

Cúpulas clásicas romanas: Geometría y construcción

Licinia Aliberti

El fenómeno del origen y desarrollo de las cúpulas clásicas romanas es de difícil lectura, si se considera la compleja suma de condiciones que las generaron. Numerosos son los estudios sobre el valor simbólico y formal de las primeras cúpulas en la cultura que impulsa su difusión y su lugar en la historia de la arquitectura. Menos frecuentes son los textos que analizan los sistemas constructivos y las especiales características geométricas de estas formas. El objetivo de esta comunicación es el estudio de las geometrías de las cúpulas clásicas romanas de planta circular o poligonal, en directa conexión con los temas más propiamente constructivos que permiten generar tales formas. En este contexto el levantamiento métrico de algunas de las cúpulas estudiadas se concibe como herramienta fundamental para poder realizar un análisis comparado en base a datos precisos.

ESPACIO, GEOMETRÍA Y MATERIALES

Los hombres primitivos instintivamente usaban el círculo para construir sus primeros refugios y para definir el perímetro de espacios sagrados. Estos hombres reconocieron en las cubiertas esféricas la directa evolución de las plantas circulares. El uso primigenio de los trazados circulares se apoya en parte en la fascinación y simbolismo de esta forma sencilla y pura, y por otra parte en una serie de condicionantes prácticos relativos a su facilidad constructiva y su buen comportamiento estructural.

Una gran parte de los sistemas primitivos de cubrición de espacios sobre planta circular usan geometrías aproximadamente cónicas, como ocurre en las primeras cabañas prehistóricas de madera. Sin embargo en Palestina se han encontrado, en el estrato del Neolítico Medio, restos de cabañas circulares cubiertas con cúpulas semiesféricas realizadas en material ligero, mimbre, recubierto de arcilla y paja. Probablemente existían los mismos tipos constructivos en Mesopotamia (Laurenzi 1958, 203).

En las más antiguas arquitecturas hipogeas se encuentran formas abovedadas de cubrición de espacios de planta circular, como por ejemplo los *tholos* micénicos, ambientes funerarios dedicados al culto de los muertos.

Los modelos antiguos de edificios de planta circular más cercanos a la cultura romana son los *nuraghi* sardos, estructuras megalíticas de piedra en forma de torres cónicas truncadas, y los *tholos* etruscos, arquitecturas funerarias realizadas en bloques de piedra superpuestos en voladizo progresivo para formar un intradós que se acerca a la superficie ojival o esférica. La influencia de la cultura etrusca con la introducción del arco y de las falsas bóvedas es según la mayoría de los historiadores la base de las primeras fases de la arquitectura romana.

La técnica empleada por los romanos en la construcción de bóvedas es el *opus caementicium*, que consiste en la disposición de pequeños fragmentos inertes embebidos en un mortero de alta resistencia. Las cúpulas en *opus caementicium* se construyen me-

dianate la superposición de anillos que avanzan progresivamente para conformar la bóveda. Las nuevas estructuras siguen por lo tanto el mismo principio de las antiguas *tholos* miceneas y etruscas, pero haciendo uso de técnicas y materiales profundamente novedosos, que permiten experimentar nuevas formas y ampliar las dimensiones de las estructuras y del espacio interior.

La disposición de los *caementa* se realiza por estratos: se disponen en seco las piedras y sucesivamente se vierte el mortero en estado amorfo. Se comienza la construcción del estrato siguiente solo cuando el anterior está completamente seco y es resistente, de manera que el nuevo anillo tiene una sólida base de apoyo y los encofrados no tienen que aguantar el peso de la estructura entera. Para mejorar el proceso de endurecimiento del hormigón el material se dispone en estratos delgados, de manera que la reacción química se desarrolla uniformemente en su totalidad incluso en la construcción de bóvedas de espesor considerable (Waddell 2008, 49).

Normalmente los inertes se disponen horizontalmente a distancias regulares, mientras que solo en algún raro caso se aprecia una colocación radial de estos elementos, como en el Templo de Mercurio en Baia realizado en fragmentos de tufo (MacDonald 1958; Rakob 1988). En las bóvedas de las Termas de Treviri en Alemania los *caementa* parecen también dispuestos de forma radial (Rasch 1985, 120), así como en las salas circulares de las Termas Estabianas y de las Termas del Foro en Pompeia (De Angelis D'Ossat 1938, 239).

El área geográfica alrededor del centro de Italia presenta una riqueza de distintos materiales útiles a la construcción en *opus caementicium*. Estas condiciones de entorno favorables permiten e impulsan el desarrollo de las técnicas constructivas romanas. En los alrededores de las ciudades de Roma y de Pozzuoli existe, además de piedras volcánicas, arenas sedimentarias y arcilla, una gran abundancia de madera indispensable para la construcción de los encofrados y de las estructuras provisionales necesarias a lo largo de las obras. En el caso específico de las bóvedas las construcciones de madera resultan de fundamental importancia, puesto que las cimbras precisan el molde que genera la forma final. A veces las cimbras de madera se sustituían por ladrillos planos que quedaban embebidos en la estructura y se revestían sucesivamente con un estrato de mortero continuo. En al-

gunos casos se empleaban los dos métodos, especialmente en las bóvedas casetonadas donde las formas rehundidas se realizaban con encofrados de madera mientras que los sectores de cúpula intermedios se realizaban con cimbras de ladrillos (Lugli 1957, 388-389). Publicaciones recientes (Lancaster 2005, 40-43; Rasch 1985; Rakob 1988) se dedican al estudio de los sistemas de cimbrado de las cúpulas romanas, cuyas hipótesis constructivas se formulan en base a la observación de posibles trazas presentes en el intradós de las bóvedas o según criterios lógicos de funcionalidad de las obras. En las cúpulas de grandes dimensiones los sistemas se hacen complejos y todavía se proponen hipótesis distintas, por ejemplo, sobre los posibles sistemas usados en la construcción de las cimbras del Panteón.

El hormigón romano se adapta a cualquier molde, admite construcciones en grandes alturas, sostiene enormes esfuerzos y limita amplios espacios. Este material plástico genera la introducción de líneas y superficies curvas, que se empiezan a emplear en la arquitectura del último periodo de la República en Roma y en Campania en la construcción de ninfeos, termas, tumbas y mausoleos. Conjuntamente con el uso de geometrías curvas en planta, se desarrollan sistemas de bóvedas inicialmente de cañón, de cruceña y de aristas, sucesivamente de forma cónica, esférica, de gajos alternos y de paraguas.

La utilización del *opus caementicium* en la construcción de cúpulas se realiza gradualmente. Al principio el nuevo material se aplica a la construcción de formas conocidas y con una geometría fácilmente controlable. Los primeros ejemplos de bóvedas cementicias conservados son los de las salas circulares de las Termas Estabianas y de las Termas del Foro en Pompeia (Lugli 1957; Licht 1968; Waddell 2008), ambas cubiertas con superficies cónicas en comunicación con el exterior a través del *lumen* superior. El mismo sistema se encuentra en la sala circular de las Termas Centrales de Ercolano, un ambiente completamente enterrado que presenta un óculo cuadrangular (Licht 1968, 212-213).

Los primeros edificios cubiertos mediante cúpulas se insertan en organismos más complejos y la geometría generalmente ortogonal de los espacios contiguos engloba los perímetros circulares o poligonales de los ambientes abovedados. Solo en época de Adriano empiezan a aparecer edificios aislados cubiertos con cúpulas. Un primer ejemplo (Rasch 1985,

119) de esta transformación es el Vestíbulo de la Plaza de Oro en la Villa Adriana en Tivoli, donde el tipo de construcción con bóveda cementicia asume independencia y autonomía respecto al conjunto construido en el cual se inserta, confiriendo mayor importancia a su aspecto exterior (Lucchini 1997, p. 16).

Desde el siglo XIX se considera que las bóvedas romanas tienen comportamiento monolítico trabajando únicamente a compresión. Estudios recientes se muestran más cautos sobre este aspecto (Lugli 1957; MacDonald 2002; Lancaster 2005) y afirman que el comportamiento estructural de las bóvedas de hormigón romano depende en buena parte de su tamaño. Las nuevas teorías proponen la hipótesis de que, en edificios grandes, el peso de la enorme cantidad de material usado impide a la argamasa romana absorber totalmente los esfuerzos de tracción en la primera fase de vida de la estructura.

En la época de Augusto para evitar problemas estructurales los constructores empiezan a tomar medidas preventivas como el uso de materiales más ligeros en la parte superior de las bóvedas, el sobredimensionado de los muros de apoyo, la construcción de elementos de refuerzo perimetrales y el aumento del espesor de las cúpulas en su zona inferior¹. En consecuencia las cúpulas romanas resultan de sección variable. La forma interna no corresponde con el exterior donde en algún caso los muros continúan verticalmente, en otros se generan unos escalonamientos que van aproximando el extradós al intradós convergiendo en la parte superior con una notable reducción del espesor de la estructura, como en el caso del Panteón. Recordamos la sección del Mausoleo de los Gordianos cuyo muro cilíndrico se extiende hasta casi la altura total del edificio, mientras en el tramo final el extradós de la cúpula se presenta como una superficie esférica rebajada que reduce el espesor de la cúpula y con ello el peso de la estructura (figura 1).

Se registra una notable disminución de las dimensiones de los elementos constructivos en el Ninfeo de los *Horti Liciniani*, llamado Templo de Minerva Medica, uno de los últimos ejemplos de cúpulas romanas tardo antiguas. En este caso se llevan al extremo las posibilidades de los materiales para conseguir una arquitectura más abierta, dada la presencia de numerosas ventanas, y más ligera, por el dimensionado de la cúpula y de los soportes verticales (De Angelis D'Ossat 1938, 248; Lancaster 2005, 168).



Figura 1
Mausoleo de los Gordianos en Roma (foto de la autora 2012)

Ocasionalmente, en cúpulas de cierto diámetro, se ha observado la presencia en el interior de la estructura de arcos de ladrillos dispuestos en la dirección de los meridianos. Según Choisy ([1873]1999, 72) los romanos usaban las nervaduras de ladrillos para crear un esqueleto rígido de apoyo durante la construcción de las bóvedas. El uso de los arcos de refuerzo en las bóvedas es un tema complejo, que precisa un estudio atento para poder determinar qué tipo de comportamiento estructural puedan tener estos elementos. Aparentemente en las cúpulas los romanos no los empleaban como un sistema para distribuir las cargas, puesto que numerosos casos presentan arcos meridianos que terminan en correspondencia con las partes huecas del muro que sostiene la bóveda, como en el Templo de Minerva Medica y en el *Planetarium* de las Termas de Diocleciano. La función de estos elementos parece efectivamente estar más relacionada a la fase de obra como ayuda y apoyo del proceso constructivo (MacDonald 1958, 5).

El uso de nervaduras en las cúpulas romanas se difunde a partir del siglo IV. Entre los más ejemplares modelos de aplicación de este sistema constructivo recordamos la sala circular de las Termas de Agripa², el Templo de la Tos en Tivoli y el Templo de Minerva Medica, siendo el Mausoleo de Santa Constanza el último de los edificios clásicos romanos donde su utiliza esta técnica (Rasch 1985, 138).

A partir del siglo I d.C. se documenta en varias bóvedas el uso de materiales progresivamente más ligeros a medida que la estructura sube en altura. La cúpula del Panteón es solo uno de los ejemplos, destacando por el empleo progresivo desde la parte inferior hasta la superior de fragmentos de ladrillos, de ladrillos y tufo, de tufo y piedras volcánicas muy ligeras (Terenzio 1933). Recordamos el Templo de Diana en Baia que en la parte inferior está construido usando hileras de ladrillos, a continuación se emplean grandes bloques de tufo y en la parte final pequeños fragmentos de tufo más ligero (Rakob 1988, 275). En el ninfeo de Albano en la parte inferior de la cúpula se emplean bloques de peperino, mientras que en la superior bloques de tufo más ligero (Lugli 1957, 670). El tufo, que es considerado material extremadamente ligero, se emplea también para la construcción de la cúpula del Templo de Minerva Medica, escorias volcánicas para el *Tepidarium* de las Termas de Diocleciano y piedra pómez para el *Planetarium* (Rasch 1985, 134-35).

En el siglo II d. C. se empiezan a introducir unos elementos huecos de arcilla (ánforas) embebidos en el *opus caementicium* en la zona inferior de alguna bóveda romana. Las explicaciones del uso de esta técnica se relacionan con el efecto de aligeramiento de la estructura, con un mejor comportamiento de fraguado del hormigón y con la reducción del material de construcción. Al principio se encuentra el uso de las ánforas en la construcción de las cúpulas de los hornos (Lugli 1957, 671) y posteriormente la misma técnica se difunde a bóvedas de distinta forma y uso. La mayor parte de los ejemplos datan del siglo IV y se encuentran en Roma y sus alrededores. Ejemplar es la aplicación de esta técnica en el Mausoleo de Elena, donde la disposición de las ánforas resulta especialmente ordenada. Otros ejemplos donde se aprecia el uso de ánforas en la construcción de las bóvedas son la sala octogonal en la Villa de los Gordianos y el Templo de Minerva Medica (Lancaster 2005, 78-79).

La cúpula de la sala circular de las Termas con *Heliocaminus* en la Villa Adriana presenta en su estado actual una serie de perforaciones en la superficie del intradós, interpretadas erróneamente en el pasado como los huecos dejados por ánforas de aligeramiento (figura 2). Realmente se ha comprobado que estos elementos están presentes también en otras bóvedas de época adrianea y que corresponden a las huellas

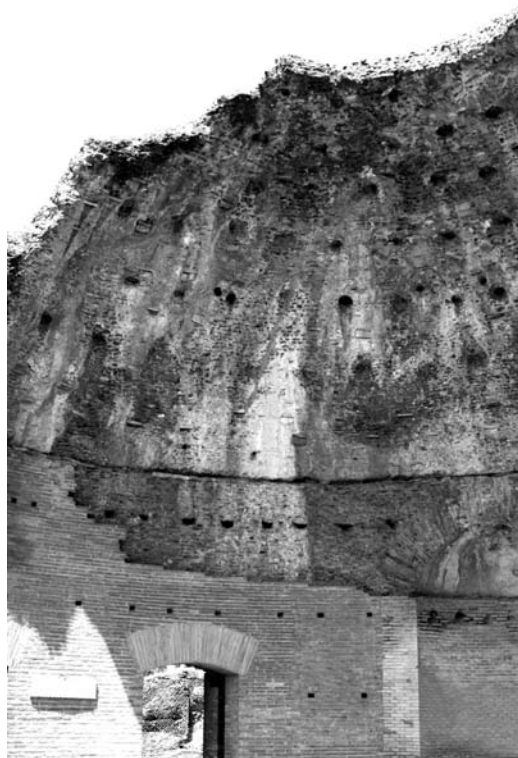


Figura 2
Sala circular de las Termas con *Heliocaminus* en la Villa Adriana (foto de la autora 2011)

dejadas por unos soportes metálicos, que tenían la función de sujetar un casquete esférico separado de la estructura cementicia (Cairolí 1975, 330-332). La cámara de aire que se formaba, junto con los conductos presentes en las paredes y el espacio vacío por debajo del pavimento, serían atravesados por el aire caliente generado en los *praeurnia*, los hornos de las instalaciones termales, de tal manera que todas las superficies del espacio irradiaban calor (Lucchini 1997, 13). Según los resultados del levantamiento que he realizado la disposición de los huecos en el intradós de la cúpula es sustancialmente ordenada según líneas horizontales, mientras que no se respetan alineaciones en el sentido de los meridianos³.

Las cúpulas tienen generalmente una abertura circular o poligonal en la parte superior que ofrece una fuente de iluminación y a la vez soluciona el problema de cierre de la estructura. Normalmente el borde

del óculo se termina con una hilera de ladrillos dispuestos verticalmente que siguen el contorno del hueco. En algunos casos los ladrillos se disponen en dos órdenes superpuestos, como en la sala del *Planetarium* en Roma, y en otros se apoyan sobre un estrato de *bipedales* dispuestos horizontalmente, como en la sala circular de las Grandes Termas en la Villa Adriana (De Angelis D'Ossat 1938, 231-33). En los primeros edificios la superficie que define el hueco del óculo tenía la forma de un cono truncado invertido.

Es único el caso del Templo de Mercurio donde la superficie cónica del óculo está orientada en el sentido opuesto, abriéndose hacia el espacio interior. Según el levantamiento fotogramétrico que hemos realizado el centro del óculo está desplazado horizontalmente con respecto al muro circular que sostiene la cúpula, dato que podría haber contribuido a generar las irregularidades en la geometría de la bóveda (Aliberti, Alonso y Canciani 2012).

El tamaño de los óculos se relaciona en general con el diámetro de la cúpula. Según los estudios de Rasch (1985, 135-36) basados en el levantamiento fotogramétrico de 12 ejemplos de cúpulas romanas que van desde el siglo I d.C. hasta el siglo IV d.C. esta proporción oscila entre $1/4$ y $1/6$, con una media de $1/5,2$.

A partir del siglo I a.C. en algunas de las cúpulas se practican ventanas generalmente en su parte inferior. En la bóveda del Templo de Mercurio aparecen cuatro huecos cuadrangulares en la zona inferior mientras que la cúpula de la sala octagonal de las Termas de Pisa presenta ocho huecos cuadrangulares en su parte superior. En el Templo de Minerva Medica se ven preparadas una serie de ventanas alargadas y arqueadas que finalmente no se realizaron. Más comunes son los casos de ventanas situadas en la parte superior del tambor que sostiene las bóvedas como en el *Planetarium* de las Termas de Diocleciano, el Mausoleo de los Gordianos, el Mausoleo de Elena y el Mausoleo de Santa Constanza.

Según el levantamiento que he realizado del intradós de la cúpula de Santa Constanza las ventanas situadas en el tambor están dispuestas ordenadamente⁴. Desde un punto de vista constructivo la presencia de 12 ventanas de cierto tamaño situadas en la línea de imposta de una cúpula de 11,5 m de diámetro es un dato interesante (figura 3). Un estudio transversal que incluya otras disciplinas podría aportar algún conocimiento útil sobre el comportamiento estructural



Figura 3
Interior del Mausoleo de Santa Constanza en Roma (foto de la autora 2010)

del edificio. En este sentido los datos derivados del levantamiento podrían constituir una base útil para el análisis detallado de la estructura del mausoleo, considerado generalmente como el último ejemplo de cúpulas clásicas romanas.

GEOMETRÍA Y DIMENSIONES

Se propone una clasificación de las cúpulas clásicas romanas de planta circular o poligonal. Se han tenido en cuenta una serie de parámetros que se refieren a las medidas principales y a la geometría de las cúpulas estudiadas. Para cada ejemplo presentado se especifica su denominación, localización, datación, la tipología, la geometría de la planta, del intradós y del óculo y el diámetro interior de la cúpula (tabla 1).

Denominación	Localización	Datación	Tipología	Planta	Óculo	Intradós	Diam. bóveda [m]	Ref. medidas
Termas Estabianas	Pompeia	sig II a.C.	sala termal	circular	circular	cónico	6,46	Licht 1968
Termas del Foro	Pompeia	sig I a.C.	sala termal	circular	mistilíneo	cónico	5,80	Licht 1968
Termas Centrales	Ercolano	sig I a.C.	sala termal	circular	cuadrangular	cónico	4,75	Licht 1968
Ninfeo de Albano	Roma	81-96 d.C.	ninfeo	circular	circular	esférico	15,60	Rash 1985
<i>Heliocaminus</i>	Villa Adriana	118-125 d.C.	sala termal	circular	-	esférico	12,10	Obs. personal 2011
Pantheon	Roma	118-128 d.C.	templo	circular	circular	esférico	44,06	Obs. personal 2012
Termas Grandes	Villa Adriana	134-138 d.C.	sala termal	circular	circular	esférico	10,20	Lucchini 1997
Templo de Apolo	Lago d'Averno	sig. II d.C.	sala termal	circular	-	esférico	36,00	Adam 1988
Termas de Agripa	Roma	222-235 d. C.	sala termal	circular	circular	esférico	24,00	Lancaster 2005
Termas de Diocleciano	Roma	298-306 d.C.	sala termal	circular	circular	esférico	19,30	De Angelis D'Ossat 1945
Templo de la Tos	Tivoli	sig. IV d.C.	ninfeo o sepulcro	circular	circular	esférico	12,32-12,45	Rasch 1998
Mausoleo de los Gordianos	Roma	sig. IV d.C.	mausoleo	circular	-	esférico	13,63	Rasch 1993
Tor de' Schiavi	Roma	sig. III d.C.	ninfeo	octogonal	-	esférico	11,40	Lancaster 2005
Mausoleo de Elena	Roma	sig. IV d.C.	mausoleo	circular	-	esférico	20,18	Rasch 1998
Santa Constanza	Roma	sig. IV d.C.	mausoleo	circular	circular	esférico	11,50	Obs. personal 2010
Templo de Diana	Baia, Nápoles	sig. II d.C.	sala termal	circular	-	apuntado	29,68	Rakob 1988
Templo de Mercurio	Baia, Nápoles	sig. I d.C.	sala termal	circular	circular	apuntado	21,55	Obs. personal 2011
Termas de Nerón	Pisa	sig. II d.C.	sala termal	octogonal	octogonal	aristas	6,80	Pasquinucci 1989
<i>Domus Aurea</i>	Roma	64-68 d.C.	sala	octogonal	circular	aristas-esférico	14,68	Wilson Jones 2000
<i>Heliocaminus</i>	Villa Adriana	118-125 d.C.	sala termal	octogonal	-	aristas-esférico	8,07	Obs. personal 2011
Minerva Medica	Roma	sig. IV d.C.	ninfeo	decagonal	-	aristas-esférico	23,5	Lancaster 2005
Sala octagonal	Baia, Nápoles	sig. II d.C.	sala termal	octogonal	-	paraguas	5,90	Obs. personal 2011
<i>Planetarium</i>	Roma	298-306 d.C.	sala termal	octogonal	octogonal	paraguas	21,65	Lancaster 2005
Plaza de Oro	Villa Adriana	II sig. d.C.	vestibulo	mistilínea	circular	paraguas	10,20	Obs. personal 2011
Serafeo	Villa Adriana	134-138 d.C.	ninfeo	circular	circular	gajos alternos	16,68	Obs. personal 2011
<i>Horti Sallustiani</i>	Roma	sig II d.C.	ninfeo	circular	circular	gajos alternos	11,30	Obs. personal 2011
Templo de Venus	Baia, Nápoles	117-138 d.C.	sala termal	circular	-	gajos alternos	26,30	Obs. personal 2011

Tabla 1

Clasificación de algunos ejemplos de cúpulas clásicas romanas (elaborada por la autora 2013)

Los valores presentados se refieren parcialmente a levantamientos realizados por distintos autores o datos extraídos desde la literatura sobre los temas tratados. Buena parte de las medidas han sido comprobadas por observación personal en repetidas visitas de estudios a los lugares señalados. Los métodos que se han empleado para obtener las medidas son el levanta-

tamiento directo mediante distanciometría láser y el levantamiento indirecto mediante fotogrametría digital de imágenes cruzadas⁵, aprovechando las propiedades de versatilidad y agilidad de ejecución de este tipo de restitución. En el caso del Panteón a estos dos métodos se suma un levantamiento realizado empleando la tecnología del escáner láser tridimensional¹⁶.

El área geográfica objeto de este estudio comprende el territorio de las ciudades de Roma y Nápoles y sus alrededores. En este ámbito territorial encontramos los primeros ejemplos de edificios de planta central cubiertos con bóvedas esféricas, cónicas y a gajos. El centro de Italia es la región de origen de la revolucionaria arena puzolánica y lugar de experimentación de sistemas constructivos que influenciarán el futuro de la arquitectura occidental. El límite meridional del ámbito de estudio está marcado por las termas de Pompeia con sus cúpulas cónicas, las más antiguas, mientras que el límite septentrional está indicado por las termas de Pisa con la sala octagonal y su cúpula de aristas.

Las cúpulas presentadas pertenecen a un periodo que va desde el siglo I a.C. hasta el siglo IV d.C. En las épocas anteriores encontramos solo raros ejemplos de tamaño poco relevante. En épocas posteriores podemos encontrar también algún ejemplo de cúpulas realizadas con el sistema constructivo romano. Se elige como último ejemplo tratado la cúpula de Santa Constanza en Roma fechada en la segunda mitad del siglo IV, que marca un cambio de tendencia desde la arquitectura tardo-antigua hacia nuevas soluciones espaciales y estructurales, indicando de alguna manera un punto final en la evolución de las cúpulas clásicas romanas.

Las tipologías de los edificios estudiados se pueden reconocer como salas termales, ninfeos, mausoleos y en raros casos templos. Puesto que el presente estudio se centra en el análisis geométrico de los ejemplos estudiados la indicación del tipo de uso de los ambientes se deduce de la literatura consultada en cada caso sin avanzar hipótesis propias. Las plantas de los edificios estudiados son circulares o poligonales. La forma más común es el círculo, seguida por el octógono, mientras que menos comunes son las plantas decagonales o dodecagonales. Las plantas poligonales se basan generalmente en formas regulares.

Una observación especial merecen las plantas mistilíneas que emplean a la vez tramos de circunferencias y elementos rectilíneos así como la combinación de arcos cóncavos y convexos enlazados, como ocurre en el Vestíbulo de la Plaza de Oro y en una sala menor de las Termas Pequeñas en la Villa Adriana (Lucchini 1997, 16). El mismo tipo de construcción geométrica se encuentra en la planta de una pequeña sala anexa al Templo de Venus en Baia. En estos casos la complejidad de la solución de cubrición se genera a partir de la misma planta.

Desde la observación de los edificios estudiados se propone una clasificación en base a la geometría del intradós de las cúpulas. Existe una primera distinción entre bóvedas simples, que no presentan aristas y que derivan de la revolución de una curva, y bóvedas complejas, que presentan aristas y están compuestas por porciones de superficies diversas. Entre las bóvedas simples encontramos las de geometría cónica, esférica, apuntada; mientras que al tipo de bóvedas complejas pertenecen las de aristas, de aristas-esféricas, de paraguas, de gajos alternos (figura 4). En la historia de la construcción de bóvedas sobre planta circular o poligonal se aprecia un desarrollo desde el uso de formas simples hasta la experimentación de formas más complejas. La conquista del control de la técnica constructiva permite variar las formas y ampliar significativamente las dimensiones de las estructuras abovedadas.

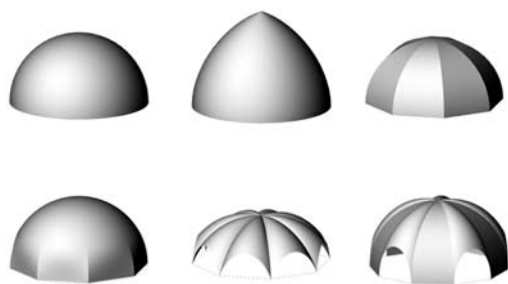


Figura 4
Geometrías de las cúpulas clásicas romanas observadas: esférica, ojival, de aristas, de aristas-esférica, de paraguas, de gajos alternos (dibujos de la autora 2013)

Los primeros ejemplos de cúpulas construidas en *opus caementicium* se aplican a plantas circulares y asumen una geometría cónica, muy similar a las clásicas cabañas de madera. La superficie de simple curvatura se prestaba por su simplicidad a estos primeros intentos de cubrición de espacios de planta circular mediante los nuevos sistemas constructivos. Estas bóvedas tenían normalmente un óculo superior (circular, mistilíneo o cuadrangular) y estaban insertas en sistemas de edificios o parcialmente enterradas.

Posteriormente encontramos las cúpulas de forma semiesférica aplicadas a plantas circulares con diámetros de distinta entidad. Los materiales utilizados,

la datación y las dimensiones de estas cúpulas varían pero se mantiene el mismo sistema constructivo. En la mayoría de los casos existe un óculo circular que ofrece iluminación cenital y solo en alguna ocasión se aprecian ventanas recortadas en la misma superficie de la cúpula.

Se ha estudiado la esfericidad de algunas de estas cúpulas. Con esta finalidad se ha realizado el levantamiento del intradós de la cúpula del Panteón en Roma mediante fotogrametría digital (Aliberti y Altozano 2011) y posteriormente mediante escáner láser, del Mausoleo de Santa Constanza en Roma y de la sala circular de las Termas con *Heliocaminus* en la Villa Adriana, ambos mediante fotogrametría digital. Para poder desarrollar los análisis, se introduce el valor de la esfera media resultante de promediar la distribución de los puntos del modelo derivado del levantamiento. El cálculo de las distancias de los puntos medidos respecto a la superficie de la esfera media proporciona unos datos sobre la regularidad de la geometría de las bóvedas.

Desde los resultados del levantamiento del Panteón aparece evidente que la mayoría de los puntos se acercan sensiblemente a la superficie esférica. Observando la cúpula por partes separadas se nota que la distancia media en la zona casetonada es de apenas 5,5 cm., mientras que en la zona del casquete superior alcanza un valor medio de 9,4 cm. Todos los puntos con distancias relevantes desde la esfera media, que pueden llegar a superar los 15 cm., se sitúan en el casquete incluido entre el último orden de casetones y el óculo, donde los datos apuntan a la presencia de una zona deformada que resulta en depresión. La directa correspondencia con la geometría esférica es en gran parte del intradós del todo sorprendente.

Este tipo de análisis no es aplicable con la misma eficacia a la sala circular de las Termas con *Heliocaminus* debido a la extrema irregularidad de la superficie del intradós. Sin embargo, desde los datos obtenidos, se puede confirmar la hipótesis de que la geometría de la bóveda es sensiblemente semiesférica.

La cúpula de S. Constanza, con un diámetro de 11,5 m, tiene un tamaño notablemente menor que la del Panteón y es de época posterior. La distancia media de los puntos medidos a la esfera ideal es de apenas 4 cm. en toda la extensión de la cúpula⁷. Se puede afirmar que el intradós de la cúpula de S. Constanza se aproxima con extrema precisión a una semiesfera de una manera uniforme en todas sus partes.

Una variación de las cúpulas semiesféricas son las cúpulas que presentan un perfil apuntado. Estas formas se acercan a los modelos más antiguos de las tumbas etruscas y micénicas, cuyas falsas bóvedas solían tener un perfil aproximadamente ojival. La introducción del mortero romano de alta resistencia permite ligar los anillos autoportantes y rebajar progresivamente la bóveda hasta llegar a un perfil semicircular.

Existen ejemplos de cúpulas de perfil apuntado construidas en *opus caementicium* en el área arqueológica de Baia. Los resultados obtenidos mediante el levantamiento fotogramétrico del Templo de Mercurio, indican que el perfil del intradós resulta definido por dos arcos de circunferencia con centros respectivamente en la línea de imposta de la cúpula y en un punto a cota inferior. Se puede observar en el estudio de la sección del edificio que su hipotética culminación al prolongar los arcos superiores tendría una forma apuntada, físicamente inexistente debido a la presencia del óculo. La característica geometría de la cúpula del Templo de Mercurio se encuentra más acentuada en el cercano Templo de Diana, que presenta una bóveda marcadamente ojival sobre planta circular.

Las plantas poligonales adoptaban inicialmente bóvedas de aristas, como ocurre en la sala octogonal de las Termas Neronianas en Pisa. Este tipo de geometría era fácilmente controlable gracias a la posibilidad de organizar las cimbras según los pliegues de la bóveda que corresponden a los vértices del polígono de la planta. En estos casos el óculo suele ser de forma poligonal recalando la geometría de la planta.

Más compleja resulta la construcción de las bóvedas que llamamos de aristas-esféricas. A partir de una planta poligonal se genera una superficie de transición que reconduce la sección horizontal a un círculo, sobre el cual se desarrolla un casquete esférico. Como consecuencia la bóveda, que generalmente termina en una abertura circular o poligonal, resulta articulada en dos partes que se enlazan de manera que no resulte visible la línea de unión entre las superficies.

El primer ejemplo conocido de la aplicación de esta difícil geometría es la notable sala octogonal de la *Domus Aurea*. En su conjunto reúne varios temas muy relevantes como son la admirable manera de realizar su cubierta esférica a partir de una planta octogonal, la iluminación cenital a través del óculo supe-

rior y el aligeramiento de los soportes a través de los huecos de acceso al deambulatorio que rodea el espacio abovedado. La geometría adoptada expresa la intención de experimentar formas complejas.

La misma configuración se encuentra en el ninfeo de los *Horti Liciniani* en Roma, donde la cúpula se genera sobre una planta decagonal con nichos perimetrales. En este edificio se aplican varios sistemas de construcción experimentados en los siglos anteriores, cuales son el uso de arcos de descarga, la introducción de ánforas para aligerar la estructura, la construcción de elementos verticales de refuerzos en el tambor y la concentración de las cargas. La cúpula tiene un diámetro de 23,65 m (Rasch 1985, 128) y se conserva actualmente solo la parte inferior de la estructura. La planta del edificio es decagonal y se conecta a la cúpula semiesférica a través de pequeñas pechinas, resultando la transición en la superficie del intradós prácticamente imperceptible.

Entre los tipos de cúpulas complejas se encuentran las cúpulas de paraguas, que generalmente cubren plantas octogonales. La superficie del intradós resulta subdividida en gajos cóncavos que convergen hacia el vértice, formando una composición de superficies con forma de velas. Significativo es el ejemplo de la sala octogonal anexa al Templo de Mercurio en Baia, que tiene el valor de conservarse en su totalidad. La cúpula de paraguas se desarrolla sobre una planta octogonal, que mide 5,90 m de diámetro y presenta una apertura situada encima del hueco de la entrada (figura 5). Debido a la específica situación del lugar, sujeto al fenómeno del bradisismo, el pavi-



Figura 5
Interior de la sala octogonal anexa al llamado Templo de Mercurio en Baia, Nápoles (foto de la autora 2011)

mento se encuentra por debajo del nivel freático, estando la sala actualmente inundada así como ocurre en el mismo Templo de Mercurio.

En otros ejemplos los sectores de superficie resultan alternativamente cóncavos y convexos o cóncavos y esféricos. En este caso la bóveda se define a gajos alternos. La especial conformación de este tipo de bóveda se adapta fácilmente a las plantas mistilíneas que precisan un sistema de cubrición más complejo en comparación con las plantas circulares o polígonos regulares. Encontramos varios ejemplos de este tipo de bóvedas en las salas de la Villa Adriana que, aún sin llegar a dimensiones importantes, son ejemplos admirables de la experimentación de los sistemas de construcción y de las nuevas formas.

Un ejemplo de este tipo de bóvedas es el Serapeo de la Villa Adriana con un diámetro considerable de aproximadamente 16,70 m. Aunque se genera a par-



Figura 6
Cúpula del Serapeo en la Villa Adriana (foto de la autora 2010)

tir de una simple planta semicircular, la geometría de la cúpula es compleja. La articulación del muro cilíndrico en nichos produce la división de la superficie en gajos que son alternativamente porciones de esferas y porciones de velas (figura 6).

El estudio propuesto forma parte de una investigación más amplia sobre las cúpulas clásicas romanas de planta circular o poligonal. Desde la observación de los ejemplos presentados de forma sintética, se intuye la riqueza de estos sistemas constructivos y el interés hacia un análisis más profundo y detallado. Este tipo de estructuras muestra variaciones de materiales, proporciones, tamaño y geometría considerables, formando sin duda un capítulo sorprendente en la historia de la arquitectura romana.

5. Para la toma de datos se ha utilizado una cámara reflex digital de formato completo (Canon EOS 5D, sensor CMOS 35,8 x 23,9 mm de 13,3 MP, 12,8 MP efectivos) y lentes fijas que han sido intercambiadas según las necesidades (Canon 50 mm, 1:1.4; Canon 24 mm, 1:2.8). El software utilizado para la gestión de los datos ha sido el Photomodeler v.6.
6. La herramienta empleada para realizar el levantamiento es el escáner Leica HD6200. Los programas informáticos usados para la gestión de los datos son el Leica Cyclone v. 7.0 y el 3DReshaper v.7.
7. Según el modelo fotogramétrico del intradós de la cúpula de Santa Constanza, resulta que el 75% de los puntos dista menos de 6 cm. de la esfera media, el 21,5% entre los 6 y los 10 cm. y el restante 3,5% entre los 10 y los 20 cm.

NOTAS

1. Existe una proporción entre los espesores del muro perimetral y de la cúpula con el diámetro de la misma. Rasch (1985, 128) afirma que sobre un estudio de 19 cúpulas desde el siglo II al siglo IV d.C. el espesor del muro cilíndrico corresponde entre 1/3.5 y 1/9.3 del diámetro, siendo el valor medio de 1/6.7. El espesor de las cúpulas resulta mucho más variado y oscila entre 1/9 y 1/42, siendo en la mayoría de los casos entre 1/16 y 1/22 con una media general de 1/20. En las construcciones mayores el espesor de la cúpula es en proporción inferior respecto a los edificios de tamaño más reducido.
2. La datación de las termas se reconduce al siglo I a.C. por lo que este edificio podría ser precursor de una técnica considerada más moderna; pero recientes estudios sostienen la hipótesis realista de que la sala fue restaurada y en parte reconstruida en época severiana, alrededor del siglo III d.C. (Lancaster 2005, 108).
3. Las distancias entre los huecos presentes en el intradós de la cúpula oscila entre 0,80 y 1,20 m en horizontal, según el levantamiento realizado mediante fotogrametría digital de imágenes cruzadas. Las distancias verticales entre las alineaciones horizontales de los huecos oscilan aproximadamente entre 0,50 y 0,85 m.
4. Según el levantamiento realizado mediante fotogrametría digital de imágenes cruzadas, los ejes de los huecos enfrentados tienen unas inclinaciones mínimas respecto a la hipotética subdivisión de la circunferencia en partes iguales. El promedio del ángulo que los ejes reales forman con los ejes ideales es de apenas 0,3°. Las ventanas son de medio punto y el ancho medio de los huecos es de 1,78 m.

LISTA DE REFERENCIAS

- Adam, J. P. 1988. *L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche*. Milano: Longanesi Editori.
- Aliberti, L. y F. Altozano García. 2011. «Documentación gráfica mediante fotogrametría digital de la cúpula del Panteón en Roma». *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Santiago de Compostela, 33-43. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Aliberti, L.; Alonso Rodríguez, M. A. y M. Canciani. 2012. «Estudios sobre la cúpula del Templo de Mercurio en Baia (Nápoles)». *Actas del XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la edificación*.
- Cairolì Giuliani, Fulvio. 1975. «Volte e cupole a doppia calotte». *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung*, 82.2: 329-342.
- Choisy, Auguste. [1873]1999. *El arte de construir en Roma*. S. Huerta y J. Girón (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- De Angelis D'Ossat, Guglielmo. 1938. «La forma e la costruzione delle cupole nell'architettura romana». *Atti del III Congresso Nazionale Di Storia dell'Architettura*, 223-250.
- Fine Licht, Kijeld de. 1968. *The Rotunda in Rome. A Study on Hadrian's Pantheon*. Copenhagen: Nordisk Forlag.
- Lancaster, Lynne. 2005. *Concrete vaulted construction in Imperial Rome. Innovations in context*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Laurenzi, Luciano. 1958. «L'origine della cupola voltata e la storia della cupola». *Arte antica e moderna*, 3: 203-215.
- Lucchini, Flaminio. 1997. «Le cupole di Adriano». Conforti, C. *Lo specchio del cielo. Forme, significati, tecniche e funzioni della cupola dal Pantheon al Novecento*, 9-21. Milano: Electa.

- Lugli, Giuseppe. 1957. *La tecnica edilizia romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*. Roma: Giovanni Bardi Editore.
- MacDonald, William. 1958. «Some implications of later roman construction». *Journal of the Society of the Architectural Historians*, XVII: 2-8.
- MacDonald, William. 2002. *The Pantheon: Design, Meaning and Progeny*. Harvard: Harvard University Press.
- Rakob, Friedrich. 1988. «Römische Kuppelbauten in Baiae». *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung*, 257-301.
- Rasch, J. J. 1985. «Die Kuppel in der römischen Architektur». *Architectura*, 15: 117-139.
- Terenzio, Alberto. 1933. «La restauration du Pantheon de Rome». *Conservation de monuments d'art et d'histoire*, 280-285. Paris: Institut de Coopération Intellectuelle.
- Waddell, Gene. 2008. *Creating the Pantheon. Design, Materials and Construction*. Roma: L'Erma di Bretschneider.
- Wilson Jones, M. 2000. *Principles of Roman Architecture*. New Haven: Yale University Press.

Huerta, Santiago y Fabián López Ulloa (eds.). 2013. Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid, 9-12 de octubre de 2013. Madrid: Instituto Juan de Herrera.