

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LA CUPULA DE LA BASÍLICA DEL MONASTERIO DE EL ESCORIAL

PEDRO HURTADO VALDEZ

Consideraciones iniciales.

Ubicado a 50 Km. de Madrid y a 1.026 m. de altitud, en la zona de la Sierra de Guadarrama y definida por la ladera oriental del Monte Abantos, el monasterio del Real de San Lorenzo de El Escorial constituye un monumento de primer orden, no solo para el legado histórico español sino para la humanidad, tanto por su arquitectura como por su entorno natural.¹ Dentro de las características arquitectónicas del monasterio, se puede mencionar su fábrica como muestra de una elaborada expresión constructiva, especialmente en lo tocante a la estereotomía de la piedra con la que están hechas sus bóvedas. De un recorrido por el conjunto edificado se ha observado la presencia en muchas bóvedas de grietas y fisuras, que en un primer momento pueden llevar a pensar en la existencia de patologías que amenazan su estabilidad. Sin embargo las fisuras vienen a ser el comportamiento natural que tiene la fábrica para adaptarse a las modificaciones del contorno, pero hace necesario un ejercicio de verificación de que tales modificaciones no comprometen la estabilidad de estas bóvedas.

El presente trabajo busca aportar nuevos conocimientos del monasterio a nivel de su comportamiento estructural, en la dirección de los trabajos de Heyman sobre el análisis límite de las estructuras de fábrica. El estudio se dirige exclusivamente a la basílica del monasterio, diseñada por Juan de Herrera, para lo cual se procedió a desarrollar un análisis de la estabilidad de la cúpula que cubre el crucero y determinar si las cargas que soporta son aceptables o suponen un peligro de ruina para la fábrica. Asimismo con el propósito de obtener una posición más exacta de los elementos que definen la estructura se ha utilizado un levantamiento por fotogrametría de la sección de la cúpula de la basílica, realizada y publicada por la Universidad Politécnica de Madrid.

Hipótesis del análisis límite.

La aplicación de la teoría del análisis límite efectuada por Heyman para arcos y bóvedas parte de tres hipótesis del comportamiento estructural de una fábrica.²

a) La resistencia a compresión es infinita. Considera que la fábrica está constituida por un material rígido unilateral resistente a compresiones de magnitud infinita, esto es, un conjunto de bloques indeformables

¹ Cota tomada con respecto a la lonja, mostrando un perfil prácticamente plano y que está consignada en los planos del ayuntamiento de San Lorenzo de El Escorial.

² HEYMAN, Jacques. El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, 1999, págs. 15-31.

en contacto seco y directo, sostenido bajo peso propio. A pesar que esta hipótesis va en contra de la seguridad las tensiones que actúan en el material son muy bajas para su capacidad de trabajo, siendo poco probable un fallo por resistencia.³

b) La resistencia a tracción es nula. Supone que el material rígido unilateral no tiene capacidad alguna para resistir tracciones. Esta suposición va evidentemente a favor de la seguridad por lo que cualquier resistencia, aunque mínima, que pueda ofrecer el material a tracción constituye un mejoramiento de las características de la fábrica.

c) El fallo por deslizamiento es imposible. Asume además que la pretensión de compresión generada entre las piedras por el propio peso de ellas es suficientemente alta como para evitar su deslizamiento. Esta hipótesis vuelve a estar en contra de la seguridad, si bien los casos de deslizamientos entre piedras son muy raros, estando asociados mayormente a movimientos sísmicos o alta vibración por causas externas a la misma fábrica.

Condición de estabilidad.

La condición de estabilidad de una fábrica, edificada con un material que cumpla los postulados del análisis límite, necesita que las fuerzas actuantes en ella muestren una trayectoria de la línea de empujes contenida dentro de su propia geometría, es decir que la resultante de las tensiones debe estar contenida en su interior para cada sección hipotética tomada en la estructura.⁴

La condición de estabilidad, por tanto su nivel de seguridad, estará determinada por la distancia existente desde la ubicación de la resultante de las fuerzas actuantes hasta los bordes de la sección, ya que si se saliera de la fábrica implicaría tracciones que el material de acuerdo a las hipótesis adoptadas no puede asumir.

Así se pone de manifiesto el carácter geométrico del coeficiente de seguridad, sustituyendo a la idea común en el cálculo de estructuras de hormigón armado o acero, de un coeficiente de resistencia. Por tanto define una posición que el empuje resultante no debe sobrepasar dentro de cada sección. Los coeficientes de seguridad que se han dado a las fábricas antiguas dependen del tipo y uso de la estructura, y tienen por lo general un carácter empírico, aunque habían previsto posibles asimetrías constructivas, asientos diferenciales posteriores y sobrecargas accidentales o imprevistas.

³ "...aunque la aparición de una rótula implica un giro de dovelas y una concentración de tensión, en condiciones normales, el material puede soportar entre 20 y 30 veces más su tensión de trabajo sin romper, por lo que la formación de una rótula es posible y tolerable". MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio. Las grietas en las estructuras de fábrica, un procedimiento para evaluar la forma de trabajo de éstas. En apuntes del curso procedimientos y técnicas constructivas del patrimonio, Universidad de Alcalá, Master de Restauración y Rehabilitación del Patrimonio, Alcalá de Henares, 2004, pág. 46.

⁴ Las ecuaciones matemáticas del equilibrio pueden quedar representadas por la cadena invertida de Hooke o antifunicular de tensiones. El principio fue enunciado por Hooke hacia 1670 y Gregory en 1698 expuso las consecuencias de este descubrimiento: "...solo la catenaria (invertida) es la forma correcta de un arco. Y si arcos de otras formas se sostienen es porque en su espesor hay contenida una catenaria". Citado por HUERTA FERNANDEZ, Santiago. Mecánica de las bóvedas de la catedral de Gerona. En apuntes del curso las grandes bóvedas hispanas, Madrid 19-23 de mayo de 1997. Ministerio de Fomento, Madrid, 1998, páginas 53-65, pág. 57.



Vista del monasterio a comienzos del siglo XX.

Límite inferior del coeficiente de seguridad.

Normalmente la estructura de una fábrica antigua es de naturaleza hiperestática, por lo cual es posible encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro del material, correspondientes a las infinitas situaciones de equilibrio que se pueden establecer, ya que la trayectoria de la línea de empujes no es más que una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio. Así en una estructura que cumpla los postulados mencionados se podría demostrar el Teorema Fundamental del Análisis Límite, el cual explica que una estructura no colapsará ante las cargas dadas si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con esfuerzos no contrarios a la condición límite del material (que no generen tracciones). Es decir, si es posible dibujar la trayectoria de una línea de empujes contenida dentro de la estructura, ésta será estable.⁵

Como bien refiere Huerta la importancia del teorema se basa en que la situación de equilibrio marcada por la línea de empujes, puede ser elegida libremente y aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa obteniendo un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico, ya que la estructura tiene al menos ese coeficiente de seguridad.⁶ Ciertamente se podría encontrar una línea de empujes que permitiera una situación más favorable, pero como refiere el teorema basta con encontrar una línea cualquiera que cumpla con las condiciones señaladas.

⁵ HEYMAN, Jacques. Op.cit., pág. 26.

⁶ HUERTA FERNANDEZ, Santiago. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2004.

El criterio de estabilidad, por tanto, rige la seguridad de las fábricas antiguas más que los criterios de estabilidad o rigidez, dado que las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas. El criterio de estabilidad conlleva a una concepción geométrica de estas estructuras, donde la forma marca un papel importante posibilitando la actuación de las líneas de empujes siempre dentro de los límites de la fábrica.

Movimientos y patologías de los arcos.

Las grietas y fisuras son de aparición normal en materiales que no resisten tracciones. Estos agrietamientos son la forma que tiene la estructura para adaptarse a las variaciones en las condiciones iniciales, como por ejemplo al asentamiento producido al descimbrarse la estructura o a un pequeño desplazamiento de los estribos. Las grietas dividen la estructura en un conjunto articulado de bloques que se mueve y adapta a las nuevas condiciones del entorno. A cada movimiento corresponde un agrietamiento distinto y una estructura puede presentar a lo largo de su historia distintos agrietamientos, que corresponden a distintas posiciones de las líneas de empujes. Como el Teorema Fundamental del Análisis Límite asegura que si se encuentra una línea de empujes dentro de la fábrica, es decir una cierta situación de equilibrio, aunque puede moverse ésta, difícilmente se saldrá de los límites de la fábrica con lo que la estabilidad queda asegurada.

En el caso de los arcos, se puede considerar que en uno de suficiente espesor puede acomodar un infinito número de líneas de empujes distintas, que corresponden a infinitas situaciones de equilibrios posibles. Cuando la línea de empujes toca el borde de la fábrica se forma una grieta, funcionando como una articulación. Esta patología está relacionada con determinados movimientos de los apoyos, de forma que si los apoyos se mueven ligeramente hacia fuera del arco el empuje se hace mínimo, y si los apoyos se acercan ligeramente, las grietas se invierten y el empuje se hace máximo. Por tanto hay dos posiciones extremas para la línea de empujes dentro del arco, una de más peralte (la trayectoria del antifunicular toca el trasdós en la clave y en el intradós en los riñones) y mínimo empuje, y otra de menor peralte (toca el intradós cerca de la clave y el trasdós en los arranques) y máximo empuje.

Cuando la línea de empujes toca el borde del arco se forma una articulación, pudiendo aparecer hasta tres articulaciones, por tanto el arco funcionará como triarticulado asegurando su estabilidad. Si la configuración de la carga conduce a la aparición de una cuarta articulación el arco colapsaría al formarse un mecanismo de cuatro bielas, como podría suceder por la aplicación de una carga puntual.

Las cúpulas y el método de los cortes para determinar su estabilidad.

Una cúpula es una bóveda compuesta (aproximadamente semiesférica) que suele cubrir un amplio espacio, pudiendo adoptar formas variadas, siendo la más sencilla la de una cáscara de revolución. El comportamiento estructural de una cúpula puede considerarse asimilable al principio de la cadena colgante de Hooke y aplicados a la fábrica, considerada como un material no resistente a tracción.

La cúpula igual que el arco muestra empujes hacia fuera de sus apoyos y éstos como ocurriría con el arco, ceden ligeramente. Al producirse este efecto la cúpula tiende a abrirse en gajos separados por grietas meridionales, aunque generalmente se muestre intacta entre la clave y aproximadamente unos 25° de latitud. Una de las causas a las que se atribuyen los daños en las cúpulas es a los asentos de la fábrica o la cimentación. Además se suele distinguir entre la evolución de los daños debidos a esta causa, que terminan frenándose y la de los daños debido al empuje insuficientemente contrarrestado, que produce agrietamientos en el plano de los meridianos por la dilatación de la base de la cúpula.⁷



Vista actual del monasterio

Ya en 1748 Poleni había reparado en este detalle cuando escribió su célebre informe donde analizaba las grietas de la cúpula de San Pedro en el Vaticano, representando las fuerzas necesarias para mantener un estado de equilibrio de acuerdo a la cadena colgante de Hooke y su correspondiente arco invertido, siendo una consideración muy próxima al teorema de la seguridad del análisis límite expuesto por Heyman siglos después.⁸

Poleni procedió entonces a considerar una cúpula como una serie de arcos en equilibrio formados por un gajo de la cúpula y su opuesto. Su objetivo era mostrar que podía hallar una línea de empujes para dicho arco que se encontrase en el interior de la fábrica. Esto demostraría entonces que la cúpula cortada y dividida en gajos era segura y que por tanto en una situación más ventajosa una cúpula completa sería también segura. Por tanto el problema de la estabilidad de las cúpulas puede reducirse al de los arcos

⁷ LOPEZ MANZANARES, Gema M. Estabilidad y construcción de cúpulas de fábrica: el nacimiento de la teoría y su relación con la práctica. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, 1998, pág.710.

⁸ "che dentro alla solidità della volta la nostra catenaria tutta intiera sia situata". Citado por HEYMAN, Jacques. Op. cit., 1999, pág. 44.

aplicando el llamado método de los cortes. El método consiste en imaginarse la cúpula dividida en una serie de gajos, obtenidos al cortar por planos meridianos, donde cada dos gajos opuestos forman un arco. Demostrada la estabilidad de este arco, la cúpula rota de donde se le obtuvo sería estable también. Por tanto la cúpula original, que no está rota, tendrá que ser estable. Se trata de una aplicación del primer postulado del Teorema, con una solución de equilibrio con los esfuerzos dentro de la cúpula que mostraría su estabilidad.



Vista exterior de la basílica.

La construcción del monasterio de El Escorial

En 1558 Felipe II afectado por la muerte de su padre, Carlos V, decidió la construcción de un panteón dinástico, el cual permitiese además afirmar la Casa de Austria en España.⁹ De esta forma en 1561 coincidiendo con el traslado de la capital del reino a Madrid, el monarca comienza la adquisición de los terrenos de la Herrería, la Fresneda, el Campillo, Monesterio y la Dehesa de El Escorial sobre los que planifica la construcción de un monasterio, cuya fundación encarga a los monjes de la orden de los Jerónimos.

Para el desarrollo de la obra Felipe II mandó a traer a Juan Bautista de Toledo desde Italia, donde había laborado en el entorno de Miguel Angel en la cúpula de San Pedro en el Vaticano. Toledo presentó a comienzos de 1561 un primer proyecto sobre el programa que el monarca había señalado. A esta primera

⁹ Según la tradición en la decisión de construir un monasterio de la envergadura de El Escorial también estaba inmersa la idea de compensar la destrucción de una iglesia dedicada a San Lorenzo durante la batalla de San Quintín con Francia.

traza le siguió un segundo proyecto en 1562, el cual fue motivo de una dura crítica por parte del arquitecto italiano Paciotto.

A petición de Felipe II, Pacioto realiza un nuevo proyecto con la correspondiente maqueta de lo que él pensaba que debía ser la iglesia. Sin embargo y a pesar de estas vicisitudes en 1563 fue nombrado Juan Bautista de Toledo maestro mayor de la obra de El Escorial, a la vez que se designaba a Juan de Herrera y Juan de Valencia como ayudantes para la preparación de dibujos y modelos. Así en la primavera de 1563 se comenzaron las obras según un tercer proyecto en el cual se recogían algunos planteamientos de Paciotto y de Gaspar de Vega, quien también había efectuado algunos diseños para el monasterio tiempo atrás. Mientras se desarrollaba la construcción del monasterio se remitieron varios informes de otros arquitectos opinando sobre la ejecución de las obras y los problemas que las trazas originaban, decidiéndose en 1564 someter el proyecto de Toledo a nuevas modificaciones.¹⁰



Séptimo diseño de Herrera

En este mismo año Felipe II decidió doblar el número de jerónimos que tendría la comunidad escurialense, pasando de 50 religiosos a 100, con lo cual hubo que multiplicar celdas y servicios añadiendo nuevas alturas, no previstas inicialmente en el proyecto de la mitad occidental del monasterio. Finalmente el conjunto quedó definido por un rectángulo de 207 por 161 metros, subdividido interiormente varias veces con un trazo reticular regular, el cual recuerda la compartimentación de los hospitales españoles del Renacimiento. Esta retícula establecía tres zonas que corresponden al patio de los Reyes, iglesia y palacio, en el centro de la traza; al convento en el costado sur, y la zona del colegio en el tercio norte. Cada una de estas zonas muestra su acceso en la fachada principal que da a la lonja oeste.

¹⁰ Por ejemplo el informe pedido a Rodrigo Gil de Hontañón y a Hernán González de Lara, sobre la marcha de las obras y posibles defectos en las últimas trazas dadas por Juan Bautista de Toledo.

La edificación de la basílica.

Durante la ejecución de las obras se produciría la muerte de Toledo, haciéndose cargo entonces de la dirección de la construcción Juan de Herrera en 1572. Con la asunción de la nueva responsabilidad Herrera imprime un fuerte impulso a la obra hasta su terminación, encargándose de múltiples cometidos, desde la traza definitiva de la basílica del monasterio hasta el diseño del tabernáculo o los muebles de la biblioteca. Igualmente procedió a la contratación de la ejecución de las partes faltantes del conjunto, especialmente en lo tocante a las torres y bóvedas de la iglesia.



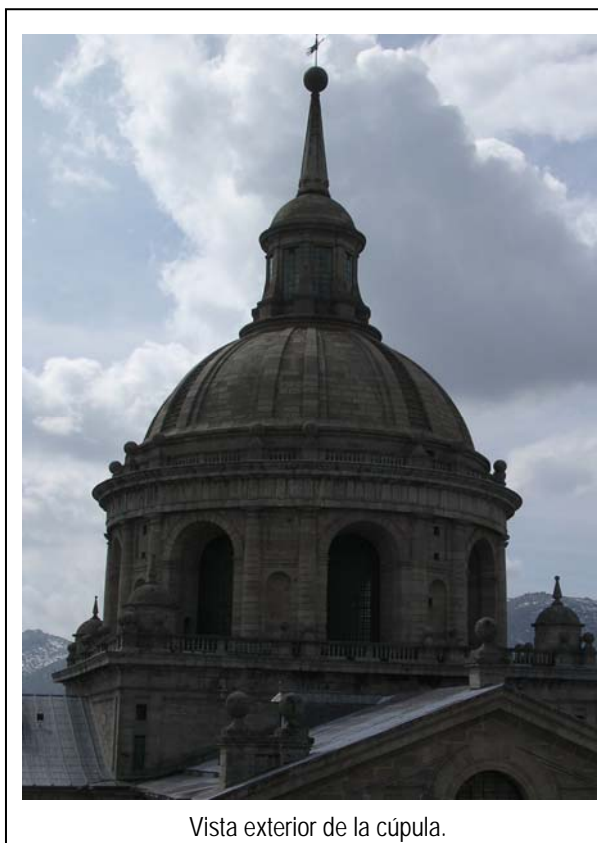
La disposición final de la iglesia se planteó con frente al patio de los Reyes, entre las dos torres del campanario cuya altura alcanzan los 72 m., los cuales sobresalen por encima de los chapiteles de las torres del monasterio, pero de menor altura que la cúpula de la basílica.

Así, la planta del templo surgía inicialmente centralizada, de ascendencia romana, compuesta por una cruz griega inscrita en un cuadrado definido por el eje de la traza general y sobre cuyo crucero se alzaba una cúpula.¹¹ Al recibir la incorporación de una capilla mayor en la zona del presbiterio y de un coro y nártex a los pies, por fuera del cuadrado original, definiría una nueva planta más cercana a la cruz latina. Esta nueva disposición permitía continuar con la simetría marcada por el eje principal, pero ya no sobre el eje transversal como fueron las ideas iniciales.

¹¹ Cfr. NAVASCUES PALACIO, Pedro. El monasterio de El Escorial. En *Monasterios de España*, volumen I. Espasa Calpe, Madrid, 1984, pág. 37.

Características geométricas y constructivas de la Basílica.

Es interesante notar que a una organización conventual con antecedentes medievales se superpuso una traza cruciforme de iglesia renacentista, donde la media naranja se convertía en la primera cúpula de carácter moderno de la época en España, con su perfil trasdosado exteriormente y apoyada en el tambor de luces como se hacía en Italia, a cuyo esquema era poco partidaria la arquitectura española coetánea.



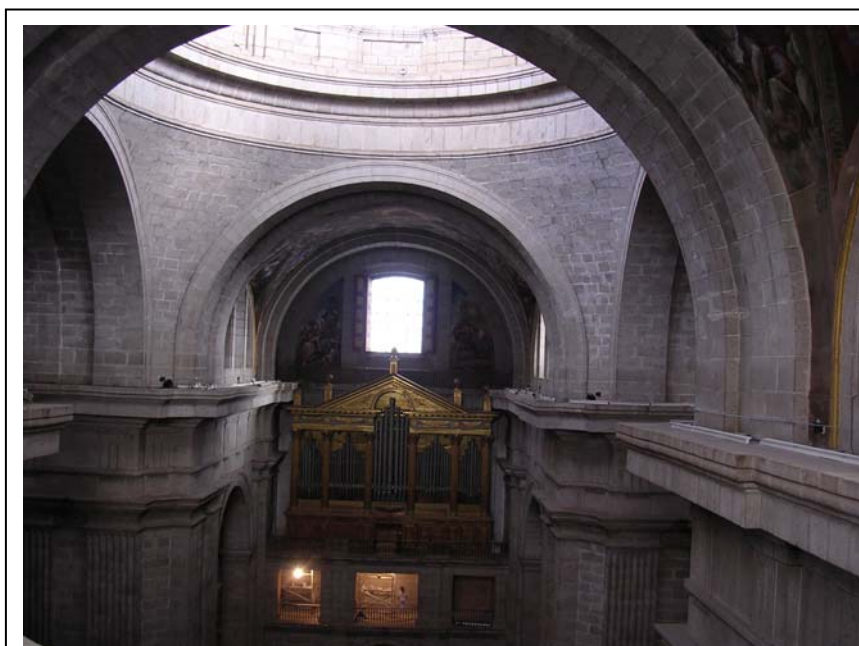
Vista exterior de la cúpula.

La estructura arranca de un tambor de luces de 12,92 m. de altura apoyada en las pechinas y arcos que definen los pilares del crucero, la cual a su vez sirve de estribo a la cúpula que posee una luz interna de 18,27 m., siendo el diámetro exterior, medido en su punto más amplio de la base de 24,58 m. La cáscara está construida con un doble sillar hasta aproximadamente la mitad de su desarrollo, pasando a tener un solo sillar en las partes más altas hasta llegar al anillo que recibe la linterna. Es interesante destacar que las primeras hiladas son horizontales hasta un tercio de la altura para luego empezar a seguir la inclinación del radio de la circunferencia inscrita internamente. Igualmente se debe señalar que la cáscara no posee un ancho constante, empezando de forma muy maciza en la base, con un ancho máximo de 2,66 m. hasta disminuir en lo alto a un ancho de 1,19 m.

La cúpula termina en una linterna con su correspondiente cupulín, cuyo acceso es exterior a través de las cuatro escaleras labradas en el trasdós de la cúpula. El remate final se produce por una aguja de piedra, cuya bola y cruz alcanza los 92 metros de altura, medido desde el pavimento de la iglesia. Lleva a uno

de sus costados el "sillar de oro" o plancha dorada que a modo de monumental relicario, guarda varias reliquias de San Pedro, San Pablo y Santa Bárbara, entre otros.

Todas las bóvedas de la iglesia, incluidas las de la nave central de la cabecera, están enlucidas y decoradas con motivos geométricos de yeso, que después serían típicos de las bóvedas del XVII y XVIII español. A primera vista la media naranja no presenta grietas ni en el intradós ni en el trasdós, no obstante pueda tener fisuras generadas por el comportamiento natural de la cúpula que trata de abrirse en gajos. Asimismo el peso de la fábrica, de acuerdo con la sección de la cúpula, es considerable y puede hacer presumir que el tambor y los pilares bajo él estén soportando una carga excesiva.



Vista de las pechinas y arcos que sostienen el tambor

Los materiales: La piedra

El monasterio de El Escorial fue edificado en piedra granítica, tanto en el exterior como en el interior. Esta piedra procedía de la cantera de Zarzalejo, situada en los parajes de La Fresneda, Arroyo Sandón y La Alberquilla, al pie de la machota Chica, y también de una cantera ubicada en la llanura contigua a su falda oriental. Todas estas canteras se encontraban a menos de 5,5 Km. (una legua) de distancia del del monasterio y por debajo de la cota de la lonja (1.026 m.).

El material corresponde al llamado complejo cristalino de la Cordillera Central, es decir, una formación metamórfica anterior al granito, siendo intrusivos en la roca gnéisica. El monasterio al estar situado en la ladera del monte Abantos se encuentra prácticamente cimentado sobre una formación metamórfica de gneis. Esta roca posee características mecánicas muy parecidas al granito, pero sin embargo se presenta con tonos grises y oscuros, a diferencia de los tonos claros y luminosos del granito.

A decir de Serret aquí se establece el acierto de Juan Bautista de Toledo y de Juan de Herrera, al haber elegido el granito para construir el monasterio en alternativa al gneis, abundante en el macizo metamórfico del monte Abantos, que hubiera permitido un transporte más fácil del material con el consiguiente abaratamiento de la obra, pero el resultado final hubiese perdido en calidad y belleza.¹²

El tipo de granito más frecuente observado en el monasterio pertenece a una variedad gris de grano medio, rico en biotita y feldespatos, por lo cual se trata de una granodiorita. Este tipo de granito granodiorítico es adecuado para la construcción por su resistencia mecánica con un peso específico de 2.670 Kg/m³. Además posee buenas condiciones para su extracción y su deterioro frente a los agentes atmosféricos es menor que otras rocas. Este fue el tipo de granito utilizado en los pórticos abovedados del Patio de los Reyes y en la basílica. La otra variedad de granito empleado es de grano más grueso, abundante en cuarzo y feldespato alcalino. Esta variedad se utilizó principalmente en las fachadas.

Aplicación del método de los cortes a la cúpula.

La primera prueba de la estabilidad de un edificio de fábrica y de la existencia de una solución de equilibrio, con los empujes transmitiéndose por su interior, es que está en pie desde varios siglos atrás.¹³ No obstante es conviene verificar si esta estabilidad correspondería a un límite máximo o acercándose a él, es decir, si con el paso de los siglos, las modificaciones del contorno han producido que la línea de empujes se encuentre cerca de los límites de la fábrica. Se aplicarán luego los principios referidos en el marco teórico del presente trabajo para verificar la estabilidad de la cúpula de la basílica de El Escorial a partir de un tramo tipo.

El proceso consiste en imaginar este tramo dividido en dos partes: la bóveda y el sistema de contrarresto. Por tanto se calculará primero el empuje total de la bóveda a partir del método de los cortes y se verificará con él la estabilidad de los estribos. La comprobación de la estabilidad de la cúpula y el tambor que funciona como primer estribo se reduce a comprobar que esta transmisión de empujes se realiza dentro de la fábrica.

El cálculo se ha efectuado a partir de un levantamiento fotogramétrico realizado y publicado por la Universidad Politécnica de Madrid, en donde se observa que la media naranja presenta una sección de notable espesor y de carácter variable.

De esta forma se ha procedido a dividirla en 64 gajos y cada gajo en 14 dovelas, con el fin de calcular el peso de cada una de ellas dada su formación en cuña, cuya anchura se reduce hasta la clave, tanto para determinar el empuje final que reciben los apoyos como observar el paso que realiza la línea de empujes

¹² SERRET MEDINA, Alfonso. Materiales pétreos que se utilizaron en la construcción del monasterio de El Escorial. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas, Madrid, 1998, pág. 10.

¹³ HUERTA FERNANDEZ, Santiago. Op. cit., 1998, pág. 59.

dentro de cada dovela que forman un gajo.¹⁴ Además se ha calculado el peso de la linterna y su correspondiente incidencia en cada gajo.

Análisis de la estabilidad de la cúpula.

En el análisis se ha tomado un gajo de la cúpula suponiendo que los estribos del tambor han cedido ligeramente y que por consiguiente la línea de empujes adopta su posición más peraltada, es decir, la de empuje mínimo. En estas condiciones la posición de la línea de empujes queda determinada. Se ha calculado el empuje del arco en magnitud y dirección para cada uno de las dovelas consideradas.

A partir de las mediciones realizadas en ordenador se ha obtenido el volumen de cada "dovela" del gajo, el cual ha sido multiplicado por el peso específico del granito (2,670 Kg/m³), además de haberse añadido la correspondiente carga de la linterna que le corresponde al gajo. No obstante intriga el excesivo espesor de su cáscara maciza, pues para una cúpula de estas características hubiera necesitado solo algo más del 4,2% del radio.¹⁵ Esto es 40 cm., aunque habría que incorporar el ancho necesario para asumir el peso de la enorme linterna.

De la aplicación de estas cargas a su expresión gráfica vectorial se ha observado que la línea de empujes está contenida dentro de la fábrica, siendo la cúpula estable, tal como postula el Teorema Fundamental del Análisis Límite. Llama la atención que a pesar del gran peso que soporta la fábrica la línea de empujes muestra un alto coeficiente de seguridad, es decir que como se mencionó en el nivel de seguridad, éste todavía tiene trecho suficiente, pues la trayectoria del empuje de cargas dista aún mucho de los bordes de la sección.

Igualmente la trayectoria de las cargas del gajo al finalizar su recorrido en ella, está casi contenida dentro de la sección del tambor de la iglesia, solamente escapando de la geometría de esta estructura en su apoyo al nivel de los pilares de la iglesia. Pero si se aplica el vector correspondiente al peso propio del tambor se observa que compensa favorablemente la dirección de la resultante dentro de la sección del tambor.

Este dato resulta paradójico, si se considera a grandes rasgos la regla de Blondel, para la sección del tambor que actúa como estribo, se vería que en principio no cumpliría con las proporciones, pero al incorporar la carga de su peso propio muestra un coeficiente de seguridad amplio como para garantizar la estabilidad de la cúpula.¹⁶

¹⁴ Ya Borra (1748) había caído en cuenta de que la distribución de los pesos en las cúpulas era diferente a la de los arcos por este fenómeno de la reducción del peso en dirección a la clave. Citado por LOPEZ MANZANARES. Op. cit., pág.162.

¹⁵ HEYMAN, Jacques. Op. cit., 1999, pág. 48

¹⁶ La regla define que tanto para un arco de medio punto, apuntado o rebajado, el ancho del estribo se obtiene a partir de la división del intradós del arco en tres partes iguales y luego se traza una recta que una el punto del tercio superior con el punto del arranque más cercano, para llevar luego la distancia que existe entre estos dos puntos a dicha recta prolongada.

Por tanto parece razonable pensar que el peso propio y los coeficientes de seguridad de los estribos estarían dirigidos principalmente a evitar un fuerte giro de éstos, debido a la excentricidad de la fuerza resultante en la base del tambor. Únicamente un notable movimiento haría que el tambor se desestabilice, por lo que si se mantiene la posición actual de las piedras del estribo, la cúpula continuará a ser estable.

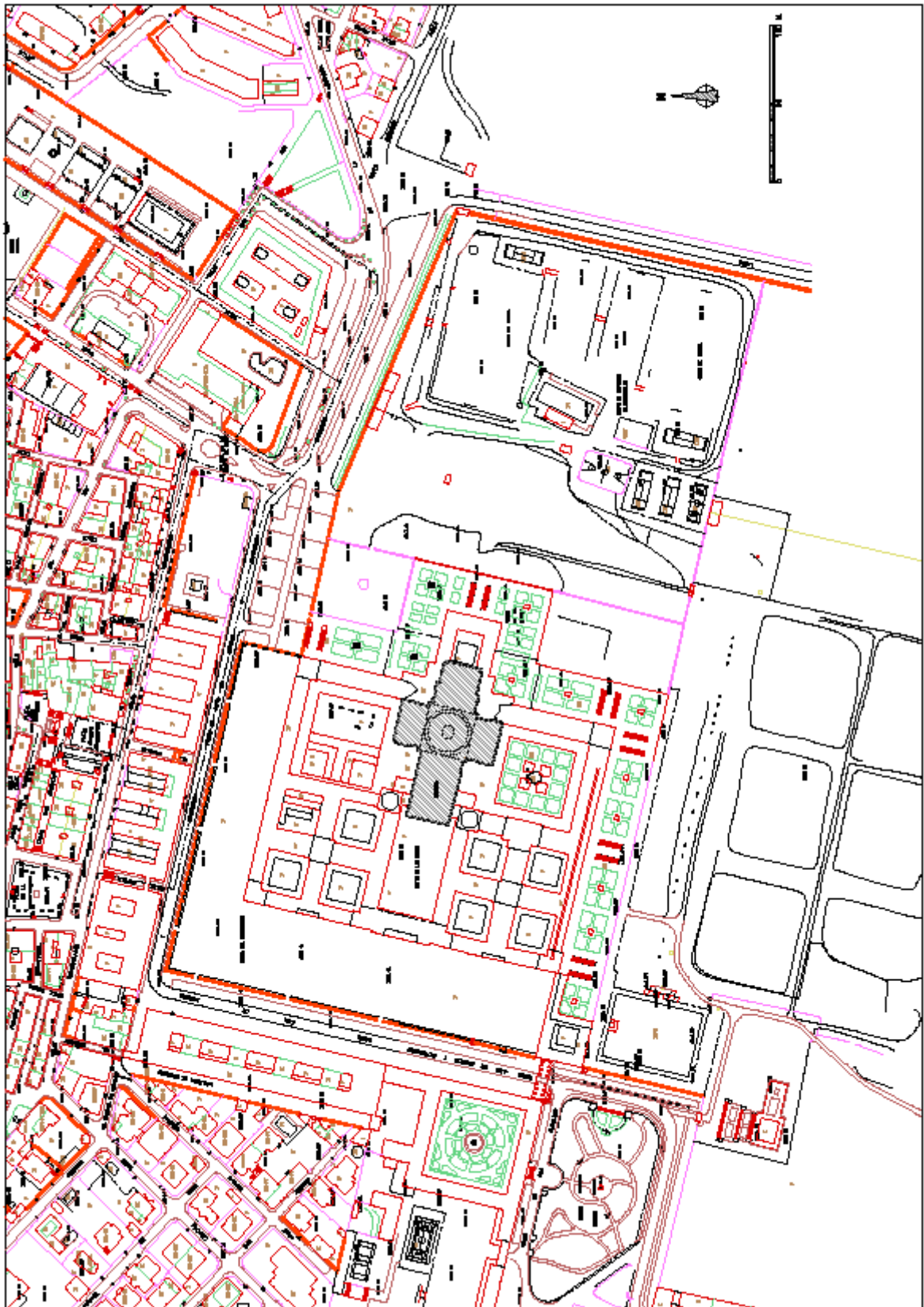
Dovela	Area sección	Long. media	Volumen (m3)	γ (Tn/m3)	Peso
1	2.35	0.27	0.63	2.67	1.69
2	1.99	0.35	0.70	2.67	1.86
3	1.99	0.45	0.90	2.67	2.39
4	1.23	0.55	0.68	2.67	1.81
5	1.22	0.64	0.78	2.67	2.08
6	1.26	0.72	0.91	2.67	2.42
7	1.33	0.80	1.06	2.67	2.84
8	1.35	0.87	1.17	2.67	3.14
9	1.43	0.94	1.34	2.67	3.59
10	1.50	1.00	1.50	2.67	4.01
11	1.58	1.04	1.64	2.67	4.39
12	1.66	1.08	1.79	2.67	4.79
13	2.00	1.11	2.22	2.67	5.93
14	2.94	1.13	3.32	2.67	8.87
Linterna (parte proporcional)			2.04	2.67	5.45
Peso en gajo					55.25
Empuje horizontal en gajo					11.88
Peso Total					3,535.83
Empuje horizontal total					760.20

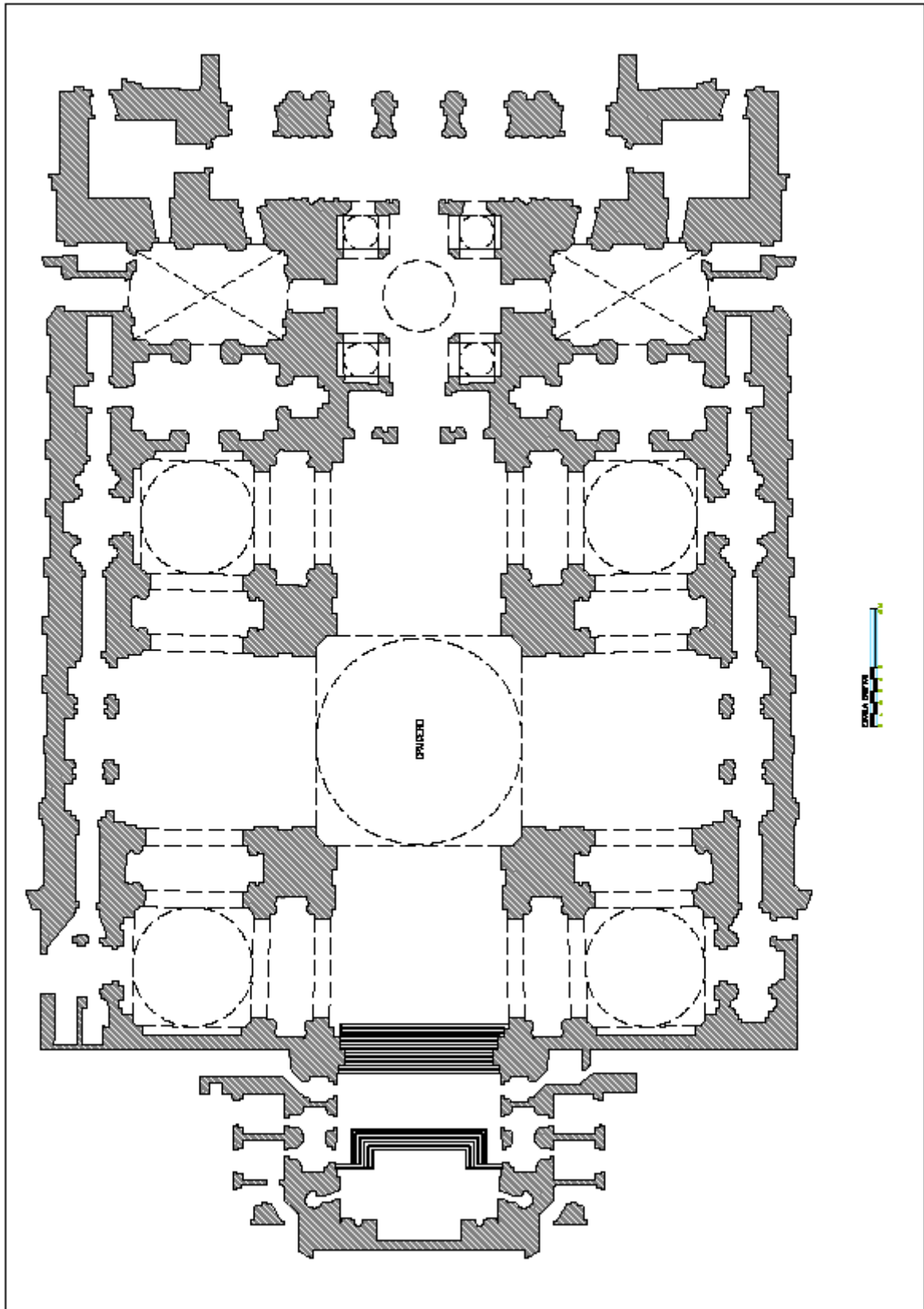
Conclusiones.

Después de este ejercicio la conclusión primera que se puede enunciar es que la cúpula de la iglesia de El Escorial, en las actuales circunstancias de cargas y posición de las "dovelas" y sistema de contrarresto del tambor, es estable, presentando una estructura interna de suficiente sección para garantizar que el recorrido de la línea de empujes se realice dentro de la fábrica.

Sin embargo dentro del estudio no se ha considerado el papel que realizan los pilares, es decir, si existen desplomes o pérdida de capacidad portante que puedan generar movimientos localizados que a su vez promuevan cambios en la posición de los diferentes elementos que forman la cúpula.

Si en caso extremo se quiere asegurar que no se produzcan movimientos de las piedras en la cúpula se pueden incorporar zunchos con una sección tal que pueda resistir con suficiente seguridad la componente horizontal que se pueda producir.







Vista exterior de la basílica.



Vista interior de la basílica.

BIBLIOGRAFIA.

- HEYMAN, Jacques. Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, 1995.
- HEYMAN, Jacques. El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, 1999.
- HUERTA FERNANDEZ, Santiago. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2004.
- HUERTA FERNANDEZ, Santiago. Mecánica de las bóvedas de la catedral de Gerona. En apuntes del curso las grandes bóvedas hispanas, Madrid 19-23 de mayo de 1997. Ministerio de Fomento, Madrid, 1998, páginas 53-65.
- HUERTA FERNANDEZ, Santiago; López Manzanares, Gema; Redondo Martínez, Esther. Informe sobre la estabilidad de la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción de Melgar de Fernamental (Burgos). Junta de Castilla y León, Consejería de Educación y Cultura, Dirección General de Patrimonio, Madrid, 2001.
- LOPEZ MANZANARES, Gema M. Estabilidad y construcción de cúpulas de fábrica: el nacimiento de la teoría y su relación con la práctica. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, 1998.
- MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio. Aproximación al estudio de patologías mecánicas en estructuras cupuliformes a través de instrumentación y modelos: Ejercicio práctico en la iglesia de San Sebastián de Villacastin, Segovia. En apuntes del curso procedimientos y técnicas constructivas del patrimonio, Universidad de Alcalá, Master de Restauración y Rehabilitación del Patrimonio, Alcalá de Henares, 2004.
- MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio. Las grietas en las estructuras de fábrica, un procedimiento para evaluar la forma de trabajo de éstas. En apuntes del curso procedimientos y técnicas constructivas del patrimonio, Universidad de Alcalá, Master de Restauración y Rehabilitación del Patrimonio, Alcalá de Henares, 2004.
- MOLEON, Pedro. Dos templos para una iglesia: escala y figuración en la basílica de San Lorenzo el Real de El Escorial. En ideas y diseño (la arquitectura), IV centenario del Monasterio de El Escorial, Dirección General de Arquitectura y Edificación, Madrid, 1986, pag. 87-97.
- NAVASCUES PALACIO, Pedro. El monasterio de El Escorial. En Monasterios de España, volumen I. Espasa Calpe, Madrid, 1984, pag. 105-135.
- SERRET MEDINA, Alfonso. Materiales pétreos que se utilizaron en la construcción del monasterio de El Escorial. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas, Madrid, 1998.