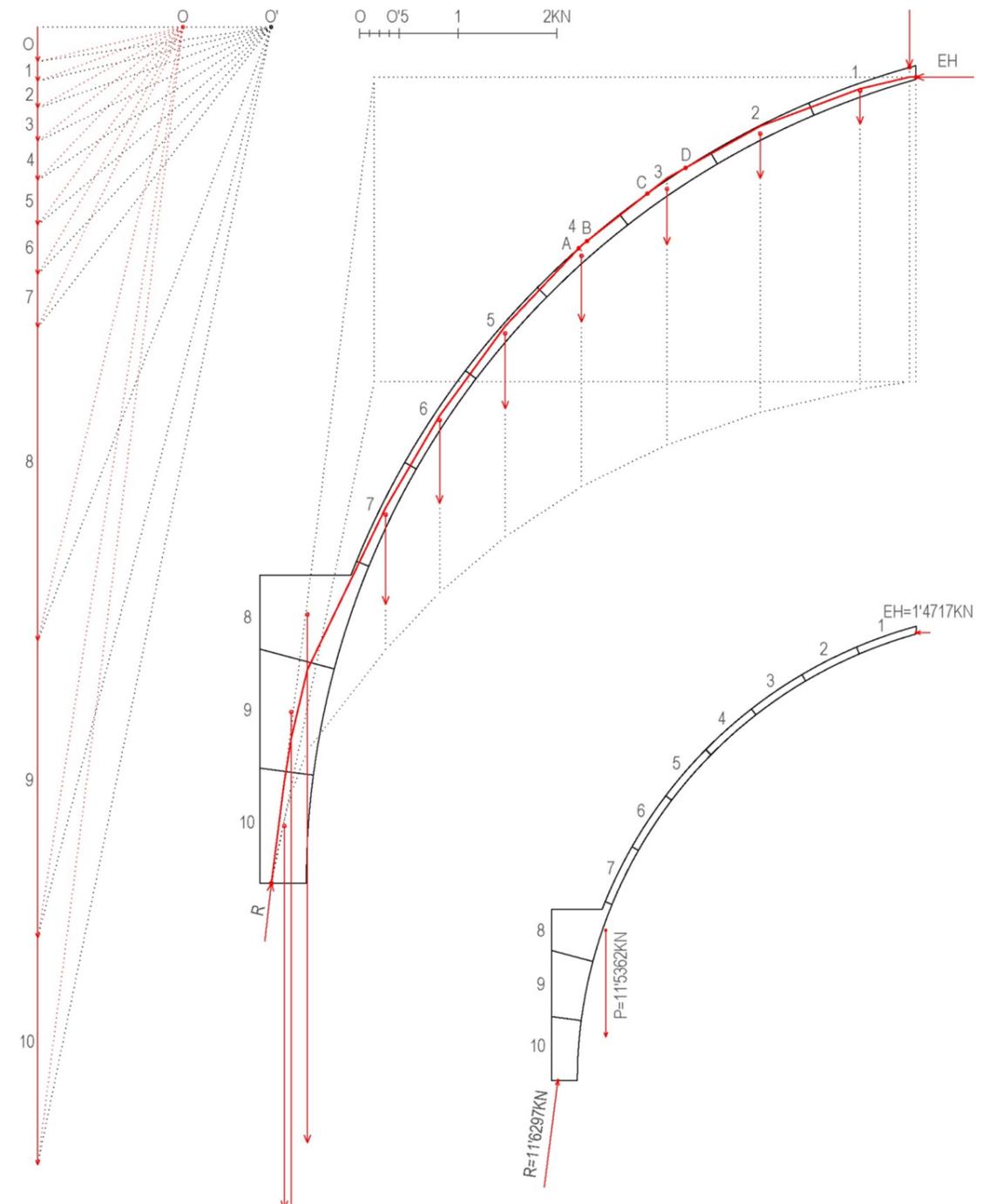


Figura 110: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 12. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 13. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'2100m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'2100m$ en la base y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'012**.

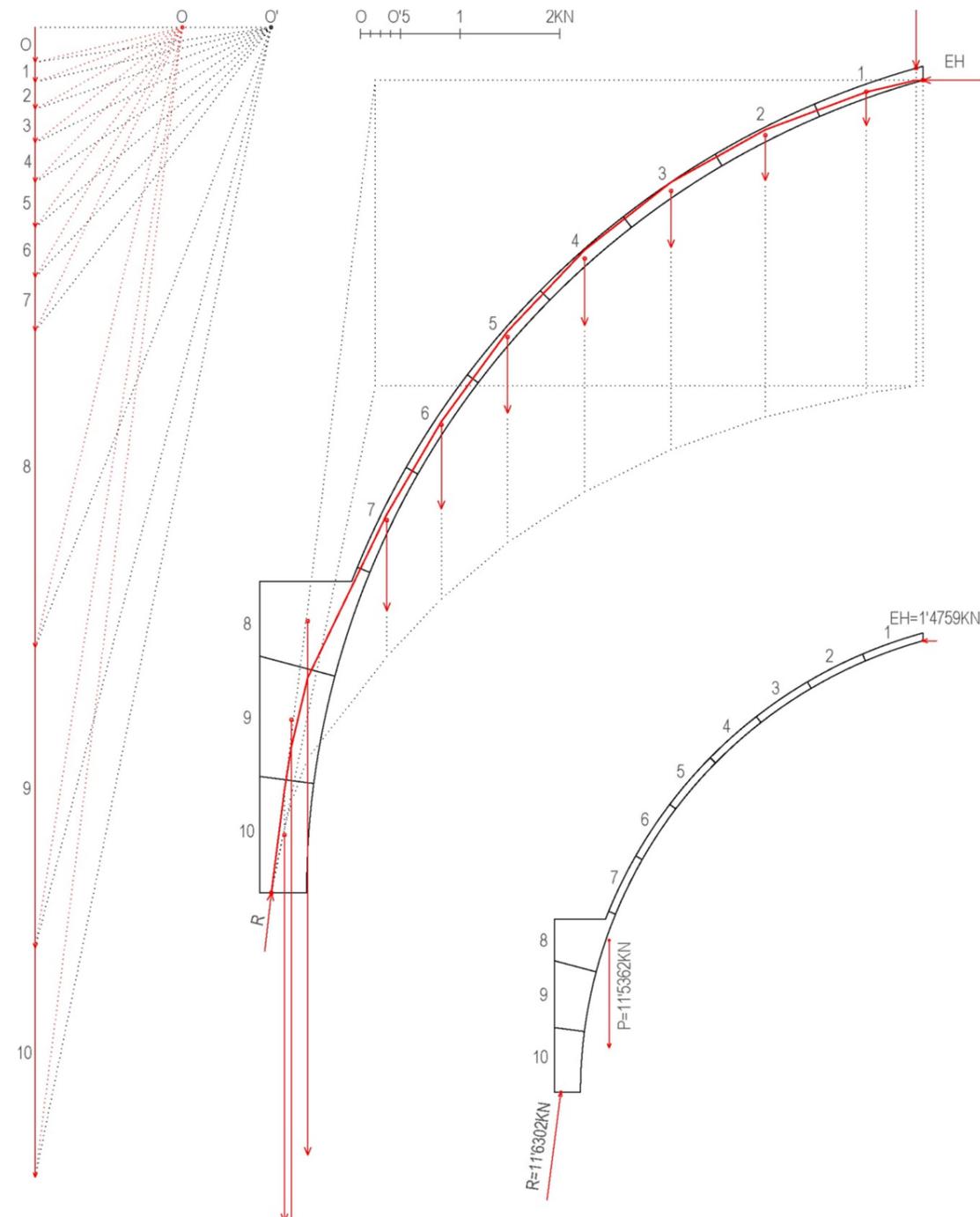


Figura 111: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 13. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 14. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'1983m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'1983m$ en la base y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

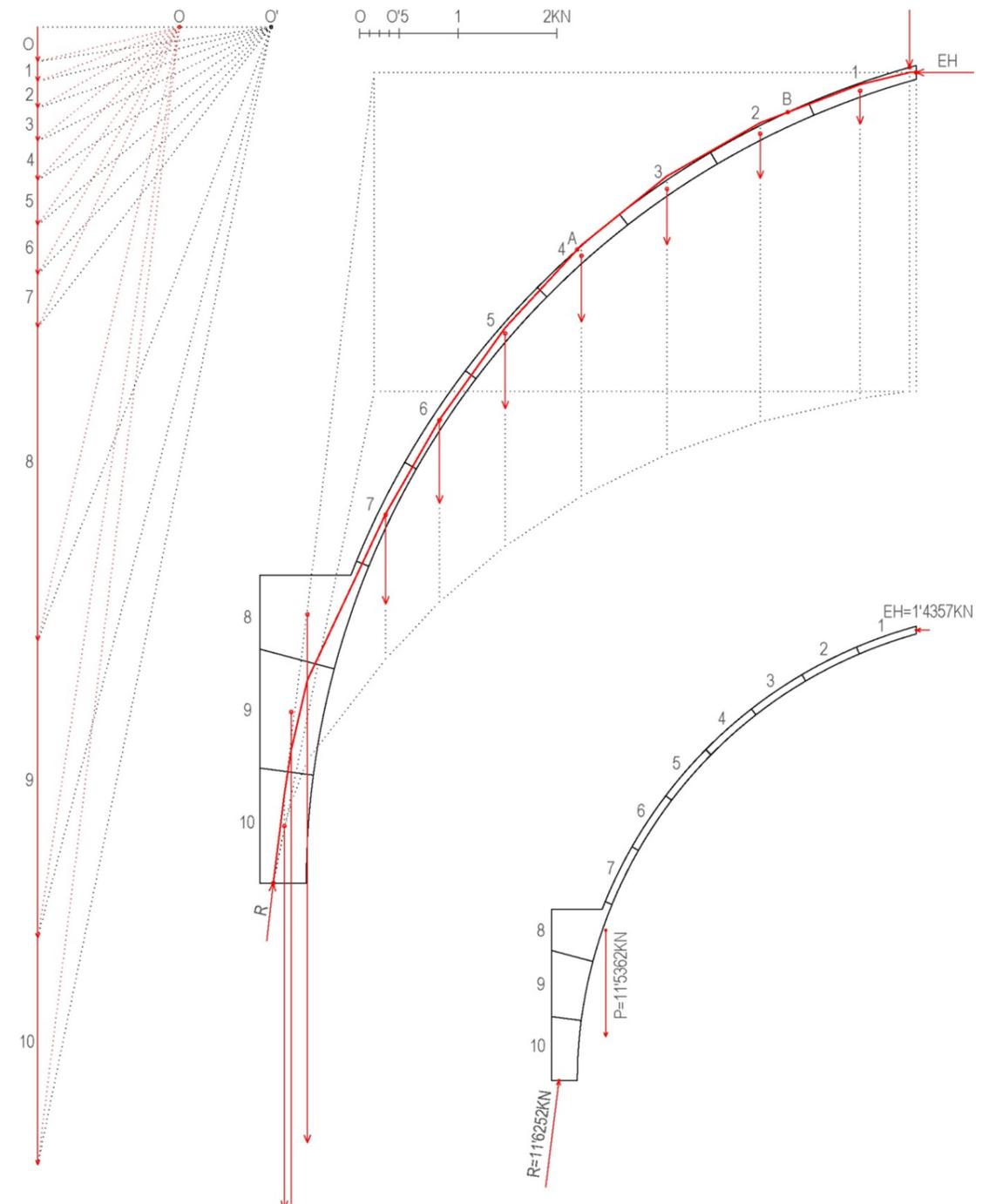


Figura 112: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 14. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 15. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'1983m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'1983m$ en la base y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B y los puntos C y D. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

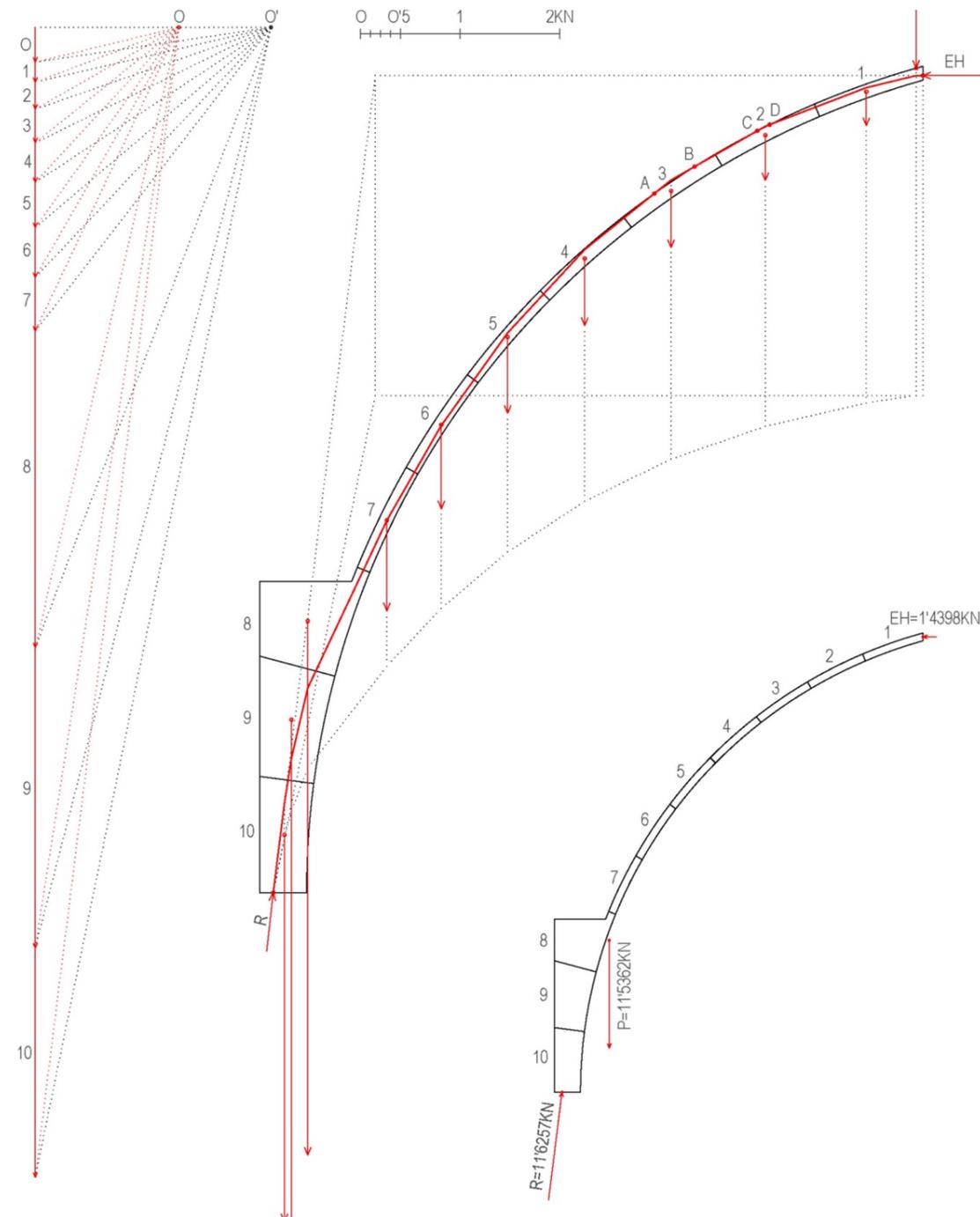


Figura 113: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 15. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 16. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'1983m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'1983m$ en la base y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'212**.

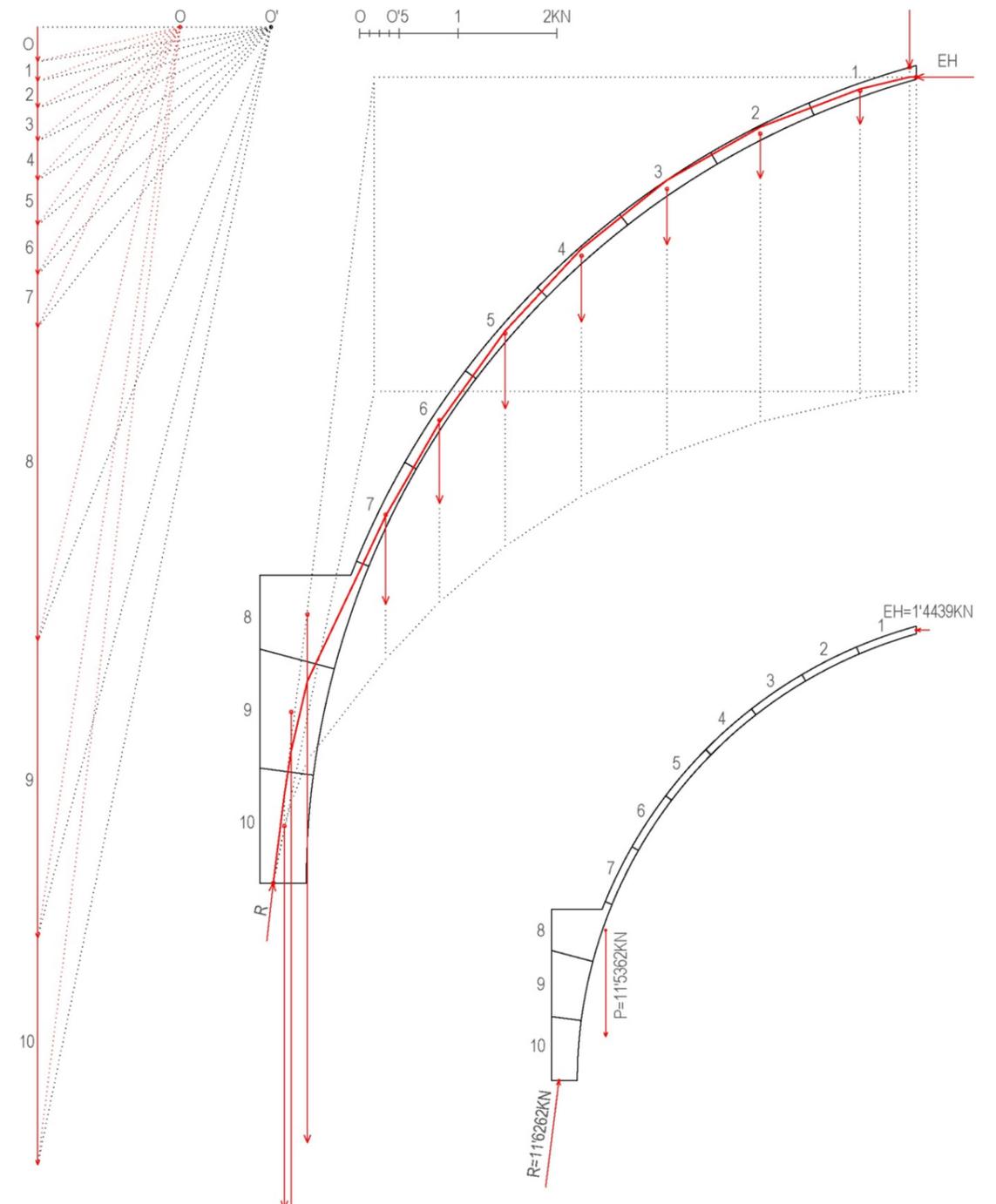


Figura 114: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 16. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 3. Situación 17. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'1983m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de 20cm de ancho hasta una altura de 1'85m. Se impone la condición de que la reacción pase a una distancia $D_b=0'1983m$ en la base y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'154**.

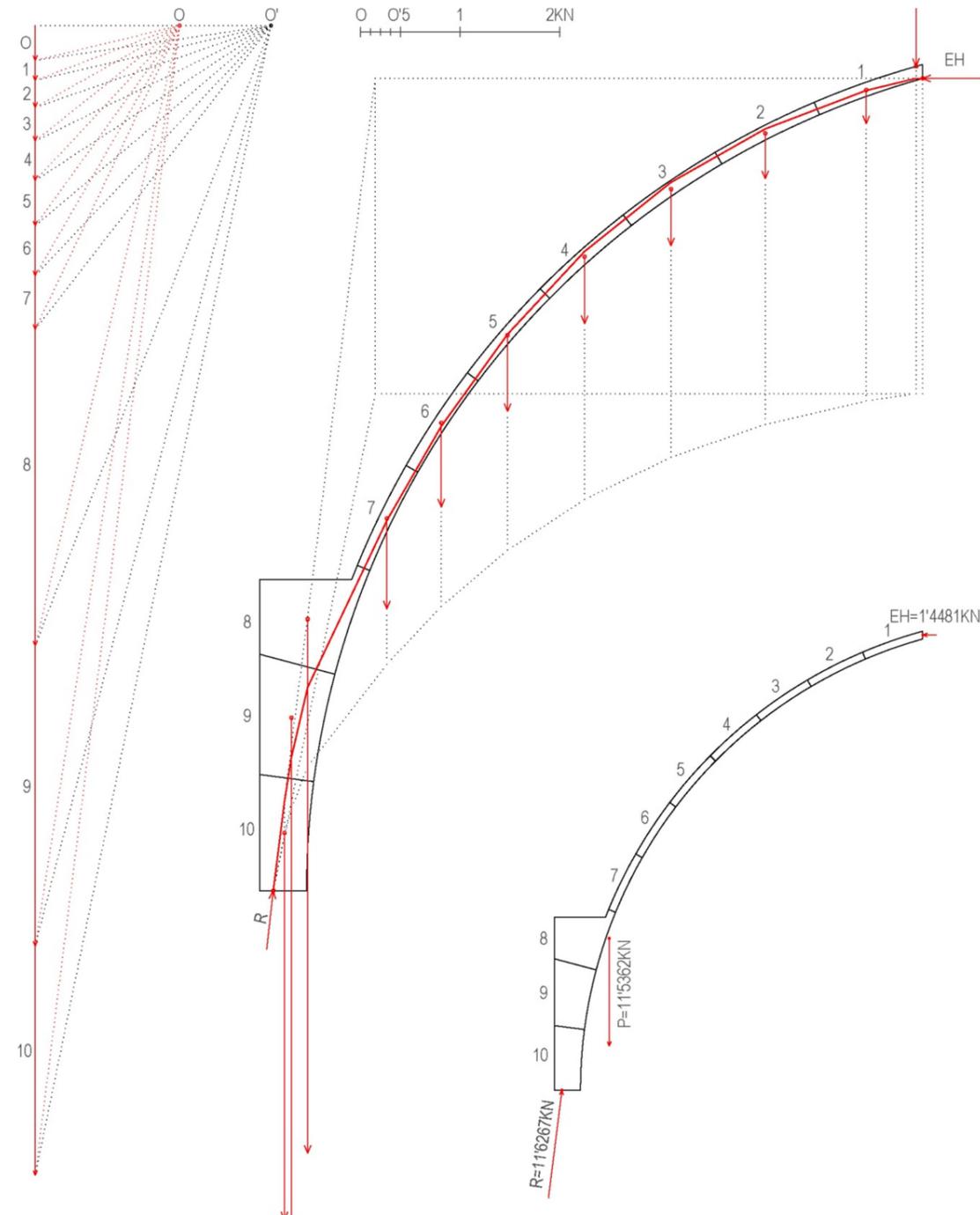


Figura 115: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 17. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.4. Hipótesis 4

Obtención de la línea de empujes de la cúpula, considerando para el cálculo uno de los cincuenta gajos en los que se ha dividido la misma, con un ángulo de $7'2''$. Para esta hipótesis, el sector elegido no coincidirá con las partes de la cúpula en las que aparecen los lunetos, ya que estos serán objeto de estudio en el apartado dedicado a la Hipótesis 5. El sector que se va a estudiar en este apartado se ha dividido a su vez en 10 dovelas. Se considera que sobre la corona superior de la cúpula descansa todo el tabicado del cupulín, que tiene las mismas características que el de la cúpula principal, es decir, se considera que está conformado por dos hojas de rasilla más el mortero intermedio entre ambas, con un espesor total de 8cm. Por tanto, la cáscara de la cúpula soportará el peso transmitido por el tabicado del cupulín. El gajo o sector simétrico al que estamos estudiando tendrá exactamente las mismas características.

Por otro lado, en esta hipótesis se considera que la cúpula tiene un relleno a partir del extradós de la misma igual al ancho del muro en el que se apoya y hasta una altura de $1'85m$. El relleno tendrá capacidad de transmisión de cargas, por lo que en este caso la cúpula se calculará como si se tratase de una cúpula rebajada.

A partir de este modelo y con la estimación de cargas y centros de gravedad que aparecen en la Tabla 4, se efectúan los cálculos para la obtención de una línea de empujes con la que conseguir una situación de equilibrio con el mayor coeficiente de seguridad geométrico posible. Para ello será necesario hacer sucesivas variaciones en la posición de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje horizontal en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_a , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro punto es el de aplicación de la resultante en la dovela situada en la base 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.

Hipótesis 4: Cúpula e=8cm MACIZADO todo el muro (cúpula rebajada)					
Dovelas	Volumen (m ³)	P _{esp} fábrica ladrillo (KN/m ³)	Peso (KN)	X _g (m)	Y _g (m)
1	0'0073	18	0'1314	1'5792	4'8003
2	0'0095	18	0'1710	2'0118	4'6351
3	0'0115	18	0'2070	2'4323	4'4286
4	0'0134	18	0'2412	2'8323	4'1838
5	0'0152	18	0'2736	3'2081	3'9028
6	0'0168	18	0'3024	3'5562	3'5879
7	0'0183	18	0'3294	3'8738	3'2420
8	0'0197	18	0'3546	4'1579	2'8681
9	0'0208	18	0'3744	4'4060	2'4694
10	0'0211	18	0'3798	4'6133	2'0573
1/50 cupulín	0'0194	18	0'3492	--	--

Tabla 6: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 4.

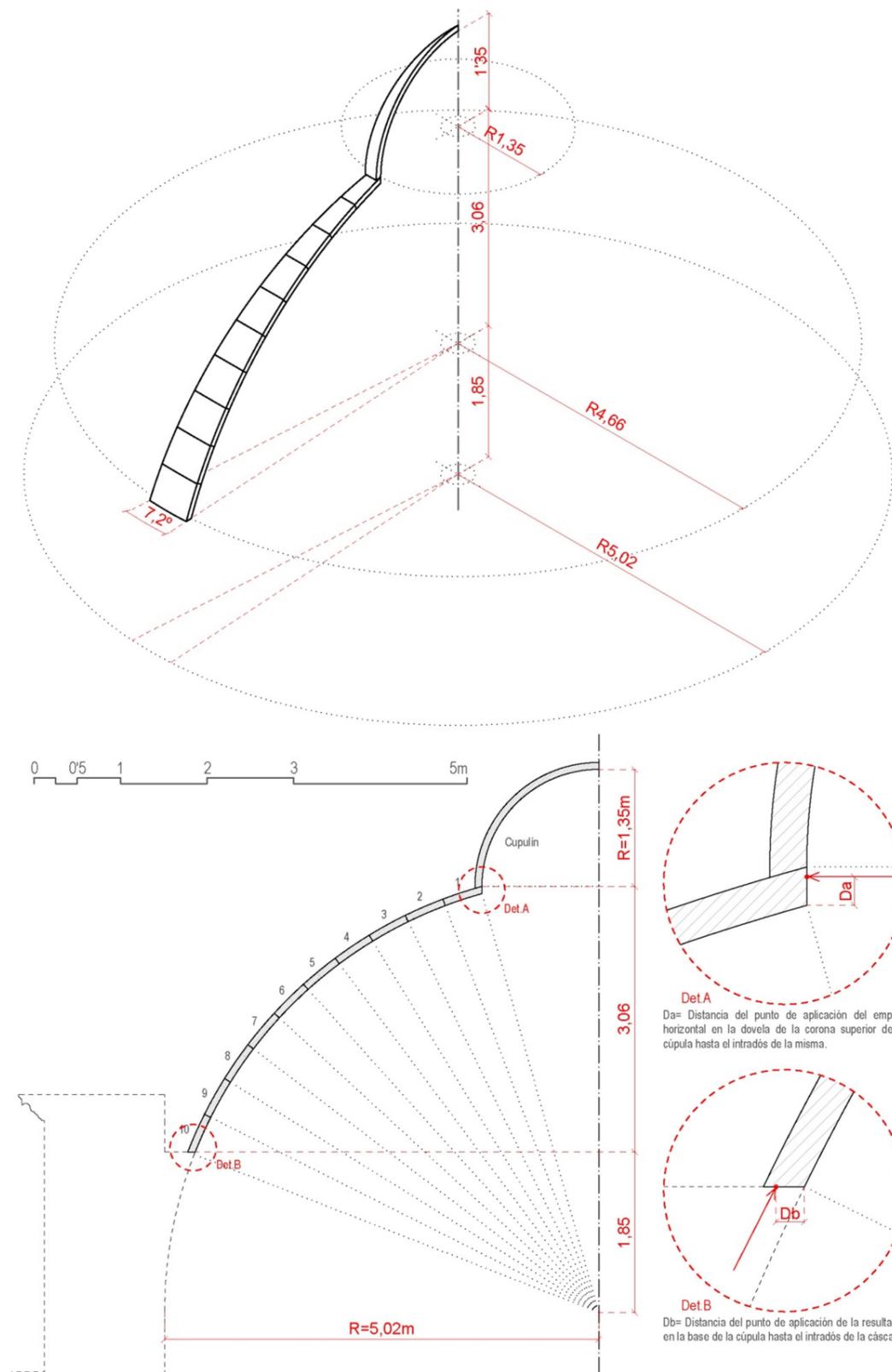


Figura 116: Representación gráfica de la Hipótesis 4. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 1. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

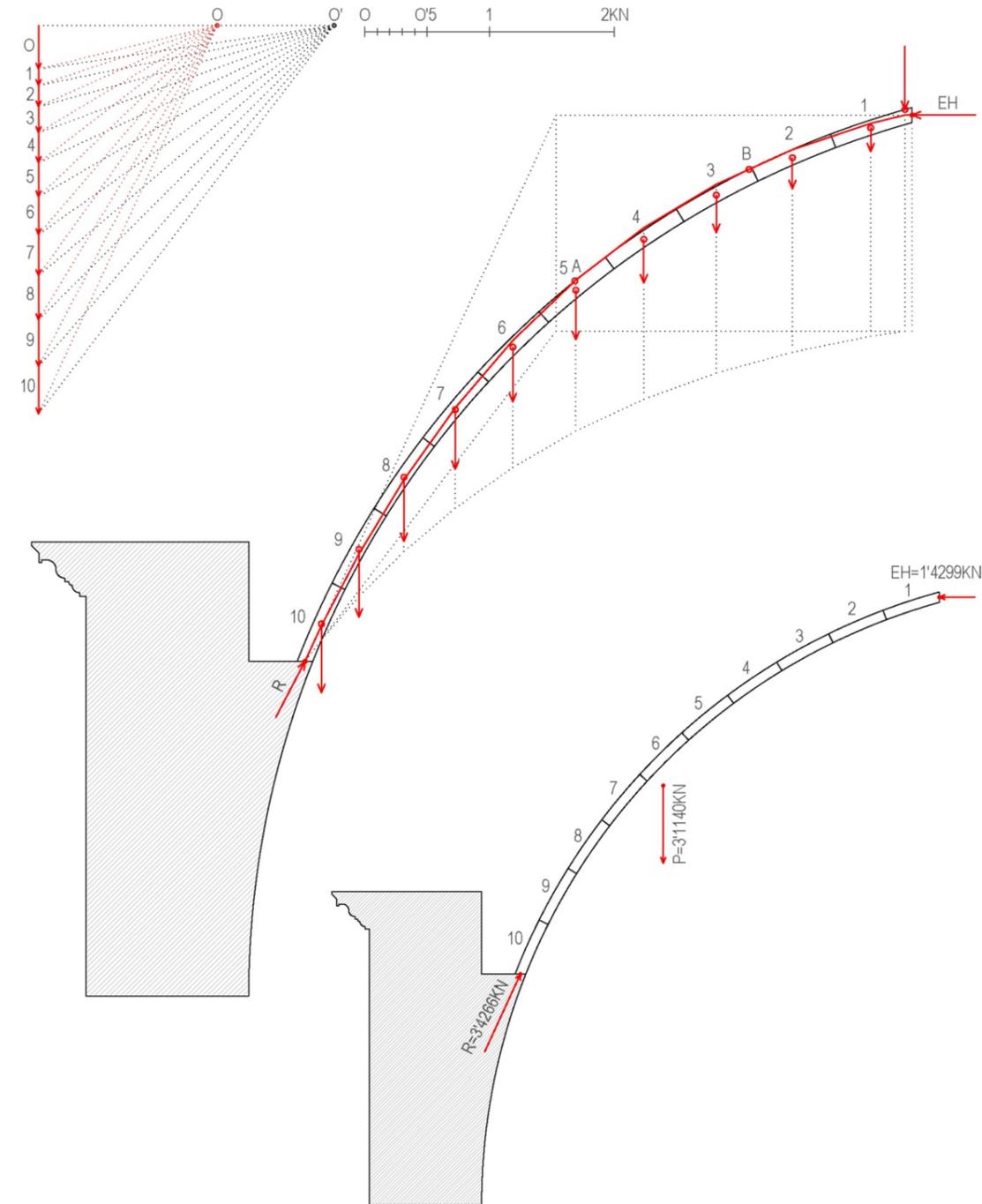


Figura 117: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 1. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 2. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

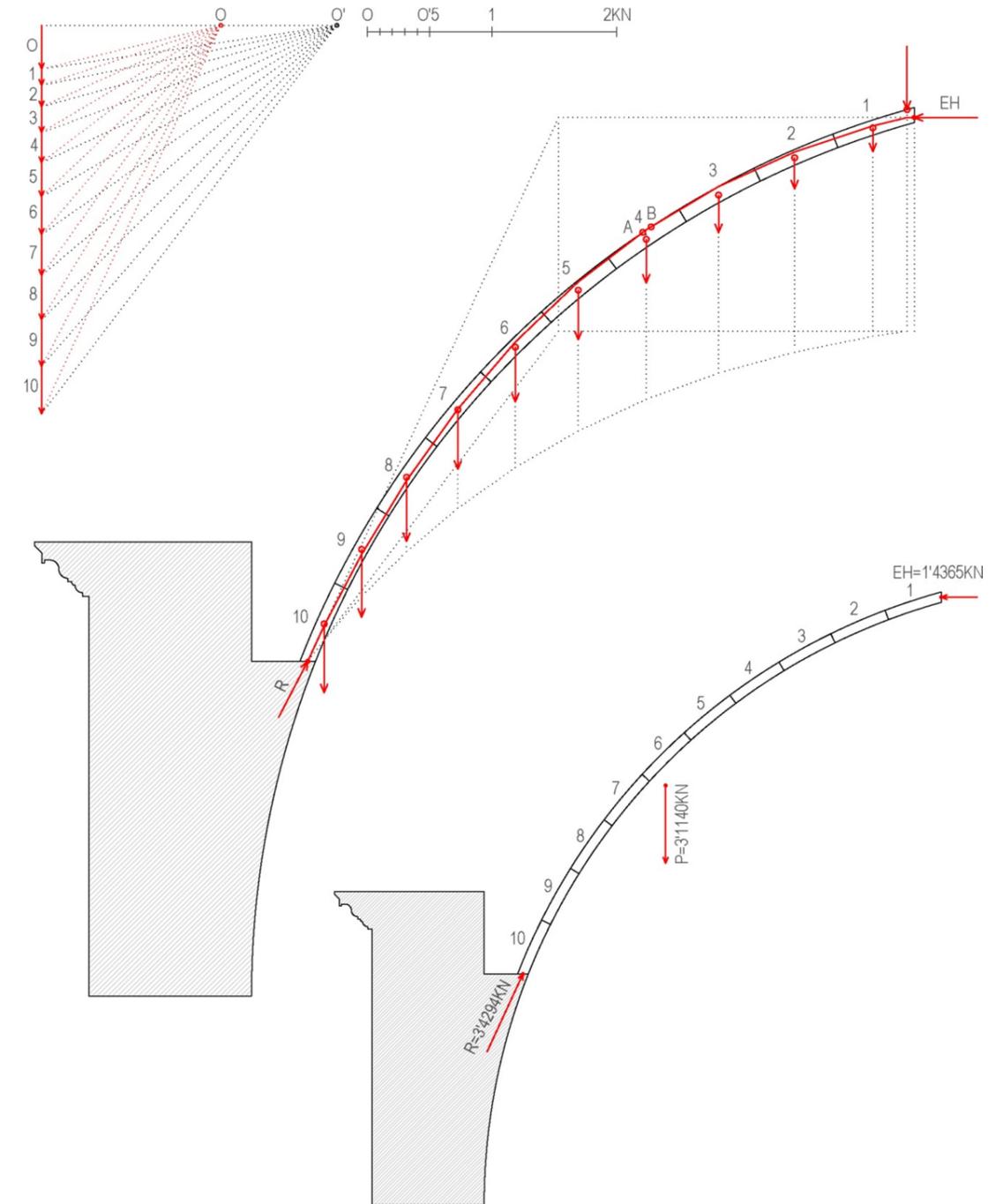


Figura 118: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 2. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 3. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'248**.

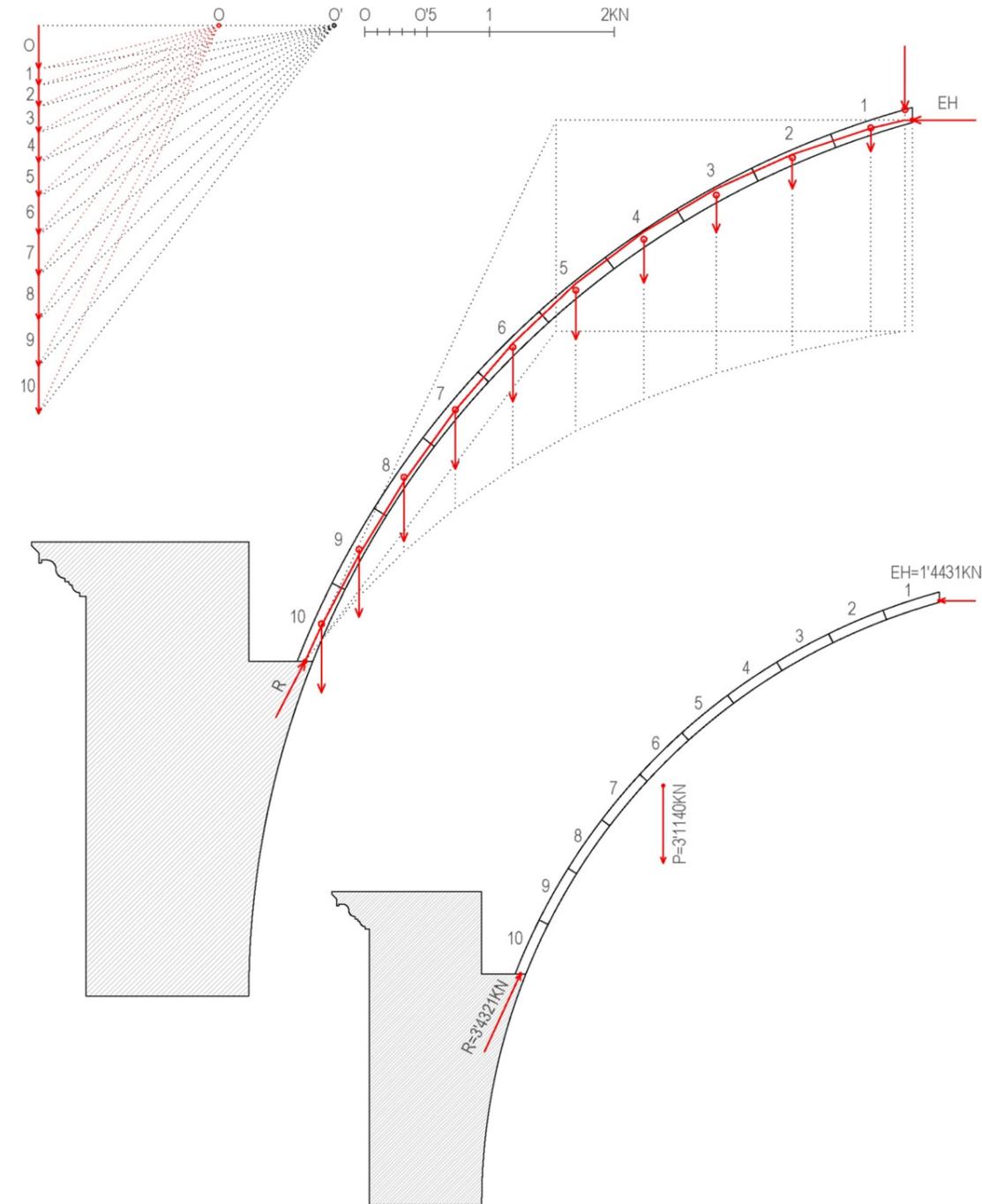


Figura 119: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 3. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 4. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'161**.

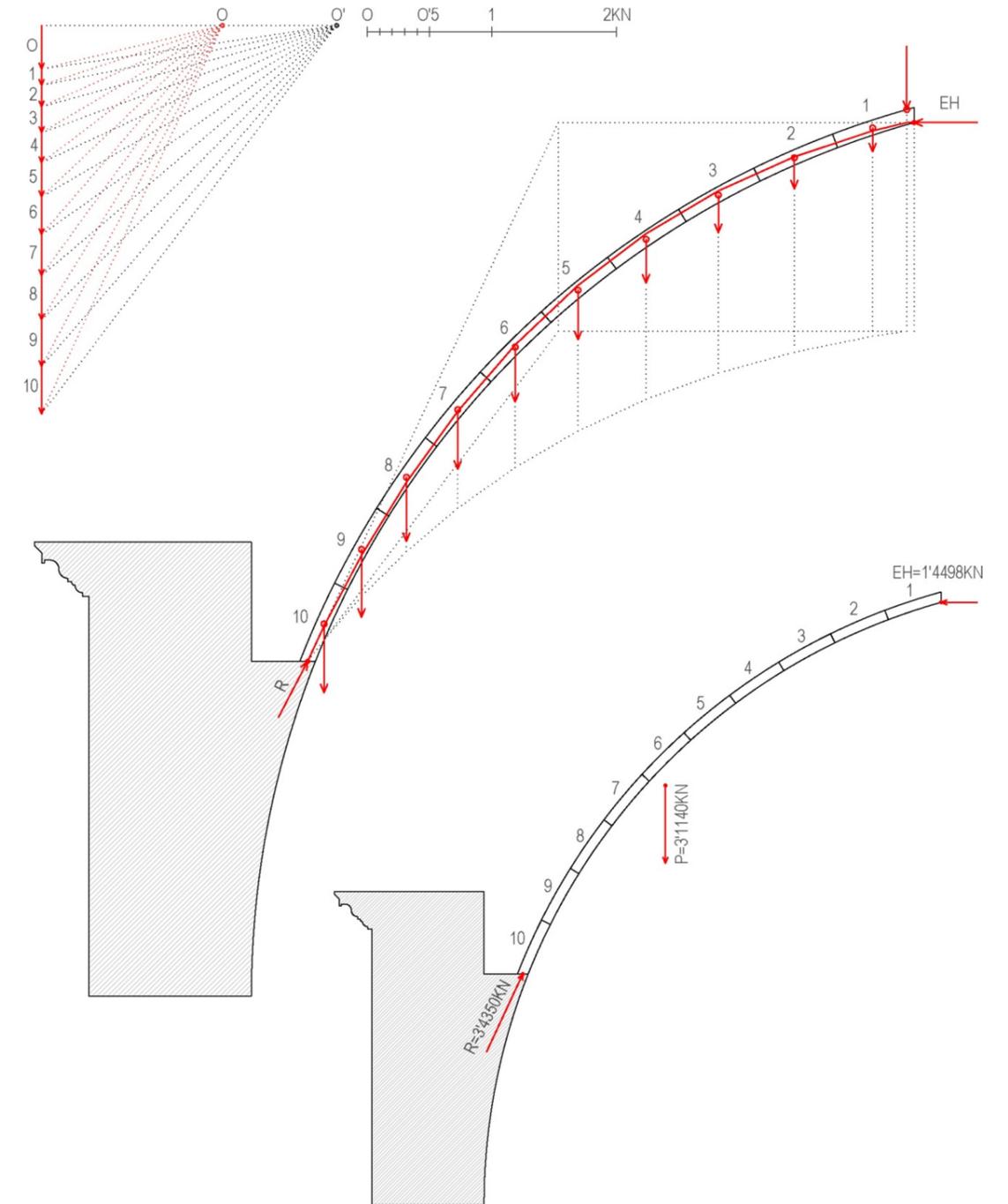


Figura 120: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 4. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 5. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

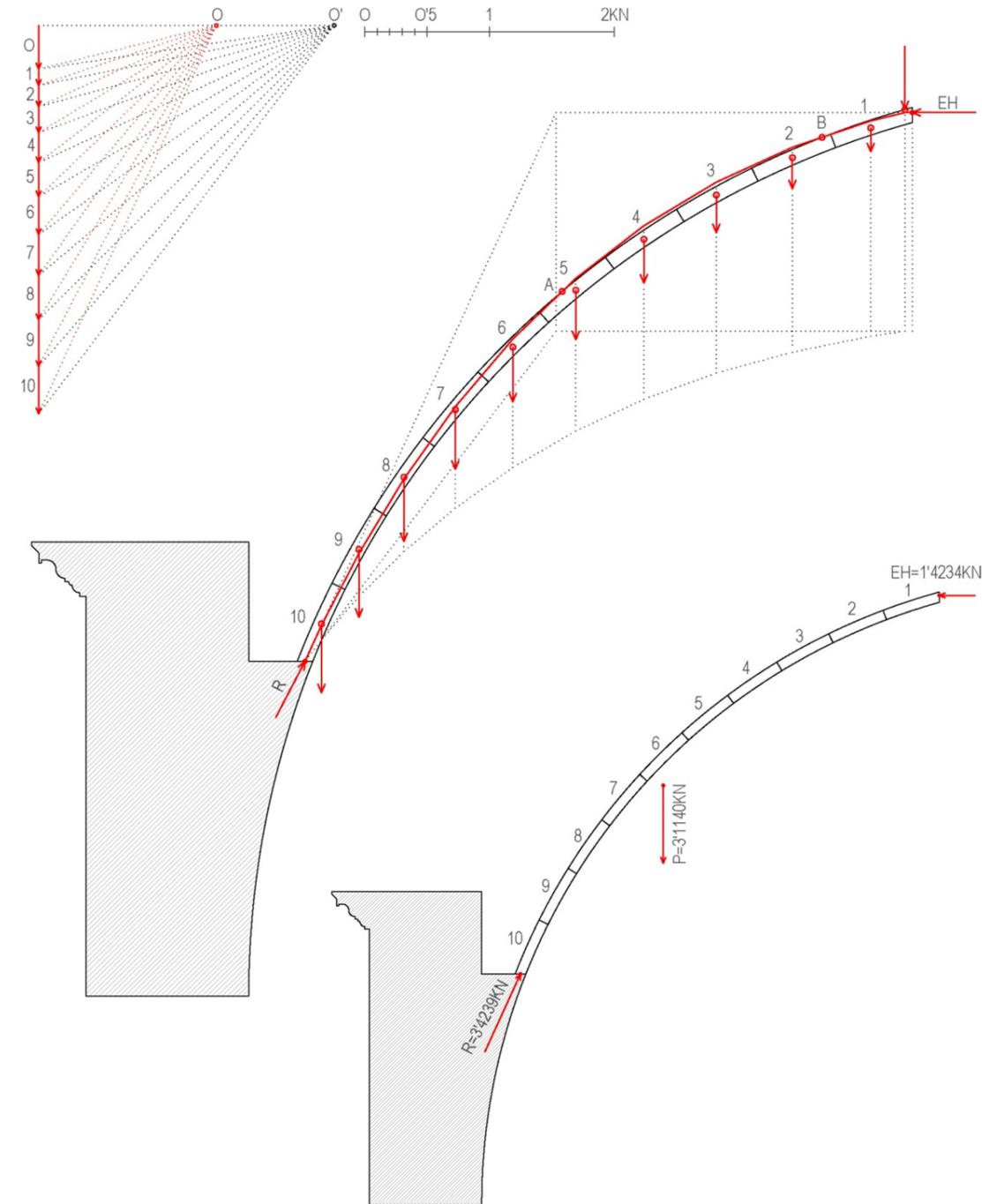


Figura 121: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 5. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 6. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0593m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0593m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

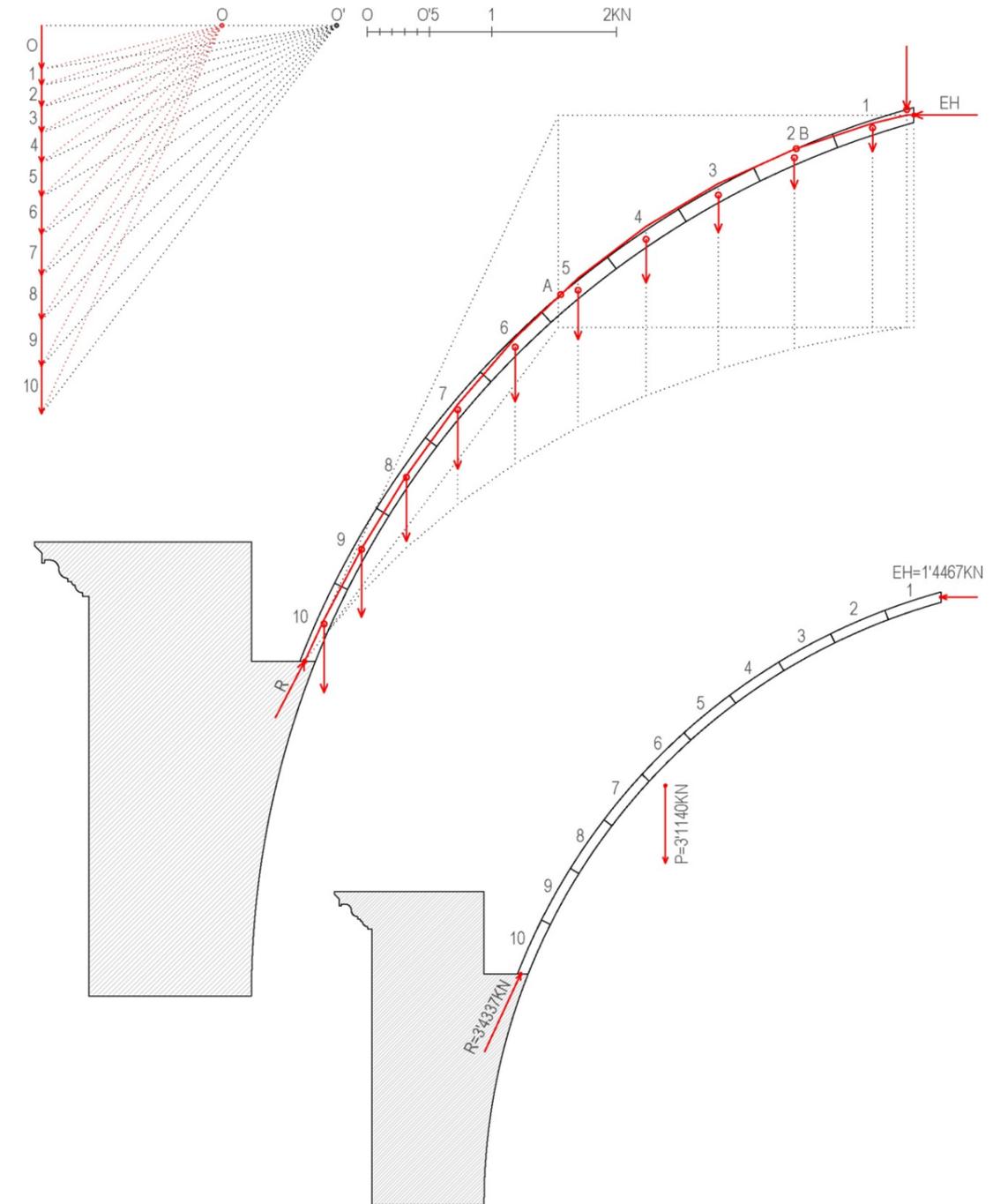


Figura 122: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 6. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 7. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0593m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0593m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

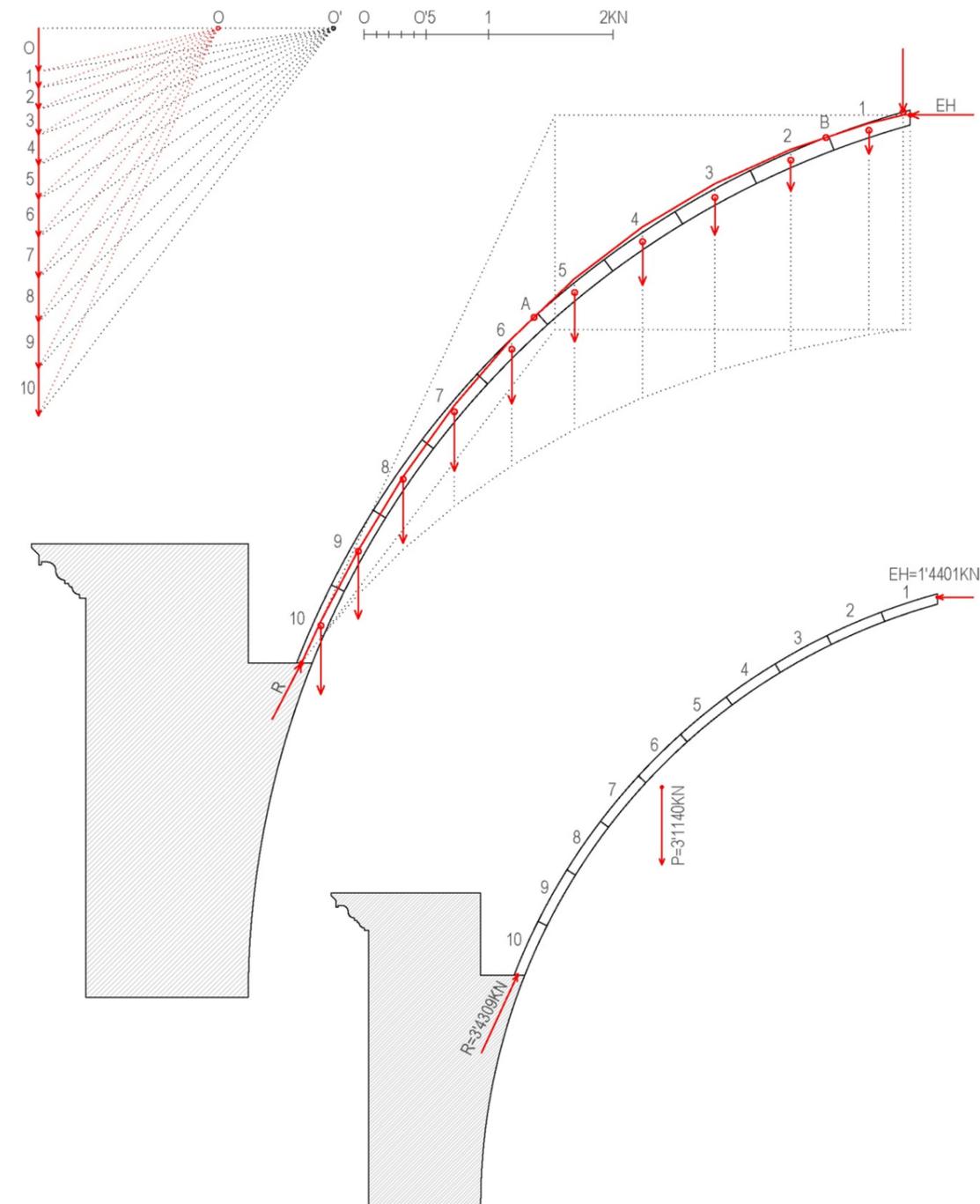


Figura 123: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 7. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 8. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0593m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0593m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

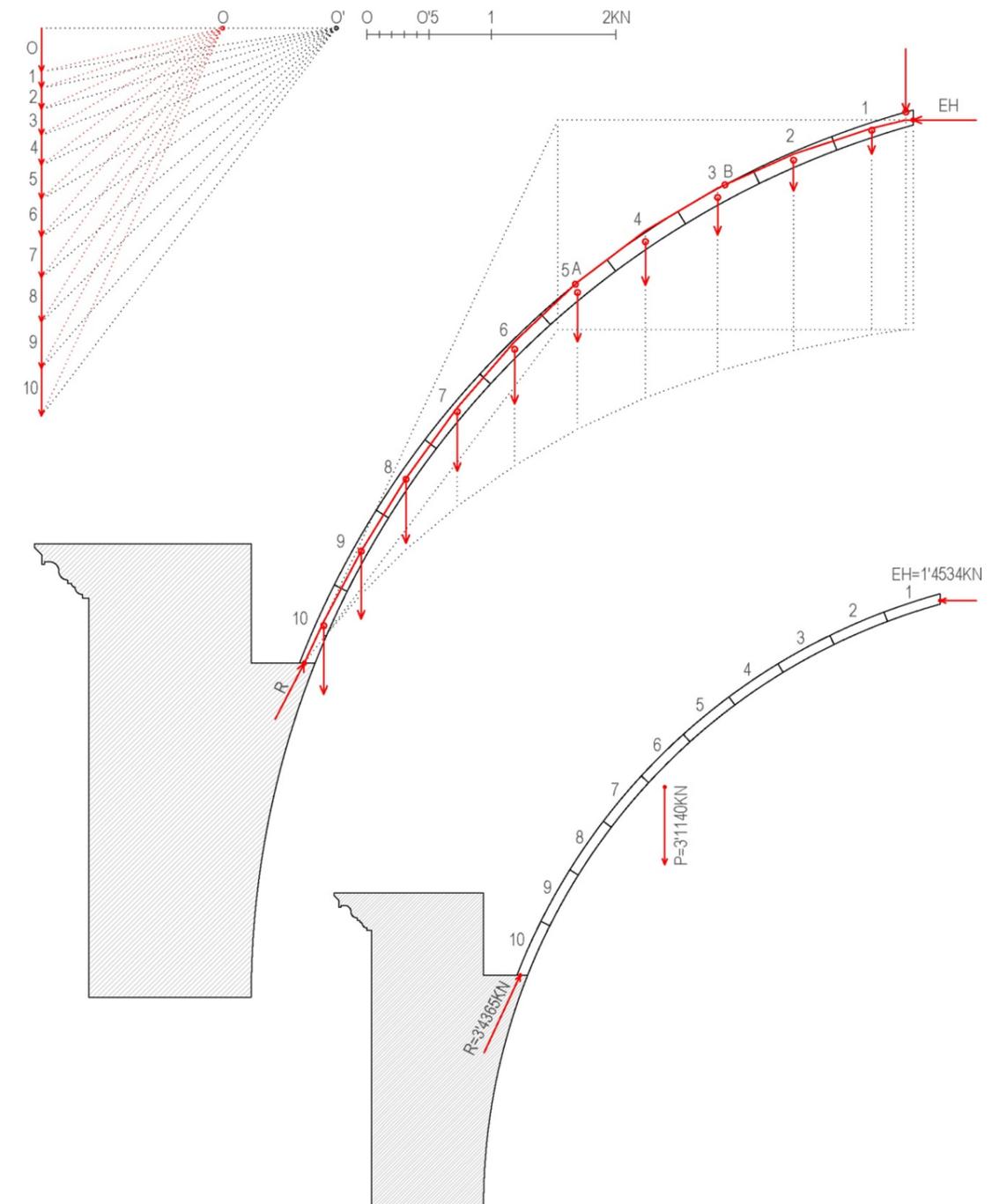


Figura 124: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 8. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 9. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'0593m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0593m$) y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'248**.

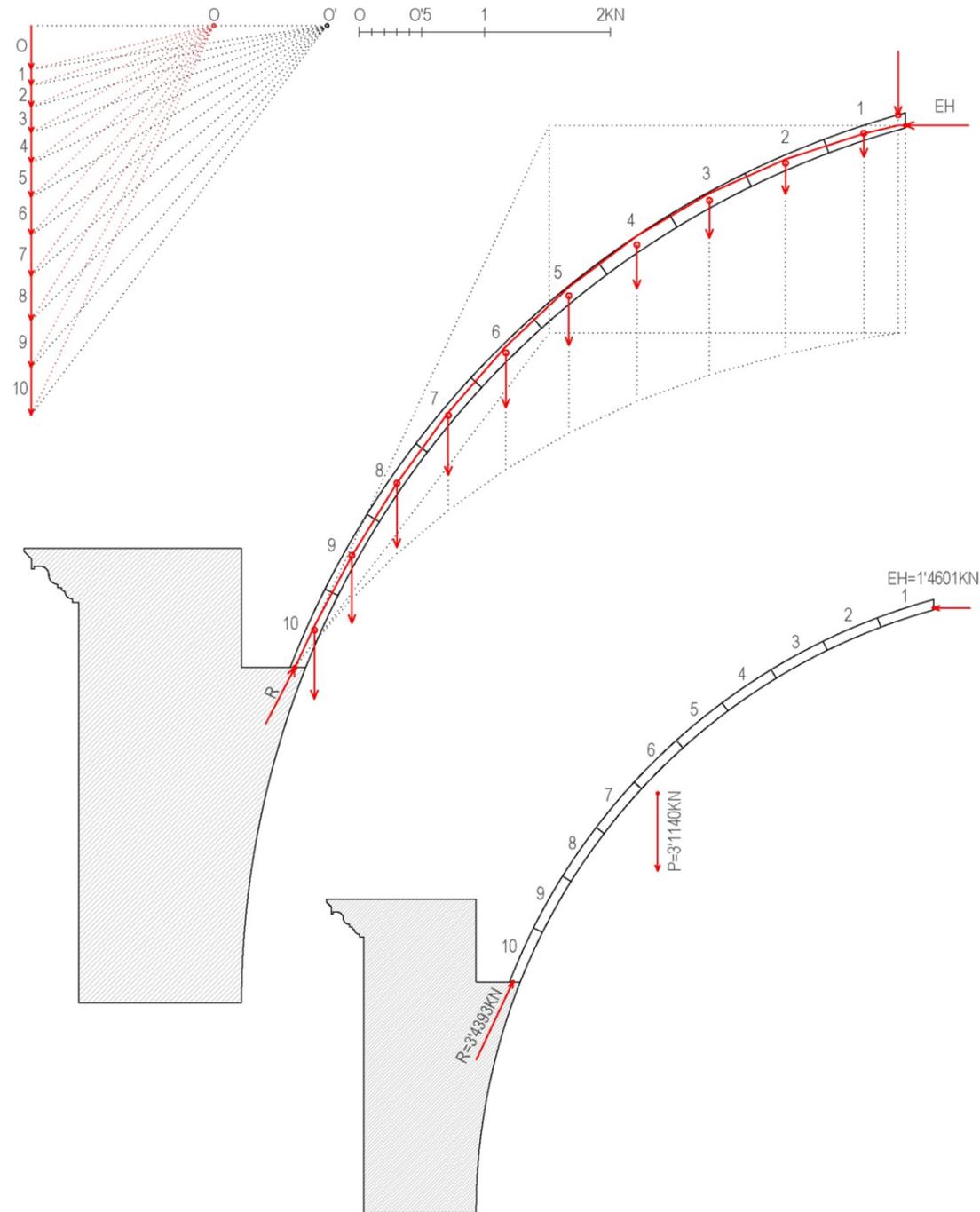


Figura 125: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 9. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 10. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'0593m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0593m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'061**.

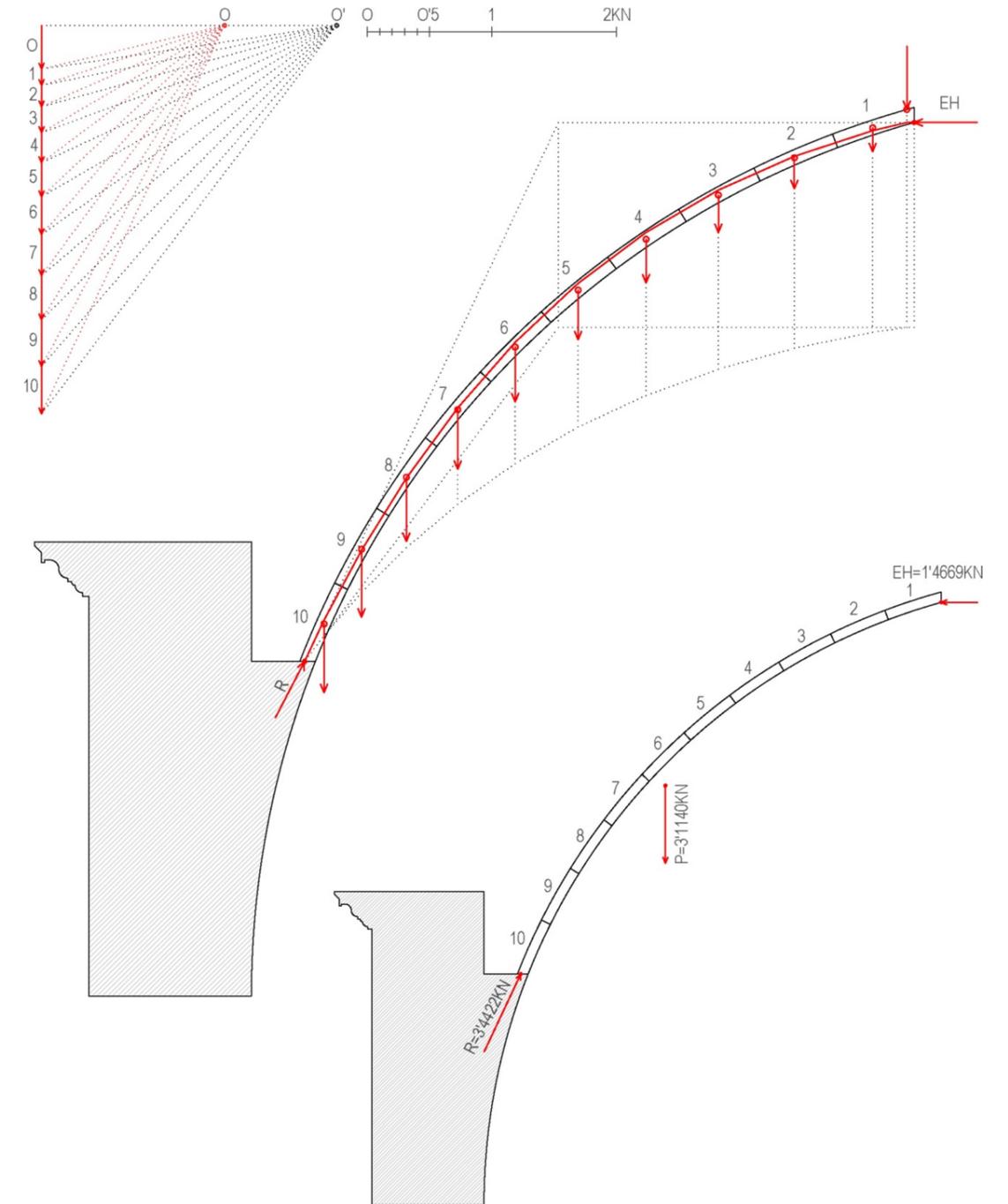


Figura 126: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 10. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 11. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0297m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0297m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

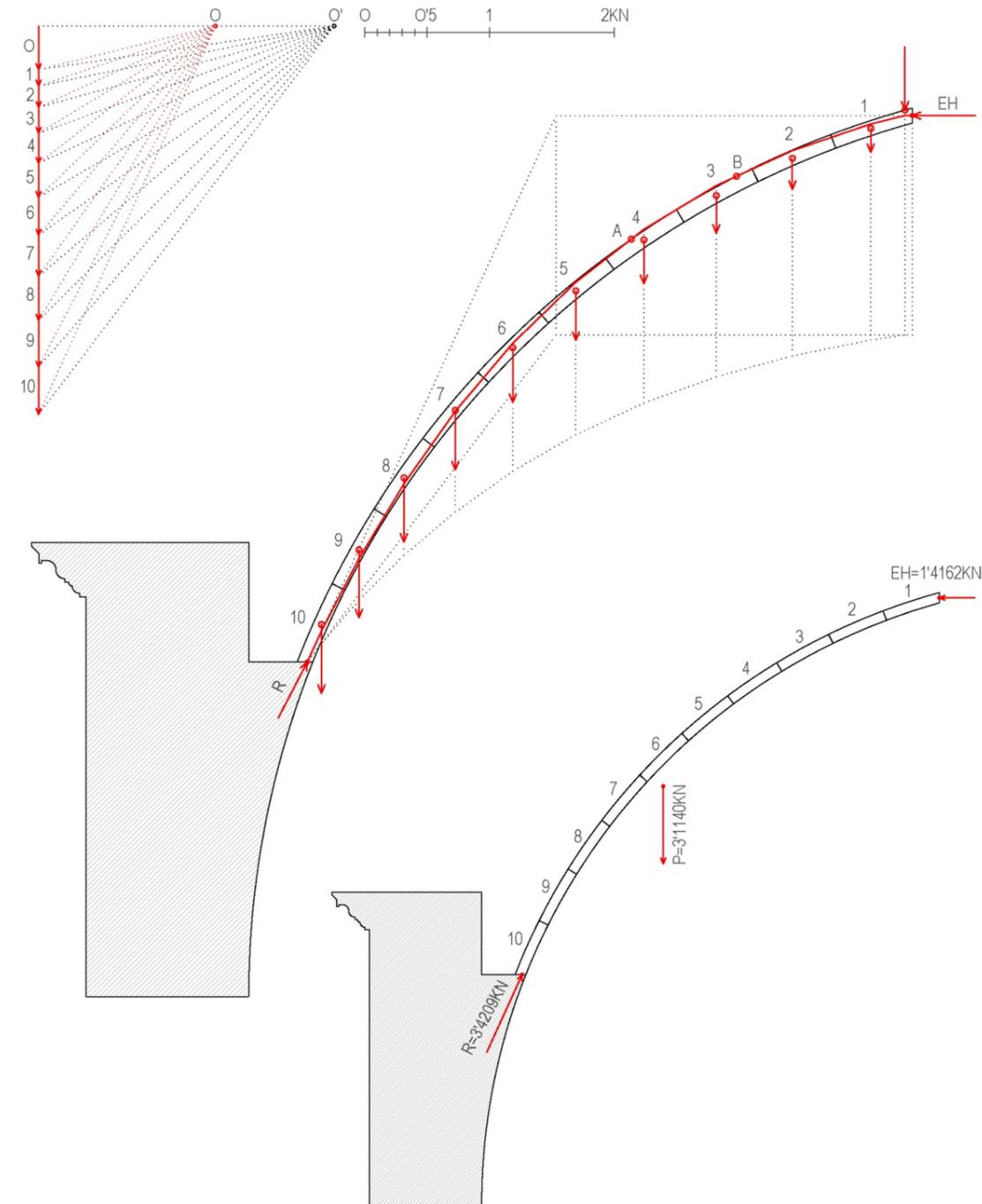


Figura 127: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 11. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 12. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0297m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0297m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'061**.

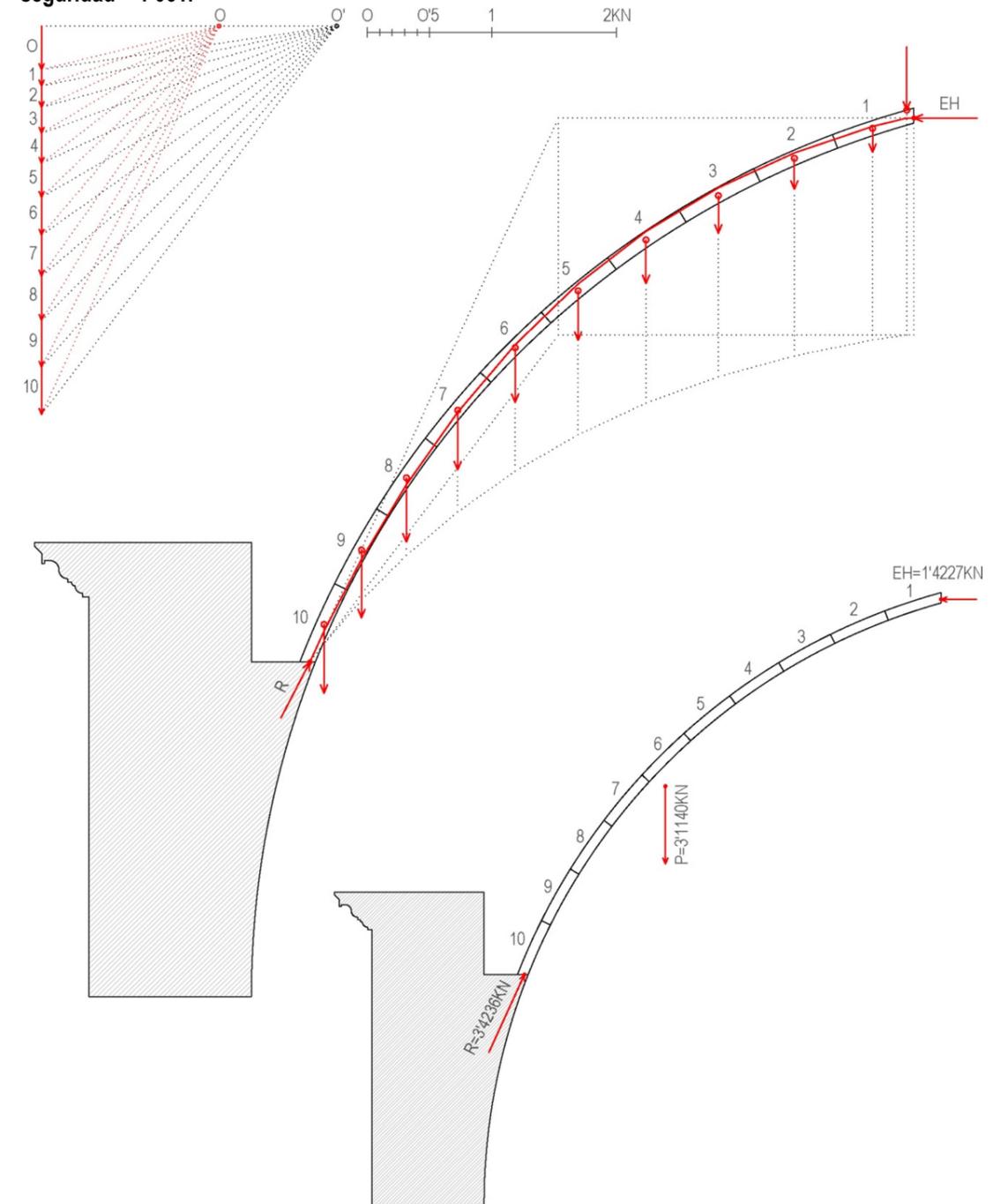


Figura 128: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 12. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 13. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'0297m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0297m$) y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'351**.

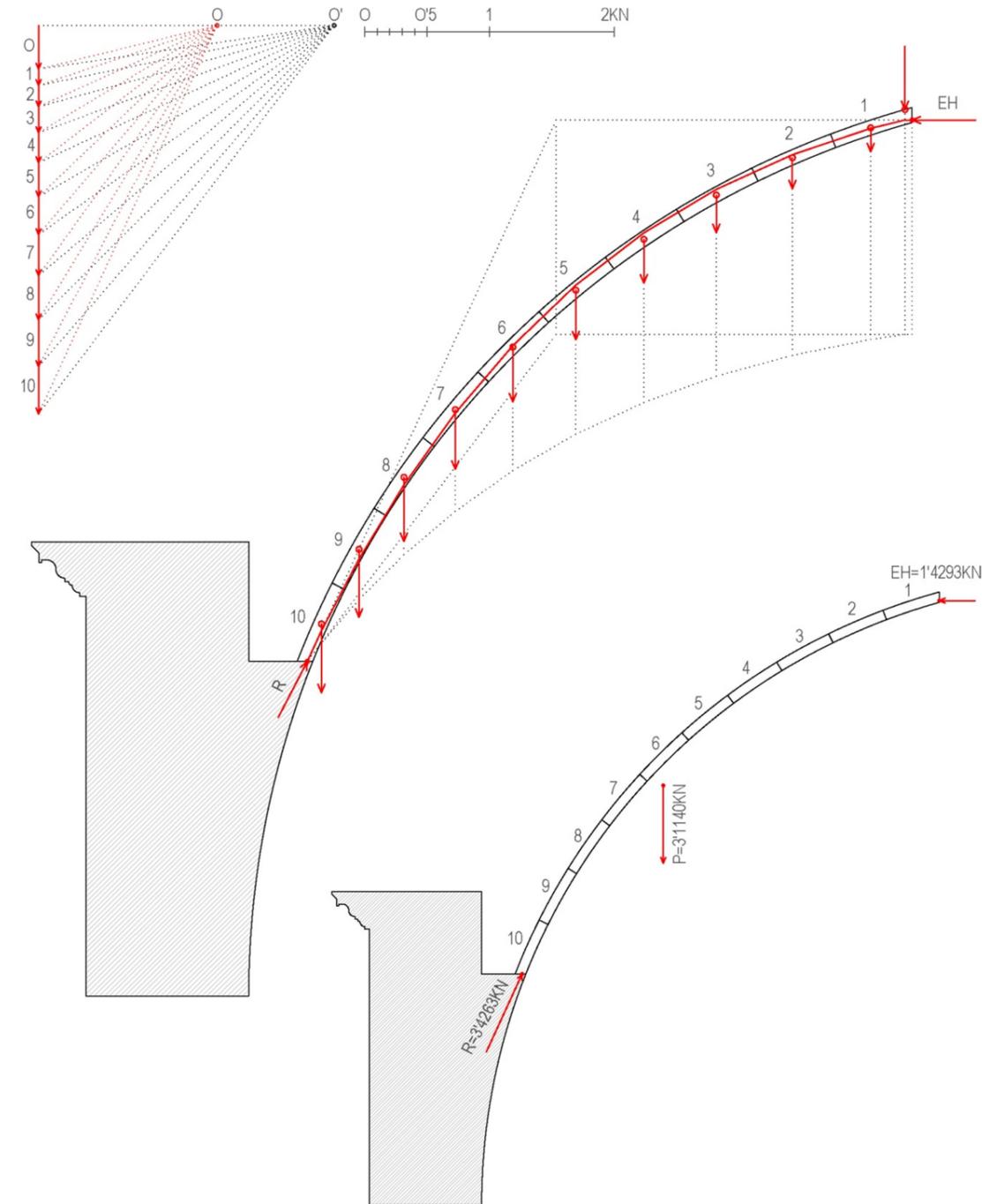


Figura 129: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 13. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 4. Situación 14. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'0297m$)

Cúpula tabicada con relleno compactado de ancho igual al muro de apoyo hasta una altura de 2'21m (cúpula rebajada). Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0297m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'266**.

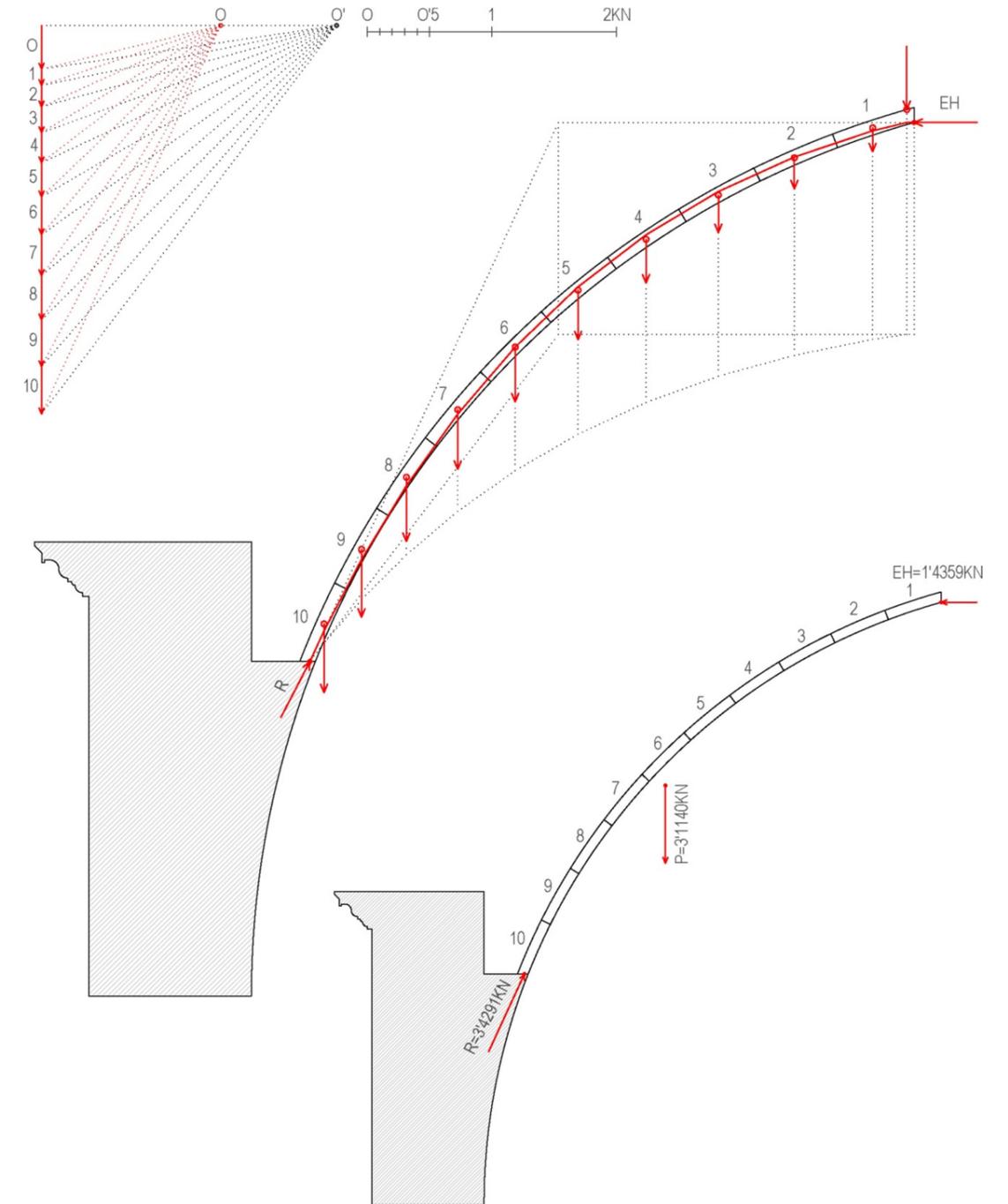


Figura 130: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 14. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.5. Hipótesis 5

Obtención de la línea de empujes de la cúpula, considerando para el cálculo uno de los cincuenta gajos en los que se ha dividido la misma, con un ángulo de $7'2''$. Para esta última hipótesis, el sector elegido coincidirá con una de las secciones de la cúpula que se ven afectadas por el trazado de alguno de los lunetos. El sector que se va a estudiar en este apartado se ha dividido a su vez en 10 dovelas. Se considera que sobre la corona superior de la cúpula descansa todo el tabicado del cupulín, que tiene las mismas características que el de la cúpula principal, es decir, se considera que está conformado por dos hojas de rasilla más el mortero intermedio entre ambas, con un espesor total de 8cm. Por tanto, la cáscara de la cúpula soportará el peso transmitido por el tabicado del cupulín. El gajo o sector simétrico al que estamos estudiando tendrá exactamente las mismas características.

El análisis de uno de los gajos coincidentes con uno de los lunetos nos permitirá determinar la carga que se transmite hasta la clave de los mismos y que se bifurca y transmite hasta la base de la cúpula a través de sus secciones laterales.

A partir de este modelo y con la estimación de cargas y centros de gravedad que aparecen en la Tabla 5, se efectúan los cálculos para la obtención de una línea de empujes con la que conseguir una situación de equilibrio con el mayor coeficiente de seguridad geométrico posible. Para ello será necesario hacer sucesivas variaciones en la posición de dos puntos de paso inicialmente fijados. El primero de ellos es el punto de aplicación del empuje horizontal en la dovela de la corona superior de la cúpula, definido por la distancia D_a , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del empuje. El otro punto es el de aplicación de la resultante en la dovela situada en la base del gajo estudiado, cuya posición queda definida por la distancia D_b , medida desde el intradós de la cáscara hasta el punto de aplicación del esfuerzo.

Hipótesis 5: Cúpula e=8cm Sección coincidente con lunetos					
Dovelas	Volumen (m ³)	P _{esp} fábrica ladrillo (KN/m ³)	Peso (KN)	X _g (m)	Y _g (m)
1	0'0047	18	0'0846	1'5031	4'8259
2	0'0054	18	0'0972	1'7900	4'7264
3	0'0062	18	0'1116	2'0657	4'6125
4	0'0070	18	0'1260	2'3342	4'4824
5	0'0078	18	0'1404	2'5947	4'3367
6	0'0086	18	0'1548	2'8461	4'1757
7	0'0093	18	0'1674	3'0876	4'0002
8	0'0100	18	0'1800	3'3184	3'8107
9	0'0106	18	0'1908	3'5375	3'6079
10	0'0113	18	0'2034	3'7443	3'3925
1/50 cupulín	0'0194	18	0'3492	--	--

Tabla 7: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 5.

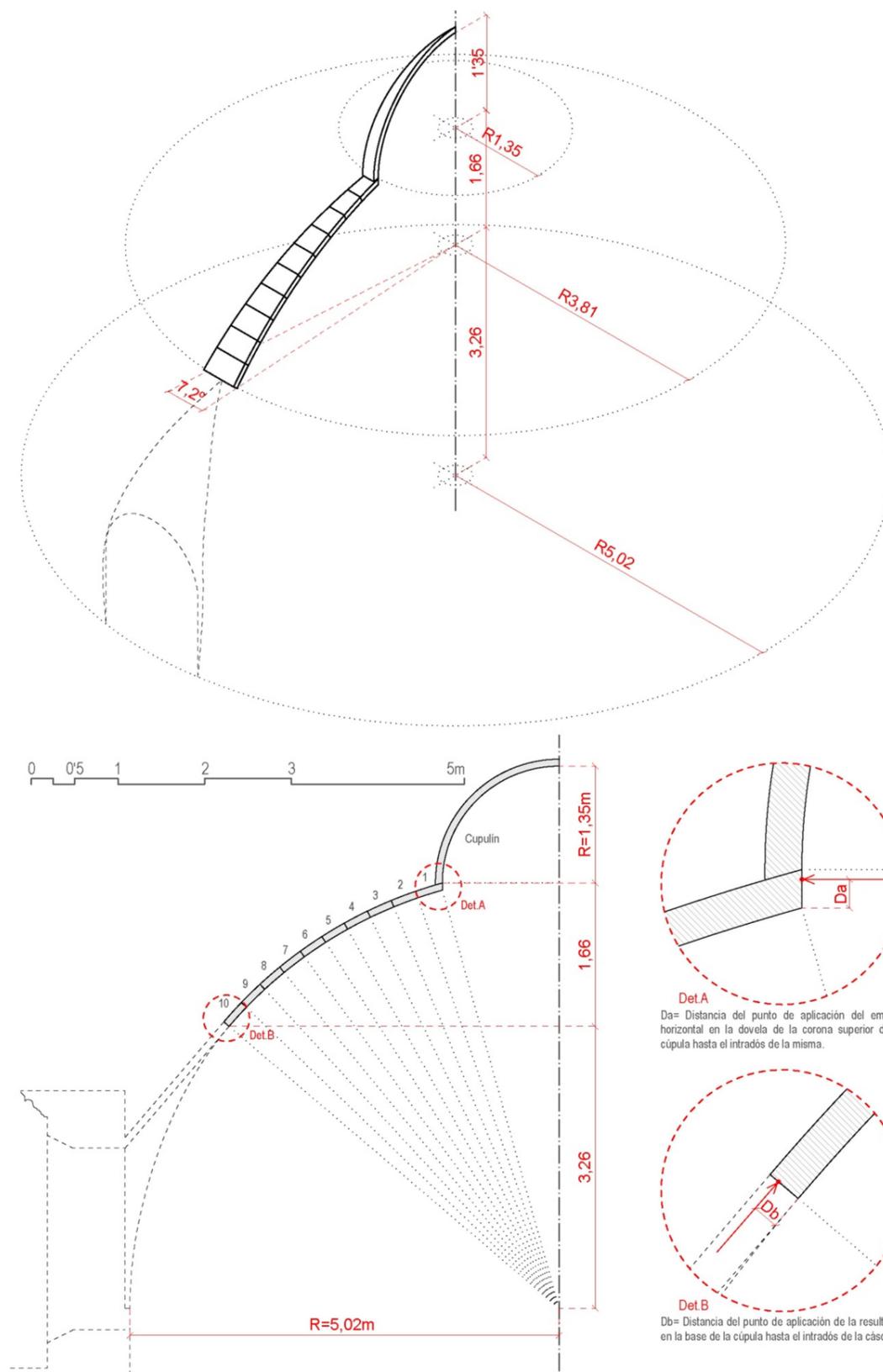


Figura 131: Representación gráfica de la Hipótesis 5. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 1. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

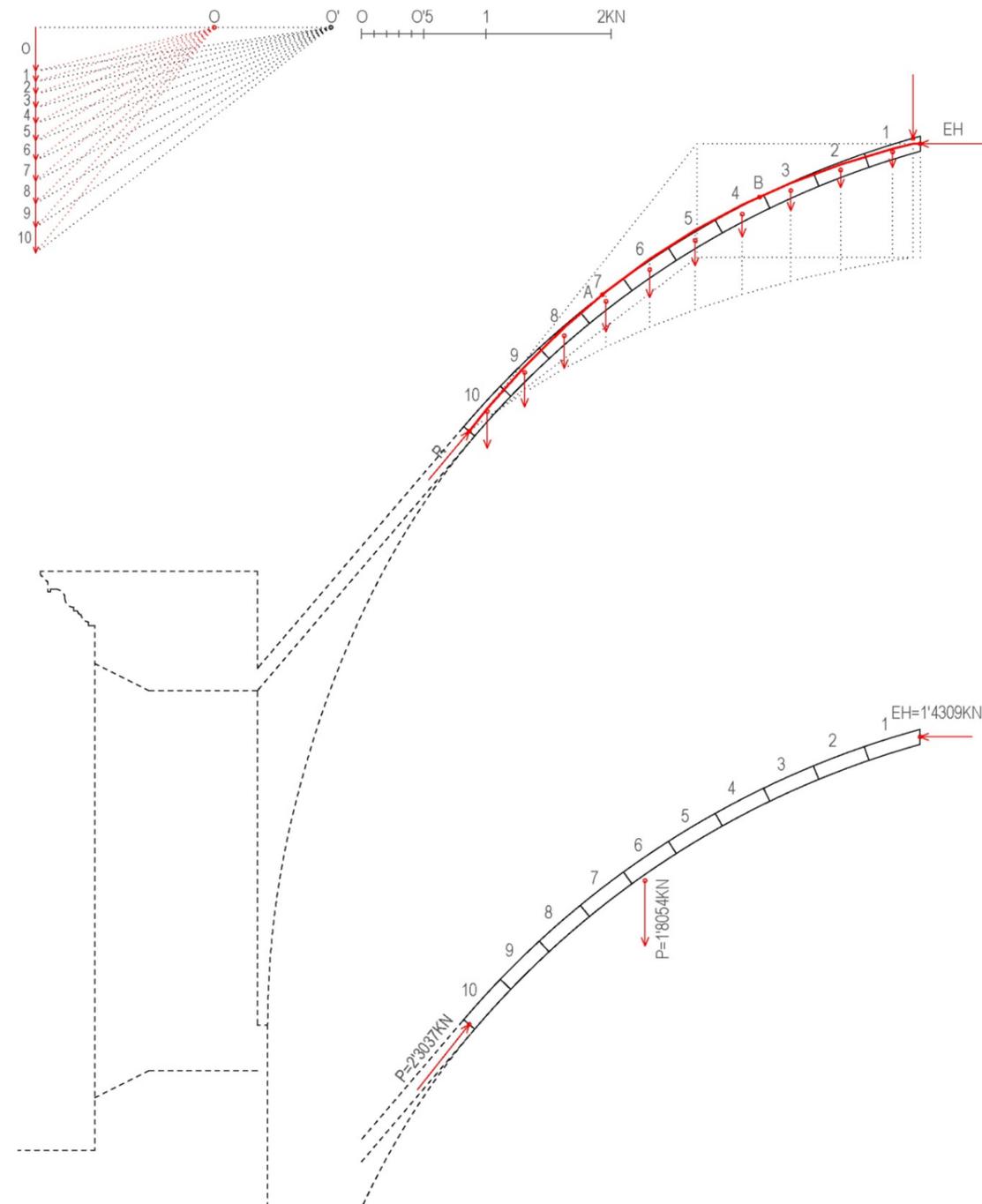


Figura 132: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 1. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 2. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'501**.

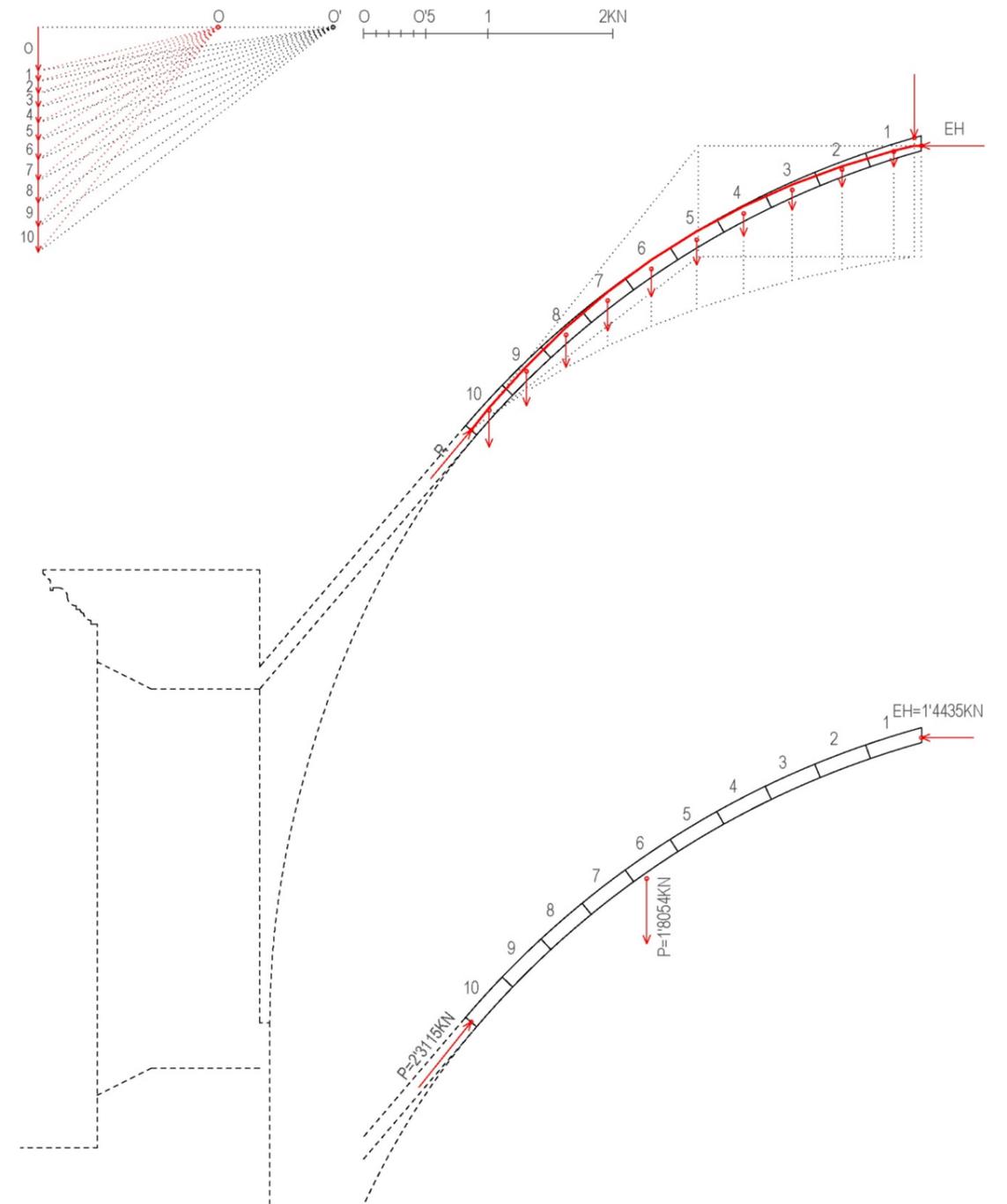


Figura 133: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 2. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 3. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'336**.

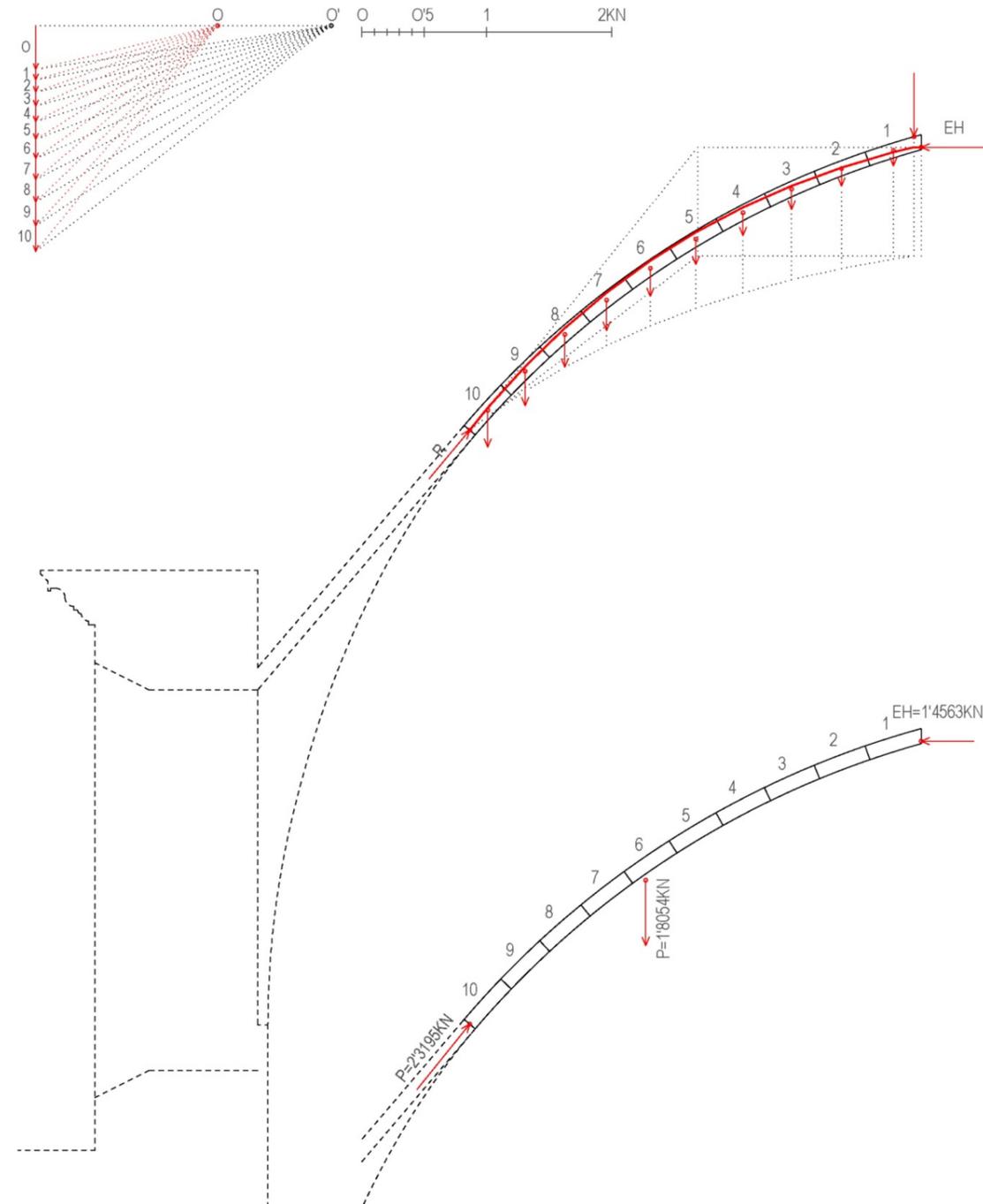


Figura 134: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 3. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 4. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'221**.

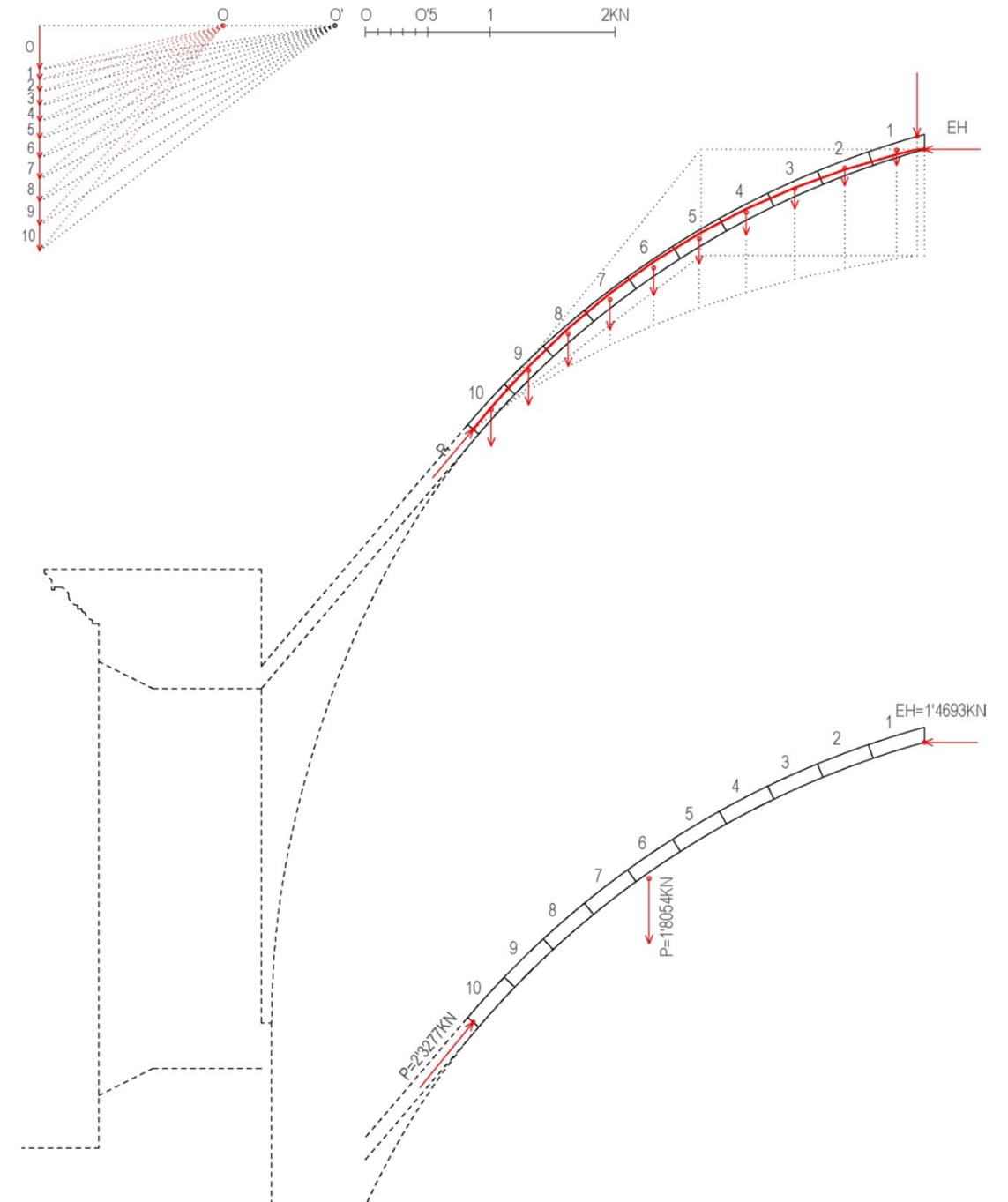


Figura 135: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 4. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 5. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0400m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el punto medio de la sección en la base ($D_b=0'0400m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

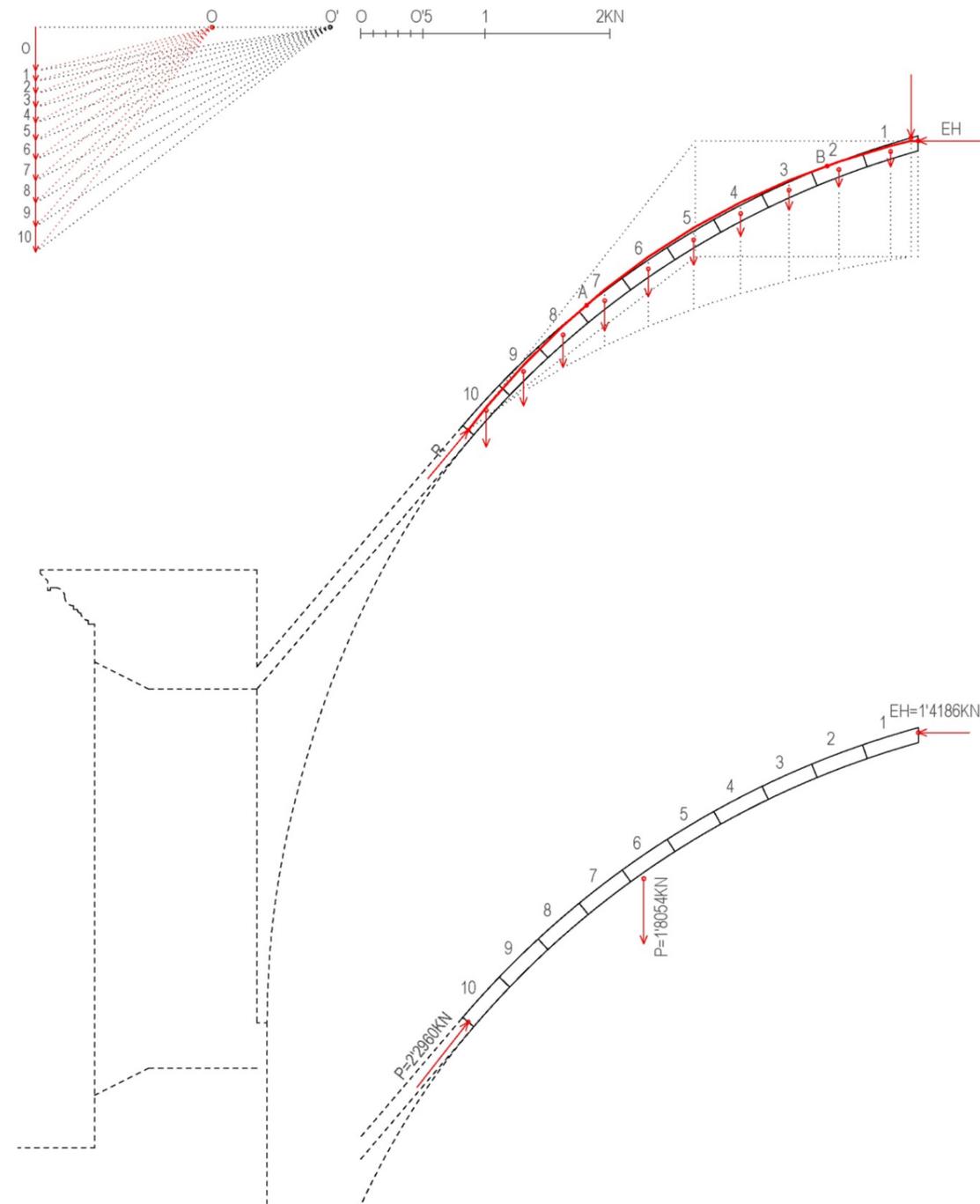


Figura 136: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 5. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 6. ($D_a=0'0400m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase por el punto medio de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0400m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

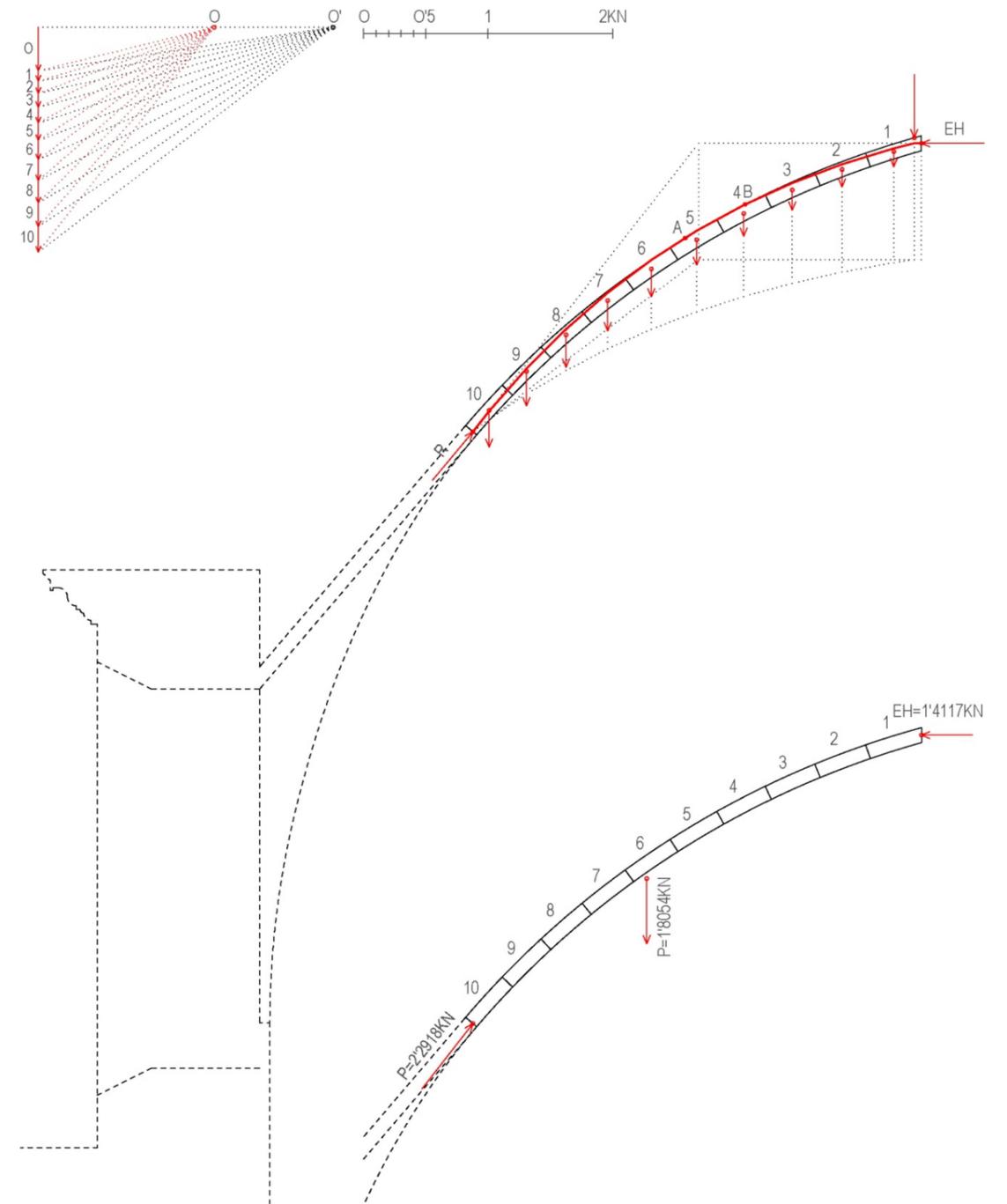


Figura 137: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 6. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 7. ($D_a=0'0267m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0267m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'691**.

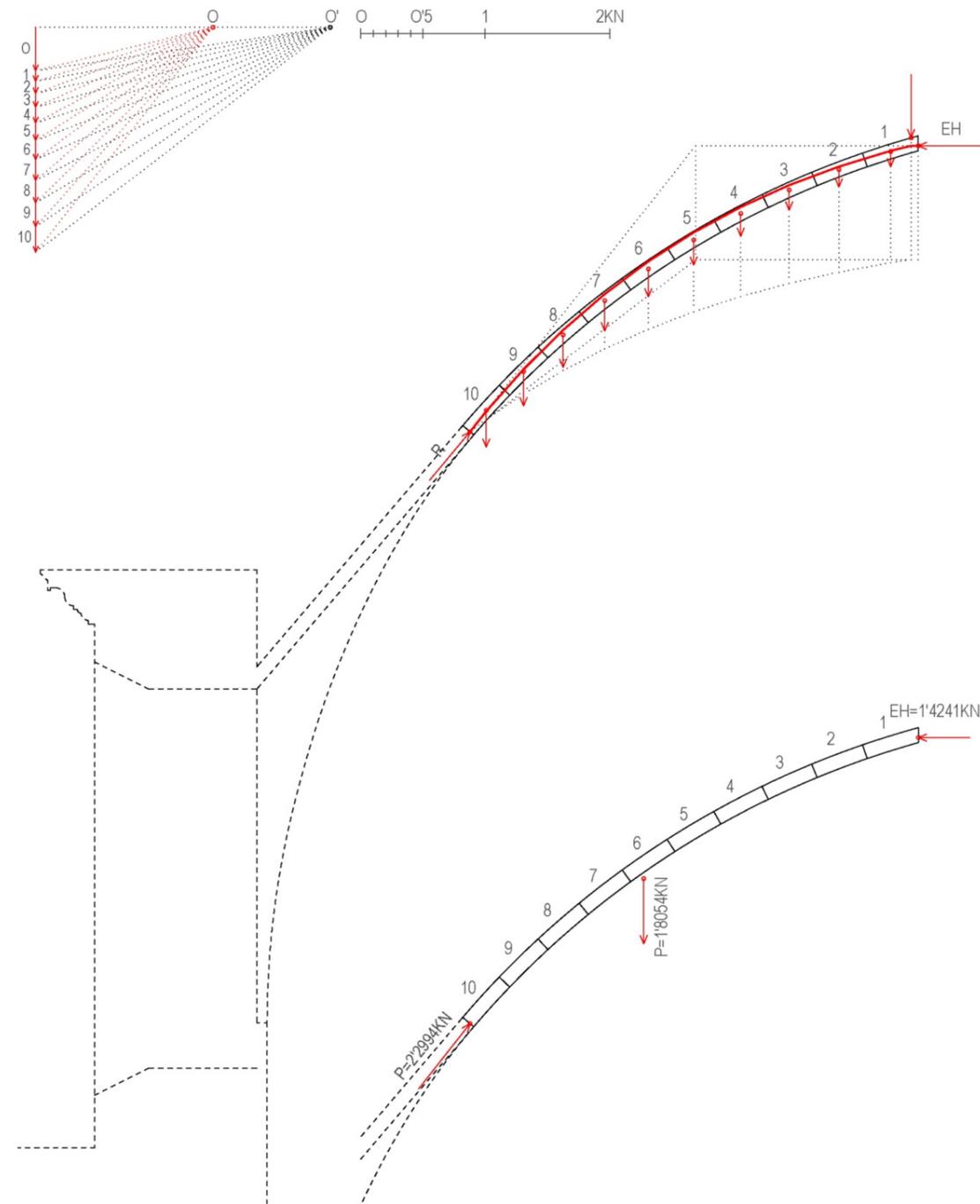


Figura 138: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 7. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 8. ($D_a=0'0133m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase a una distancia $D_a=0'0133m$ en la corona superior de la cúpula. Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'515**.

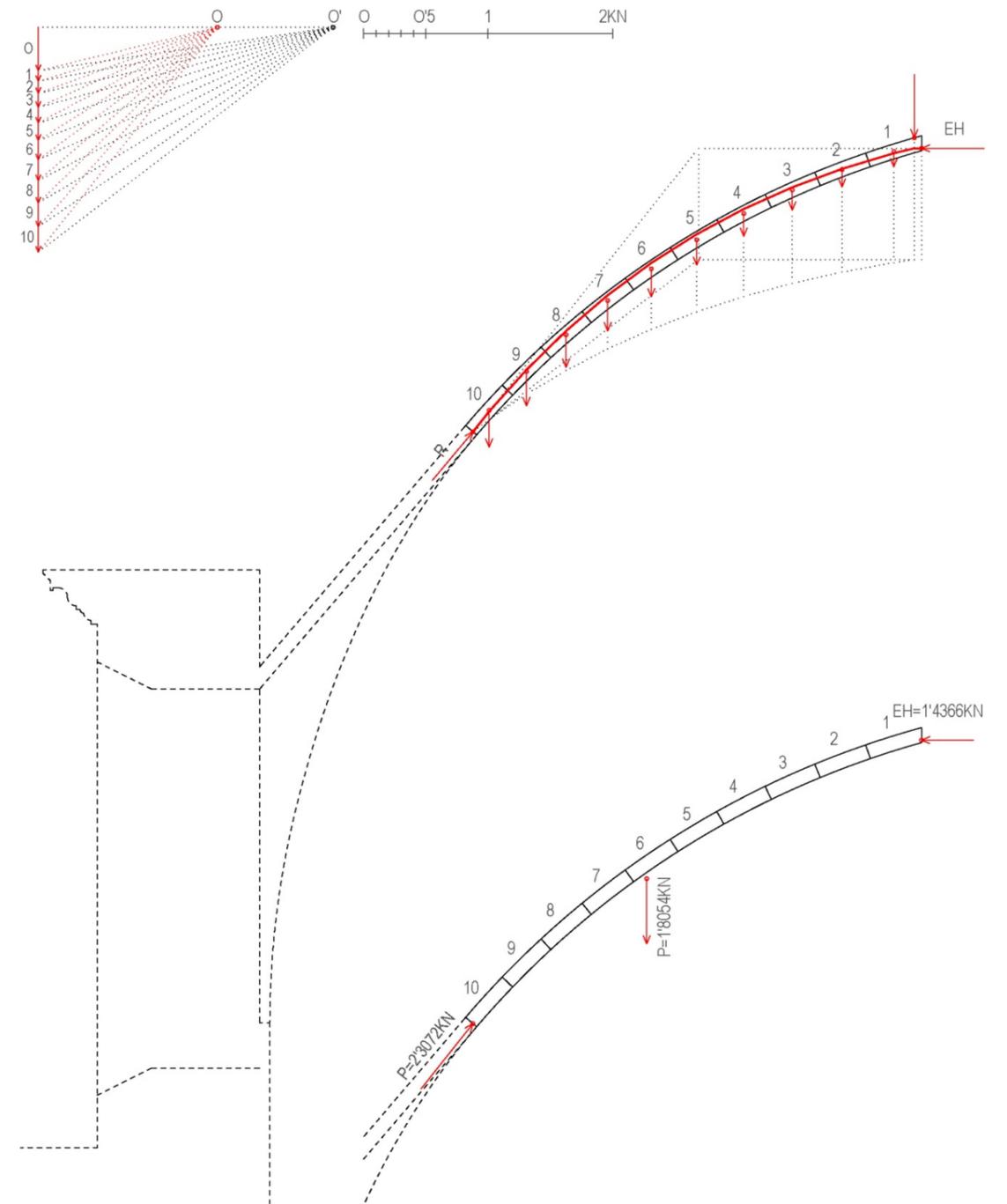


Figura 139: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 8. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 9. ($D_a=0'0000m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase por el límite interior de la sección en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0000m$). Se obtiene una línea de empujes que se mantiene dentro de la sección. Por tanto, se trata de una situación **ESTABLE**, con un **coeficiente de seguridad = 1'351**.

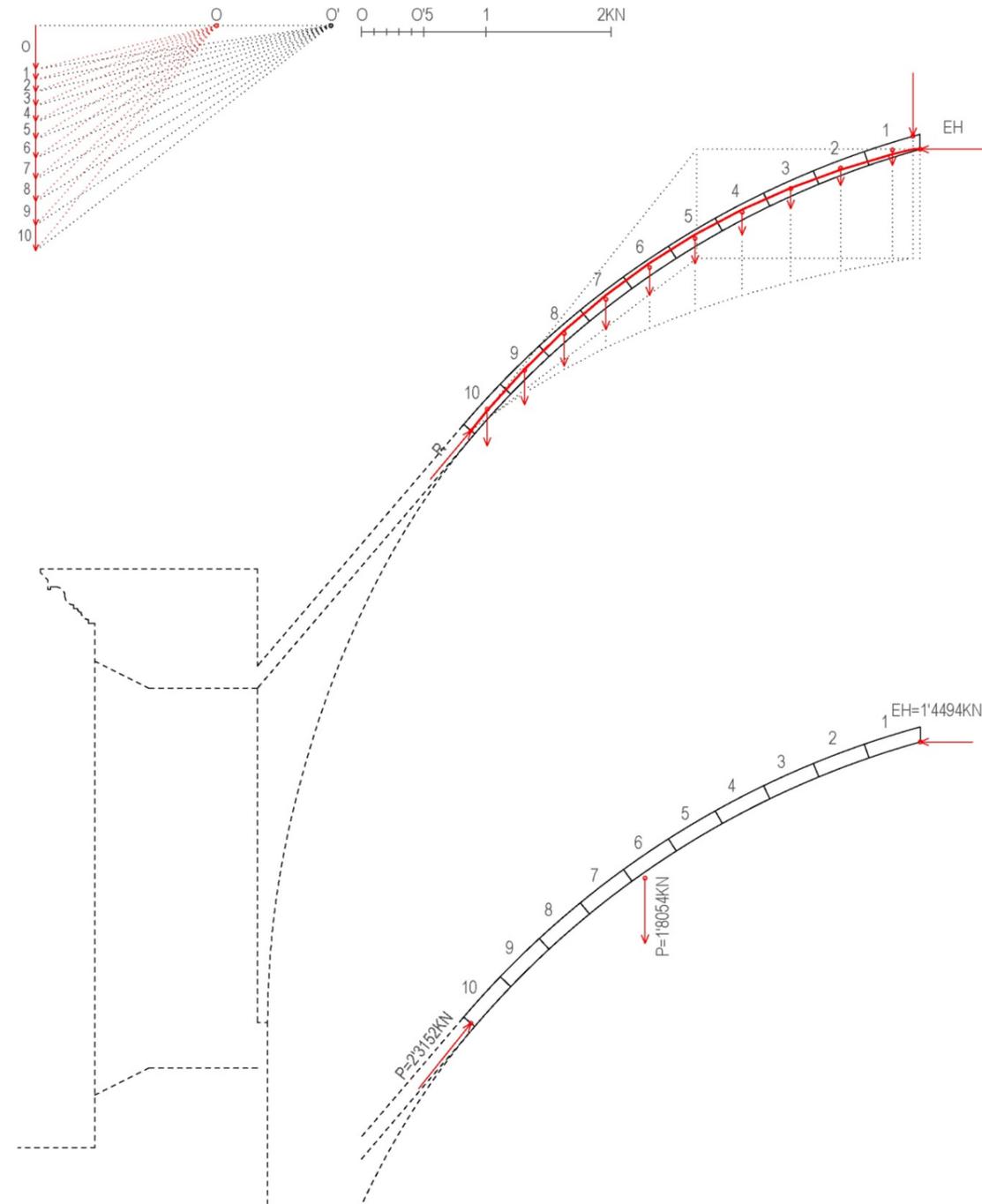


Figura 140: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 9. Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis 5. Situación 10. ($D_a=0'0533m$ $D_b=0'0267m$)

Cúpula tabicada coincidente con uno de los lunetos. Se impone la condición de que la reacción pase por el límite interior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la base ($D_b=0'0267m$) y que el empuje pase por el límite exterior de un pasillo central de seguridad 1'5 en la corona superior de la cúpula ($D_a=0'0533m$). Se obtiene una línea de empujes que sale fuera de la sección estudiada por el extradós entre los puntos A y B. Por tanto, se trata de una situación **no estable**.

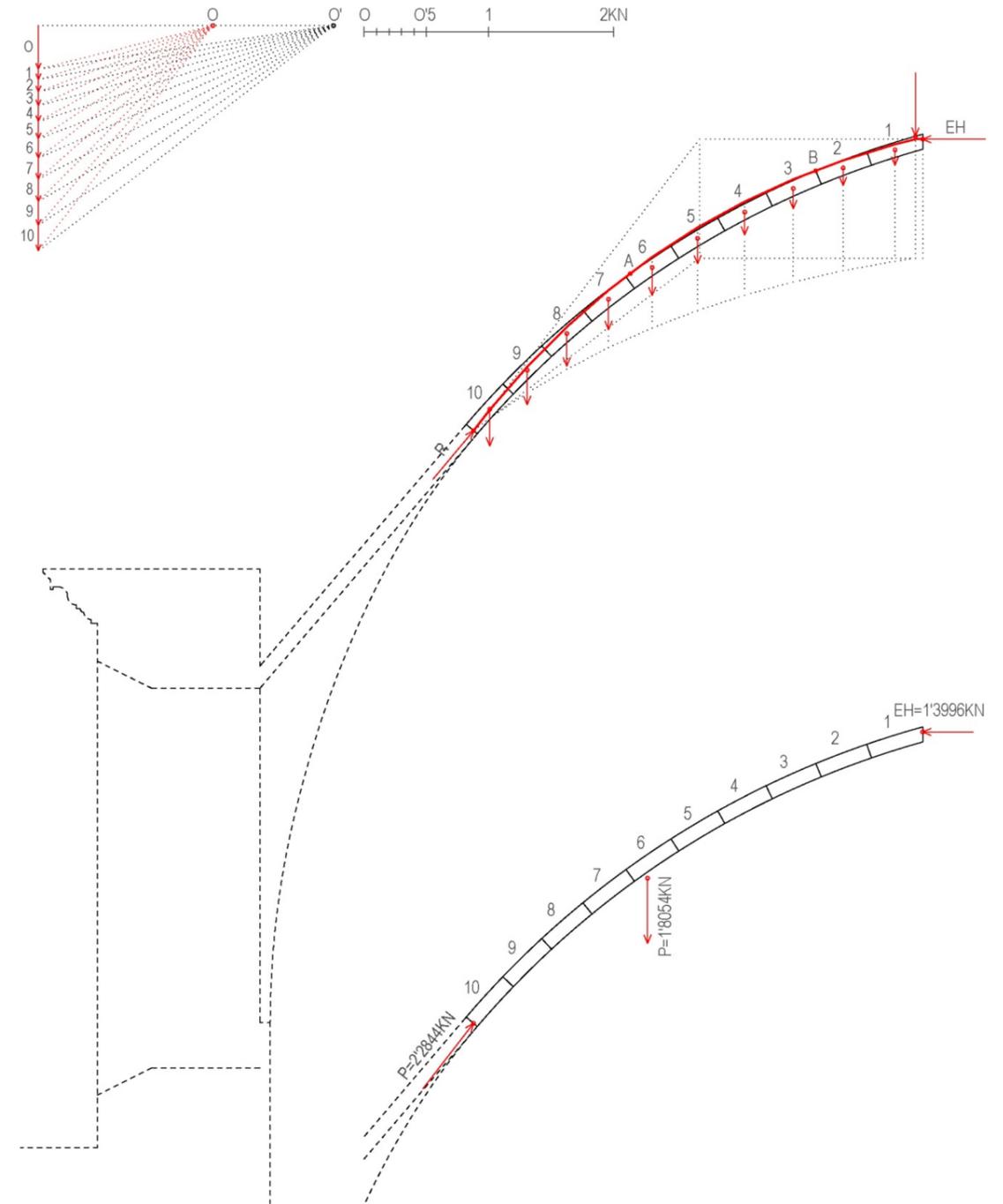


Figura 141: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 10. Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. Análisis de los resultados

Si observamos con detenimiento los resultados obtenidos en los puntos anteriores, podemos comprobar la dificultad para encajar una línea de empujes dentro de la sección estudiada, ya que en la mayoría de los supuestos planteados ésta se salía del espesor del arco. De los cuarenta y nueve casos estudiados entre las cuatro primeras hipótesis, solamente se han encontrado diez en los que la línea de empujes está contenida dentro de la sección. Estos diez casos se concentran dentro de las hipótesis 3 y 4 y presentan en su mayoría unos coeficientes de seguridad geométricos muy bajos. Se podría considerar también que existen otros siete casos en los que la estabilidad de la cúpula se encontraría en el límite, todos ellos pertenecientes también a las hipótesis 3 y 4 (Ver Tabla 8). En lo referente a la hipótesis 5, en la que se analizan las secciones coincidentes con los lunetos de la cúpula, podemos apreciar que existe un número mayor de situaciones en las que la estructura es estable (en concreto seis de las diez situaciones planteadas). Esto se debe a que en esta última hipótesis la cúpula se calcula como si se tratase de una cúpula rebajada que transmite los esfuerzos a los laterales del luneto hasta llegar a la base en la que se apoya.

El supuesto nº14 de la hipótesis 4 ha sido en el que se ha alcanzado un coeficiente de seguridad geométrico mayor, concretamente 1'372, resultado de dividir el ancho real entre el ancho eficaz de la sección. Cabe indicar que, aunque ésta sería la situación de equilibrio más estable que hemos conseguido, no sería la única. En concreto, para el planteamiento de esta hipótesis se ha considerado que la cúpula tiene un relleno a partir del extradós de la misma igual al ancho del muro en el que se apoya y hasta una altura de 1'85m. El relleno tendrá capacidad de transmisión de cargas, por lo que la cúpula se comportará como si se tratase de una cúpula rebajada. Sobre la corona superior de la misma descansará todo el peso del tabicado del cupulín, que tendrá las mismas características constructivas que la cáscara principal de la cúpula, es decir, un espesor de 8cm (dos rasillas de ladrillo más el mortero intermedio). Por tanto, se supondrá esta solución constructiva como la más acertada o probable, ya que debido a la falta de información no se ha podido concretar con exactitud cómo está resuelta esta parte de la estructura (Ver Figura 142).

Dentro de todo el conjunto de hipótesis y supuestos estudiados se pueden extraer algunas conclusiones que pueden ser interesantes y que enuncio a continuación:

- Como se puede apreciar en los supuestos de la hipótesis 1, en la que no se ha considerado relleno, la línea de empujes sale fuera de la sección, casi desde el comienzo, por el intradós de la base de la cúpula. Si los comparamos con los supuestos del resto de hipótesis, en los que sí se ha considerado relleno o macizado, podemos observar cómo éste incrementa el peso de las dovelas inferiores, haciendo que la línea de empujes adquiera una mayor verticalidad y tienda a mantenerse en el interior de la sección.
- Se puede observar también que cuanto más alejado del intradós esté el punto de aplicación de la fuerza resultante en la base de la cúpula (cuanto mayor sea la distancia D_b), más difícil resulta que la línea de empujes salga por el intradós de la misma. Este hecho es fácilmente visible en los supuestos planteados dentro de la hipótesis 3, que cuenta con un relleno de 20cm a partir del extradós en el tercio inferior de la cáscara, y especialmente en los de la hipótesis 4, en las que toda la sección del muro actúa como relleno.
- Al igual que en la base, el punto de aplicación de la resultante horizontal en la corona superior de la cúpula determina en gran medida si la línea de empujes se mantiene dentro de la sección o no. Se puede observar que ésta tiene tendencia en esta parte a salir por el extradós del arco, pero reduciendo la distancia de aplicación de la fuerza respecto al intradós (reduciendo la distancia D_a), podemos revertir esta situación y hacer que la línea de empujes se mantenga dentro de la sección.

- Como consecuencia de estos dos últimos puntos, se puede apreciar que en los supuestos que se han obtenido unos mejores resultados han sido aquellos en los que se ha impuesto que la resultante horizontal pase cerca del intradós de la cúpula en su corona superior y que la reacción en la base pase cerca del extradós.

Hipótesis	Situación	Estabilidad	Coef. Seguridad
1	Todas (1-9)	NO	--
	2	Todas (1-9)	NO
3	1	NO	--
	2	NO	--
	3	NO	--
	4	NO	--
	5	NO	--
	6	Límite	1
	7	Límite	1
	8	Límite	1
	9	NO	--
	10	NO	--
	11	NO	--
	12	Límite	1
	13	SI	1'012
	14	NO	--
	15	Límite	1
	16	SI	1'212
	17	SI	1'154
4	1	NO	--
	2	Límite	1
	3	SI	1'353
	4	SI	1'266
	5	NO	--
	6	NO	--
	7	NO	--
	8	NO	--
	9	SI	1'231
	10	SI	1'156
	11	Límite	1
	12	SI	1'159
	13	SI	1'294
	14	SI	1'372
5	1	NO	--
	2	SI	1'501
	3	SI	1'336
	4	SI	1'221
	5	NO	--
	6	Límite	1
	7	SI	1'691
	8	SI	1'515
	9	SI	1'351
	10	NO	--

Tabla 8: Resumen de los resultados obtenidos en el planteamiento de las diferentes hipótesis

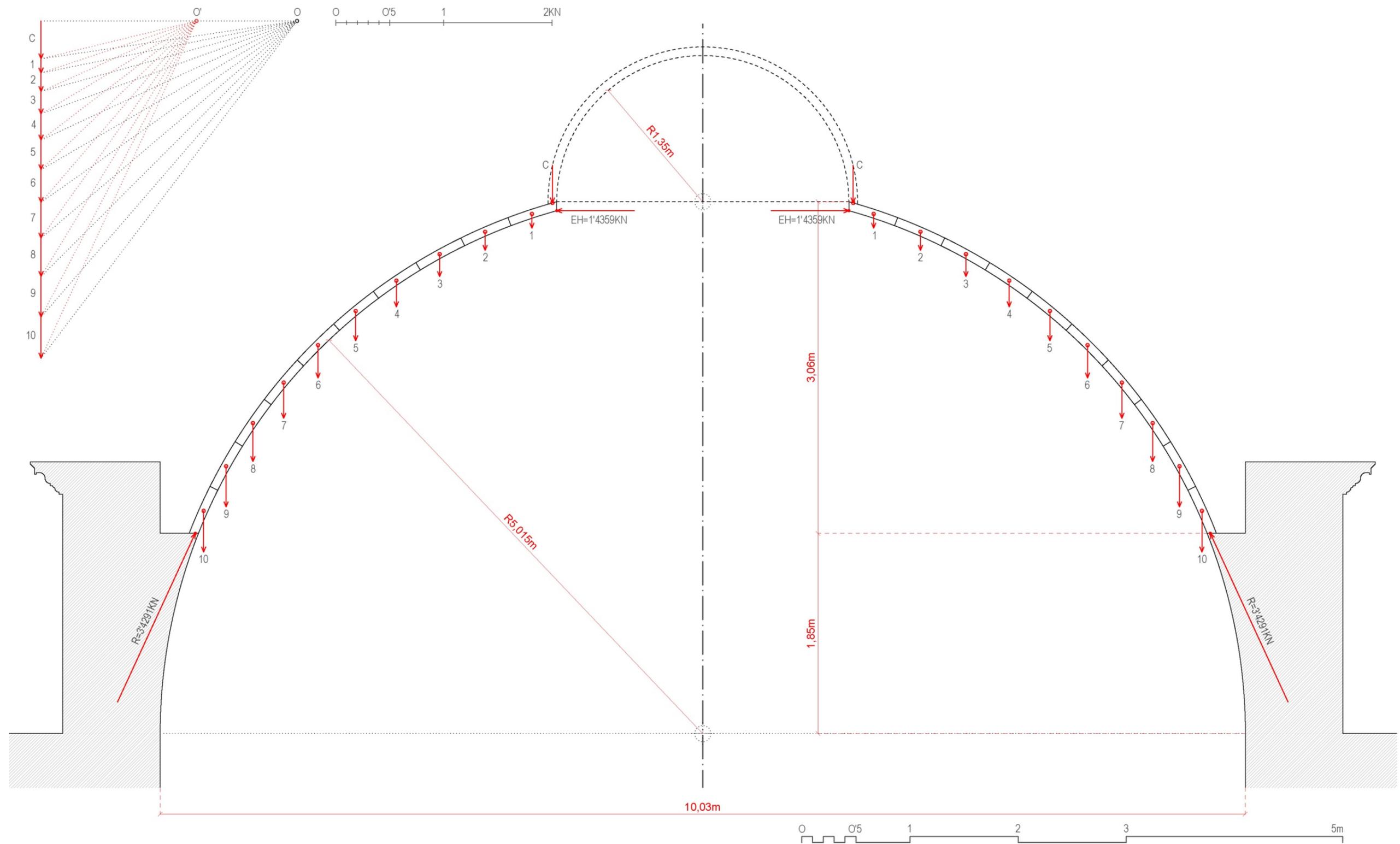


Figura 142: Situación 13 de la Hipótesis 4. Situación de equilibrio con mayor coeficiente de seguridad geométrico (1'351). Fuente: Elaboración propia.

6.1.4. Aplicación del Análisis de Membrana de Rankine

El análisis de membrana de cáscaras de fábrica se basa en la búsqueda de una solución de equilibrio con los esfuerzos contenidos dentro de la superficie media de la cáscara. Este método de análisis fue propuesto por primera vez por Rankine en 1858 dando la solución analítica para cúpulas de revolución. Previamente, en 1856, Schwedler desarrolló un método analítico para cúpulas de barras que puede extrapolarse a cáscaras.

El cálculo se basa en la hipótesis de Rankine y Schwedler, la cual supone que las fuerzas interiores creadas por las cargas están situadas en planos tangentes a la cúpula media en los puntos de aplicación de dichas cargas, con lo que se suprimen los momentos de flexión y esfuerzos tangenciales, existiendo únicamente esfuerzos de tracción y compresión.

Los elementos de cálculo correspondientes a un punto cualquiera con coordenadas referidas a la cúspide (x,y), tienen las siguientes notaciones:

- x = Radio del paralelo.
- y = Distancia vertical a la cúspide.
- φ = Colatitud (inclinación del meridiano respecto a la horizontal).
- dx = Incremento diferencial del radio.
- dy = Espesor diferencial del radio.
- s = Longitud del meridiano contada desde la cúspide.
- ds = Elemento diferencial de meridiano; su proyección horizontal es dx.
- N_1 = Compresión meridiana por unidad lineal del paralelo.
- R_1 = Tracción o compresión meridiana por unidad lineal del paralelo.
- P = Carga de la porción de cúpula superior al paralelo.
- dP = Carga del anillo de radio x y anchura dx.

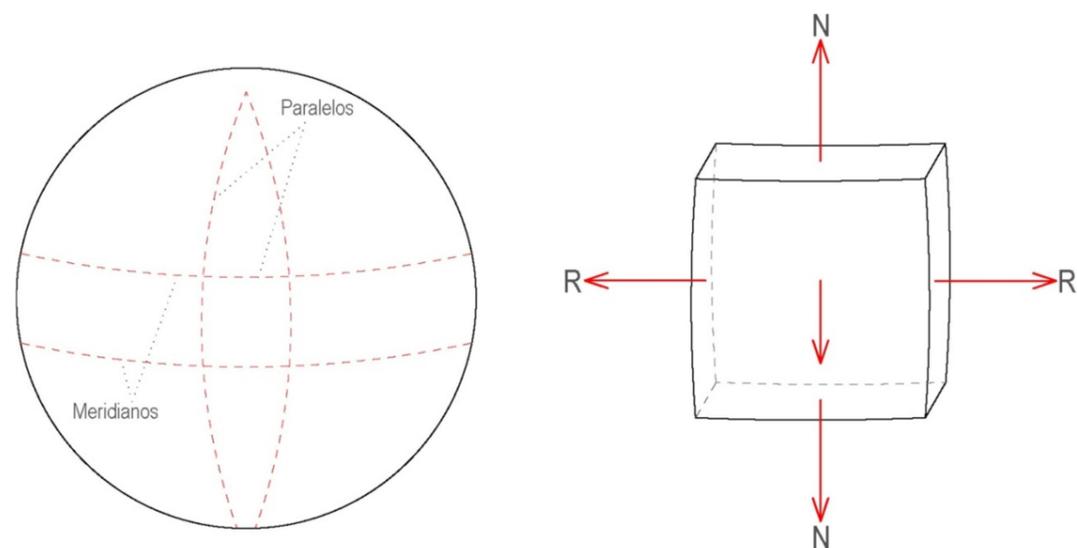


Figura 143: Fuerzas meridianas y paralelas en una superficie de revolución (Izda.). Equilibrio de un elemento de la superficie (Dcha.).
Fuente: Elaboración propia.

Cúpula de revolución de base circular

Partimos de la base de una cúpula cuya superficie es generada por revolución con un eje vertical, cuyo polo es la cúspide, por lo que como consecuencia, las secciones verticales serán los meridianos y las secciones horizontales serán los paralelos a esta superficie.

Consideramos una rebanada de la cúpula de revolución de base circular producida por un plano horizontal a una cierta altura y el peso de la parte que queda por encima del corte se descompone por unidad de paralelo. De esta forma tenemos:

$$N_1 = \frac{P}{2\pi x \sin(\varphi)} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{dR}{ds} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{ds} (P \cot g(\varphi)) \quad (2)$$

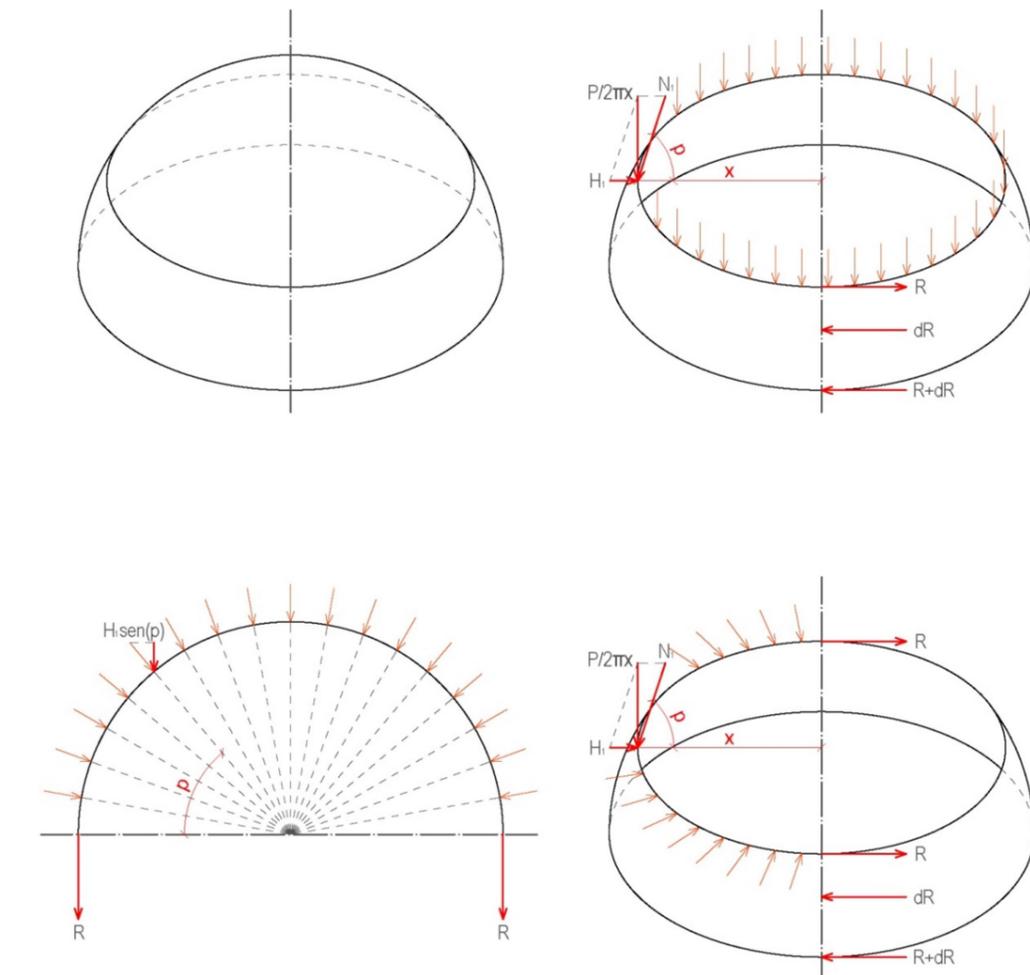


Figura 144: Explicación gráfica de las ecuaciones expuestas para una cúpula de revolución de base circular.
Fuente: Elaboración propia.

Cúpula esférica

Para una cúpula esférica tenemos que:

$$x = R \operatorname{sen}(\varphi) \quad (3)$$

$$y = R(1 - \cos(\varphi)) \quad (4)$$

Considerando un peso uniformemente repartido en la superficie "g" (g=peso/unidad superficie), tenemos que $P=2\pi Ryg=2\pi R^2g(1-\cos(\varphi))$, y entrando en las ecuaciones anteriores (1) y (2), obtenemos:

$$N_1 = \frac{R^2 g}{2R - y} \quad (5)$$

$$R_1 = g \frac{y^2 - 3Ry + R^2}{2R - y} \quad (6)$$

En la cúspide $\varphi=0$. Además, $x = y = 0$, lo que implica:

$$N_0 = R_0 = \frac{Rg}{2} \quad (\text{compresión})$$

Si se anula el esfuerzo paralelo ($R_1 = 0$), tenemos que:

$$R_1 = 0 \rightarrow y^2 - 3Ry + R^2 = 0 \rightarrow y = R \frac{3 \pm \sqrt{5}}{2} \rightarrow \cos(\varphi) = 1 - \frac{y}{R} = 0.62 \rightarrow \varphi = 51'83''$$

Con esto comprobamos que, para este caso, a partir de $51'83''$ ($\varphi=51'83''$) el esfuerzo paralelo por unidad lineal de meridiano (R_1) pasa de compresión a tracción. Por último, en la base $\varphi=90^\circ$. Además, $y = R$, lo que implica:

$$N_1 = gR \quad (\text{compresión})$$

$$R_1 = -gR \quad (\text{tracción})$$

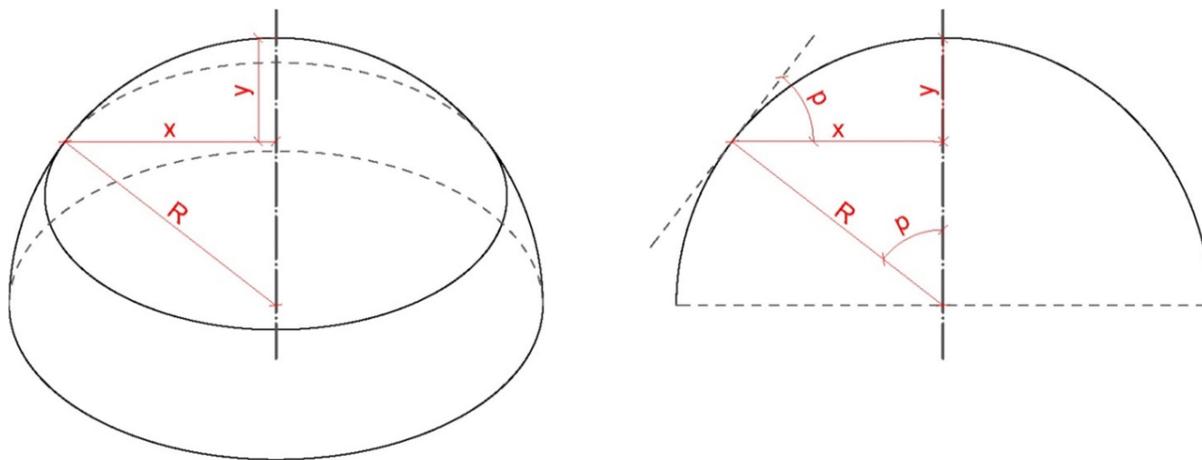


Figura 145: Explicación gráfica de las ecuaciones que intervienen en la cúpula esférica. Fuente: Elaboración propia.

Cúpula esférica con linterna

En este caso, tenemos que descontar el peso de la porción de cúpula eliminada ($2\pi Rbg$) y añadir el peso que introduce la linterna "L". El peso resultante es "G₁" ($G_1=L-2\pi Rbg$). Así obtenemos que $P=2\pi Ryg + G_1 = 2\pi R^2g(1-\cos(\varphi)) + G_1$. Entrando en las ecuaciones (1) y (2) con esta expresión de P, tenemos que:

$$N_1 = \frac{R^2 g}{2R - y} + \frac{RG_1}{2\pi X^2} \quad (7)$$

$$R_1 = g \frac{y^2 - 3Ry + R^2}{2R - y} - \frac{G_1 R}{2\pi x^2} \quad (8)$$

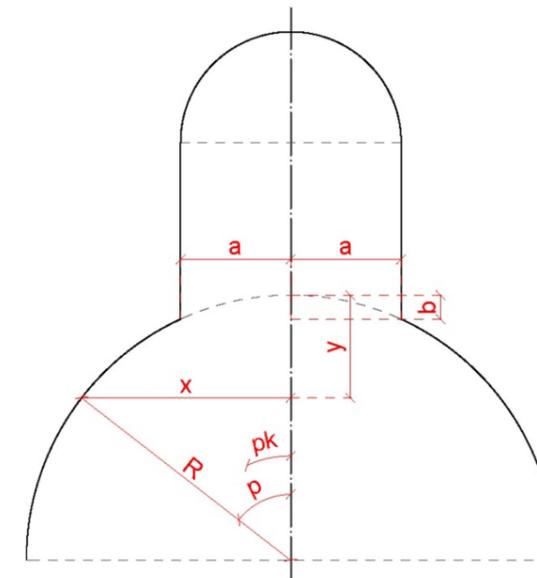


Figura 146: Explicación gráfica de las ecuaciones que intervienen en la cúpula esférica con linterna. Fuente: Elaboración propia.

Caso particular: Cúpula del Sagrario

A continuación se procederá a aplicar este método de análisis a la solución constructiva que había considerado como la situación de equilibrio más estable a raíz de los resultados obtenidos en el apartado dedicado al Análisis Límite. Para la mencionada solución se consideraba que la cúpula tiene un relleno a partir del extradós de la misma igual al ancho del muro en el que se apoya y hasta una altura de 2'21m. Dicho relleno tiene capacidad de transmisión de cargas, por lo que la cúpula se comportará como si se tratase de una cúpula rebajada. Sobre su corona superior descansará todo el peso del tabicado del cupulín. La cáscara principal de la cúpula como la del cupulín tienen las mismas características constructivas: ambas tienen un espesor de 8cm, formado por dos rasillas de ladrillo más el mortero intermedio.

Para aplicar este método de análisis podemos emplear las fórmulas que se emplean para el cálculo de cúpulas esféricas con linterna, con la salvedad de que al no tener nuestra cúpula linterna (únicamente

tiene cupulín) habrá que sustituir en las fórmulas el peso de la linterna por el de nuestro cupulín. De este modo, los datos de partida serían los siguientes:

$$R = 5'095m$$

$$g = (18KN/m^3) \times 0'08m = 1'44KN/m^2$$

$$L = 17'486KN$$

$$G_1 = L - 2\pi Rbg = 9'092KN$$

Considerando diferentes ángulos de φ , en nuestro caso comprendidos entre 16° (arranque del cupulín) y 68° (arranque de la base de la cúpula, desde donde comienza el relleno), y empleando las expresiones (7) y (8) con los valores de x e y correspondientes a cada ángulo, obtenidos a partir de las expresiones (3) y (4) y con los datos de partida anteriores, obtenemos los siguientes valores de N_1 y R_1 :

CÚPULA ESFÉRICA CON CUPULÍN					
φ (grados)	φ (radianes)	x (m)	y (m)	N_1	R_1
16	0,27925268	1,404372328	0,197371659	7,47883218	-0,42624737
20	0,34906585	1,74259263	0,307266097	6,21023407	0,68410275
22,5	0,392699082	1,949772088	0,387833782	5,75279178	1,02552757
25	0,436332313	2,153240044	0,477361825	5,43876562	1,21063335
27,5	0,479965544	2,352609184	0,575679805	5,22004513	1,28777595
30	0,523598776	2,5475	0,682600568	5,06776409	1,28609109
32,5	0,567232007	2,737541505	0,797920584	4,96379345	1,22400091
35	0,610865238	2,922371943	0,921420334	4,89632462	1,1136301
37,5	0,654498469	3,101639481	1,052864731	4,8574411	0,96323368
40	0,698131701	3,275002871	1,192003562	4,84171821	0,77859666
42,5	0,741764932	3,442132108	1,338571969	4,8453826	0,56387376
45	0,785398163	3,60270905	1,49229095	4,86579035	0,32211069
47,5	0,829031395	3,756428031	1,652867892	4,9010935	0,05557674
50	0,872664626	3,902996438	1,819997129	4,95002186	-0,23401773
52,5	0,916297857	4,042135269	1,993360519	5,01173757	-0,54537672
55	0,959931089	4,173579666	2,172628057	5,08573679	-0,87752119
57,5	1,00356432	4,297079416	2,357458495	5,17178295	-1,22972319
60	1,047197551	4,412399432	2,5475	5,26986161	-1,60146161
62,5	1,090830782	4,519320195	2,742390816	5,38015044	-1,99239322
65	1,134464014	4,617638175	2,941759956	5,50300053	-2,40233487
67,5	1,178097245	4,707166218	3,145227912	5,63892599	-2,83125418
68	1,186823891	4,724001739	3,186379407	5,66773659	-2,91932294

Tabla 9: Resultados obtenidos de N_1 y R_1 para cada ángulo considerado en la cúpula del Sagrario. Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar, aproximadamente a partir de $\varphi=50^\circ$, el esfuerzo paralelo por unidad lineal de meridiano (R_1) pasa de ser positivo a negativo, es decir, de compresión a tracción. Por tanto, en nuestro caso, comienzan a aparecer esfuerzos de tracción a partir de un ángulo de 50° con la vertical. Podemos apreciar que hay una ligera diferencia con los resultados obtenidos anteriormente para cúpulas esféricas sin linterna, donde este ángulo era ligeramente superior ($\varphi=51'83^\circ$). El hecho de que en nuestro caso empiecen a aparecer los esfuerzos de tracción más cerca de la corona de la cúpula es debido al peso extra añadido por el tabicado del cupulín.

Por último, para comprobar que todos los cálculos se han realizado correctamente, debemos ver que la compresión meridiana por unidad lineal de paralelo máxima (N_{1F}), esto es, la correspondiente a $\varphi=68^\circ$ (donde arranca la cúpula a partir del relleno, ver Figura 142) en el caso de nuestra cúpula, multiplicada por la longitud correspondiente a la cincuentava parte de la longitud de circunferencia de la base de la cúpula ($l_{1/50}$), debe ser igual al valor de la reacción en la base obtenida por el método del Análisis Límite para un sector de $7'2^\circ$ (uno de los cincuenta gajos en los que dividíamos la cúpula) considerado para el mismo caso (R_{al}).

$$R_{al} = 3'4291KN$$

$$N_{1F} = 5'6677 KN/m$$

$$R = 4'6613m \text{ (Radio a la altura donde aparece la reacción para } \varphi=68^\circ \text{)}$$

$$L_{1/50} = 2\pi R/50 = 29'2878m$$

Por tanto:

$$N_{1F} L_{1/50} = 3'32 KN \approx R_{al}$$

6.2. Estructura de madera de la cúpula

6.2.1. Planteamiento general

Para el cálculo de la estructura de madera que cubre la cúpula del Sagrario, consideraré que serán las ocho limatesas más los ocho partorales los encargados de transmitir todas las cargas desde la cubierta del cupulín hasta llegar al estribo, que a su vez transmitirá las cargas uniformemente sobre el muro en el que se levanta esta estructura. Por una parte, tanto las limatesas como los partorales reciben la carga correspondiente al peso propio de la cubierta del cupulín. Este peso incluirá el peso propio de la estructura de madera, más el peso del acabado exterior (tablazón + mortero de agarre + tejas). No incluirá el peso propio del cupulín, ya que en la hipótesis que había planteado consideré que éste descansaba directamente sobre la corona superior de la cúpula tabicada. Por otra parte, las limatesas recibirán también dos cargas puntuales a cada lado, correspondientes al apoyo de las viguetas que soportan la cubierta de la cúpula (tablazón + mortero de agarre + tejas). No ocurre lo mismo con los partorales, que reciben esta carga de manera uniforme.

Para el cálculo del peso propio de cada uno de los elementos me basaré en el levantamiento en 3D que he realizado para este trabajo con el programa informático AutoCad, con el que podré calcular sus volúmenes y multiplicarlo por el peso propio de cada uno de ellos para obtener las distintas cargas. Los pesos propios que he empleado para los cálculos los he obtenido en el CTE-DB-SE-AE, concretamente en las tablas C1 y C2:

- Peso propio del mortero de yeso = 12 a 28 KN/m³. Tomaré el valor de 15 KN/m³.
- Peso propio de la madera aserrada, tipos C14 a C40 = 3'5 a 5'0 KN/m³. Tomaré el valor de 3'8 KN/m³.
- Peso propio de la teja curva = 0'50 KN/m².

La comprobación de las tensiones se va a llevar a cabo sobre una de las ocho limatesas. Dado que el peso propio de la cubierta del cupulín es soportado por 16 elementos, deberemos dividir el peso total entre 16 para obtener el peso que transmite a cada uno de ellos. El peso de los dos apoyos puntuales se calculará en función de la superficie de faldón que soporte cada una de las viguetas. Para una mejor comprensión del esquema de transmisión de fuerzas, consultar la Figura 147. De este modo, nos quedaría:

- Volumen estructura cupulín = 2'2901 m³
- Área paños cubierta cupulín = 13'0368 m²
- Peso estructura cupulín = 2'2901 m³ x 3'8 KN/m³ = 8'7024 KN
- Peso paños cubierta cupulín = 13'0368 m² x (0'095 + 0'50 + 0'0075 KN/m²) = 7'855 KN
- Peso total cupulín = 8'7024 KN + 7'855 KN = 16'56 KN
- Peso 1/16 cupulín = 1'035 KN
- Peso m² tablero cúpula = 0'095 + 0'50 + 0'0075 = 0'6025 KN/m²
- Superficie apoyo 1 = 4'264 m²
- Peso transmitido en apoyo 1 = 4'264 m² x 0'6025 KN/m² = 2'57 KN / 2 = 1'285 KN
- Superficie apoyo 2 = 4'023 m²
- Peso transmitido en apoyo 2 = 4'023 m² x 0'6025 KN/m² = 2'44 KN / 2 = 1'220 KN

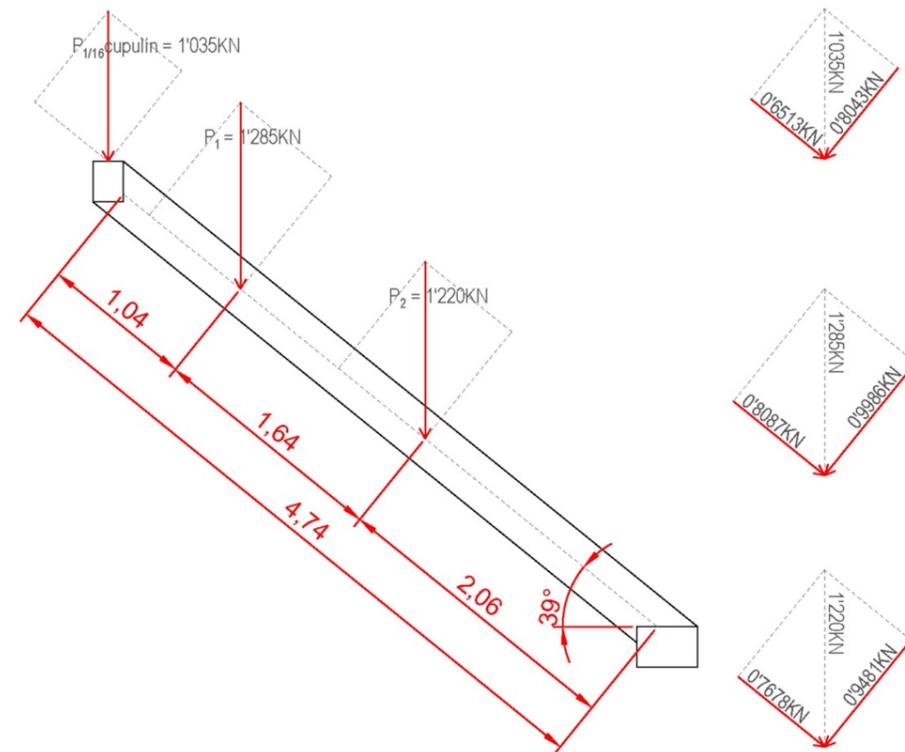
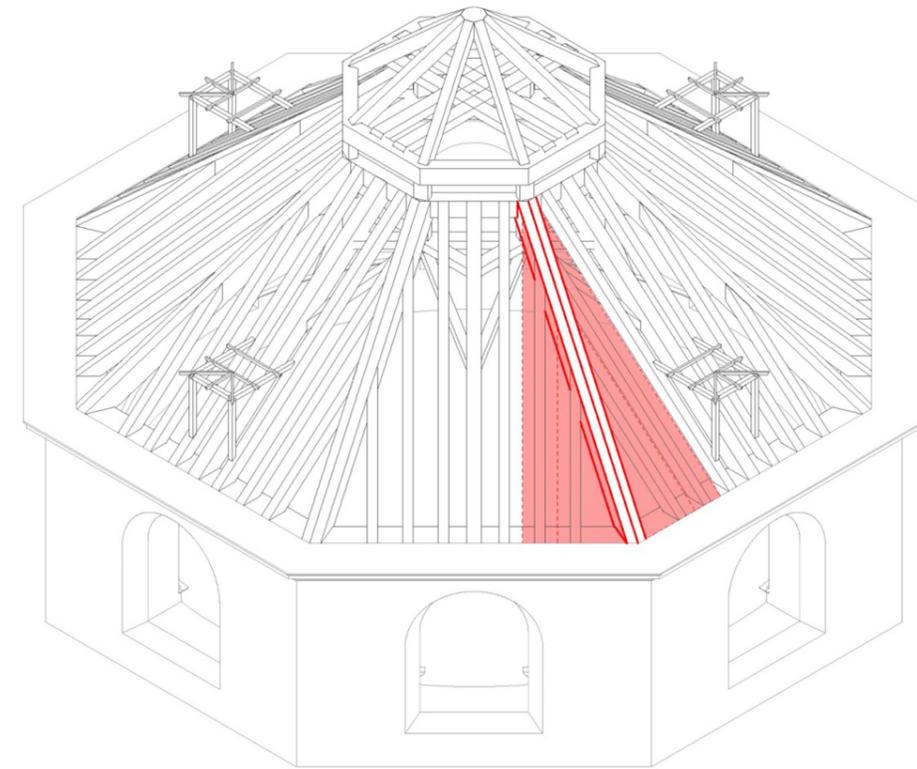


Figura 147: Planteamiento general del cálculo de la limatesa. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Comprobación de las tensiones

Una vez conocidas las cargas y previo a la comprobación de las tensiones que actúan sobre la sección de la limatesa que estamos estudiando, he procedido a la obtención de las leyes de esfuerzos que actúan sobre este elemento, con las que podremos conocer las diferentes tensiones y determinar la clase resistente a la que pertenece la madera, con el fin de conocer los valores de sus propiedades de resistencia, rigidez y densidad. Debido a la falta de datos concretos, he supuesto que se trata de una madera aserrada de clase resistente C18. La sección que consideraré para los cálculos será rectangular de ancho $a = 28\text{cm}$ y alto $h = 35\text{cm}$ y tendrá una longitud de $4,74\text{m}$. Además, presentará articulaciones en sus extremos.

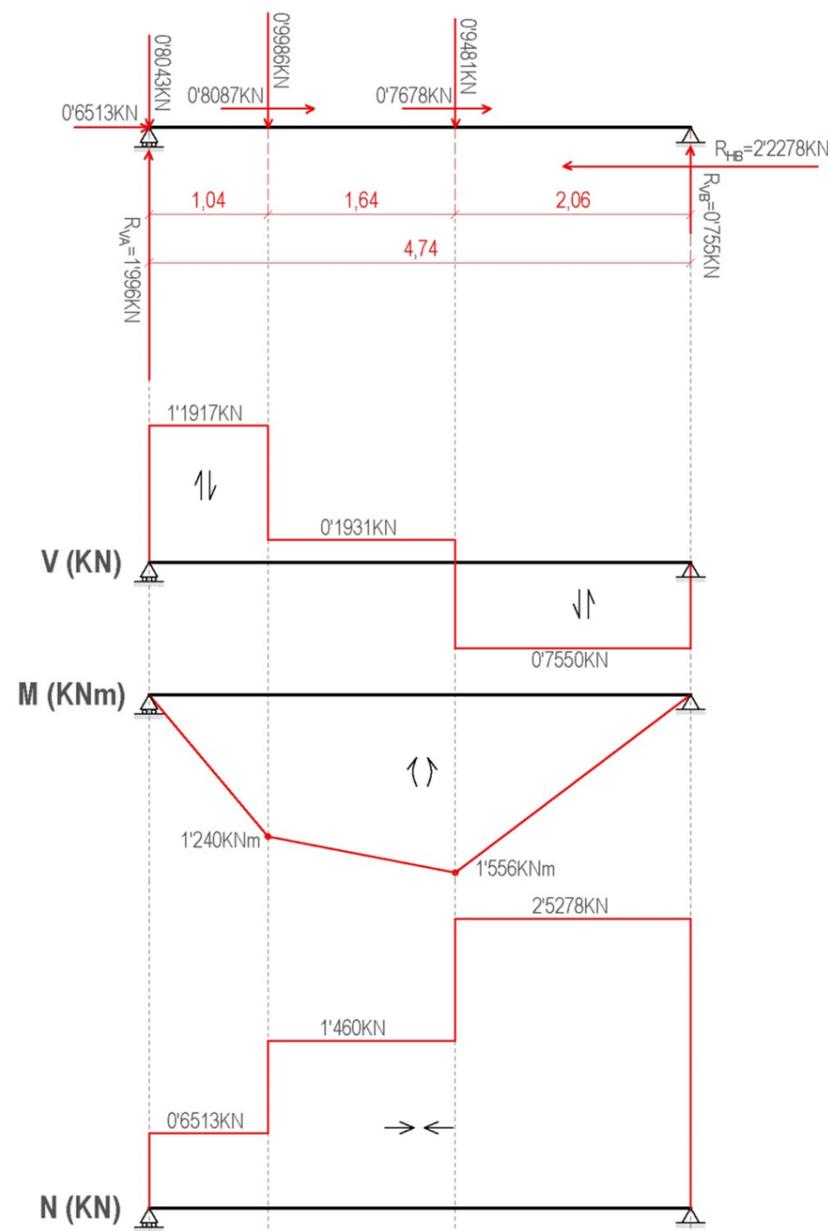


Figura 148: Leyes de esfuerzos actuantes sobre la limatesa objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se obtienen los valores de cálculo tanto de las propiedades como de las acciones a partir de los valores característicos.

-Valores de cálculo de las propiedades

Se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M}$$

Siendo:

X_k = Valor característico de la propiedad. Obtenidos a partir de la [tabla 11](#).

$\gamma_M = 1'3$ Valor del coeficiente parcial de seguridad para el material para combinaciones fundamentales en estados límite últimos.

$K_{mod} = 0'60$ Valor del factor de modificación que tiene en cuenta el efecto de la duración de la carga y del contenido de humedad en los valores resistentes para una carga permanente en clase de servicio 1.

Obtenido a partir de la [tabla 12](#).

Aplicando esta expresión se obtienen los siguientes valores de cálculo:

- Flexión $f_{m,d} = 8'31\text{ N/mm}^2$
- Tracción paralela a la fibra $f_{t,0,d} = 5'07\text{ N/mm}^2$
- Tracción perpendicular a la fibra $f_{t,90,d} = 0'18\text{ N/mm}^2$
- Compresión paralela a la fibra $f_{c,0,d} = 8'31\text{ N/mm}^2$
- Compresión perpendicular a la fibra $f_{c,90,d} = 1'02\text{ N/mm}^2$
- Cortante $f_{v,d} = 1'57\text{ N/mm}^2$

-Valores de cálculo de las acciones

Se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$F_d = \gamma_F F_K$$

Siendo:

$\gamma_F = 1'35$ Coeficiente parcial de seguridad para acciones permanentes.

F_K = Valor característico de la acción.

Aplicando esta expresión se obtienen los siguientes valores de cálculo:

- Axil $N_k = 2'5278\text{ kN}$; $N_d = 3'413\text{ kN}$
- Cortante $V_k = 1'9117\text{ kN}$; $V_d = 2'581\text{ kN}$
- Momento flector $M_k = 1'556\text{ kNm}$; $M_d = 2'101\text{ kNm}$

Tabla E.1 Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente

Propiedades	Clase resistente	Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia (característica) en N/mm²													
- Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
- Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
- Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm²													
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
- Módulo transversal medio	G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad, en kg/m³													
- Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabla 10: Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente para madera aserrada. Fuente: CTE DB SE-M.

Tabla 2.4 Valores del factor k_{mod}

Material	Norma	Clase de servicio	Clase de duración de la carga				
			Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera maciza	UNE-EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Madera laminada encolada	UNE-EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Madera microlaminada	UNE-EN 14374, UNE-EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tabla 11: Valores del factor K_{mod} para madera maciza. Fuente: CTE DB SE-M.

6.2.2.1. Comprobación a flexocompresión

Se debe cumplir que:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Siendo:

$\sigma_{c,0,d} = N_d/A_n$, valor de cálculo de la tensión de compresión paralela a la fibra, provocada por el esfuerzo axil N_d , suponiendo que las tensiones se reparten uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza, A_n .

$$A_n = 280\text{mm} \times 350\text{mm} = 98000\text{mm}^2$$

$$N_d = 3'413\text{KN} = 3413\text{N}$$

$$\sigma_{c,0,d} = 3413/98000 = 0'035\text{N/mm}^2$$

$\sigma_{m,y,d} = M_d/W$, valor de cálculo de la tensión de flexión máxima respecto del eje y-y.

$W = bh^2/6$, módulo resistente para una sección rectangular.

$$W = (280 \times 350^2)/6 = 5716666'6\text{mm}^3$$

$$M_d = 2101000\text{Nmm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = 2101000/5716666'6 = 0'368\text{N/mm}^2$$

Por tanto:

$$\frac{0.035}{8.31} + \frac{0.368}{8.31} = 0'05 < 1$$

6.2.2.2. Comprobación a cortante

Se debe cumplir que:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

Siendo:

$\tau_d = 1'5V_d/(bh)$, valor de cálculo de la tensión tangencial máxima para secciones rectangulares.

$$V_d = 2581\text{N}$$

$$\tau_d = 1'5 \times 2581 / (280 \times 350) = 0'04\text{N/mm}^2$$

Por tanto:

$$\frac{0'04}{1'57} = 0'025 < 1$$

6.2.2.3. Comprobación de la unión par-estribo

Como ya comenté en el apartado del análisis constructivo dedicado a la estructura de madera, la unión limatesa-estribo es posible que esté realizada con un ensamble de barbilla a tope simple, un tipo de ensamble a compresión, tal y como recomendaba Fray Lorenzo de San Nicolás en su Tratado. En este tipo de unión los esfuerzos se transmiten de una pieza a otra equilibrando, generalmente, los esfuerzos axiales mediante compresiones y esfuerzos tangenciales. Los elementos metálicos que suelen añadirse solo tienen, en general, la misión de asegurar o afianzar las piezas impidiendo su descolocación.

El cálculo de las uniones tradicionales se reduce a la comprobación de las tensiones de compresión localizadas y las tensiones tangenciales en los cogotes de las piezas, en función del modo de transmitir los esfuerzos.

Antes de comenzar el cálculo, cabe recordar que el estribo planteado en la hipótesis constructiva presenta una sección transversal rectangular de 420mmx280mm. En la zona del apoyo la sollicitación en el estribo será exclusivamente una fuerza axial de compresión, $N_{e,d}$, y en el par un axial de compresión, $N_{l,d}$, y un cortante $V_{l,d}$. El equilibrio del nudo exige que las componentes horizontales de $N_{l,d}$ y $V_{l,d}$, se equilibren con el axial del estribo $N_{e,d}$ y que las componentes verticales se igualen a la reacción en el apoyo, R_d . Conociendo los valores de $N_{l,d}=3'413\text{KN}$ y $V_{l,d}=2'581\text{KN}$, obtenidos anteriormente, se han obtenido los valores de $R_d=4'1537\text{KN}$ y $N_{e,d}=1'0281\text{KN}$, mediante el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio (Figura 149).

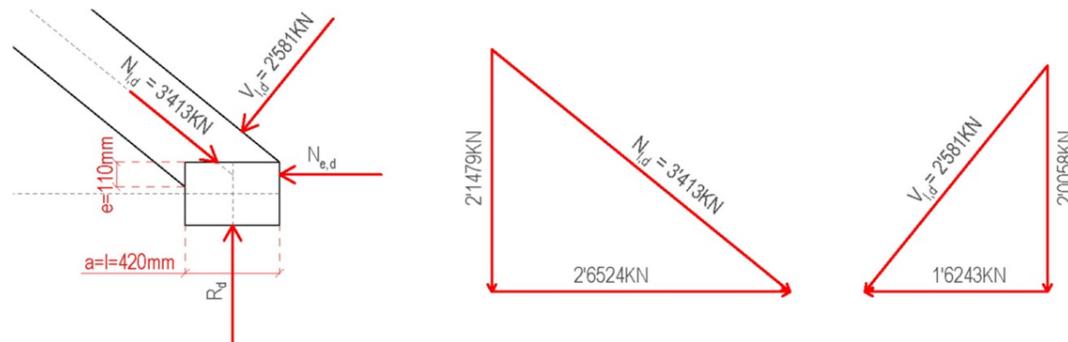


Figura 149: Fuerzas actuantes en el nudo limatesa-estribo. Fuente: Elaboración propia.

En las superficies de contacto de las piezas del ensamble se originan unas tensiones de compresión que resultan oblicuas a la fibra cuyo efecto puede analizarse de forma simplificada, considerando solamente sus componentes paralelas y perpendiculares a la fibra, según el procedimiento siguiente:

- La componente vertical, que resulta igual a la reacción R_d , provoca una tensión de compresión perpendicular a la fibra $\sigma_{c,90,d}$ sobre la superficie de área ab , que debe resultar inferior a la resistencia de cálculo de compresión perpendicular a la fibra $f_{c,90,d}$:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_d}{axb} \leq f_{c,90,d}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} R_d &= 4153'7\text{N} \\ a &= 420\text{mm} \\ b &= 280\text{mm} \\ f_{c,90,d} &= 1'02\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

Por tanto:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{4153'7}{420 \times 280} = 0'0355\text{N/mm}^2 < 1'02\text{N/mm}^2$$

- El esfuerzo axial de compresión del estribo $N_{e,d}$, origina una tensión de compresión paralela a la fibra, $\sigma_{c,0,d}$, sobre la superficie eb , que debe ser inferior a la resistencia de cálculo paralela a la fibra, $f_{c,0,d}$:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{e,d}}{exb} \leq f_{c,0,d}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} N_{e,d} &= 1028'1\text{N} \\ e &= 110\text{mm} \\ f_{c,0,d} &= 8'31\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

Por tanto:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{1028'1}{110 \times 280} = 0'033\text{N/mm}^2 < 8'31\text{N/mm}^2$$

- Finalmente, este esfuerzo axial, $N_{e,d}$, genera una tensión tangencial τ_d , sobre la superficie bl , que debe resultar inferior a la resistencia de cálculo a cortante $f_{v,d}$:

$$\tau_d = \frac{N_{e,d}}{bxl} \leq f_{v,d}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} l &= 420\text{mm} \\ f_{v,d} &= 1'57\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

Por tanto:

$$\tau_d = \frac{1028'1}{280 \times 420} = 0'009\text{N/mm}^2 < 1'56\text{N/mm}^2$$

7. Conclusiones

7.1. Análisis de los resultados

Una vez llegado casi al final de este trabajo y tras las múltiples visitas al Sagrario y la consulta y estudio de numerosos artículos y documentos, puedo confirmar casi con total seguridad que la cúpula principal de esta iglesia se trata de una estructura tabicada. Son varios los factores que me han llevado a alcanzar esta conclusión:

- La propagación de esta solución constructiva por parte de Fray Lorenzo de San Nicolás en su tratado *Arte y Uso de la Arquitectura*, una de las principales fuentes de las que se serviría José de Bada.
- La proliferación de este tipo de estructuras por todo el territorio Peninsular, con algunos ejemplos citados a lo largo de este trabajo como la San Juan de Dios en Granada (obra también de Bada), la iglesia de San Juan de la Penitencia en Alcalá de Henares, el convento de San Pedro en Sevilla, etc.
- Los problemas estructurales que comenzó a presentar el Sagrario durante su construcción, que hicieron que el Maestro Mayor se decantase por construir la cúpula empleando la técnica tabicada, en lugar de construirla de cantería tal y como estaba proyectada desde un principio, mucho más pesada.
- La crisis económica que comenzó a sufrir España en aquella época, propiciando que este tipo de estructuras, más rápidas de construir, más ligeras y sobre todo más baratas, fuesen una opción más que justificada.

El principal problema que presentan este tipo de estructuras a la hora de su identificación, sobre todo cuando la documentación existente es escasa, es que al tratarse de construcciones en las que la mayoría de las veces el espacio que queda entre la cúpula tabicada y el armazón de madera que la cubre es inaccesible. Por tanto, únicamente se puede certificar su modo de construcción cuando en ellas se lleva a cabo algún trabajo de restauración en el que se descubra el material de cubrición que haya sobre la estructura de madera. En este sentido, el caso del Sagrario es un poco particular, ya que presenta cuatro respiraderos en la cubierta de la cúpula, desde los que se podría visualizar el espacio al que hago referencia. Lamentablemente, durante la realización de este trabajo me fue imposible subir hasta estos respiraderos, dada su elevada altura.

En lo referente al análisis estructural he podido comprobar, en primer lugar y empleando el método del Análisis Límite planteado por Heyman, la dificultad para encontrar una solución de equilibrio en la que la línea de empujes quedase contenida dentro de una sección de tan escaso espesor. Tras haber planteado cinco hipótesis o planteamientos diferentes, con diversas variaciones a su vez dentro de ellas, la situación de equilibrio en la que obtuve un mayor coeficiente de seguridad geométrico, de 1'372, corresponde a la solución en la que se considera que la cúpula tabicada tiene un espesor de 8cm, sobre la que apoya directamente el cupulín, también con un espesor de 8cm, y que presenta un macizado en sus riñones hasta una altura de 1'85m con un espesor igual al ancho del muro y con capacidad de transmisión de cargas, por lo que la cúpula se comportaría como una cúpula rebajada.

En segundo lugar, mediante el Análisis de Membrana de Rankine, he podido obtener los diferentes valores de los esfuerzos de tracción y compresión, comprobando que en nuestro caso los esfuerzos de tracción comienzan a aparecer a una latitud mayor que en el caso del supuesto de una cúpula esférica sin

linterna. Esto es debido principalmente a la variación de cargas que sufre la cúpula al verse desprendida de su parte superior, que pasa a ser sustituida por el cupulín, el cual descarga todo su peso sobre la corona superior de la cúpula.

En último lugar, he realizado una serie de comprobaciones sobre una de las limatesas que forman parte de la estructura de madera de la cubierta, así como de la unión entre ésta y el estribo en su parte inferior. He podido comprobar que las diferentes tensiones que afectan a estas partes son muy inferiores a las tensiones que podrían soportar, lo que parece lógico si pensamos que la estructura, en sus orígenes, estaba cargada por una pesada linterna que fue retirada posteriormente, por lo que actualmente podríamos decir que está "sobredimensionada" para las cargas que debe soportar.

7.2. Futuras líneas de investigación

Una línea de investigación muy interesante, a mi parecer, sería el estudio de esta cúpula y en general de este tipo de estructuras frente a la acción de los terremotos. Cabe mencionar que, tras el terremoto que sufrió Granada en noviembre de 1755, el Cabildo pidió a Bada realizar un reconocimiento de la Catedral, la cual presentaba algunos desperfectos, mientras que la cúpula del Sagrario seguía manteniéndose intacta. Este hecho no hace más que corroborar que este tipo de estructuras presentan en estos casos un comportamiento bastante bueno que sería un interesante objeto de estudio.

Por otro lado, también creo que sería interesante el estudio de las posibles deformaciones de la cúpula, debidas principalmente a su peso propio. Para ello sería imprescindible realizar una medición láser por nube de puntos y estudiar las zonas de deformación para identificar posibles zonas tensionadas en la estructura que pudiesen originar un colapso de la misma.

Por último, otra línea de investigación que se podría plantear sería el estudio en profundidad del estado de la estructura de madera que cubre la cúpula. Cabe recordar el hecho de que el colapso de la cúpula de la iglesia de San Juan de la Penitencia de Alcalá de Henares se produjo por el colapso de uno de los pares de la estructura de madera (por pudrición), la cual arrastró en su caída a la cúpula tabicada. Por tanto, sería interesante ahondar en este tema, pues aunque no forma parte de la estructura de tabicada propiamente dicha, su buen mantenimiento y estado de conservación juegan un papel fundamental en la estabilidad de todo el conjunto.

Anexo A.

Toma de datos



Figura 150: Medición con estación y distanciómetro láser. Fuente: Elaboración propia.

Punto	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Coordenada Z (m)
1	0	0	0
2	-0.7168	0	2.1506
3	-0.5905	0.1629	8.9106
4	-1.0160	-0.3426	10.5773
5	1.3231	-0.2619	16.1409
6	3.8983	-3.2085	20.2440
7	3.5583	-3.3473	20.5776
8	3.4873	-3.3728	20.7753
9	3.2632	-3.4564	20.9483
10	3.1611	-3.5013	21.0893
11	3.1631	-3.5059	21.4100
12	3.0393	-3.6313	22.7057
13	2.7896	-3.7423	22.9328
14	3.0444	-4.4975	23.1562
15	3.4840	-4.6600	24.1230
16	3.4052	-3.4332	25.9669
17	2.8181	-8.4577	23.1689
18	-1.3795	-1.6170	23.1597
19	1.6357	-3.7189	27.6905

Tabla 12: Coordenadas de los puntos medidos con la estación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 151: Puntos medidos con la estación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 152: Medición de la parte exterior de la cúpula. Fuente: Elaboración propia.

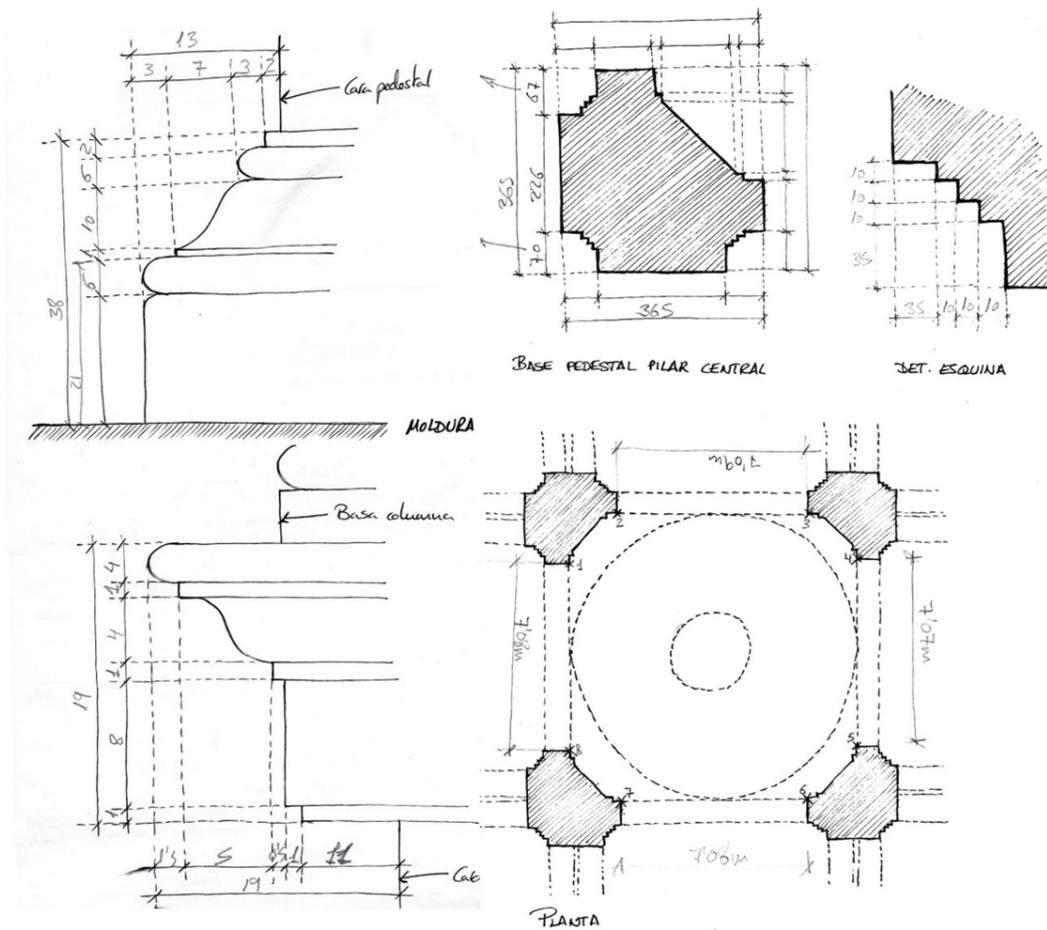


Figura 153: Croquis empleados en la medición con cinta. Fuente: Elaboración propia.

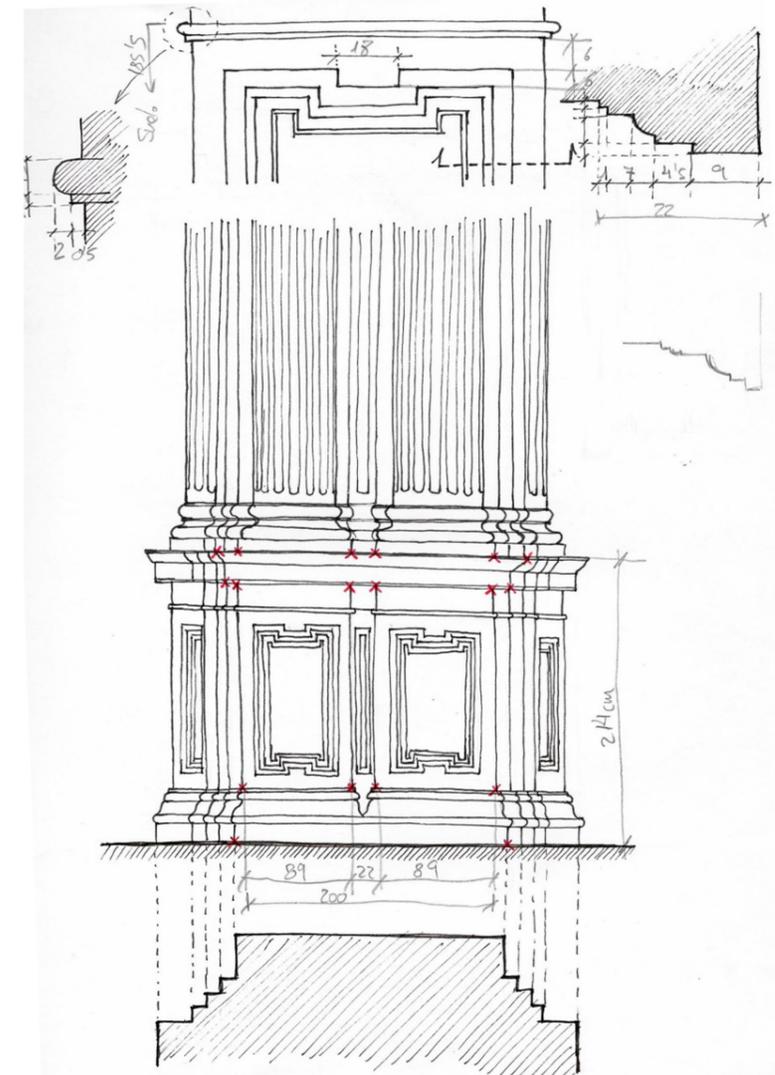
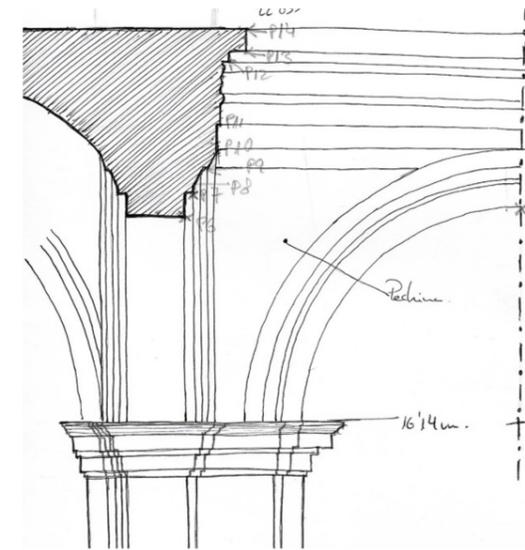


Figura 154: Croquis empleados en la medición con cinta. Fuente: Elaboración propia.

8. Bibliografía

- Argüelles Álvarez, R., (1996): "Estructuras de madera: diseño y cálculo", Madrid.
- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural de Madera CTE DB SE-M, (2009).
- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural Acciones en la Edificación CTE DB SE-AE, (2009).
- Gallego Sánchez, F., (2017): Trabajo Fin de Grado "Análisis constructivo y estructural de la cúpula de San Juan de Dios en Granada", Granada.
- Guastavino Moreno, R., (1893): "Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timber vault", Boston.
- Huerta Fernández, S., (2001): "La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino", Madrid.
- Huerta Fernández, S., (2004): "Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica", Madrid.
- Iborra Bernad, F., (2013): "¿Cúpulas o cimborrios? Las medias naranjas con nervios y lunetos en la arquitectura española del siglo XVIII", Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid.
- Isla Mingorance, E., (1977): "José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz (1691-1755)", Granada.
- Isla Mingorance, E., (1979): "Hospital y basílica de San Juan de Dios en Granada", Madrid.
- Martín Jiménez, C., (2009): "La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia", Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Valencia.
- Münzer, J. (2010): "Viaje por España y Portugal en los años 1494 y 1495", versión del latín por Julio Puyol, Alicante.
- Pinto Puerto, F., (2005): "El cimborrio de madera del antiguo convento de San Pablo de Sevilla", Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz.
- Redondo Martínez, E., (2013): Tesis Doctoral "La bóveda tabicada en España en el siglo XIX", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Rosenthal, E., (1990): "La Catedral de Granada. Un estudio sobre el Renacimiento Español", Granada.
- Ruiz Agudo, E. Mª., (2007): Tesis Doctoral "Prevención del daño debido a la cristalización de sales en el Patrimonio Histórico construido mediante el uso de inhibidores de cristalización" Universidad de Granada, Granada.
- Salmerón Escobar, P., Garzón Osuna, D., Pérez de la Torre, R.M., (2016): "Guía de la Catedral de Granada", Granada.
- San Nicolás, Fray L., (1639, 1665): "Arte y Uso de Arquitectura", Primera y Segunda parte.
- Taylor, R., (1996): "El Sagrario de la Catedral de Granada y la Junta de Maestros de 1738".
- VV.AA. (2007): "La Catedral de Granada. La Capilla Real y la Iglesia del Sagrario. Vol. 1 y 2", Granada.
- <https://chrismielost.blogspot.com>
- <https://contemplalaobra.blogspot.com>
- <https://esthisart.blogspot.com>
- <http://historico.oepm.es/museovirtual/index.php>
- <http://legadonazari.blogspot.com.es>
- <https://www.sjd.es>
- <https://www.zaragoza.es>
- <https://www.albanecar.es>

9. Referencias a figuras y tablas

Figura 1: Fragmento del lienzo de la Batalla de la Higuera...	3
Figura 2: (Izda.) Grabado de Heylan de 1614 de la torre Turpiana o alminar de la Mezquita Mayor de Granada. (Dcha.) Fragmento de la plataforma de Ambrosio de Vico de 1613...	4
Figura 3: (Izda.) Plano de la mezquita aljama de Granada, dibujado por José Sánchez y Sebastián Díaz en 1704. (Dcha.) Plano de la Mezquita Mayor y la Catedral de Granada en construcción por Juan de la Vega (1594)...	4
Figura 4: Evolución en planta del conjunto catedralicio...	5
Figura 5: Lápida de la Sacristía del Sagrario con las fechas de inicio y fin de las obras...	6
Figura 6: (Izda.) Planta de la cripta del Sagrario. (Dcha.) Planta baja del Sagrario...	7
Figura 7: Imagen general del interior del Sagrario...	8
Figura 8: Imagen general de las bóvedas del Sagrario...	8
Figura 9: Imágenes generales de la cripta...	9
Figura 10: Imagen general de la bóveda bajo el crucero...	9
Figura 11: Esquema de bóvedas de la cripta...	9
Figura 12: Comparación entre las plantas del Sagrario de Granada y San Pedro de Roma...	10
Figura 13: Espacios que componen el Sagrario (arriba) y esquema de bóvedas (abajo)...	10
Figura 14: Accesos a la Sacristía (Izda.) y Puerta que comunica con la Catedral (Dcha.)...	11
Figura 15: Cúpula central sobre pechinas...	11
Figura 16: Detalle de una de las pechinas...	12
Figura 17: Detalle de uno de los soportes centrales...	12
Figura 18: Detalle de una de las bóvedas vaídas y de la bóveda de cuarto de esfera de una de las capillas...	12
Figura 19: Detalle de una de las bóvedas de arista...	12
Figura 20: Detalle de una de las capillas laterales del crucero...	13
Figura 21: Detalle de los distintos tipos de capiteles...	13
Figura 22: Detalle de un arco de medio punto de las capillas laterales...	13
Figura 23: Detalle de las basas de los soportes centrales...	13
Figura 24: Alzado principal (arriba) y alzado desde la calle Oficios (abajo)...	14
Figura 25: Portada principal del Sagrario. Fuente: Elaboración propia...	15
Figura 26: Detalles de capiteles y basas de la portada...	15
Figura 27: Torre del Sagrario...	15
Figura 28: Balcón de la fachada principal (izda.) y portada de la calle Oficios (dcha.)...	15
Figura 29: Armaduras tabicadas empleadas por los romanos...	16
Figura 30: Bóveda bizantina...	16
Figura 31: Planta y secc. de la cúpula de la iglesia de San Vitale de Rávena...	17
Figura 32: Bóvedas de la capilla de los Jofre (Izda.) y Huella de bóveda en la catedral de Barcelona (Dch)...	17
Figura 33: Bóveda de la capilla de la reina María en el convento de la Trinidad de Valencia (Izda.) y bóvedas de la capilla de San Martín (Dcha.)...	18
Figura 34: Sección y vista general de las bóvedas de la Lonja de Zaragoza...	18
Figura 35: Vista general de las bóvedas del Hospital General de Valencia...	18
Figura 36: Sección de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia...	19
Figura 37: Cúpula tabicada de la sacristía de la Cartuja de Granada...	19
Figura 38: Recreación de la planta diseñada por Hurtado Izquierdo...	20
Figura 39: Grieta del pedestal...	21
Figura 40: Dibujo de José Gallego para el encadenado de los cimientos del Sagrario...	21

Figura 41: Ídem. Fig. 12. Comparación entre las plantas del Sagrario de Granada y San Pedro de Roma...	23
Figura 42: Refuerzos de la bóveda de la cripta situada bajo el tabernáculo...	24
Figura 43: Vistas del extr. de una de las cúpulas vaídas laterales a través del respiradero de la cubierta...	25
Figura 44: Vistas de las armaduras de cubierta de una de las cúpulas vaídas laterales a través del respiradero...	25
Figura 45: Cúpula de la basilica de San Juan de Dios de Granada...	25
Figura 46: Decoración de la cúpula y el cupulín por su intradós...	25
Figura 47: Muros exteriores y cubierta vidriada de la cúpula principal...	26
Figura 48: Detalle de respiraderos de las cubiertas. Cúpula principal (izda.) y cúpula lateral (dcha.)...	26
Figura 49: Cubierta vidriada de la cúpula principal...	26
Figura 50: Cubierta cerámica de una de las bóvedas laterales...	26
Figura 51: Perspectiva y alzado del muro exterior de la cúpula...	29
Figura 52: Procedimiento para construir una media naranja esférica de ladrillo tabicado, según Fray Lorenzo de San Nicolás...	30
Figura 53: (Izda.) Croquis de la cúpula de San Juan de la Penitencia. (Dcha.) Croquis de la cúpula de San Juan de Dios de Granada...	30
Figura 54: Perspectiva y planta de la estructura tabicada del Sagrario...	31
Figura 55: Cubierta de madera para una bóveda encamionada con linterna, según Fray Lorenzo de San Nicolás...	31
Figura 56: Cubierta de madera del cimborrio del antiguo convento de San Pablo de Sevilla...	32
Figura 57: Medidas y escuadrías más usuales en estructuras de madera...	32
Figura 58: (Arriba) Perspectiva de la estructura de madera que cubre la cúpula. (Abajo) Planta de la estructura...	33
Figura 59: (Arriba) Perspectiva de la estructura de madera que cubre la cúpula incluyendo el tablazón. (Abajo) Sección de la estructura incluyendo la cúpula tabicada...	33
Figura 60: Proceso constructivo de la estructura de madera de la cubierta...	34
Figura 61: Esquema de detalles constructivos analizados...	35
Figura 62: Detalles constructivos de la estructura de madera...	35
Figura 63: Acabado exterior de la cúpula con teja cerámica vidriada...	36
Figura 64: Detalles de las yeserías del acabado interior de la cúpula...	36
Figura 65: Sección constructiva completa de la cúpula...	37
Figura 66: Estribos para bóvedas de cañón según Fray Lorenzo de San Nicolás...	38
Figura 67: Sala de telares de la fábrica Batlló...	39
Figura 68: Comparación entre arco mecánico y cohesivo (izda.) y comparación de agrietamientos (dcha.)...	39
Figura 69: Ensayos de tracción, flexión y cortadura realizados por Guastavino...	40
Figura 70: Ensayos de resistencia sobre una bóveda de cañón tabicada...	40
Figura 71: Cúpula tabicada rebajada con refuerzos metálicos...	40
Figura 72: Método gráfico propuesto por Eddy...	41
Figura 73: Disposición de armaduras metálicas en cúpulas tabicadas...	41
Figura 74: Posiciones de la línea de empujes en un arco tabicado...	42
Figura 75: Modelo colgante de Poleni para verificar la estabilidad de la cúpula de San Pedro...	44
Figura 76: Agrietamientos usuales en una cúpula de fábrica que la convierten en una sucesión de gajo...	44
Figura 77: Planta y secciones de la cúpula...	45
Figura 78: Representación gráfica de la Hipótesis 1...	46
Figura 79: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 1...	47

Figura 80: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 2.....	47
Figura 81: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 3.....	48
Figura 82: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 4.....	48
Figura 83: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 5.....	49
Figura 84: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 6.....	49
Figura 85: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 7.....	50
Figura 86: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 8.....	50
Figura 87: Línea de empujes para Hipótesis 1 – Situación 9.....	51
Figura 88: Representación gráfica de la Hipótesis 2.....	52
Figura 89: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 1.....	53
Figura 90: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 2.....	53
Figura 91: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 3.....	54
Figura 92: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 4.....	54
Figura 93: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 5.....	55
Figura 94: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 6.....	55
Figura 95: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 7.....	56
Figura 96: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 8.....	56
Figura 97: Línea de empujes para Hipótesis 2 – Situación 9.....	57
Figura 98: Representación gráfica de la Hipótesis 3.....	58
Figura 99: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 1.....	59
Figura 100: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 2.....	59
Figura 101: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 3.....	60
Figura 102: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 4.....	60
Figura 103: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 5.....	61
Figura 104: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 6.....	61
Figura 105: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 7.....	62
Figura 106: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 8.....	62
Figura 107: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 9.....	63
Figura 108: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 10.....	63
Figura 109: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 11.....	64
Figura 110: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 12.....	64
Figura 111: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 13.....	65
Figura 112: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 14.....	65
Figura 113: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 15.....	66
Figura 114: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 16.....	66
Figura 115: Línea de empujes para Hipótesis 3 – Situación 17.....	67
Figura 116: Representación gráfica de la Hipótesis 4.....	68
Figura 117: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 1.....	69
Figura 118: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 2.....	69
Figura 119: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 3.....	70
Figura 120: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 4.....	70
Figura 121: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 5.....	71
Figura 122: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 6.....	71
Figura 123: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 7.....	72
Figura 124: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 8.....	72
Figura 125: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 9.....	73

Figura 126: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 10.....	73
Figura 127: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 11.....	74
Figura 128: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 12.....	74
Figura 129: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 13.....	75
Figura 130: Línea de empujes para Hipótesis 4 – Situación 14.....	75
Figura 131: Representación gráfica de la Hipótesis 5.....	76
Figura 132: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 1.....	77
Figura 133: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 2.....	77
Figura 134: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 3.....	78
Figura 135: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 4.....	78
Figura 136: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 5.....	79
Figura 137: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 6.....	79
Figura 138: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 7.....	80
Figura 139: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 8.....	80
Figura 140: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 9.....	81
Figura 141: Línea de empujes para Hipótesis 5 – Situación 10.....	81
Figura 142: Situación 13 de la Hipótesis 4. Situación de equilibrio con mayor coeficiente de seguridad geométrico (1'351).....	83
Figura 143: Fuerzas meridianas y paralelas en una superficie de revolución (Izda.). Equilibrio de un elemento de la superficie (Dcha.).....	84
Figura 144: Explicación gráf. de las ecuaciones expuestas para una cúpula de revolución de base circular.....	84
Figura 145: Explicación gráfica de las ecuaciones que intervienen en la cúpula esférica.....	85
Figura 146: Explicación gráfica de las ecuaciones que intervienen en la cúpula esférica con linterna.....	85
Figura 147: Planteamiento general del cálculo de la limatesa.....	87
Figura 148: Leyes de esfuerzos actuantes sobre la limatesa objeto de estudio.....	88
Figura 149: Fuerzas actuantes en el nudo limatesa-estribo.....	90
Figura 150: Medición con estación y distanciómetro láser.....	92
Figura 151: Puntos medidos con la estación.....	92
Figura 152: Medición de la parte exterior de la cúpula.....	93
Figura 153: Croquis empleados en la medición con cinta.....	93
Figura 154: Croquis empleados en la medición con cinta.....	93

Tabla 1: Escuadrías recomendadas por Fray Lorenzo de San Nicolás.....	32
Tabla 2: Tensiones de rotura obtenidas en los ensayos.....	40
Tabla 3: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 1.....	46
Tabla 4: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 2.....	52
Tabla 5: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 3.....	58
Tabla 6: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 4.....	68
Tabla 7: Cálculo de volúmenes, pesos y centros de gravedad correspondientes a la Hipótesis 5.....	76
Tabla 8: Resumen de los resultados obtenidos en el planteamiento de las diferentes hipótesis.....	82
Tabla 9: Resultados obtenidos de N_1 y R_1 para cada ángulo considerado en la cúpula del Sagrario.....	86
Tabla 10: Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente para madera aserrada.....	89
Tabla 11: Valores del factor K_{mod} para madera maciza.....	89
Tabla 12: Coordenadas de los puntos medidos con la estación.....	92

