

**APROXIMACIÓN ARQUITECTÓNICA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS BÓVEDAS DE TERCELETE EN EL CASO
DE LA CAPILLA CAPITÁN MONTE BERNARDO DE LA IGLESIA DE SANTA ANA DE SEVILLA**

AUTORA: MARÍA TARÍN DOMÍNGUEZ
TUTORES: MARÍA TERESA RODRÍGUEZ LEÓN
JAIME AGUILAR VALSECA

TFG-G_ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA_UNIVERSIDAD DE SEVILLA_JUNIO 2019

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis tutores el apoyo que me han dado durante la realización de este trabajo.

A Teresa Rodríguez por saber orientarme hasta llegar a este punto en el que escribo estas líneas, exigiéndome y guiándome de la mejor manera posible para llegar a nuestro objetivo.

A Jaime Aguilar por abrirme las puertas de Santa Ana y del estudio NFOQUE Arquitectos que siento como mi casa. Gracias por enseñarme a ver la arquitectura con otros ojos y por tener la paciencia de compartir conmigo sus conocimientos.

Por supuesto agradecer a mi familia el apoyo incondicional que tengo de ellos. Por animarme en los peores momentos y alegrarse más que yo en los buenos.

Por último agradecer a mis amigos de siempre el aguantar las locuras de este mundo y a los amigos hechos en la carrera por compartir esa locura siempre con una sonrisa.

A todos, simplemente, gracias.

Índice

AGRADECIMIENTOS	3	8. CONCLUSIONES	55
1. INTRODUCCIÓN	7	9. ÍNDICE DE TABLAS	57
2. OBJETIVOS	9	10. ÍNDICE DE FIGURAS	57
3. METODOLOGÍA	9	11. ANEJO DE PLANIMETRÍA	61
4. ANÁLISIS HISTÓRICO	11	12. BIBLIOGRAFÍA.....	69
4.1 Iglesia de Santa Ana	11		
4.2. Sevilla en el s.XVI.	14		
4.3. Capilla Capitán Monte Bernardo.	17		
5. ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y CONSTRUCTIVO	19		
5.1. Iglesia de Santa Ana	19		
5.2. Capilla Capitán Monte Bernardo.	21		
6. GENERACIÓN DEL MODELO	25		
6.1 Levantamiento CAD y PHOTOSCAN	26		
6.2 Modelo 3D en RHINOSCEROS	30		
6.2.1. Generación del modelo.	30		
6.3 Mallado en ANSYS ICEM	34		
6.3.1 Elección de tipo de elemento	34		
7. ANÁLISIS	37		
7.1 Introducción en SAP2000 y ABAQUS	37		
7.1.1. Materiales	37		
7.1.2. Secciones	40		
7.1.3. Condiciones de contorno	41		
7.2 Análisis de resultados	42		
7.2.1 Validación del modelo	42		
7.2.2 Modelo 1	44		
7.2.3 Modelo 2	46		
7.2.4 Modelo 3	50		

1. INTRODUCCIÓN

A mediados de siglo XIII, surge en Sevilla la Iglesia de Santa Ana. Esta Iglesia es de vital importancia en la historia de Sevilla puesto que es la primera construida de nueva planta. Situada a extramuros, en el barrio de Triana, tiene un marcado carácter defensivo debido tanto a su posición a los pies de la cornisa del Aljarafe, por donde se producían constantes ataques a la ciudad por parte del pueblo musulmán que acababa de ser expulsado de la ciudad; como por su posición frente al río, situada en la orilla del mismo y desde donde se podía visualizar todo su cauce.

Esta Iglesia, a lo largo de su historia, ha tenido constantes variaciones en la morfología de su planta. Las más significativas son las adhesiones de capillas que se han ido produciendo en los laterales de la misma. La primera de estas adhesiones, en torno al año 1507, fue la de la Capilla del Capitán Monte Bernardo. Esta capilla, de planta rectangular, se cubre con dos bóvedas de crucería compleja de cinco claves, también llamada, bóvedas de tercelete.

La llegada de este tipo de bóvedas a Sevilla comienza con la construcción de la bóveda de la Capilla Mayor de la Catedral en el año 1506. Tras ésta, en el siguiente año se construyen como ella seis bóvedas más, entre ellas la de la Capilla Capitán Monte Bernardo.

Las bóvedas de tercelete tienen la peculiaridad de las cuatro claves secundarias que le dan forma y que surgen de la necesidad de descargar los arcos perimetrales de las bóvedas y transmitir los esfuerzos más directamente a los apoyos.

Será objeto de este trabajo el estudio del comportamiento estructural de este tipo de bóvedas, aplicado al caso concreto de las bóvedas de la Capilla Capitán Monte Bernardo de la Iglesia de Santa Ana de Sevilla. Además se elaborará para ello una documentación gráfica exhaustiva de esta capilla mediante herramientas de dibujo en dos y tres dimensiones.



2. OBJETIVOS

Con la motivación de poder realizar un trabajo de investigación sobre un edificio patrimonial, como es la Iglesia de Santa Ana en la ciudad de Sevilla, al que durante el desarrollo del trabajo se tendrá total acceso para facilitar la realización de este documento, nace la idea de realizar este trabajo, cuyo objetivo principal es el de realizar un análisis histórico, constructivo y estructural de la Capilla Capitán Monte Bernardo y, a raíz de este análisis, poder establecer un protocolo de aproximación a edificios patrimoniales de estas características desde el punto de vista de un alumno de arquitectura sin medios para realizar un análisis más detallado.

Mediante el uso de diversas herramientas de estudio, representación gráfica y análisis estructural, como son los levantamientos manuales, la fotogrametría o los programas informáticos de dibujo asistido y de cálculo de estructuras empleados durante la elaboración del trabajo, se desarrollará una planimetría exacta de la capilla, así como unos modelos de análisis estructural con los que se realizará un entendimiento del comportamiento teórico de la Capilla Capitán Monte Bernardo.

3. METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación cuyo objetivo es la documentación de la Capilla Capitán Monte Bernardo de Sevilla se desarrollará siguiendo tres bloques principales que serán:

- Un primer bloque donde se estudia histórica y constructivamente la Capilla Capitán Monte Bernardo para determinar su trazado. En este bloque se identifica el contexto histórico en el que se construye dicha capilla, se identifica su relación con el resto de la iglesia y se analiza la metodología de la construcción de la misma.
- En el segundo bloque se justificará el trazado de la geometría de las bóvedas que forman la capilla tanto en planta como en sección y en modelado 3D. Se elaborará una planimetría exacta mediante el levantamiento con medios tradicionales y un levantamiento fotogramétrico. Se realizarán tres modelos 3D de la capilla mediante herramientas de dibujo tridimensional para su posterior análisis estructural.
- Por último, tras la elaboración de la documentación gráfica de esta capilla, se realizará un modelo de análisis estructural. Con este modelo se estudiará el comportamiento estructural, según la teoría de los elementos finitos, de las bóvedas de tercelete en el caso concreto de la Capilla Capitán Monte Bernardo en función de las diferentes discretizaciones que se elaboraren en el apartado anterior. En cada una de las discretizaciones se obtendrán unas conclusiones que aportarán información para la compresión total del conjunto estudiado.

4. ANÁLISIS HISTÓRICO

4.1 Iglesia de Santa Ana

Durante el período de Reconquista en la península ibérica [722-1492] el siglo XIII sería de vital importancia en la historia de Sevilla.

El 23 de noviembre de 1248, tras meses de asedio cristiano en la ciudad, se produce la reconquista de Sevilla por parte de las tropas de Fernando III de Castilla. Comienza así un período de cristianización en la ciudad que había quedado vacía ya que se facilitó la partida de la población musulmana. [Ros, 1990].

En este proceso de cristianización se establece un nuevo orden en la ciudad respecto a lo religioso, lo social y lo político. La ciudad se organiza en collaciones en torno a centros parroquiales constituidos a partir de las mezquitas existentes en la ciudad.

En este contexto, tras el fallecimiento de Fernando III y en el reinado de su sucesor Alfonso X, entorno al año 1266, se comienza la construcción de la iglesia de Santa Ana de Sevilla, la que será la primera iglesia de nueva planta de la ciudad.

El origen de ésta responde, por un lado, a la impulsión por parte del rey Alfonso X de importantes obras para el enaltecimiento de la ciudad de Sevilla y por otro lado al fuerte carácter defensivo de ésta debido a su ubicación estratégica extramuros en el barrio de Triana, a la orilla del río Guadalquivir. Desde esta situación se controla el acceso a la ciudad por la cornisa del Aljarafe por la cual se producían constantes asedios por parte de la población musulmana que había sido expulsada en la reconquista. (Valseca, 2013)

Desde la construcción de la iglesia primitiva en el año 1266 hasta nuestros días, la planta de la iglesia ha sufrido innumerables intervenciones.



Figura 4-1 Vista desde la cubierta de la Iglesia de Santa Ana

La planta original, la primitiva, constaba de un cuerpo de tres naves de cinco tramos. El cuerpo de naves estaba rematado en la cabecera con el ábside.

A mediados del s. XIV comienza la construcción de la primera parte de la torre a los pies de la nave del Evangelio.

En 1499 aparece la Capilla del Calvario ocupando el ábside de la nave de la Epístola.

Sin fecha específica pero coincidiendo con la construcción en Sevilla de otras capillas de similares trazas, en torno al año 1505 se construye la Capilla Capitán Monte Bernardo que recibiría este nombre más adelante. Esta capilla se sitúa anexa a la nave del Evangelio, en el cuarto tramo junto a la puerta de esta nave.

En el año 1507, en contraposición a la Capilla del Capitán Monte Bernardo, anexa a la nave de la Epístola se encuentra la Capilla de Santa Bárbara.

A mediados del s.XVI se construye la Capilla Sacramental en el segundo tramo de la nave del Evangelio.

En 1570 se acaba la Capilla de San Francisco situada a los pies de la nave del Evangelio ocupando parcialmente el último tramo de ésta.

En el año 1591, en los pies de la nave de la Epístola, también ocupando parcialmente el tramo, se construye la Capilla de las Ánimas.

A finales del s.XVI en el segundo tramo de la nave de la Epístola se encuentra la Capilla de San Joaquín.

Entre 1614 y 1617 se tienen referencias de la Capilla Bautismal, junto a la Capilla del Capitán Monte Bernardo.

En 1629 se llevan a cabo las obras del segundo cuerpo de la torre y del chapitel piramidal.

Sin tener segura esta fecha, entorno al 1865, se encuentra en el último tramo de la nave la Epístola la Capilla de la Divina Pastora.

Éstas serán las intervenciones más relevantes en la planta de la iglesia de Santa Ana hasta el período de 1993 a 2016, años en los que se llevan a cabo actuaciones en el patio de la Sacristía. (Valseca, 2013).

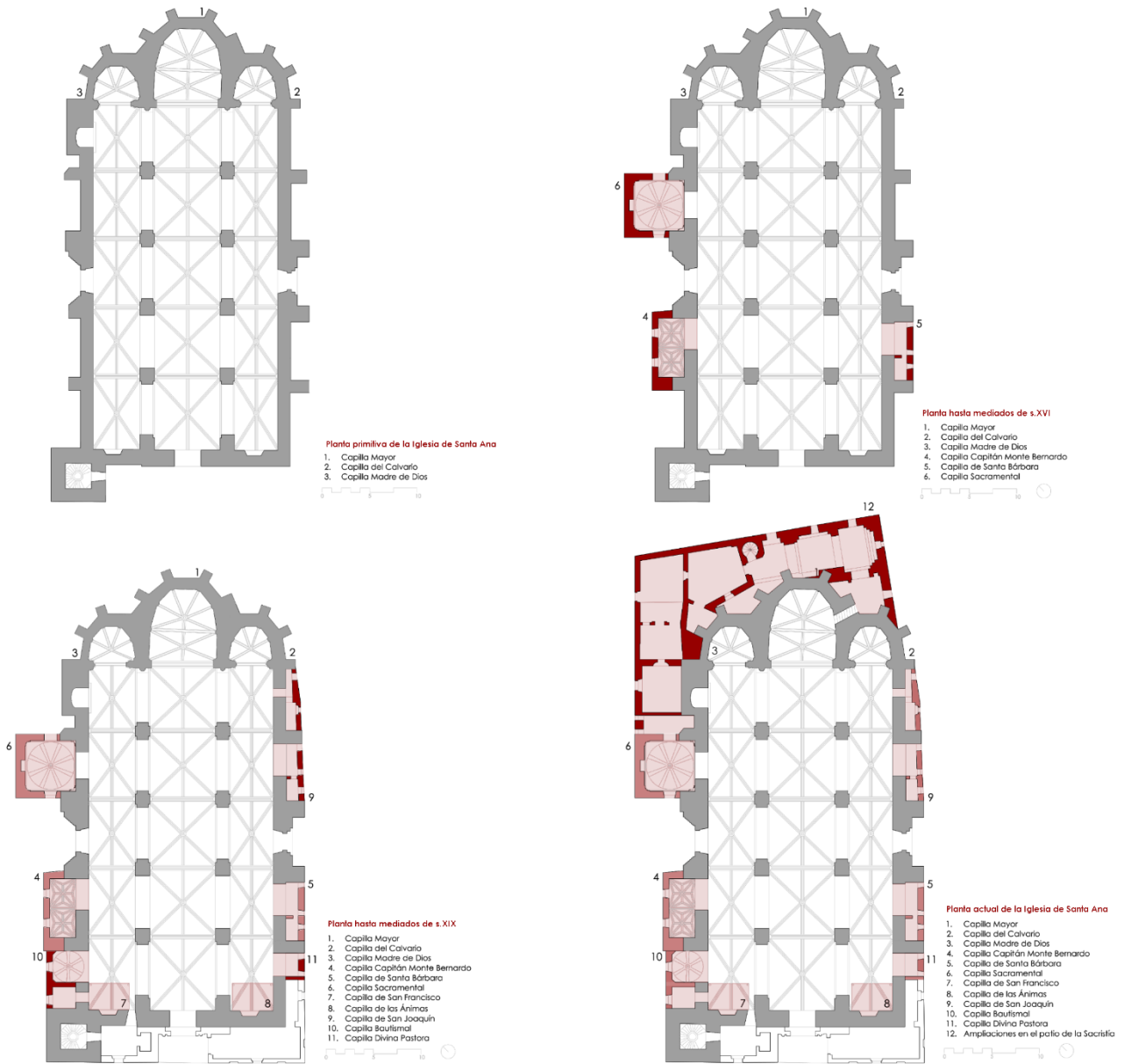


Figura 4-2 Evolución de la planta de la Iglesia de Santa Ana

4.2. Sevilla en el s.XVI.

El principio del s.XVI en Sevilla está fuertemente marcado por el descubrimiento de América en el año 1492.

El descubrimiento de América hace que Sevilla tome una posición de relevancia mucho mayor que la que ya tenía debido a que su puerto era parada indispensable para la partida hacia el Nuevo Mundo. Es por esto que se establece en 1503 la Casa de Contratación de las Indias en Sevilla. (Peraza, 1530)

Este hecho afectó directamente al incremento de población de la ciudad de Sevilla. Aunque los datos demográficos de la época no son del todo fidedignos, existe una estimación de la población de la ciudad a principios de siglo de aproximadamente 60000 habitantes. No es hasta el Concilio de Trento en 1563 que se comience a llevar un registro parroquial en el que se recogen los bautizos y los matrimonios que se celebren.

"Tenga el párroco un libro en el que escriba los nombres de los contrayentes y de los testigos, el día y el lugar en que se contrajo matrimonio, y guarde él mismo cuidadosamente este libro" Concilio de Trento. Decreto de reforma sobre el matrimonio. Sesión XXIV. 11 de noviembre de 1563.

La fuerte inmigración de españoles del centro y norte de la península hace que, atraídos por la riqueza producida por el descubrimiento del Nuevo Mundo, la población aumente de aproximadamente unos 15.000 habitantes en 1584 a unos 60.000 en el año 1500. A este crecimiento le sucedió una época de decrecimiento de la población en el primer tercio de siglo, debido a epidemias de peste y la emigración al Nuevo Mundo.

"...salen tantas personas para el nuevo mundo, que la ciudad se halla poco poblada y casi en poder de las mujeres. Todo el vino y el trigo que aquí se cría se manda a las indias, y también se envían jubones, camisas, calzas y cosas semejantes que, hasta ahora no se hacen allá y de que sacan grandes ganancias" Andrea Navarejo. 1526.

La población se distribuía por collaciones y no era uniforme en toda la ciudad. Las parroquias con mayor número de vecinos eran las de Santa María, el Salvador y Santa Ana formada principalmente por marineros, hortelanos y artesanos.

En esta época en la que Sevilla está en su momento de mayor riqueza llega el movimiento del Renacimiento a la ciudad.

Aunque el trazado del callejero de la ciudad seguirá la fisionomía islámica en la que las calles son estrechas, sinuosas y con las casas de pequeñas fachadas y volcadas a su interior, comenzarán a construirse calles más anchas y rectas con fachadas monumentales. (Pozo Ruiz, s.f.)

Durante el s.XVI se llevarán a cabo la construcción de muchos edificios monumentales sevillanos. En el año 1506 se acaba la Catedral en la que dos años antes, en 1504, Alonso Rodríguez había construido la que sería la primera bóveda de terceleto de la ciudad para la cubrición de la Capilla Mayor de la Catedral.



Figura 4-3 Capilla Mayor de la Catedral de Sevilla. Foto de Lane Weaver

A partir de la construcción de este tipo de bóveda en la Catedral, se realizan otras del mismo tipo en Sevilla entre las que se encuentra la Capilla del Capitán Monte Bernardo en la Iglesia de Santa Ana. También podemos encontrar este tipo de bóveda en el Oratorio de los Reyes Católicos del Alcázar, varias capillas en los palacios renacentistas de Casa Pilatos y Palacio de Dueñas, en la Sala del Capítulo del Monasterio de Santa María de las Cuevas y en la cabecera de la Iglesia de Santa María de Jesús. Según dicen Collantes de Terán Sánchez, Facón Márquez y González de Canales López Obrero, todas estas se construyen aproximadamente en las mismas fechas entorno al año 1505. Por otro lado Ribera Gómez, Barrios Sevilla y Rodríguez García datan la Sala del Capítulo del Monasterio de Santa María de las Cuevas en el año 1424.

La Sala del Capítulo del Monasterio de Santa María de las Cuevas en la Isla de la Cartuja, fue donde, hasta la desamortización que sufre el monasterio en el año 1838, se albergaba la sepultura de la familia Ribera. Tras una minuciosa restauración del conjunto del Monasterio, se devuelven estas sepulturas a la Sala del Capítulo. Esta sala consta de dos piezas. El primer espacio, al que se accede desde el claustro, está cubierto por una bóveda de cinco claves con nervadura de cantería seguida. Tras ésta, le sigue el espacio que se considera realmente como la Sala del Capítulo, que es un espacio cubierto por un casquete esférico. [Figura 4-4]. (Rivera Gómez, Barrios Sevilla, & Rodríguez García, 2007).



Figura 4-4 Sala del Capítulo en el Monasterio de Sta. María de las Cuevas. Foto de Jose Luis Filpo Cabaña

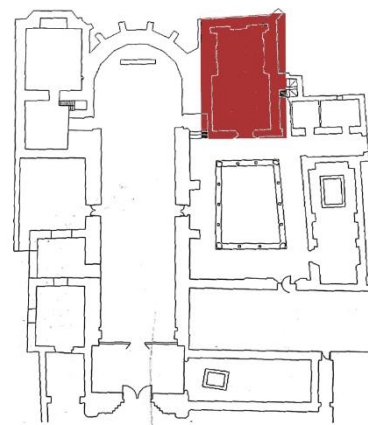


Figura 4-5 Situación de la Sala del Capítulo en relación al conjunto central del monasterio. (Rivera Gómez, Barrios Sevilla, & Rodríguez García, 2007)

El Oratorio de los Reyes Católicos es una pequeña capilla situada en el Alcázar de Sevilla destinada a la oración de la Reina Isabel la Católica. En esta capilla se puede observar la coexistencia de dos estilos arquitectónicos como son el gótico-mudéjar y el renacimiento. La capilla es de planta rectangular y sus nervios nacen en de manera totalmente vertical en ménsulas para después comenzar a curvarse. La capilla se divide en dos espacios. El primero de ellos es un vestíbulo hacia la capilla, decorado con la presencia de una columna de mármol con capitel mudéjar. El segundo espacio es la capilla, presidida por un retablo que hace las veces de altar cerámico. [Figura 4-6] (Marín Fidalgo, 1992)

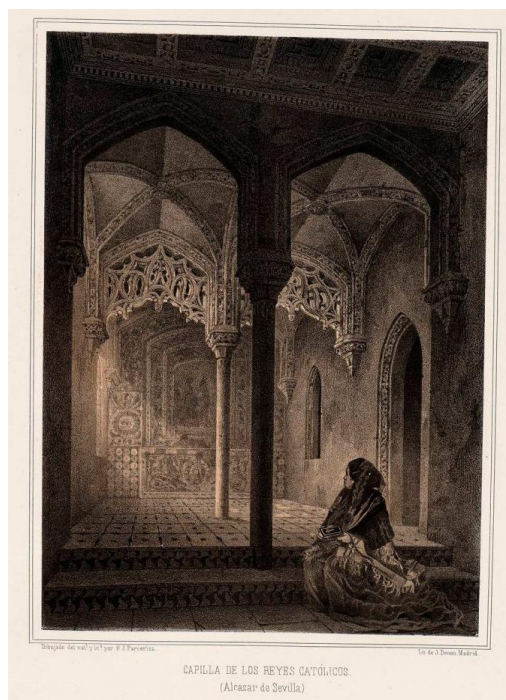


Figura 4-6 Grabado de Parcerisa, imagen del siglo XIX del Oratorio de Isabel la Católica

La Iglesia de Santa María de Jesús en la Puerta de Jerez de la ciudad de Sevilla es la única pieza aún existente de la primera Universidad de Sevilla fundada en el 1505 por el Maese Rodrigo Fernández Santaella. La iglesia es una construcción pequeña, de una sola nave con dos tipos de cubierta. Una de mudéjar de madera y la del presbiterio, que se cubre con una bóveda de tercelete de piedra. El costo de la piedra era bastante superior al de la madera por la falta de canteras cercanas a la ciudad de Sevilla, por lo que se destina el material más noble y caro exclusivamente a la zona más sagrada de la Iglesia. [Figura 4-7]. (Harillo, 2016)

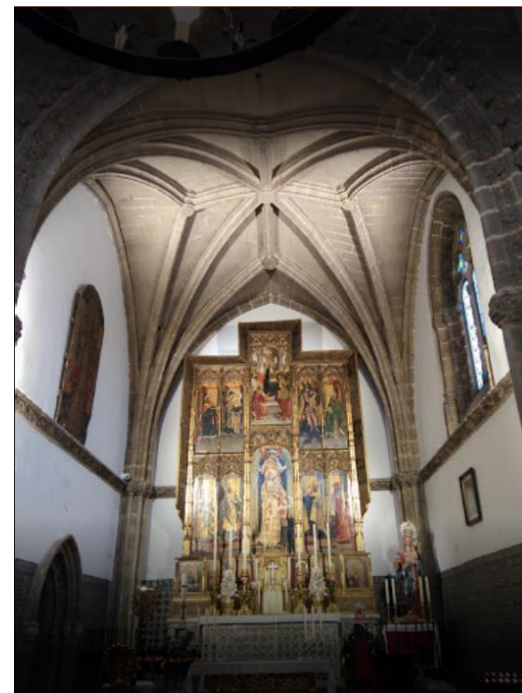


Figura 4-7 Iglesia Sta. María de Jesús. Foto de Esperanza Galindo

4.3. Capilla Capitán Monte Bernardo.

Como se ha comentado anteriormente desde la iglesia primitiva a la actualidad se han producido varias reformas y adiciones a ésta.

La primera de estas adiciones es la de la Capilla Capitán Monte Bernardo. No se tiene conocimiento de la fecha exacta, pero como se ha comentado anteriormente, se presume que la construcción de esta capilla sea en torno al año 1505 coincidiendo con las otras capillas de similares condiciones que se construyen en Sevilla a lo largo de ese año.

No es hasta el 20 de enero de 1587 que la capilla adquiere el nombre por la que es hoy conocida y a partir de este momento está bajo la advocación de San Cristóbal. Esto es debido a la adquisición de la capilla por parte del Capitán Cristóbal Monte Bernardo para que sea lugar de sepultura de él mismo, su mujer doña Catalina Cabrón y de sus descendientes.

“Se hallaba en su prosterá vida, que tiene más de 60 años y que quiere dotarla con retablo, reja, letrero, escudo y tumba” Institución Colombina. Fondes de Gestoso. Tomo 21, nº6, FF 317-340.

Es el 11 de junio de 1587 se formalizó la adquisición de la capilla por parte del capitán y se presupone que el relieve del Hércules-Atlante bajo el encuentro de nervio de las bóvedas y los querubines de los vértices sean de esta fecha. [Figura 4-9].

La capilla ha sido muy modificada desde su origen, sobretodo artísticamente con la adición de cerámica en sus paredes, la reja de entrada la renovación de esculturas. Además, el retablo de las Santas Justa y Rufina, actualmente ubicado frente a esta capilla, se encontró en el interior de esta. (Collantes de Terán Sánchez, Facón Márquez, & González de Canales López Obrero, 2016)



Figura 4-8 Bóvedas de la Capilla del Capitán Monte Bernardo



Figura 4-9 Relieve del encuentro de nervios

5. ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y CONSTRUCTIVO.

Para la descripción geométrica y constructiva de la Capilla Capitán Monte Bernardo, primero se realiza una breve introducción acerca de la descripción arquitectónica de la iglesia de Santa Ana para una mejor comprensión de la capilla.

5.1. Iglesia de Santa Ana.

La mano de obra que trabajaba en la construcción de la Iglesia de Santa Ana estaba compuesta tanto por cristianos que trataban mejor la piedra, como por alarifes moros que son reconocidos por su maestría en la alfarería. Debido a esta mezcla de mano de obra, se identifica a la iglesia de estilo mudéjar, aprovechando el gótico que aportaban los cristianos y el estilo almohade que aportaban los alarifes.

Durante de la construcción de la iglesia primitiva, no se disponía de escritos que indicasen un método de construcción sino que estos conocimientos pasaban de maestros a aprendices de manera oral en los gremios. No se tenían conocimientos de geometría exhaustivos puesto que no es hasta la llegada del renacimiento cuando se comienza a redactar tratados de arquitectura como son los de Hernán Ruiz el joven o Rodrigo Gil de Montañón. A pesar de esta carencia de conocimientos en geometría se realizaban unos trazados modulados realizados con una relación sencilla de números que tomaban como base geométrica el cuadrado para dimensionar los diferentes espacios. Además fijaban ya ejes de referencia para elementos exentos como los pilares y por la cara interior de los muros.

La Iglesia de Santa Ana, como se ha comentado anteriormente, es una iglesia de planta rectangular, formada por tres naves de cinco tramos culminadas en el ábside de las mismas. La nave central es de mayor tamaño tanto en planta como en altura, aunque una de las particularidades de esta iglesia es que las naves laterales son de una altura muy similar a la nave central, lo

que hace que la cubierta sea transitable. Esto es debido al fuerte carácter defensivo de esta iglesia.

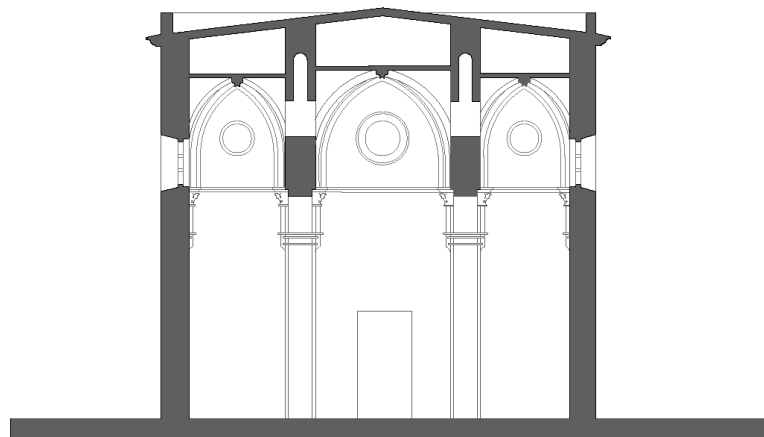


Figura 5-1 Sección transversal de la Iglesia de Santa Ana. Chueca Goitia, Fernando

Los arcos que separan las naves de la iglesia descansan sobre pilares rectangulares de clara influencia almohade y sobre los que se encuentran unas ménsulas voladas de las que arrancan los nervios que forman las bóvedas.

La totalidad de la ejecución de las bóvedas se desarrolla en fábrica de ladrillo y de cantería. La cantería al ser un material más costoso tanto en su valor como en su trabajo y con la carencia de buenos canteros en la zona, se reserva principalmente para la ejecución de los nervios de las bóvedas y para las bóvedas de la cabecera, aunque también se utiliza en los pórticos, las columnillas y ménsulas cortas y en la traba de las naves con la cabecera. Las bóvedas, por lo tanto, están formadas por unos nervios de cantería y una plementería formada por fábrica de ladrillo colocada a sardinel siguiendo el recorrido de los nervios.

Con respecto a la planta se debe entender que el sistema de medida era diferente al de hoy en día. El instrumento de medida utilizado se trata de la vara castellana [V] que corresponde con unos 83.59 cm. Para el trazado de la planta se utilizan múltiplos de las varas además de reglas de geometría básicas llegando a utilizar reglas de mayoración próximas a la diagonal del cuadrado siendo esta $\sqrt{2}$, lo cual se obtiene de relaciones como 10/7. En el caso de Santa Ana se trata de una relación 6.5V en las naves laterales y 10V en la nave central. Longitudinalmente la Iglesia mide unas 50 varas. A pesar de las imperfecciones producidas durante la construcción se observa esa intencionalidad de realizar una retícula en la que disponer los pilares. (Valseca, 2013)

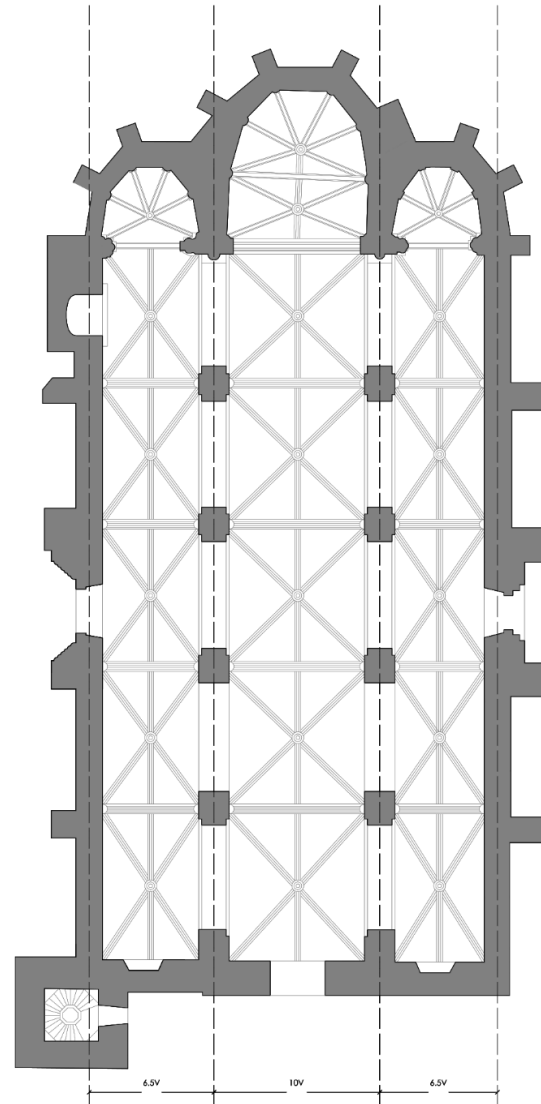


Figura 5-2 Proporciones de la planta primitiva de la Iglesia de Santa Ana de Sevilla

5.2. Capilla Capitán Monte Bernardo.

Adicionada a la planta primitiva de la iglesia de Santa Ana se encuentra la Capilla Capitán Monte Bernardo. Esta capilla tiene su origen en torno al año 1505, y responde a un estilo gótico a pesar de que el renacimiento estaba llegando a la ciudad de Sevilla.

El estilo gótico, a grandes rasgos, se caracteriza por la supresión de masas debido a la concentración de las tensiones en los nervios y los contrafuertes de la construcción. Esta supresión de masas hace que los edificios se puedan dotar de grandes vidrieras que aportan gran luminosidad como expresión de divina gloria, aunque no es el caso de esta capilla, en contraposición de lo que se viene haciendo en el estilo románico cuyas construcciones eran muy masivas y por lo tanto oscuras.

La Capilla Capitán Monte Bernardo está compuesta por dos bóvedas de cinco claves, también llamadas bóvedas de tercelete. La bóveda de tercelete se trata de una bóveda de crucería compuesta por una clave central en la que confluyen 8 nervios y cuatro claves secundarias que son el punto de intersección de otros 3 nervios en cada una de ellas. Los puntos de arranque de los nervios son los llamados enjarjes.

Para definir los nervios que forman la bóveda de tercelete se utilizarán los siguientes términos:

- Nervios ojivos o diagonales que son los que conforman las diagonales de la planta y van desde los enjarjes hasta la clave central.
- Nervios perimetrales que pueden ser formeros o perpiaños en función de si se encuentran sobre muros o ventanas o si se encuentran entre bóvedas respectivamente. Estos nervios son los que se sitúan en el perímetro de la planta y van de un enjarje a otro.

- Nervios de tercelete, son los que van desde los enjarjes a las claves secundarias y son los que dan nombre a este tipo de bóveda.
- Arcos rampantes son los que unen la clave central con las secundarias.

Este tipo de bóveda surge de la necesidad de descargar los arcos formeros, ya que al incorporar las cuatro claves secundarias y a éstas acometer los nervios de tercelete se transmiten de una forma más directa los esfuerzos a los apoyos y no se generan esfuerzos casi horizontales en las claves de los nervios perimetrales. (Serrano, 2018).

El desarrollo de la plementería de las bóvedas una vez ejecutados los nervios que la sustentarán es una tarea relativamente sencilla. No hay una regla general para el espesor de este elemento, por lo que solo se puede conocer realizando exploraciones in situ. Se estima que el espesor en el caso de la Capilla Capitán Monte Bernardo el espesor no es superior a dos ladrillos a tabla. Y que el relleno que se encuentra entre la cubierta exterior y el trasdós de la plementería será de cascotes de obra.



Figura 5-3 Bóvedas de la Capilla Capitán Monte Bernardo

Como se ha mencionado anteriormente no es hasta el s.XVI cuando se comienzan a desarrollar tratados de arquitectura donde se comenzará a posicionar al arquitecto como un intelectual de la época y no como un mero artesano. Entre estos tratados españoles del Renacimiento se encuentra el Libro de Arquitectura de Hernán Ruiz el joven. En este tratado se incluye el dibujo del trazado de una bóveda de cinco claves como la que es objeto de este estudio. [Figura 5-4]. Se trata de una bóveda de cinco claves, la central y las cuatro secundarias. En este dibujo se incluye el proceso de generación de las curvas que forman los arcos sobre los que se construye la bóveda. Éstas curvas que se dibujan son las curvas de intradós de los arcos.

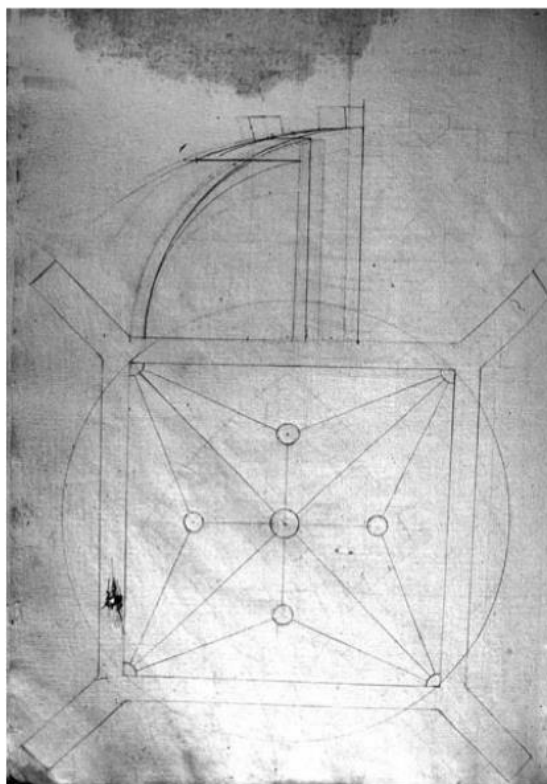


Figura 5-4 Dibujo de una bóveda de crucería de cinco claves del Libro de arquitectura de Hernán Ruiz

El proceso de trazado empieza por definir los arcos diagonales como arcos de medio punto cuyo centro será el punto C1.

Para determinar la curvatura del arco rampante, traza una porción de circunferencia cuyo centro se encuentra en la vertical del punto 1 con radio la longitud diagonal de la bóveda.

Con esta línea de curvatura, se unen la clave de la bóveda [punto 1], con la clave de los arcos formeros [punto 3]. Sobre ésta se localiza la clave de los terceletes [punto 2].

Conocidas las alturas de las claves del tercelete y del arco formero, Hernán Ruiz abate las proyecciones en planta y dibuja en alzado la curvatura de estos arcos.

Mediante este proceso se puede determinar la geometría de una bóveda de planta cuadrada, cuyo rampante será el mismo en ambas direcciones, como la bóveda de planta rectangular, cuyo rampante variará según la dirección. (Palacios Gonzalo, 2009)

A continuación podemos ver el trazado de ambos casos basados en el método de Hernán Ruiz. Primero se ha realizado el trazado en planta cuadrada de 3x3 metros [Figura 5-5] y luego el trazado en planta rectangular de aproximadamente 3.20x2.75 metros [Figura 5-6]

A pesar de que la bóveda de estudio es anterior a la publicación de estos tratados, los conocimientos de la época son ya bastante avanzados. En la capilla se puede apreciar un avance a nivel estructural y constructivo con respecto a la iglesia primitiva. Los nervios son de una talla más fina y acaban en un enjarje bien ejecutado. Y es por esto que se va a tomar el trazado de Hernán Ruiz como base del modelo teórico de esta investigación que se comparará con el trazado real de la capilla.

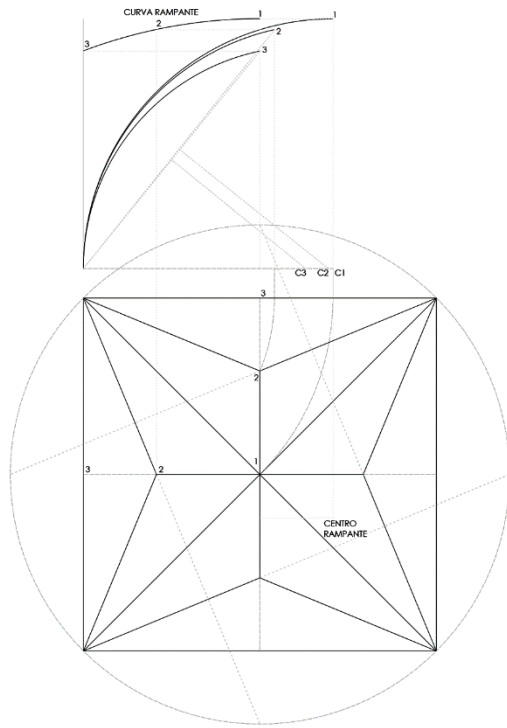


Figura 5-5 Trazado de bóveda de tercelete [3x3] según el método de Hernán Ruíz.

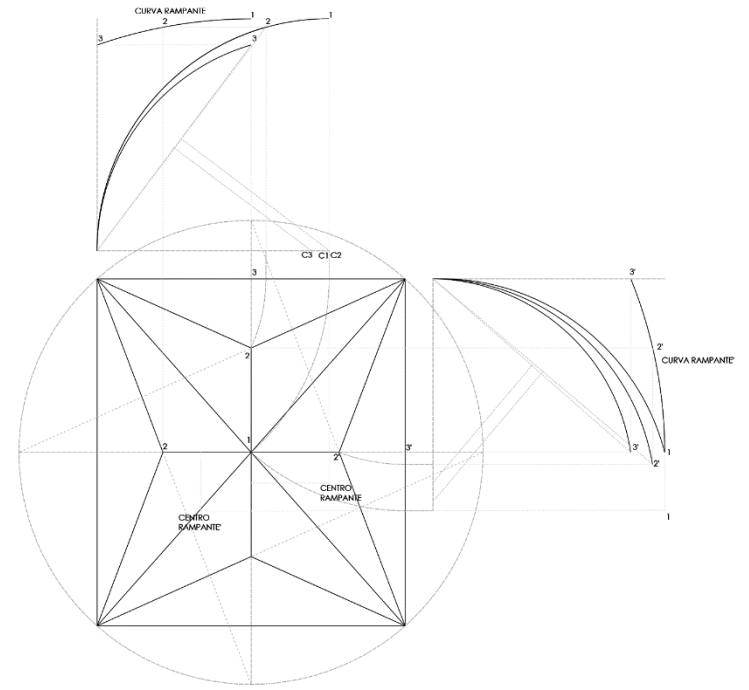


Figura 5-6 Trazado de bóveda de tercelete en el caso de la Capilla Capitán Monte Bernardo según el método de Hernán Ruíz

6. GENERACIÓN DEL MODELO

En este capítulo se explica el proceso de generación del modelo de cálculo de la capilla. Se realizará en varias etapas, empezando por un levantamiento de la capilla mediante dos técnicas, la primera, un levantamiento convencional con herramientas de medición tradicionales y su posterior trazado en CAD atendiendo a la geometría teórica estudiada con anterioridad en el apartado 5.2 de este documento; y la segunda mediante fotogrametría. El siguiente paso es la modelación en 3D de la capilla, para la cual se utilizará el programa de dibujo RHINOCEROS. Por último, para el mallado de este modelo se utilizará el programa ANSYS ICEM, dejando el modelo preparado para su introducción en los programas de cálculo. Para los modelos de elementos superficiales (tipo shell) se utilizará el programa SAP2000 y para el modelo de elementos tridimensionales (tipo sólido) se utilizará el programa ABAQUS.

El proceso mediante el cual se va a realizar el análisis está basado en la teoría de los elementos finitos, por lo que el modelo que se genere deberá tener en cuenta esto a la hora de realizar simplificaciones necesarias que no afecten al comportamiento del modelo.

Al tener en cuenta esta teoría, se decide optar por elaborar tres modelos de cálculo con distintos tipos de elementos. Para los dos primeros modelos se opta por elementos tipo shell + frame y elementos sólidos para el tercer modelo. En el caso de los modelos con elementos tipo shell + frame estarán formados por superficies de una sola cara a las que se le dará espesor desde el propio programa de cálculo. El modelo de elementos sólidos partirá del trazado que se genere para los otros dos modelos y se modificará para obtener su geometría.



Figura 6-1 Esquema del proceso de modelado

6.1 Levantamiento CAD y PHOTOSCAN

Se realizan dos levantamientos diferentes mediante dos técnicas para su posterior comparación.

El primer levantamiento se realiza mediante la toma de medidas in situ y con un posterior trazado de los nervios en planta mediante el método de Hernán Ruiz, comentado anteriormente en el apartado 5.2 de este documento. Este trazado es totalmente teórico ya que, como se ha mencionado anteriormente, el Libro de Arquitectura de Hernán Ruiz donde se desarrolla el trazado de este tipo de bóvedas es posterior a la construcción de la misma. Es por esto que se asume que la planimetría y el modelo 3D realizados con esta técnica no serán un modelo exacto de la capilla.

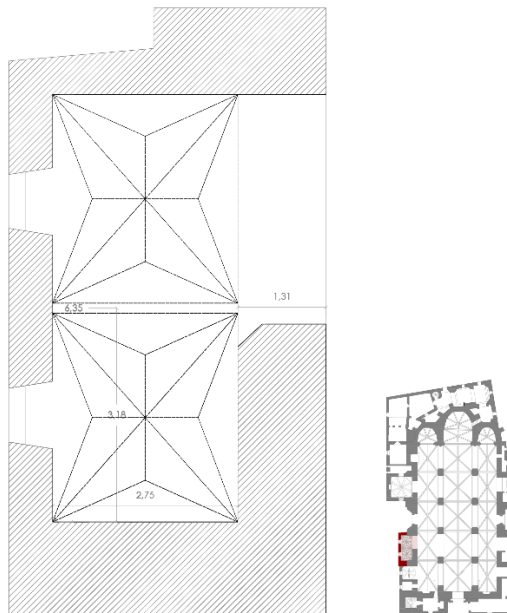


Figura 6-2 Levantamiento en planta de la capilla

Para realizar un levantamiento más detallado de la Capilla Capitán Monte Bernardo y poder obtener medidas y geometrías a las que no se tiene fácil acceso sin obstaculizar el uso de la capilla, se hace uso de la fotogrametría. La fotogrametría es una técnica en la que mediante la realización de una serie de fotos, tomadas con zonas de solape entre ellas, y su posterior introducción en un programa informático como en este caso será el programa AGISOFT PHOTOSCAN, se realiza un modelo 3D en el cual se pueden tomar medidas exactas del objeto o lugar que se haya fotografiado.

Para la realización de la fotogrametría se ha utilizado una cámara de fotos Nikon D5000 fijando los parámetros ISO400, distancia focal 35mm y velocidad de disparo 1/8 s. Además se ha empleado el uso de dianas que facilita el posterior escalado del modelo. Para la colocación de las dianas se ha utilizado un Láser Rugby 640G que marca el plano que se ha usado como base de las dianas dispuestas para la fotogrametría.



Figura 6-3 Proceso de colocación de las dianas

Se han realizado aproximadamente unas 500 fotos que se introducen en el programa AGISOFT PHOTOSCAN. Tras el procesado en AGISOFT PHOTOSCAN de las fotos realizadas se obtiene una nube de puntos dispersa. Esta nube de puntos es una primera aproximación al modelo. En este paso se puede comprobar el número de fotografías que el programa pudo alinear, en este caso se ha conseguido alinear el 99% de las fotos tomadas. Tras la nube de puntos dispersa, se obtiene la nube de puntos densa. Esta nube de puntos sirve para la construcción de la malla del modelo 3D. Ya en la nube de puntos densa se puede observar la calidad de los detalles que se van a obtener en la malla. Por último, se genera la malla obtenida de la nube de puntos densa.

A continuación, con las coordenadas de las dianas dispuestas en la fotogrametría, se escala el modelo. A partir de esta malla se obtienen datos de difícil acceso por métodos tradicionales, como el ancho de nervio.

La malla obtenida tiene zonas que por no poder acceder a ellas para realizar las fotografías carecen de información. Estos puntos son tratados con un editor de malla como es el programa Geomagic Design X.

Tras haber modificado las estas zonas, se dispone de una malla que podrá ser exportada a varios programas de dibujo asistido en los que se realiza la documentación gráfica de la capilla. Se obtienen secciones longitudinales y transversales de la capilla, lo que nos aporta información de la geometría de sus bóvedas.

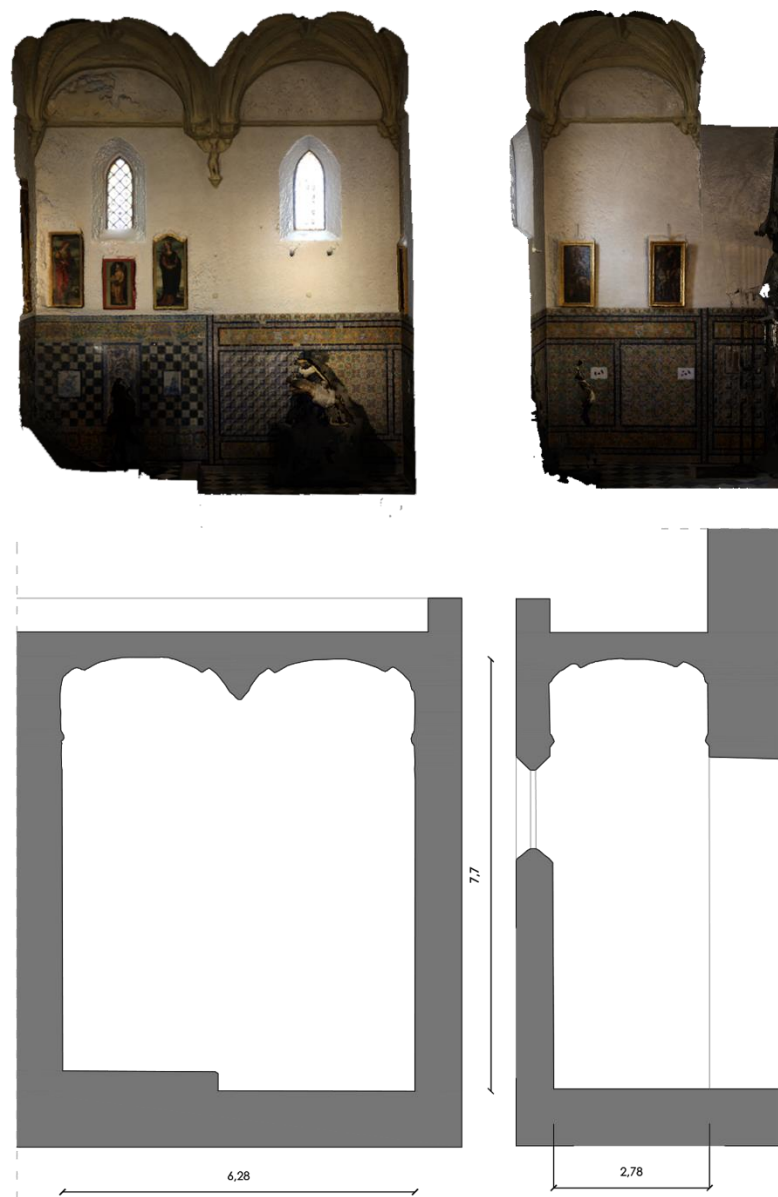


Figura 6-4 Secciones Capilla Capitán Monte Bernardo

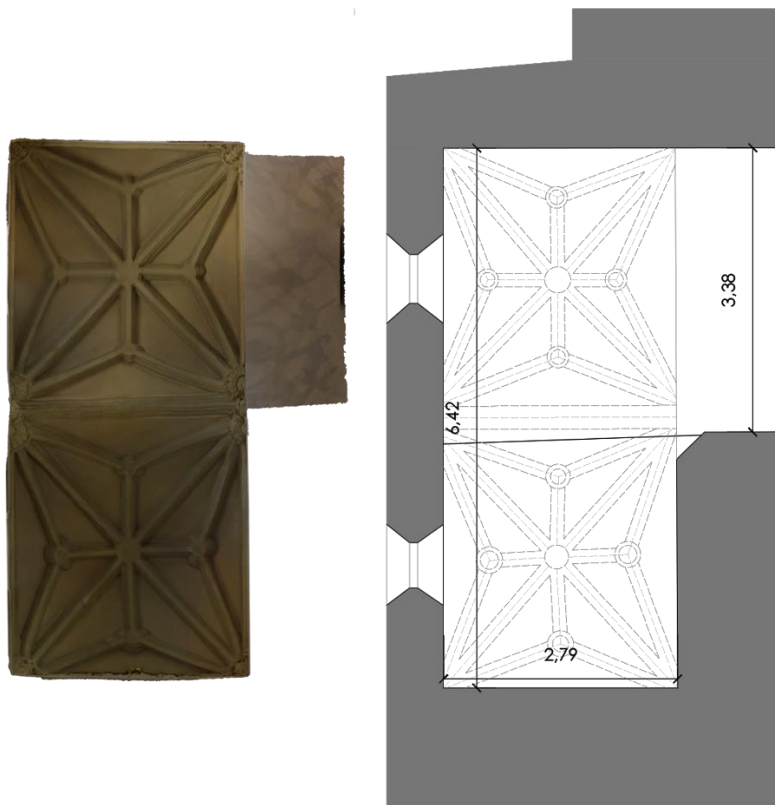


Figura 6-5 Planta de la Capilla Capitan Monte Bernardo

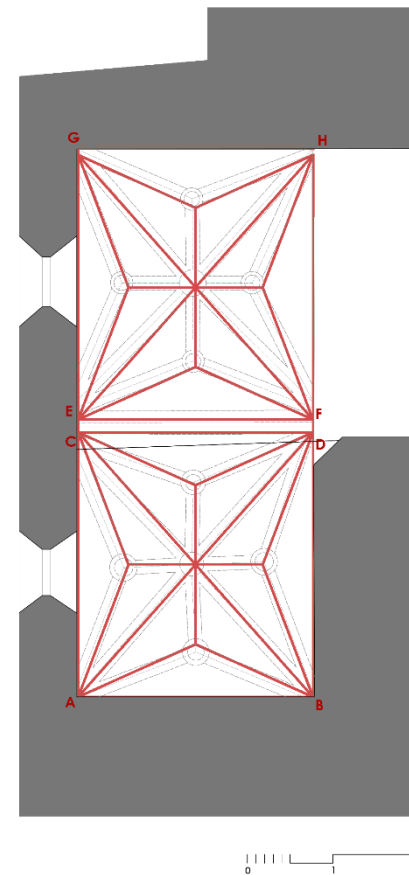


Figura 6-6 Superposición de planimetrías realizadas mediante distintos métodos de medición

Tras la realización de la planimetría obtenida de la fotogrametría, se realiza una comparación entre el trazado geométrico y el obtenido mediante fotogrametría [Figura 6-6]. En esta comparación de geometrías se puede observar que el verdadero trazado de los nervios es muy similar al trazado teórico, con una media de 4 cm de desviación en el eje x y de 7 cm en el eje y y medido desde el punto A. Por lo tanto se observa un gran avance a nivel constructivo y estructural con respecto a la Iglesia primitiva de Santa Ana.

	TEÓRICA		REAL		DIFERENCIA	
	x	y	x	y	x	y
A	0	0	0,012	0,015	0,012	0,015
B	2,75	0	2,79	0,016	0,04	0,016
C	0	3,1	0,05	3	0,05	0,1
D	2,75	3,1	2,71	3,06	0,04	0,04
E	0	3,25	0,11	3,35	0,11	0,1
F	2,75	3,25	2,77	3,44	0,02	0,19
G	0	6,35	0,01	6,41	0,01	0,06
H	2,75	6,35	2,76	6,42	0,01	0,07
MEDIA					0,04	0,07

Tabla 6-1 Distancias en metros con respecto al punto A



Figura 6-7 Fotogrametría de la Capilla Capitán Monte Bernardo

6.2 Modelo 3D en RHINOSCEROS

Partiendo de la documentación anterior, para el modelado en 3D se va a utilizar el programa RHINOSCEROS. Es un programa de dibujo asistido que por su sencillez en el uso y su amplia variedad de herramientas permite crear multitud de geometrías.

El mallado que se obtendrá depende directamente del modelo que se genere previamente, por lo que es muy importante decidir con exactitud qué se quiere obtener y modelar respecto a estos parámetros y así garantizar que el mallado se realice de la manera correcta. Por esto se realizarán tres modelos o discretizaciones. En cada uno de estos modelos se buscará el análisis pormenorizado elementos y su relación entre ellos.

Se realizará un modelo 3D como base de las diferentes discretizaciones. Para realizar el modelo 3D tomamos como referencia el trazado teórico de la capilla.

Cada una de las discretizaciones se realizará buscando unos comportamientos en concreto.

El primer modelo estará formado por elementos tipo frame en los nervios de la capilla y elementos tipo shell en las superficies de la plementería y los muros.

En el segundo modelo se mantendrán los elementos tipo shell para plementería y muros y además los nervios también serán modelados con este tipo de elementos. Esta discretización servirá para analizar los esfuerzos a los que se ven sometidos realmente los nervios.

El tercer modelo se realizará únicamente con elementos sólidos. Se realizará un modelo únicamente de los nervios que forman las bóvedas para realizar un análisis más pormenorizado del comportamiento de este elemento que, como se ha mencionado anteriormente, es el elemento más importante en este tipo de bóvedas.

6.2.1. Generación del modelo.

En la generación del modelo se ha seguido el proceso de construcción. Partiendo de los muros hasta la ejecución de la plementería y su cubrición.

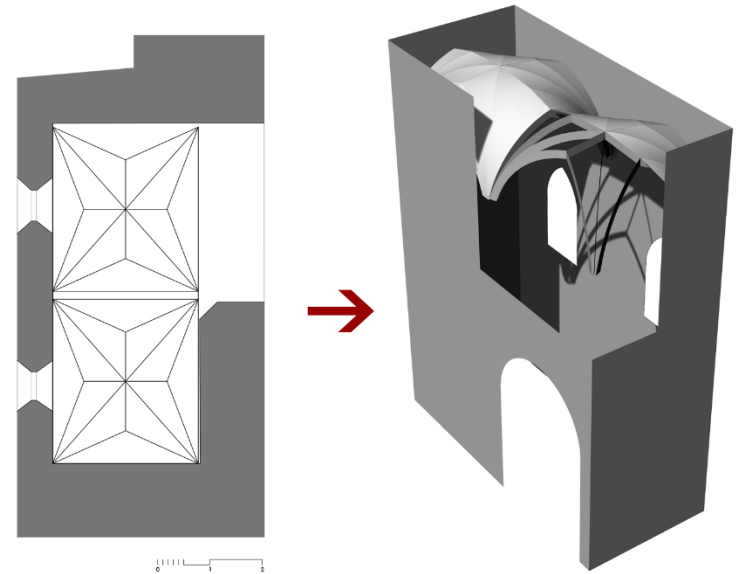


Figura 6-8 Inicio y final del proceso de modelado 3D

6.2.1.1 Muros

En primer lugar, el modelado de los muros se realiza siguiendo la planimetría teórica anteriormente realizada en CAD. Esta planimetría, como se ha comprobado mediante la realización y comparación de la geometría procedente de la fotogrametría, es bastante exacta, con una desviación casi despreciable con respecto a la geometría real de la capilla. Es por esto que se puede considerar que el modelo que se va a realizar a partir del trazado geométrico es casi una reproducción exacta de la capilla.

Para el levantamiento 3D se ha considerado los muros a cara interior de los mismos. Estos constan de una altura de 8.20 metros medidos desde el plano del pavimento inferior de la Capilla. Además se replantea el hueco de entrada a la Capilla. Este hueco es de una altura de 6 metros con un arco de medio punto con ancho de 3.50 metros aproximadamente.

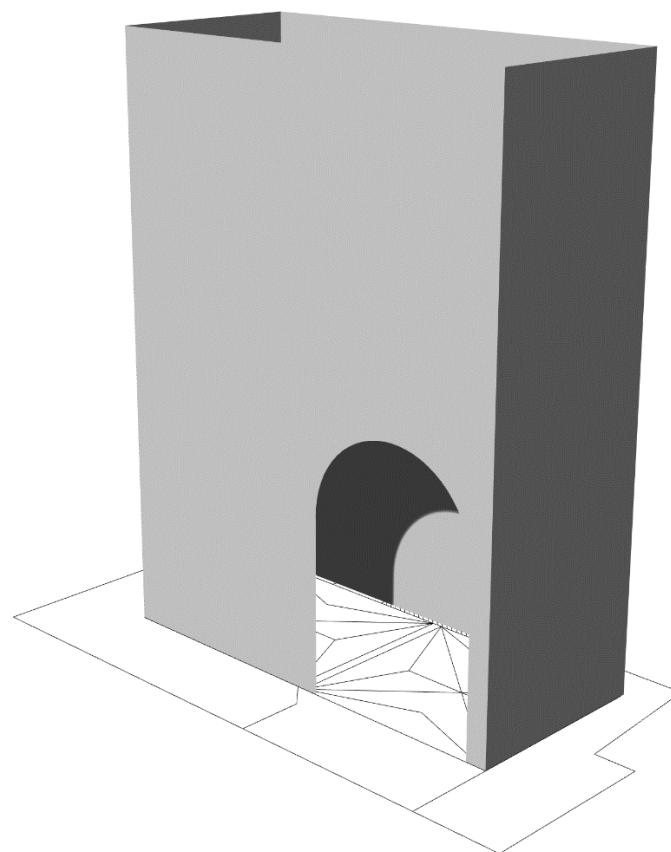


Figura 6-9 Modelo de los muros de la Capilla Capitán Monte Bernardo

6.2.1.2 Nervios

Para la generación de los nervios se ha realizado el proceso geométrico descrito por Hernán Ruiz que anteriormente se había realizado en planta en CAD. En primer lugar los nervios se han realizado mediante curvas dibujadas a eje del nervio que serán el elemento frame para el primer modelo de mallado formado por frame + Shell.

Para el modelo donde se describen los nervios mediante elementos tipo shell se utiliza esta curva y se extruye en perpendicular a la plementería con un espesor de nervio de 15cm obtenidos mediante el levantamiento fotogramétrico.

El tercer modelo de nervios es el que más complejidad tiene y el que más se asemeja al trazado original. En el modelo de elementos sólidos se debe tener en cuenta la estereotomía de la zona de enjarjes en la que arrancan los nervios. Se debe modelar un elemento que, como en la realidad, de origen a los nervios.

Se ha dado una sección de 17 cm canto a los nervios y en el caso del modelo de nervios sólidos se ha considerado un espesor de 10 cm.

Para las claves se ha realizado una asemeja al encuentro que se produce en la construcción de este tipo de elementos. Se dispone un cilindro en cada una de las claves que asumen la acometida de cada uno de los nervios a ese punto.



Figura 6-10 Modelos frame, shell y sólido de los nervios de la Capilla Capitán Monte Bernardo

6.2.1.3 Plementería

Por último, tras el trazado de los nervios, se realiza el trazado de la plementería, así como se realiza en el proceso constructivo, la plementería se construye sobre la construcción de los nervios.

El trazado de esta se verá condicionado por los nervios anteriormente modelados puesto que la superficie que se crea es una transición entre nervios.

En el caso de la plementería, se desconoce su disposición y así como en la Iglesia de Santa Ana se observa que las bóvedas están ejecutadas con ladrillos a sardinel, en este caso se considera que la plementería está ejecutada con dos hojas de ladrillos dispuestos a tabla. En el modelado 3D se considera la cara interior de la plementería como un elemento shell y no se le aporta el espesor de las dos hojas de ladrillo. Este espesor se asignará más tarde en el programa de cálculo.

El trazado de la plementería será necesario para los dos modelos de elementos shell. En el caso del modelo de elementos sólidos no se considera la plementería puesto que lo que se busca analizar en este modelo es estrictamente el comportamiento de los nervios.

Una vez acabada la generación de la plementería está acabada la geometría de los modelos para su posterior mallado.

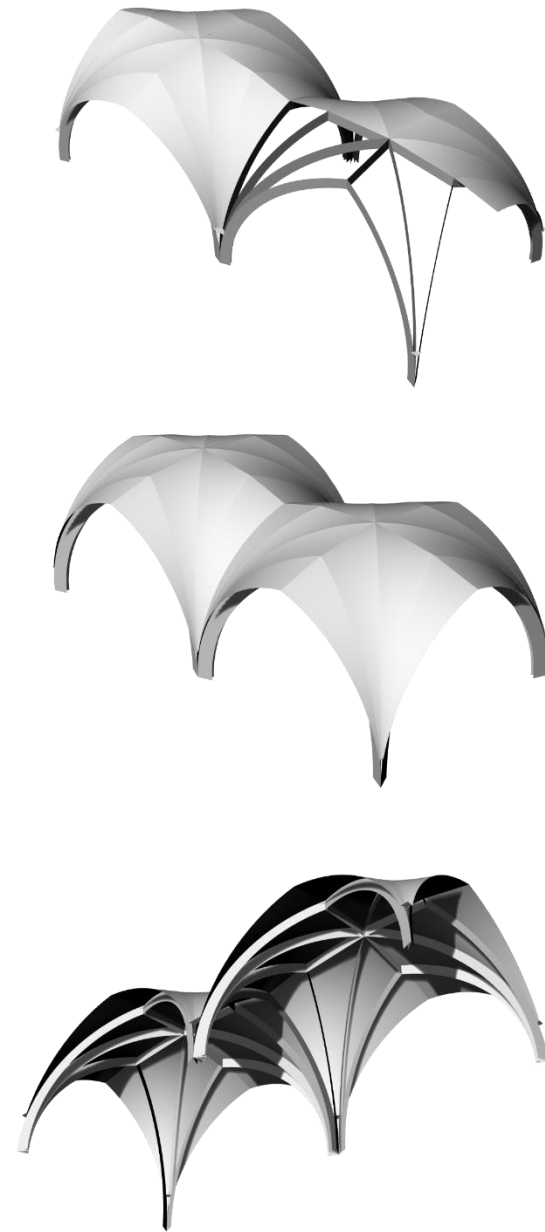


Figura 6-11 Modelo shell de la plementería de la Capilla Capitán Monte Bernardo

6.3 Mallado en ANSYS ICEM

Tras la generación de los modelos geométricos en tres dimensiones de la Capilla Monte Bernardo, se procede a realizar los modelos numéricos que se analizarán mediante el método de los elementos finitos.

Como se ha comentado con anterioridad, se realizan tres modelos de cálculo según la discretización que tiene cada uno. Estos tres modelos son los mismos que se han modelado geoméricamente, puesto que desde su modelado geométrico se ha tenido en cuenta la discretización de elementos de cada uno de los modelos.

Para la realización de los modelos de cálculo se importan los modelos geométricos al programa ANSYS ICEM donde se realiza el mallado de los mismos. En este programa además se realiza un chequeo y depuración de los modelos.

6.3.1 Elección de tipo de elemento

Tras la importación del modelo geométrico se realiza la elección del elemento en ANSYS ICEM. A partir de ahora se hablará de modelo 1, 2 y 3 para cada una de las discretizaciones de los nervios.

En el modelo 1 se consideran dos tipos de elementos. El primero es el elemento tipo frame o barra. Este elemento es la discretización más sencilla de los nervios. Se ha considerado una barra en el eje del nervio a la que posteriormente, en el programa de cálculo se le asignará su correspondiente sección. Debido a que los nervios tienen una proporción no demasiado esbelta, estos se pueden discretizar como elemento frame. En el caso de que el elemento fuese mucho más esbelto habría que discretizarlo como elemento shell.

Para la plementería, tanto en el modelo 1 como en el modelo 2 se considerarán elementos tipo shell. Se escoge este tipo de

elemento debido al carácter superficial de la plementería. Estos elementos pueden tener principalmente dos geometrías, triangular o cuadrangular. En este caso, se ha optado por elementos shell triangulares frente a los cuadrangulares por su mayor capacidad de adaptación a la geometría. Además en zonas de mayor complejidad geométrica como en el caso de la zona de enjarjes se ha producido un mallado con mayor número de elementos lo que hace también que se adapte mejor a la geometría deseada.

Para el modelo 2 se han discretizado los nervios con elementos tipo shell para obtener una mayor información a nivel tensional de los mismos. En este caso, los nervios pasan de ser una barra a ser un plano compuesto por elementos shell triangulares.

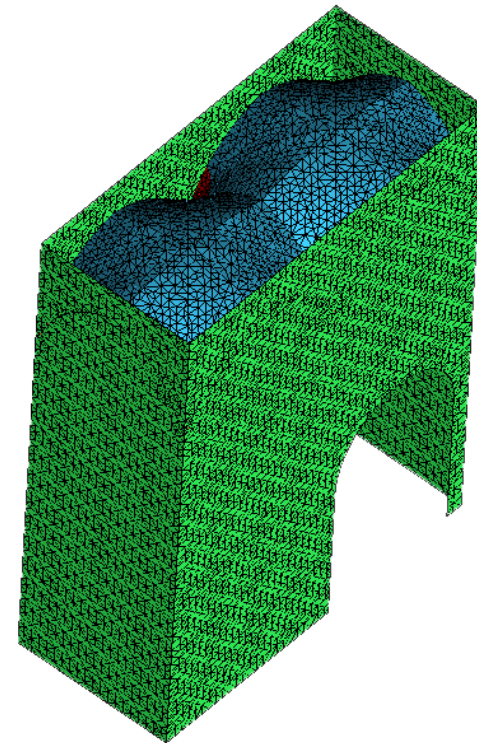


Figura 6-12 Mallado de modelo de elementos shell

El tercer modelo se trata de un modelo de sólidos, donde el elemento pasa a tener volumen. En este modelo sólo se han tenido en cuenta los nervios de la capilla, con un nivel de definición de la geometría muy superior al de los dos modelos anteriores. En este caso se ha optado por un elemento sólido tetraédrico frente al elemento sólido hexaédrico debido a que este, al igual que en el caso del elemento tipo shell, se adapta mejor a las geometrías complejas como en el caso de los enjarjes de la capilla. Los elementos tetraédricos son más rígidos que los elementos hexaédricos pero esto en un modelo de estas características, analizado en régimen elástico-lineal no es determinante a la hora de interpretar el comportamiento estructural. Es importante que todas las secciones del modelo estén compuestas por, al menos, cuatro elementos sólidos, para garantizar el correcto comportamiento y la correcta adaptación a la geometría en encuentros complicados.

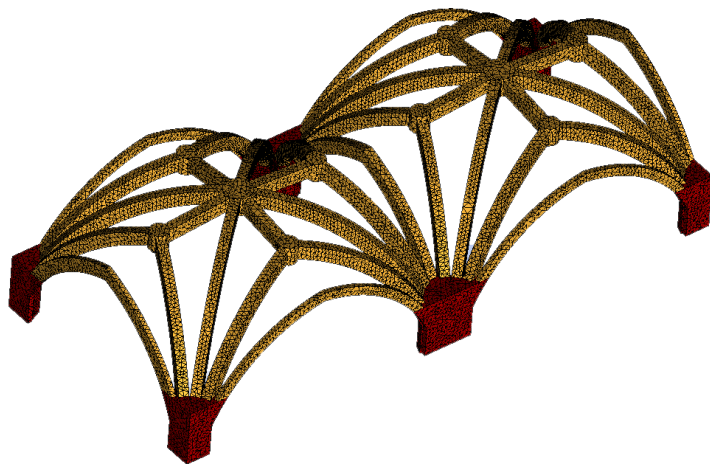


Figura 6-13 Mallado de modelo de elementos solidos

	MUROS	NERVIOS	PLEMENTERÍA
MODELO 1	Shell	Frame	Shell
MODELO 2	Shell	Shell	Shell
MODELO 3	-	Solid	-

Tabla 6-2 Tipo de elemento en cada modelo.

7. ANÁLISIS

7.1 Introducción en SAP2000 y ABAQUS

Tras el mallado de los modelos numéricos estos se analizan en programas de cálculo. Los modelos 1 y 2 al tratarse de modelos numéricos sencillos con elementos frame y shell, el programa con el que se analizan será SAP2000 Sin embargo, el modelo de elementos sólidos se analiza en el programa ABAQUS por su capacidad para tratar modelos numéricos con elementos sólidos. En ambos programas se introducirán los mismos parámetros de cálculo que se definen en apartados posteriores.

7.1.1. Materiales

Sevilla se trata de una ciudad donde gran tradición alfarera debido a la abundancia de arcillas en su territorio. Por esto y debido a que la piedra por el contrario era un material escaso en el territorio y su coste era bastante elevado con respecto al ladrillo, la cantería se destinaba a las zonas más nobles de las construcciones, como a las cabeceras de las iglesias, o a las zonas que debían requerir más resistencia, como son los nervios de las bóvedas o los arcos y el ladrillo estaba destinado al grueso de la construcción.

En la Iglesia de Santa Ana los materiales se presentan hoy en día en muy buenas condiciones. La piedra empleada en los nervios, arcos, columnillas o en la unión de la cabecera con el cuerpo de naves, seguramente tenga su origen en la Sierra de San Cristóbal. Esta roca es calcarenita y es la utilizada en el entorno de Sevilla y Jerez de la Frontera, es por esto que se intuye que la piedra de esta Iglesia deba tener características similares a las de otras construcciones de la zona, ya que, debido a su buena conservación, no se han realizado ensayos en esta Iglesia en concreto. (Valseca, 2013)

En el caso de la Capilla Monte Bernardo, tampoco se tienen datos específicos de los materiales que la constituyen, por los mismo motivos que la Iglesia Santa Ana. Esta capilla se conserva en buenas condiciones y no se han realizado intervenciones en las que se hayan podido extraer datos de su composición. Por lo tanto, a la hora de asignar las propiedades de los materiales para realizar el análisis estructural, se tendrán en cuenta propiedades de materiales que corresponden a una bibliografía específica y que se han tomado como referencia para realizar un análisis estructural de la Iglesia de Santa Ana en el estudio *Traza, geometría y estructura de la Iglesia de Santa Ana de Sevilla por Valseca, J.A.* Es por lo tanto, el modelo que se va a realizar, un modelo totalmente teórico, tanto por su geometría que, como se ha explicado anteriormente en este documento, se ha tomado un trazado teórico basado en la geometría de Hernán Ruiz II, como por sus materiales de los que no se tiene datos.

La Capilla Capitán Monte Bernardo está construida con fábrica de piedra en los nervios de las bóvedas y los enjarjes, y fábrica de ladrillo para la construcción de los muros y de la plentería.

Las fábricas son un sistema constructivo formado por piezas de piedra o ladrillo, recibidas con un mortero o argamasa, es por esto que se trata de un material heterogéneo.

7.1.1.1. El ladrillo

Al no contar con ensayos realizados sobre los ladrillos que forman la fábrica en la Iglesia de Santa Ana, se toman valores estándar de bibliografía específica para ladrillos de las características que aquí se encuentran.

Los ladrillos de la Iglesia de Santa Ana, seguramente, y con la tradición alfarera que abunda en Triana, se realizarán con arcillas secadas al sol, procedentes de la cornisa del Aljarafe.

Dependiendo de su composición y del proceso de secado con el que se haya producido, el ladrillo presentará unas características u otras. En el caso de los ladrillos de la Iglesia de Santa Ana se ha considerado una resistencia a compresión simple de 2,4 MPa. (Huerta Fernández, 2004)

Con respecto a la resistencia a tracción es igualmente bastante baja, aproximadamente 1/10 o 1/20 de la resistencia a compresión.

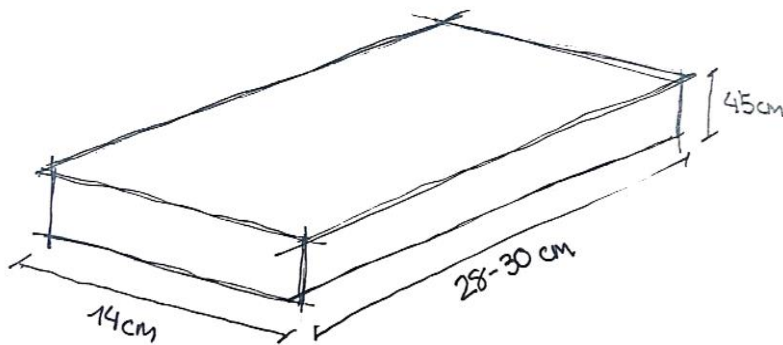


Figura 7-1 Dimensiones del ladrillo de la fábrica de Santa Ana.

7.1.1.2. La piedra

La piedra presenta una gran resistencia a compresión simple y una resistencia a tracción considerable, del orden del 5 al 10% del valor de la resistencia a compresión. (Jiménez Salas & De justo Alpañés, 1975).

La calcarenita, piedra considerada para la construcción de la fábrica de piedra de los nervios de la capilla, debe presentar una resistencia característica a compresión de mínimo 10 MPa según las prescripciones del Instituto Torroja en el PIET 70 (Torroja, 1971)

En el caso del estudio sobre la Iglesia de Santa Ana se consideran los datos obtenidos de los ensayos realizados por la empresa VORSEVI S.A. en la rehabilitación llevada a cabo en la Iglesia de Santiago el Real y de Refugio de Jerez de la Frontera, construida entre los siglos XV y XVI y ejecutada en fábrica de cantería con origen en la Sierra de San Cristóbal. Estos datos están extraídos de la tesis de Esperanza Rodríguez Mayorga.

Los valores obtenidos de estos ensayos son correspondientes a la fábrica completa, es decir a la piedra y el mortero.

Se tomarán estos valores para el análisis de los nervios de las bóvedas y de los enjarjes. Se considerarán estos valores como de un material homogéneo siguiendo las consideraciones de los macromodelos en análisis de obras de fábrica propuesto por Paulo Lourenço.

Siguiendo esta teoría, se consideran dos tipos de modelos para el análisis de obras de fábrica, los micromodelos y los macromodelos. En los micromodelos se considera cada componente de la fábrica como una unidad, por lo que se consideran las piezas de la fábrica y las juntas de la misma por separado. A cada componente se le asignan las propiedades de los materiales correspondientes y se obtiene un comportamiento global de conjunto de la fábrica.

Por otro lado, en los macromodelos se considera a la fábrica como un material continuo y homogéneo, por lo que su comportamiento se define mediante tensiones y deformaciones continuas. (Lourenço, 1996). Estos tipos de modelos suelen ser los más utilizados a la hora de acercarse a un edificio de obra de fábrica histórico mediante el método de los elementos finitos. Las características de los materiales de estos modelos no son la resultante de la suma de las características de cada material, sino se trata de una combinación de ellos.

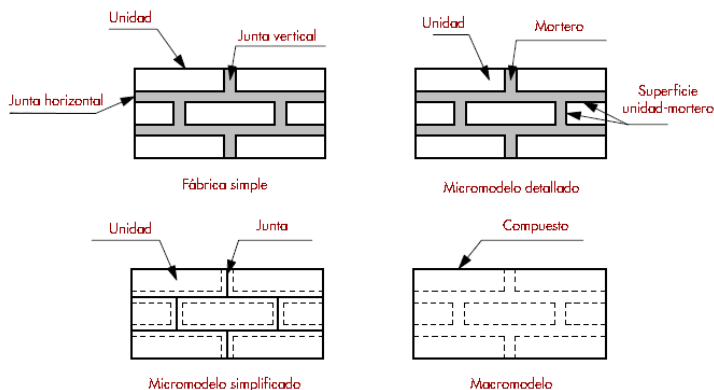


Figura 7-2 Estrategias de modelado de estructuras de fábrica por P.B.Lourenço

7.1.2.3. El mortero

El mortero en las fábricas se caracteriza por ser el material con menores capacidades mecánicas. Es por esto que la mayor parte de las deformaciones que sufre una fábrica son asumidas por el mortero.

En el caso de la Iglesia de Santa Ana, el mortero utilizado en la fábrica se trata de un mortero tradicional compuesto por cal apagada, arena y agua. La resistencia a compresión del mortero está condicionada por la dosificación de estos componentes. Su resistencia suele estar comprendida entre 0,2 y 0,5 MPa (Valseca, 2013).

7.1.2.4. La fábrica

Al considerar el elemento de la fábrica, tanto la de ladrillo como la de piedra, como un elemento continuo y homogéneo, siguiendo el concepto de los macromodelos propuesta por Lourenço, se debe tener en cuenta las características de cada uno de los materiales para obtener la resistencia del conjunto. Las características de los materiales de estos modelos no son la resultante de la suma de las características de cada material, sino se trata de una combinación de ellos.

En este caso, para la fábrica de piedra se considera los parámetros considerados en la Iglesia de Santiago de Jerez de la Frontera (R.Mayorga, 2011) cuyos valores, como se ha mencionado con anterioridad, se obtienen de los ensayos realizados en la rehabilitación del edificio.

	σ_c [MPa]	γ [Kg/m ³]	E [MPa]	ν
Fábrica de piedra	4.6	1800	6000	0.25

Tabla 7-1 Propiedades físico-mecánicas de la fábrica de piedra de la Iglesia de Santiago de Jerez de la Frontera

Siendo:

σ_c : Resistencia a compresión

γ : Peso específico

E: Módulo de elasticidad

ν : Coeficiente de Poisson

Por otro lado, a falta de datos de la fábrica de ladrillo, éstos se obtienen mediante bibliografías específicas considerando la antigüedad de estos materiales, por lo que los datos que pueden aportar una normativa de hoy día no son los adecuados para este modelo. Los elementos de una fábrica de ladrillo de hoy día siguen un proceso de fabricación que garantiza una resistencia de sus materiales muy por encima de una fábrica realizada en el siglo XV. Por lo tanto, los valores considerados son los siguientes:

	σ_c [MPa]	γ [Kg/m ³]	E [MPa]	ν
Fábrica de ladrillo	2.4	1800	3000	0.2

Tabla 7-2 Propiedades físico-mecánicas de la fábrica de ladrillo considerada en los modelos de cálculo

7.1.2. Secciones

Cada modelo cuenta con una serie de discretizaciones que hacen que algunas de las secciones que lo forman se asignen de manera distinta.

Las diferentes secciones que forman los modelos son los nervios, la plementería y los muros. Cada uno de estos tienen un espesor de sección estimado mediante el análisis geométrico y constructivo anteriormente realizado. Se trata de unos espesores aproximados, puesto que no se han podido realizar ensayos en los que se pueda determinar dichas medidas. En el caso de los nervios, el ancho se ha podido determinar mediante el trazado de la planimetría procedente de la fotogrametría. La sección de la plementería se ha estimado mediante la suposición de que se haya ejecutado con dos capas de ladrillos colocados a tabla.

Los valores estimados son en todos los modelos los mismos a pesar de tratarse de discretizaciones diferentes. Esto afecta únicamente a los nervios puesto que son el elemento del modelo que cuenta con tres discretizaciones diferentes, mediante frame, shell y sólido.

	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
	Elemento	Dimensiones [cm]	Elemento	Dimensiones [cm]	Elemento	Dimensiones [cm]
Nervios	Frame	20 x 15	Shell	e=15	Solid	20 x 15
Plementería	Shell	e=20	Shell	e=20	-	-
Muros	Shell	e=60	Shell	e=60	-	-

Tabla 7-3 Dimensiones de las secciones consideradas en los modelos

7.1.3. Condiciones de contorno

Para establecer las condiciones de contorno de la capilla se tiene que analizar su disposición conforme al resto de la iglesia.

Esta capilla se encuentra anexionada a la nave del Evangelio. Las dimensiones de la capilla con respecto al total de la iglesia por lo que esta no se verá afectada en exceso por el comportamiento de la capilla y para la capilla, la conexión con la iglesia se considera como una vinculación infinitamente rígida. Se realizan dos modelos con diferentes condiciones de contorno.

Para la validación del modelo se realiza un primer análisis de deformaciones en el eje z sin las vinculaciones con la iglesia, pero esto solo será para la validación del mismo, a continuación se introducirán para realizar el análisis de los modelos.

Con respecto a las vinculaciones exteriores en la base de la capilla se restringen los desplazamientos en las tres direcciones.

En el modelo 3, el modelo de los nervios sólidos, no se introducen condiciones de contorno, y en el apartado de análisis se verá en qué forma afecta esto al modelo.

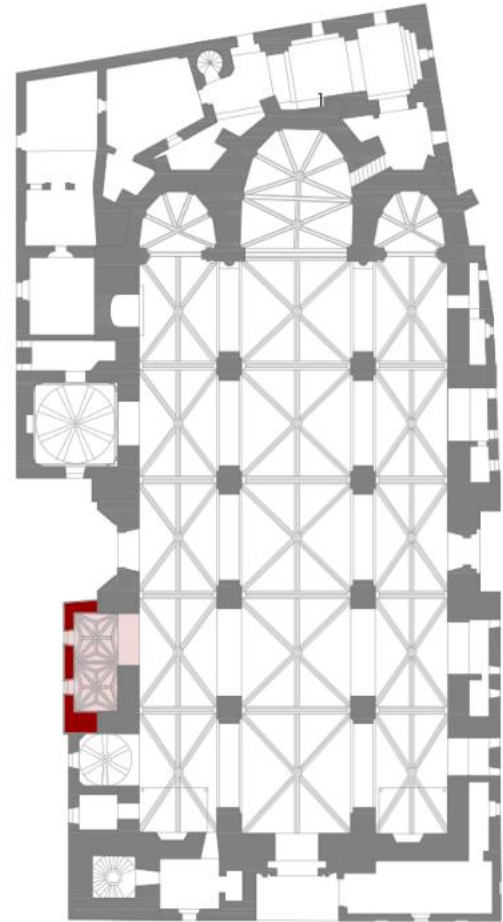


Figura 7-3 Situación de la capilla con respecto a la Iglesia de Santa Ana

7.2 Análisis de resultados

En el proceso de análisis de los diferentes modelos se seguirá siempre el mismo esquema. Se analizarán los desplazamientos, las tensiones que se producen en la plementería y las flexiones que puedan producirse en los nervios acorde a esas tensiones. Además se analizarán los modos de vibración de cada modelo.

El análisis se realiza únicamente considerando las cargas gravitatorias, en concreto el peso propio de la estructura obtenido de manera automática mediante los valores de los pesos específicos de los materiales.

7.2.1 Validación del modelo

Para realizar el análisis se comienza con un primer paso de validación de los modelos a través de las deformaciones en U_z antes de introducir las condiciones de contorno, como se ha mencionado en el anterior apartado.

En este análisis se realiza una comparación de comportamientos de otros modelos ya validados como el de una doble bóveda de crucería simple de similares dimensiones a las del caso de estudio y el modelo de la Capilla de la Jura de la Iglesia de San Juan de los Caballeros de Jerez de la Frontera. Este último modelo es objeto de estudio del TFG de José Rafael García Villegas que analiza dicha capilla mediante el método de los elementos finitos.

Analizando las deformaciones se observa en primer lugar que los valores de éstas son muy bajos, en el caso de la Capilla Capitán Monte Bernardo la deformación máxima en el eje z se produce en el centro de la bóveda con un valor de 0.2 mm. Este valor es muy similar al obtenido en los modelos de la bóveda de crucería simple y al de la Capilla de la Jura, en ambas el valor de esta deformación es de 0.13 mm, por lo que se puede afirmar que el valor de la deformación está dentro de la normalidad en este tipo de estructuras.

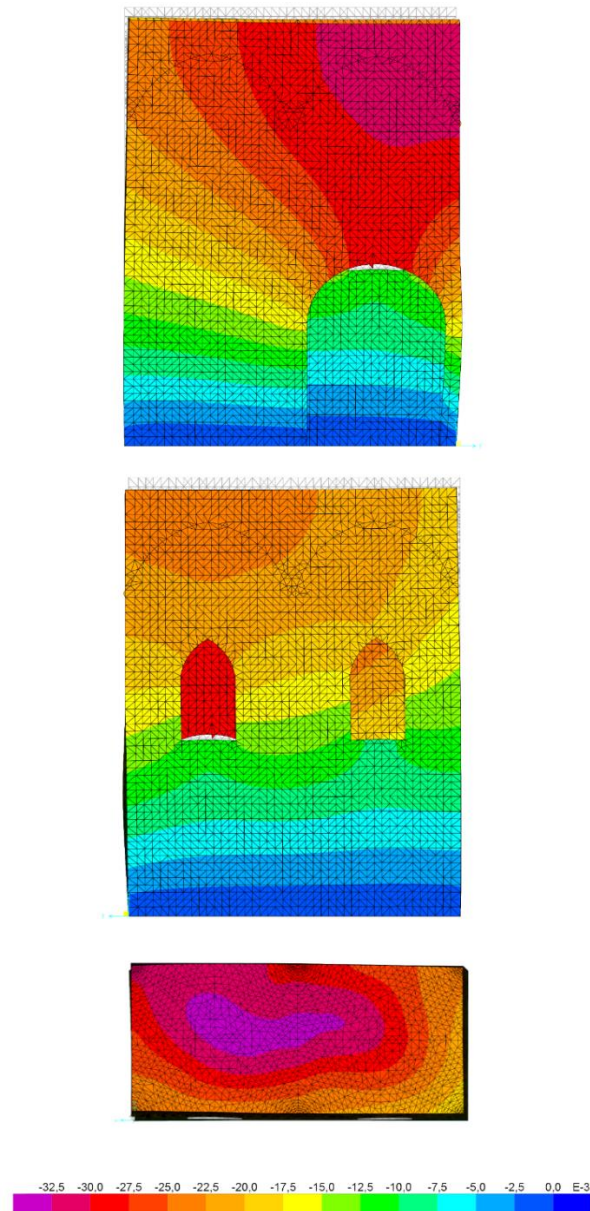


Figura 7-4 Deformada de la Capilla Capitán Monte Bernardo. Alzados y planta. Valor en cm.

Además del valor de la deformada, se observa el comportamiento de la misma. Analizando los alzados de la capilla [Figura 7-4] se puede ver que a pesar de encontrarse dentro de unos valores inapreciables, la capilla es sensible a un ligero acortamiento unitario en la parte superior de los muros. También se aprecia, en ambos alzados y en la planta, que las deformaciones son mayores en la zona más cercana al arco de entrada a la capilla debido al cambio de rigidez de la misma y esto hace que se produzca el arrastre que se observa en los alzados.

Tras analizar las deformaciones U_z , se puede afirmar que el comportamiento es coherente por lo que se pasa a analizar los modos de vibración para terminar la validación de los modelos.

En este caso, se toma como referencia los modelos de análisis de Miguel Ángel Cobreros Vime. En este tipo de estructuras no hay una normativa que especifique los valores apropiados de los períodos en este tipo de estructuras, por eso se toma como referencia los artículos de Miguel Ángel Cobreros, el cual analiza varios tipos de estructuras de fábrica y establece un valor orientativo de los períodos para este tipo de estructuras. A pesar de que los modelos estudiados por Miguel Ángel Cobreros son de mayor, en relación con ésta, lo valores de los modelos de la capilla son coherentes. El valor establecido a partir de los modelos de Miguel Ángel Cobreros suele rondar los 0.2 segundos

Se realiza una comparación de los modos de vibración entre el modelo 1 y el modelo 2 y se observa que no solo los modos de vibración son idénticos en su forma modal sino que también en los valores de los períodos

MODOS	MODELO 1 [FRAME]	MODELO 2 [SHELL]
1	0,082 s	0,083 s
2	0,052 s	0,052 s
3	0,036 s	0,036 s
4	0,035 s	0,035 s

Tabla 7-4 Valores del período de cada modelo.

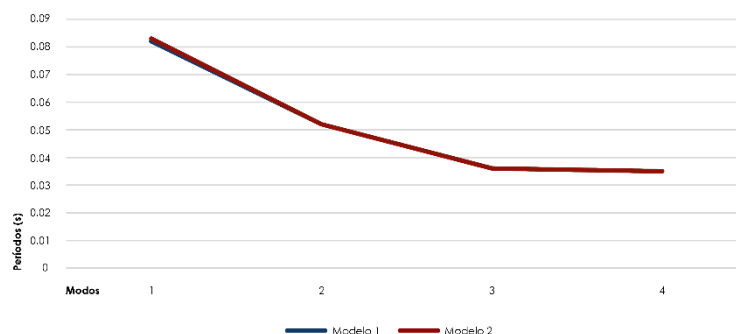


Figura 7-5 Modos de vibración de los modelos 1 y 2

Con respecto al modelo de sólidos se observa que sus modos de vibración no se corresponden a los obtenidos en los modelos 1 y 2. Esto es debido a las diferentes condiciones de contorno que tiene cada modelo. Esto se analizará más adelante en el correspondiente apartado.

Tras este primer análisis para la validación del modelo se puede afirmar que los modelos son correctos, el mallado adecuado y válidos para realizar el análisis de cada uno de ellos.

7.2.2 Modelo 1

Como se ha mencionado con anterioridad, el proceso para el análisis de cada uno de los modelos comienza con el análisis de las deformaciones, posteriormente se analiza el estado tensional y las posibles flexiones que se producen en el modelo y por último se analizan los modos de vibración de los modelos.

7.2.2.1. Deformaciones

Tras un primer acercamiento a las deformaciones del modelo durante el proceso de validación, se ha hecho un análisis más exhaustivo de cada uno de los modelos, ya introducidas las condiciones de contorno.

Se observa, con respecto al modelo de validación, que al no haber introducido las vinculaciones con respecto a la iglesia completa, la capilla se deformaba hacia el hueco de entrada y por lo tanto hacia el interior de la iglesia, como se puede observar en la [Figura 7-4](#). En el caso de este modelo se puede observar ese arrastre que produce el arco de entrada a la puerta, pero por el impedimento de los vínculos, la capilla no puede deformarse hacia el interior, por lo que la deformación que se produce es casi totalmente vertical.

Tal y como se ha comentado antes, los valores de deformación son del orden de 0.3 mm, por lo que no son importante de una manera cuantitativa, pero la forma de la deformación que se puede apreciar mediante el programa de cálculo es interesante a nivel cualitativo.

Respecto a las bóvedas, se puede observar que la zona central de las mismas es que más vence, sobre todo la bóveda que se encuentra en la entrada de la capilla, donde se puede apreciar también el arrastre que esta produce.

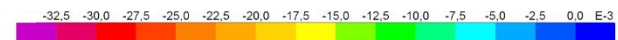
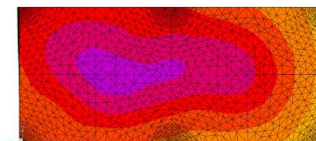
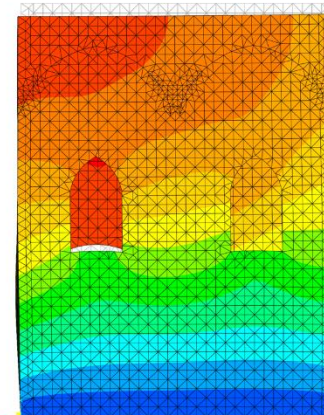
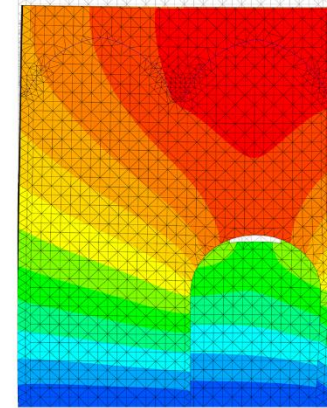


Figura 7-6 Deformada del modelo 1. Alzados y planta. Valor en cm.

7.2.2.2. Estado tensional y flexiones

Se puede observar en la planta, que en la cara superior de la plementería se identifican compresiones en el centro de cada una de las bóvedas, y por el contrario, la zona de los riñones de las bóvedas estaría traccionada. Este comportamiento es acorde a lo observado en la deformada, puesto que al ser la zona central la que más desciende provoca compresiones en la cara superior de la plementería y esto hace que la zona de riñones tienda a abrirse, es decir, a traccionarse.

Viendo esto, se busca este comportamiento en las barras que forman los nervios y se produzcan momentos flectores positivos en la zona comprimida, es decir, la zona de las claves, y momentos de flexión negativa en la zona de riñones. En la **Figura 7-7** se aprecia que estos flectores que se han intuido a partir de las tensiones en planta se corresponden con los obtenidos en el cálculo del programa.

Al igual que en el caso de la deformada, los valores de las tensiones obtenidos son muy bajos con compresiones máximas de en torno a 4 kg/cm^2 y tracciones máximas de 0.5 kg/cm^2 .¹

Teniendo en cuenta que la fábrica de ladrillo que se ha introducido en el modelo soporta hasta 25 kg/cm^2 ésta no se vería afectada apenas por estas compresiones. Con respecto a las tracciones, considerando una resistencia a tracción del 10% de la resistencia a compresión, ésta sería de 2.5 kg/cm^2 lo cual es cinco veces superior a la máxima tracción a la que está sometida la fábrica en el modelo.

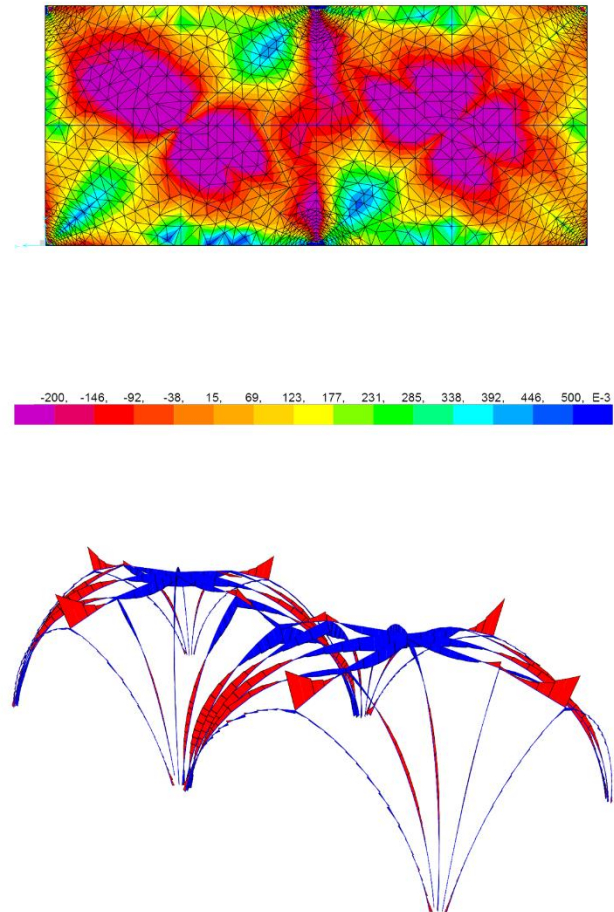


Figura 7-7 Comparación del estado tensional de los shell con el momento flector en los frames. Valor en kg/cm^2

¹ El análisis de las tensiones se realiza en kg/cm^2 debido a una mejor comprensión de estas unidades frente a las del sistema internacional.

7.2.3 Modelo 2

A continuación se analiza el segundo modelo, con nervios discretizados mediante elementos tipo shell y se sigue el mismo esquema que con el modelo anterior.

7.2.3.1. Deformaciones

El comportamiento de la deformada del modelo 2 es prácticamente el mismo que en modelo 1.

Se observa, al igual que en el caso anterior que la zona de la clave de la bóveda en la que se encuentra la entrada a la capilla es la que sufre la mayor deformación debido al arrastre que se produce de la capilla en general hacia ese lado de la capilla por tener menos rigidez.

Respecto a los muros se observa el mismo comportamiento de acortamiento unitario en la zona superior de los mismos y que va disminuyendo con la altura. Además también se observa, como ya se ha mencionado, ese vencimiento hacia la zona del arco de entrada a la capilla.

Como ocurre en el modelo 1, los valores de la deformada son muy bajos, también en torno a un máximo de 0.3 mm, lo cual en una estructura de 7 metros y medio de altura es inapreciable.

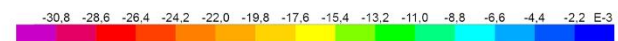
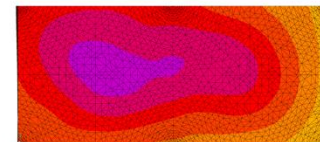
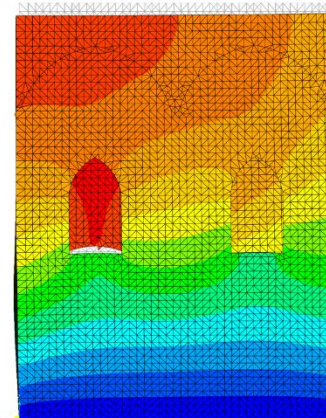
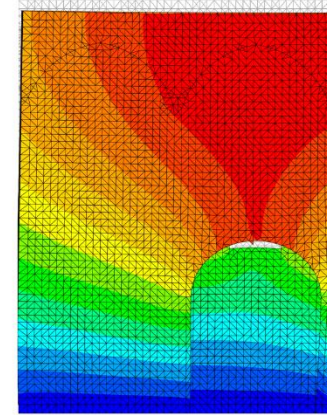


Figura 7-8 Deformada del modelo 2. Alzados y planta. Valor en cm.

7.2.3.2. Estado tensional.

En este segundo modelo, el análisis que se realiza sobre los nervios se corresponde las tensiones de los propios nervios debido a su discretización en elementos shell.

Se sigue el mismo proceso que en el modelo 1, por lo tanto se analizan primero las tensiones que se producen en la plementería. Se observa que el comportamiento es idéntico al modelo 1. En la cara superior de la plementería se encuentra comprimida la zona central de las bóvedas y comienzan a aparecer tracciones en las zonas de los riñones. La asimetría de las tensiones es debida tanto a las condiciones de contorno de la capilla como a los huecos que componen la capilla. Los riñones que se encuentran en la diagonal cuyo extremo superior es el de la entrada de la capilla [Figura 7-9] no llegan a estar traccionados debido a que por esa zona por el arrastre del arco de entrada se siguen produciendo compresiones.

En los nervios se observa que prácticamente en su totalidad están comprimidos debido a que las cargas generan unas compresiones por axil que son mayores que las tracciones que se pueden generar por las flexiones. Aparecen algunas tracciones de valor menos a 0.1 kg/cm^2 en la cara inferior de las claves, lo cual es acorde a lo analizado anteriormente en el modelo 1, en el cual, las claves estaban comprimidas en su cara superior y por lo tanto comprimidas en la inferior.

Además se observa que las compresiones van aumentando a lo largo del nervio, llegando a su punto máximo en el arranque de éstos, con valores de en torno a 3 kg/cm^2 , valor muy inferior a los 47 kg/cm^2 que puede llegar a soportar la fábrica de piedra aquí considerada.

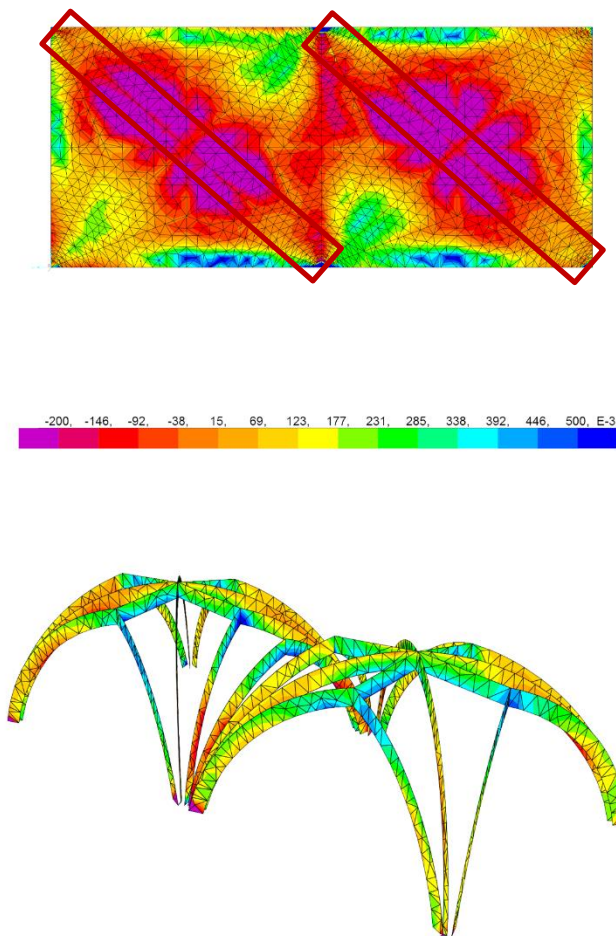


Figura 7-9 Estado tensional de la plementería y los nervios. Valor en kg/cm^2

7.2.3.3. Análisis modal de los modelos 1 y 2

Como se ha comentado anteriormente, los modos de vibración de los modelos 1 y 2 son muy parecidos, lo que lleva a pensar que los modelos son correctos.

A continuación se van a analizar cada uno de estos modos.

El primer modo de vibración se trata de un modo traslacional que moviliza la estructura en el plano YZ. La parte superior de la estructura es la que más se ve afectada por este modo debido a que la estructura se encuentra vinculada en su base pero no en la parte superior.

El modo 2 de vibración se trata de un modo traslacional en el plano XZ. Se observa que la zona central del muro exterior es la más afectada debido a que el muro interior está coaccionado por la vinculación de la iglesia.

En el tercer modo se encuentra un modo de vibración rotacional en el plano XY. En este modo se ve especialmente afectada la zona central de la plementería puesto que es la que más le afecta esta rotación.

Por último, el modo 4 se trata de un modo traslacional que moviliza la estructura de manera vertical. En este modo se identifica la influencia del arco de entrada, puesto que, a pesar de que la estructura se moviliza como un conjunto, la falta de rigidez en la zona del arco de entrada hace que ésta tenga una mayor sensibilidad a la deformación.

Como se ha indicado en el apartado de validación, los períodos de vibración de ambos modelos son idénticos [Tabla 7-4] y con valores del orden de 0.05 s, lo que hace entender que la estructura es muy rígida.

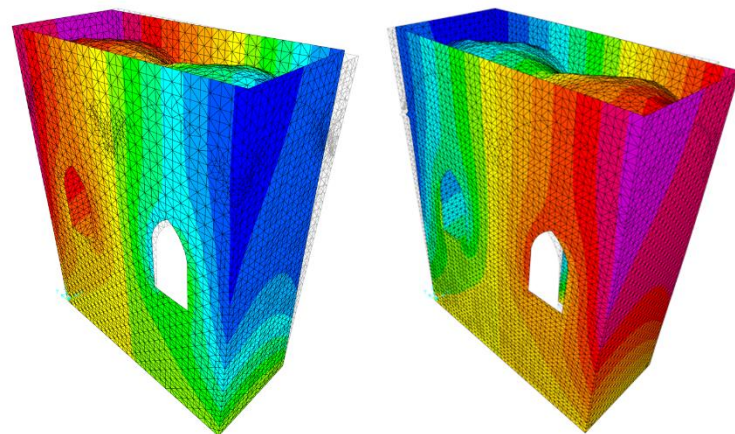


Figura 7-10 Modo 1. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2.

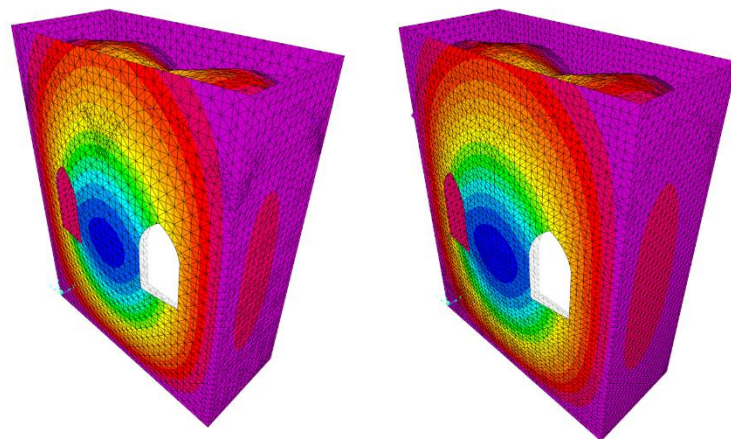


Figura 7-11 Modo 2. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2

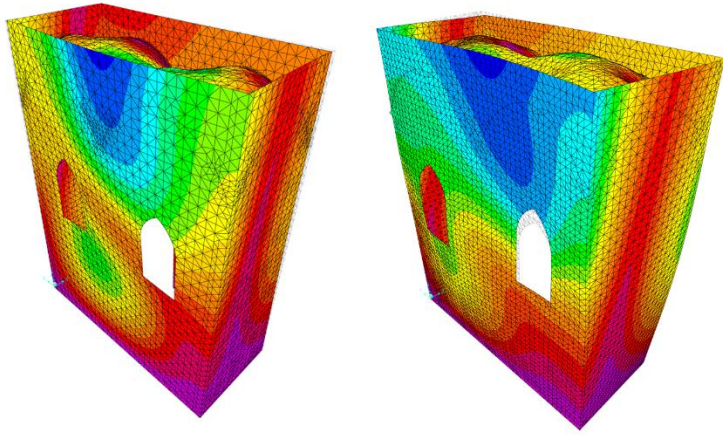


Figura 7-12 Modo 3. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2

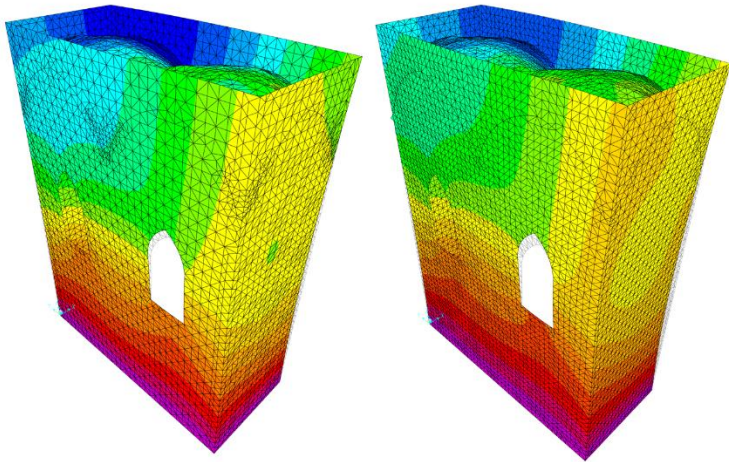


Figura 7-13 Modo 4. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2

7.2.4 Modelo 3

Por último, se realiza el análisis del modelo en el que se han discretizado los nervios mediante elementos sólidos. Este modelo tiene bastantes diferencias con los dos modelos anteriores. Se han analizado los nervios de manera aislada para comprobar su comportamiento de una manera más pormenorizada.

7.2.4.1. Deformaciones

Al igual que en los modelos anteriores, se observa que la mayor deformación de la estructura se produce en el centro de la misma, en la zona de claves.

En este modelo, se observa un comportamiento prácticamente idéntico de este modelo con respecto a los anteriores, tanto en la forma de la deformación como en el rango de valores de la misma. En los modelos 1 y 2 el valor máximo de la deformación estaba en torno a 0.3 mm en el centro de la clave, en este caso, el valor máximo de la deformada se encuentra en torno a 0.2 mm, lo cual es una diferencia inapreciable y hace pensar que ambos modelos se comportan de manera correcta.

Con estos valores de deformación se puede afirmar que la capilla, por sus dimensiones y su robustez tiene un comportamiento de sólido rígido.

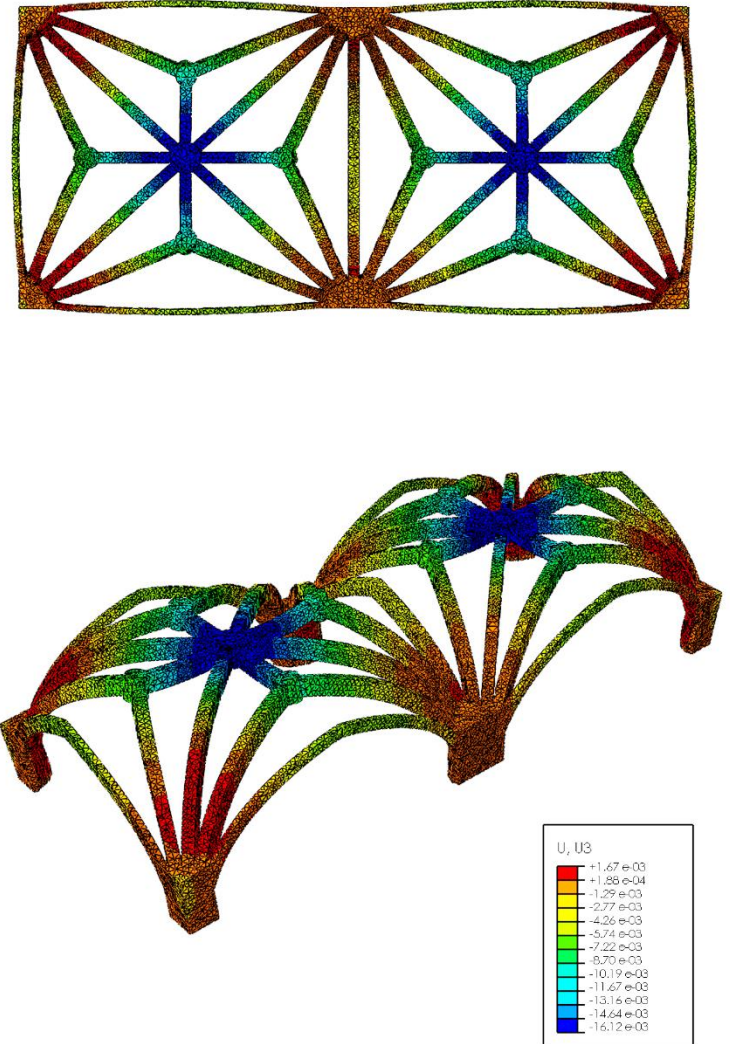


Figura 7-14 Deformada del modelo 3. Valor en cm.

7.2.4.2. Estado tensional.

A continuación se analizan las tensiones que se producen en los nervios de las bóvedas.

Al igual que en el caso de las deformaciones, las tensiones obtenidas en el análisis del modelo 3 son muy parecidas a las obtenidas en los modelos 1 y 2.

En este caso, se observa que las zonas con mayores compresiones son la cara superior de los nervios en su encuentro con la clave central y la cara inferior de la zona de los riñones. Esto es acorde a lo analizado en los modelos anteriores y se ve clara similitud con el modelo 1 donde aparecían flexiones positivas en la zona central y flexiones negativas en la zona de los riñones.

Con respecto a las tracciones, se puede ver que en su mayoría los nervios están totalmente comprimidos y que solo se presentan pequeñas tracciones en la zona de los riñones en la cara superior de los nervios y en la cara inferior de los nervios en el encuentro de los mismos con las claves.

El rango de tensiones que se obtiene de este modelo con compresiones máximas de 2.8 kg/cm² y tracciones máximas de 0.2 kg/cm², también concuerda con el obtenido de los modelos 1 y 2. Estos valores, como ya se ha comentado, son muy inferiores a la resistencia a compresión y tracción que se ha considerado para estos materiales.

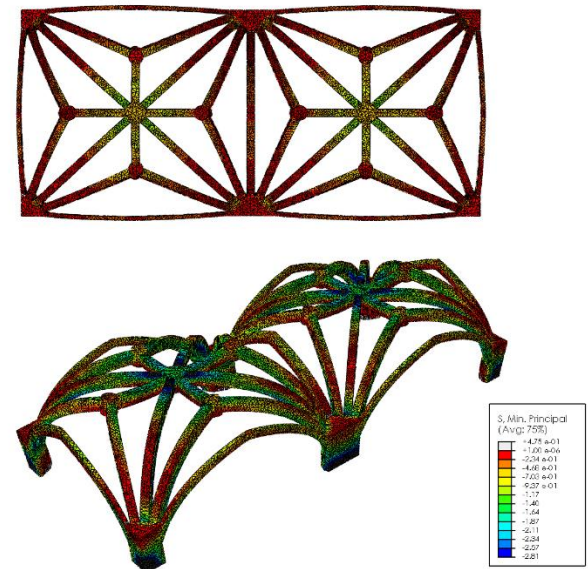


Figura 7-15 Tensión de compresión en modelo 3. Valor en kg/cm²

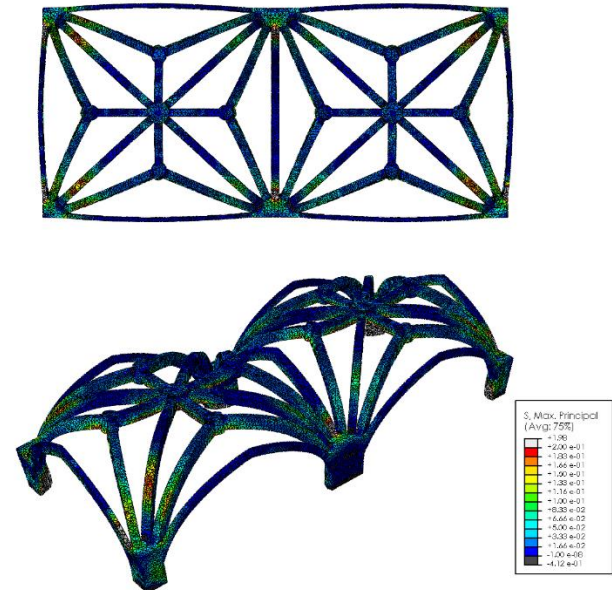


Figura 7-16 Tensión de tracción en modelo 3. Valor en kg/cm²

7.2.3.3. Análisis modal del modelo 3

Este modelo parte de unas condiciones de contorno diferentes a las de los modelos 1 y 2 por lo que sus modos de vibración no son como los de estos modelos.

Si se analiza los modos de vibración del modelo sólido únicamente para el comportamiento de los nervios, se observa que existen modos de vibración locales que son debidos la falta de comportamiento solidario de la plementería con los nervios. A pesar de que la plementería no se comporte como un elemento portante como tal, aporta rigidez y arriestra a los nervios y ayuda a que estos se comporten como un conjunto.

Es por esto que los primeros modos de vibración de la estructura son modos aislados de los arcos y no aparecen modos que movilicen la estructura como conjunto hasta el modo 30. De manera aislada solo aparecen un modo que movilice la estructura completa antes del modo 30, el modo 10 [Figura 7-18].

En las imágenes obtenidas del análisis se puede observar que los modos 1 y 20 son modos locales. En el caso del modo 1 sólo afecta a un nervio y en el caso del modo 20 afecta a una de la bóvedas.

Por el contrario, los modos 10 y 30 son modos generales que movilizan la estructura completa aunque hay elementos más afectados que otros. En estos modos se observa muy bien la influencia de la plementería la estructura, ya que, posiblemente, con la introducción de la misma, los elementos se movilizarían de una manera más unificada.

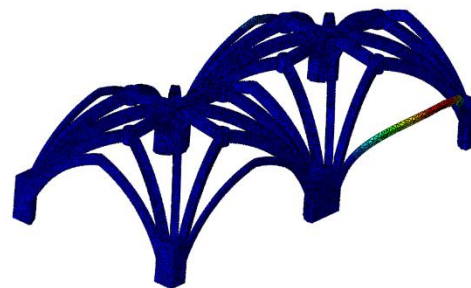
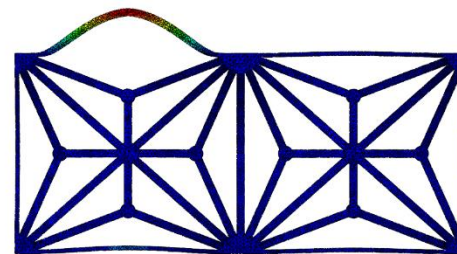


Figura 7-17 Modo 1 del modelo 3

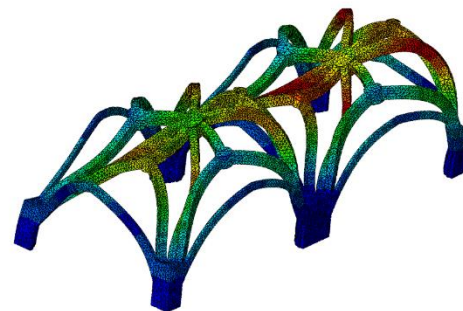
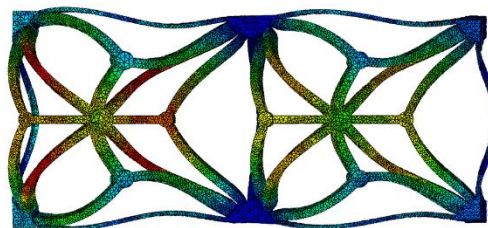


Figura 7-18 Modo 10 del modelo 3

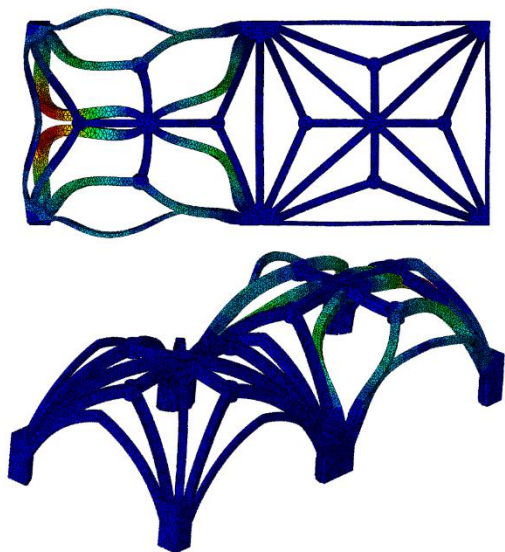


Figura 7-19 Modo 20 del modelo 3

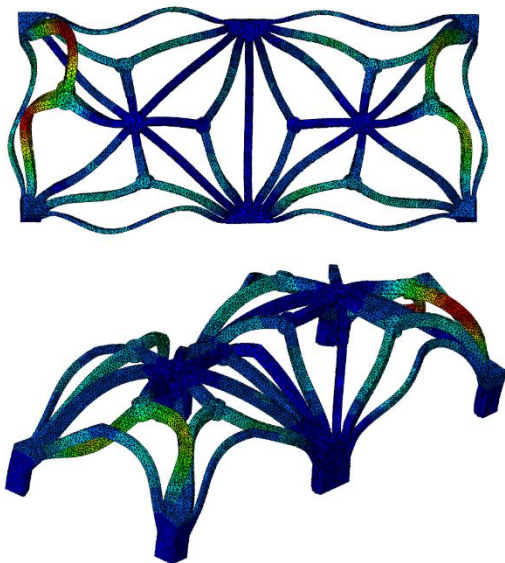


Figura 7-20 Modo 30 del modelo 3

8. CONCLUSIONES

Siguiendo el orden de trabajo, se establecen las siguientes conclusiones:

1. El proceso que se ha seguido para el análisis de la Capilla Capitán Monte Bernardo es un proceso sencillo, que un alumno de arquitectura sin medios, puede seguir para realizar una aproximación a edificios patrimoniales. Este proceso debe contar con un análisis histórico y constructivo previo en el que se identifiquen métodos de trabajo de la época en la que se construye el edificio objeto de estudio, para llegar a poder hacer un análisis geométrico y estructural más fidedigno a la realidad.
2. Debido a la situación de Sevilla a principios del s.XVI se produce un avance a nivel constructivo gracias a la formación que se da a canteros que participan en la culminación de la Catedral. Este avance en las técnicas constructivas se observa en la finura de la talla de los nervios de la Capilla Capitán Monte Bernardo y sobretodo en la exactitud del replanteo de la misma. Como se ha demostrado mediante el levantamiento fotogramétrico, el trazado de los nervios es casi exacto al trazado teórico realizado mediante el método de Hernán Ruiz. Esta exactitud no se observa en la propia Iglesia de Santa Ana, cuya construcción es de 300 años antes.
3. Analizando los modelos estructurales se puede concluir que, si bien los materiales empleados para el cálculo no se corresponden con los de la propia capilla por la imposibilidad de obtención de muestras y ensayos, el estado tensional al que se encuentra la capilla sometida es muy inferior a la capacidad resistente de los materiales que la forman, del orden de 12 veces inferior para compresión en fábrica de piedra y 6 veces en fábrica de ladrillo.

En el caso de la tracción, suponiendo que la fábrica tiene una resistencia a tracción del 10%, el estado tensional a tracción es del orden de 15 veces inferior en fábrica de piedra y 8 veces en fábrica de ladrillo.

4. Mediante el análisis modal de la estructura en el modelo 3se ha observado la importancia de la plementería a nivel de comportamiento de conjunto, por ser el elemento que arriostra los nervios y rigidiza el conjunto.

9. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6-1 Distancias en metros con respecto al punto A.....	29
Tabla 7-1 Propiedades físico-mecánicas de la fábrica de piedra de la Iglesia de Santiago de Jerez de la Frontera	39
Tabla 7-2 Propiedades físico-mecánicas de la fábrica de ladrillo considerada en los modelos de cálculo	40
Tabla 7-3 Dimensiones de las secciones consideradas en los modelos.....	40
Tabla 7-4 Valores del período de cada modelo.....	43

10. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1 Vista desde la cubierta de la Iglesia de Santa Ana	11
Figura 4-2 Evolución de la planta de la Iglesia de Santa Ana	13
Figura 4-3 Capilla Mayor de la Catedral de Sevilla. Foto de Lane Weaver	14
Figura 4-4 Sala del Capítulo en el Monasterio de Sta. María de las Cuevas. Foto de Jose Luis Filpo Cabaña	15
Figura 4-5 Situación de la Sala del Capítulo en relación al conjunto central del monasterio. (Rivera Gómez, Barrios Sevilla, & Rodríguez García, 2007)	15
Figura 4-6 Grabado de Parcerisa, imagen del siglo XIX del Oratorio de Isabel la Católica.....	16
Figura 4-7 Iglesia Sta. María de Jesús. Foto de Esperanza Galindo	16
Figura 4-8 Bóvedas de la Capilla del Capitán Monte Bernardo ..	17
Figura 4-9 Relieve del encuentro de nervios	17
Figura 5-1 Sección transversal de la Iglesia de Santa Ana. Chueca Goitia, Fernando.....	19
Figura 5-2 Proporciones de la planta primitiva de la Iglesia de Santa Ana de Sevilla	20
Figura 5-3 Bóvedas de la Capilla Capitán Monte Bernardo	21
Figura 5-4 Dibujo de una bóveda de crucería de cinco claves del Libro de arquitectura de Hernán Ruiz.....	22
Figura 5-5 Trazado de bóveda de tercelete [3x3] según el método de Hernán Ruiz.	23
Figura 5-6 Trazado de bóveda de tercelete en el caso de la Capilla Capitán Monte Bernardo según el método de Hernán Ruiz	23
Figura 6-1 Esquema del proceso de modelado	25
Figura 6-2 Levantamiento en planta de la capilla.....	26
Figura 6-3 Proceso de colocación de las dianas	26
Figura 6-4 Secciones Capilla Capitán Monte Bernardo.....	27
Figura 6-5 Planta de la Capilla Capitán Monte Bernardo	28
Figura 6-6 Superposición de planimetrías realizadas mediante distintos métodos de medición.....	28

Figura 6-7 Fotogrametría de la Capilla Capitán Monte Bernardo	29
Figura 6-8 Inicio y final del proceso de modelado 3D	30
Figura 6-9 Modelo de los muros de la Capilla Capitán Monte Bernardo.....	31
Figura 6-10 Modelos frame, shell y sólido de los nervios de la Capilla Capitán Monte Bernardo.....	32
Figura 6-11 Modelo shell de la plementería de la Capilla Capitán Monte Bernardo	33
Figura 6-12 Mallado de modelo de elementos shell.....	34
Figura 6-13 Mallado de modelo de elementos solidos	35
Figura 7-1 Dimensiones del ladrillo de la fábrica de Santa Ana. Croquis de Valseca, J.A.	38
Figura 7-2 Estrategias de modelado de estructuras de fábrica por P.B.Lourenço	39
Figura 7-3 Situación de la capilla con respecto a la Iglesia de Santa Ana	41
Figura 7-4 Deformada de la Capilla Capitán Monte Bernardo. Alzados y planta. Valor en cm.	42
Figura 7-5 Modos de vibración de los modelos 1 y 2.....	43
Figura 7-6 Deformada del modelo 1. Alzados y planta. Valor en cm.....	44
Figura 7-7 Comparación del estado tensional de los shell con el momento flector en los frames. Valor en kg/cm ²	45
Figura 7-8 Deformada del modelo 2. Alzados y planta. Valor en cm.....	46
Figura 7-9 Estado tensional de la plementería y los nervios. Valor en kg/cm ²	47
Figura 7-10 Modo 1. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2.	48
Figura 7-11 Modo 2. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2	48
Figura 7-12 Modo 3. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2	49
Figura 7-13 Modo 4. Izda. Modelo 1. Dcha Modelo 2	49
Figura 7-14 Deformada del modelo 3. Valor en cm.	50
Figura 7-15 Tensión de compresión en modelo 3. Valor en kg/cm ²	51
Figura 7-16 Tensión de tracción en modelo 3. Valor en kg/cm ² ..	51
Figura 7-17 Modo 1 del modelo 3.....	52
Figura 7-18 Modo 10 del modelo 3.....	52
Figura 7-19 Modo 20 del modelo 3.....	53

Figura 7-20 Modo 30 del modelo 3.....	53
Figura 11-1 Ubicación de la Iglesia de Santa Ana. S/E	61
Figura 11-2 Alzado de la Iglesia de Santa Ana por Jose María Jiménez Ramón. 1993	62
Figura 11-3 Alzado lateral de la Iglesia de Santa Ana por José María Jiménez Ramón. 1993.....	63
Figura 11-4 Alzado lateral de la Iglesia de Santa Ana por José María Jiménez Ramón. 1993. Alzado de la Capilla Capitán Monte Bernardo.....	64
Figura 11-5 Planimetría teórica y obtenida por fotogrametría de la Capilla Capitán Monte Bernardo.....	65
Figura 11-6 Secciones obtenidas mediante fotogrametría de la Capilla Capitán Monte Bernardo.....	66

11. ANEJO DE PLANIMETRÍA

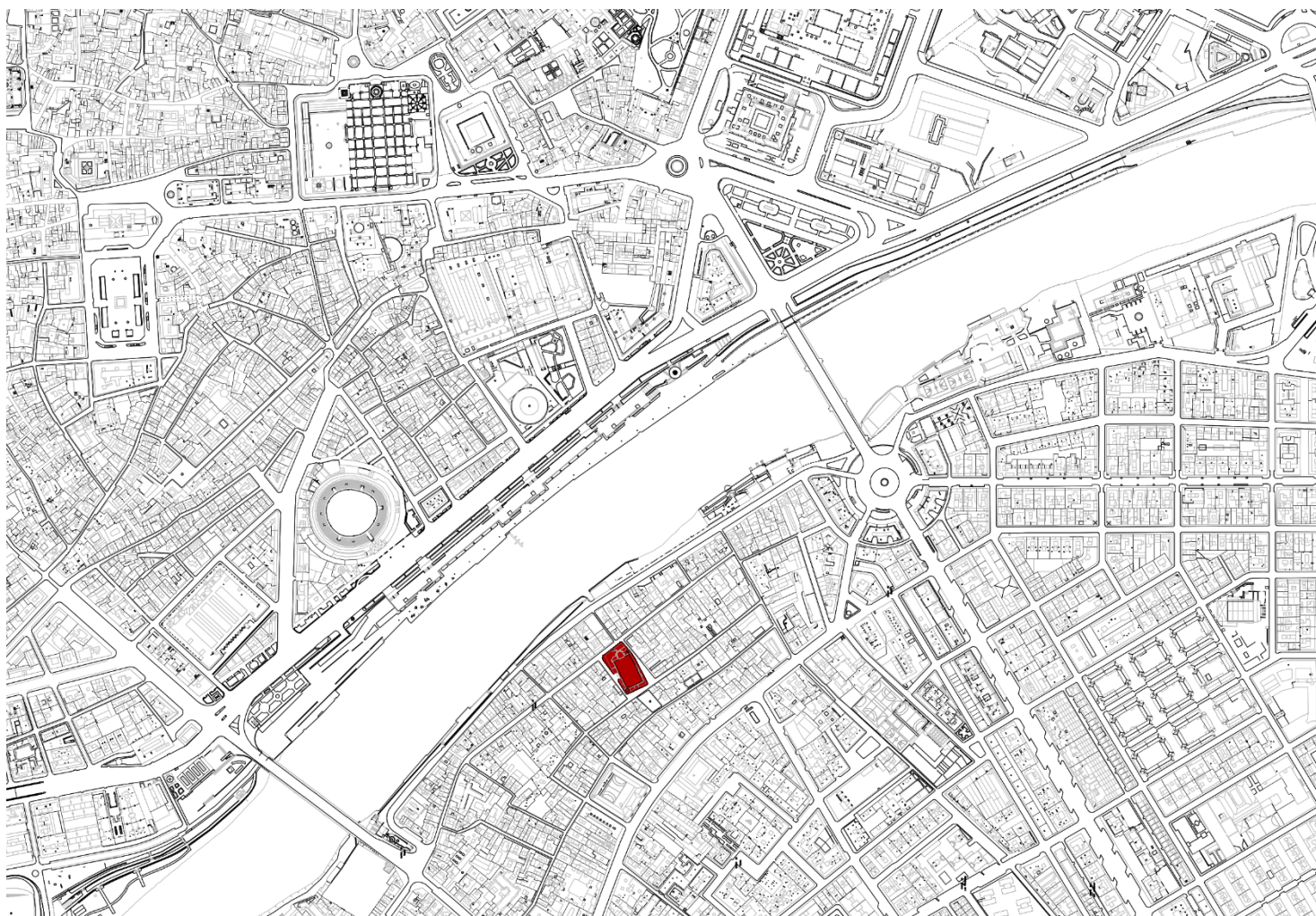


Figura 11-1 Ubicación de la Iglesia de Santa Ana. S/E



Figura 11-2 Alzado de la Iglesia de Santa Ana por Jose María Jiménez Ramón. 1993

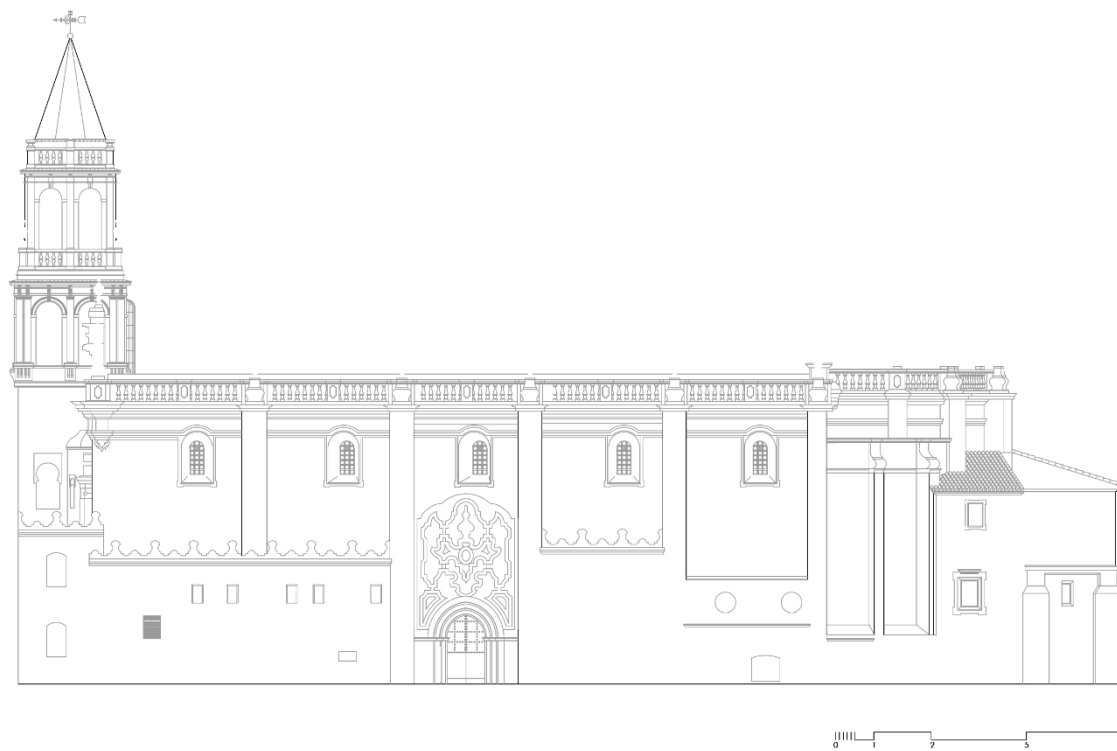


Figura 11-3 Alzado lateral de la Iglesia de Santa Ana por José María Jiménez Ramón. 1993



Figura 11-4 Alzado lateral de la Iglesia de Santa Ana por José María Jiménez Ramón. 1993. Alzado de la Capilla Capitán Monte Bernardo

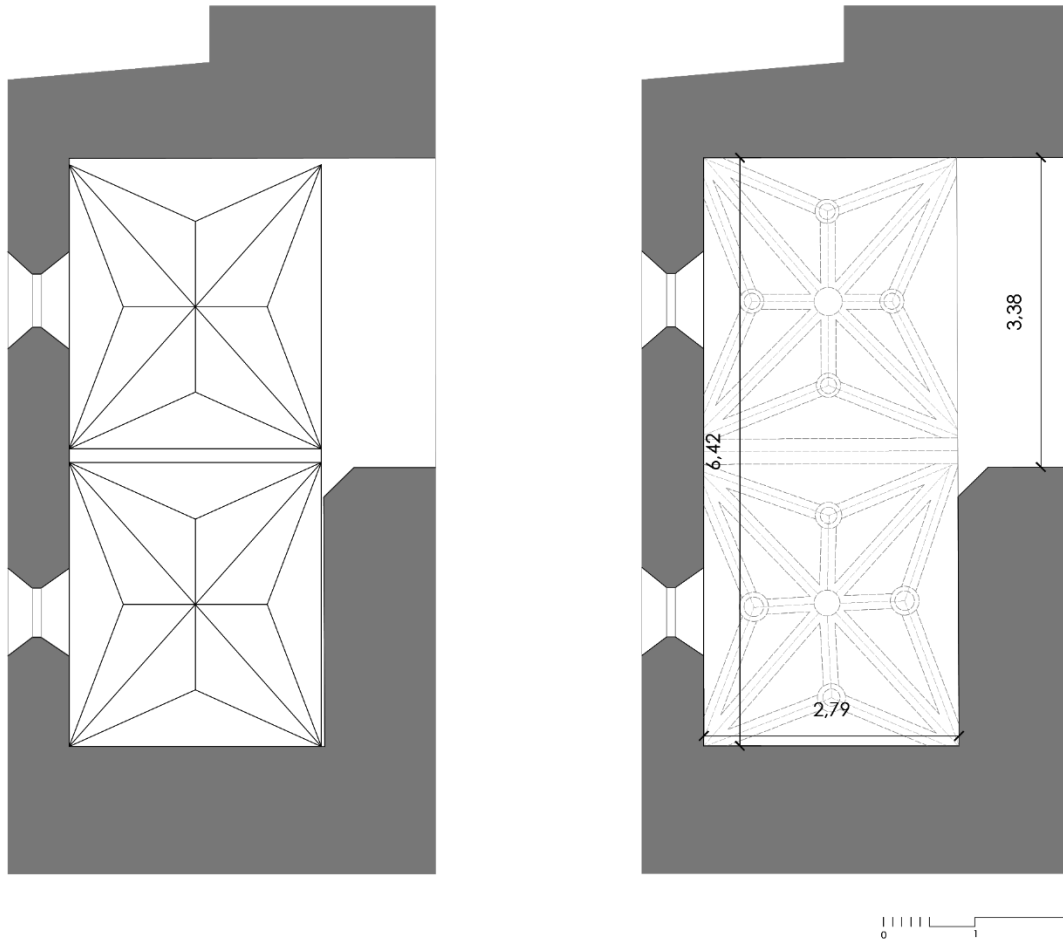


Figura 11-5 Planimetría teórica y obtenida por fotogrametría de la Capilla Capitán Monte Bernardo

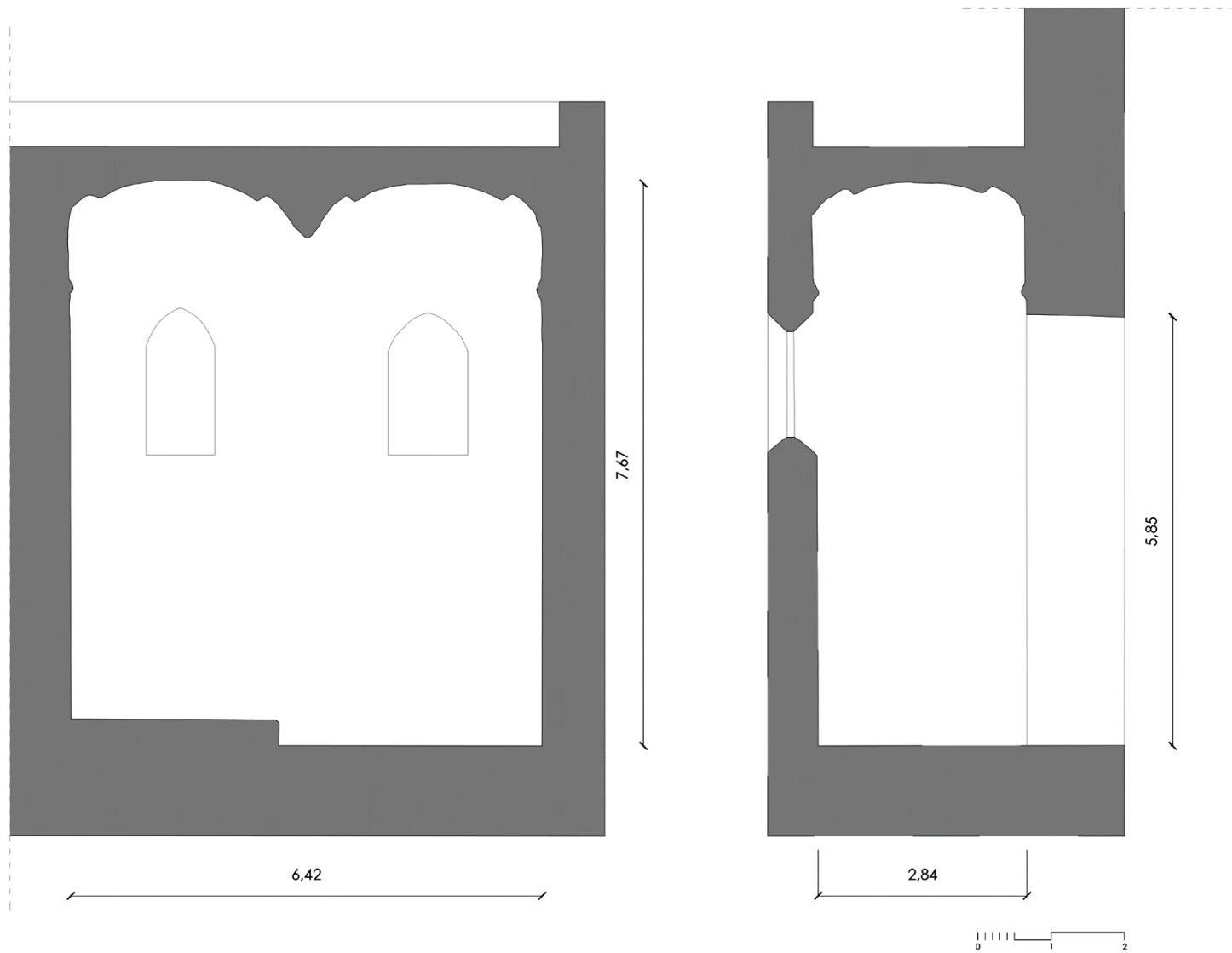


Figura 11-6 Secciones obtenidas mediante fotogrametría de la Capilla Capitán Monte Bernardo

12. BIBLIOGRAFÍA

- Chueca Goitia, F. (1965). *Historia de la Arquitectura Española. Edad Antigua, Edad Media*. Madrid: Editorial Dossat.
- Cobrerros Vime, M. (2004). Análisis de estructura de obra de fábrica. *STAR, Structural Architecture N°11*.
- Collantes de Terán Sánchez, Facón Márquez, & González de Canales López Obrero, F. (2016). *Santa Ana de Triana: Aparato histórico-artístico*. Sevilla.
- Escrig Pallares, F., & Pérez Valcarcel, J. (2004). *La modernidad del Gótico*. Sevilla: Colección de divulgación científica de la Universidad de Sevilla.
- García Villegas, J. (2015). *Estudio mediante Elementos Finitos de la Capilla de la Jura de la iglesia de San Juan de los Caballeros en Jerez de la Frontera*. Sevilla.
- Harillo, S. (19 de enero de 2016). *Cultura de Sevilla*. Obtenido de <http://culturadesevilla.blogspot.com/2016/01/la-capilla-de-santa-maria-de-jesus-abre.html>
- Heymann, J. (1999). *El esqueleto de piedra*. Instituto Juan de Herrera.
- Heymann, J. (2015). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.
- Huerta Fernández, S. (2004). Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábricas. Instituto Juan de Herrera.
- Jiménez Salas, J., & De justo Alpañés, J. (1975). *Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los sielos y de las rocas*.
- Lourenço, P. (19 de febrero de 1996). Computational strategies for masonry structures. Delft, Países Bajos.
- Marín Fidalgo, A. (1992). *Guía de los Reales Alcázares de Sevilla*. Guadalquivir S.L. Ediciones.
- Palacios Gonzalo, J. (2009). *La cantería medieval*. Ediciones Munilla-Lería.
- Peraza, L. (1530). *Historia de Sevilla*.
- Pozo Ruiz, A. (s.f.). *Alma mater hispalense*. Obtenido de <https://personal.us.es/alporu/histsevilla/poblacion.htm>
- R.Mayorga, E. (2011). Rehabilitación del Templo Parroquial de Santiago Apóstol en Jerez de la Frontera. Anamnesis, diagnosis, terapia y control. Departamento de mecánica de medios continuos, teoría de estructuras e ingeniería del terreno. Universidad de Sevilla.
- Rabasa Díaz, E. (2005). Construcción de una bóveda de crucería en el Centro de los Oficios de León. *Instituto Juan de Herrera*.
- Rivera Gómez, C. A., Barrios Sevilla, J., & Rodríguez García, R. (2007). *Las decoraciones pictóricas murales en el monasterio de Santa María de las Cuevas de Sevilla. Análisis histórico y caracterización material*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
- Ruta Cultural. (8 de Diciembre de 2018). Obtenido de <https://rutacultural.com/el-oratorio-de-isabel-la-catolica-del-alcazar-de-sevilla/>.
- Serrano, A. (2018). *Estrategias geométricas en las bóvedas góticas: las claves*. Madrid: TFG ETSAM.
- Sierra Delgado, R. (s.f.). *Diego de Siloé y la nueva fábrica de la Sacristía Mayor de la Catedral de Sevilla*. Sevilla: COAS-FIDAS.
- Torroja, E. (1971). *Prescripciones P.I.E.T. 70. Obras de fábrica*. Instituto Eduardo Torroja.
- Valseca, J. (2013). *Traza, geometría y estructura de la Iglesia de Santa Ana de Sevilla*. Sevilla.

