

Javier de Mingo García, Ángel María Martín

## ***Strapwork Wooden Domes: History, Design and Proposed Development with Spherical Geometry and the Rules of the Trade as a Basis***

*Cúpulas en la carpintería de lazo: Historia, trazado y propuesta de desarrollo con la geometría esférica y las normas del oficio como base*

*Cúpulas na carpintaria de laço: História, traçado e proposta de desenvolvimento com a geometria esférica e as normativas do ofício como base*

**Keywords | Palabras clave | Palavras chave**

Joinery, Architecture, Trigonometry, History of Construction, Wood

Lacería, Arquitectura, Trigonometría, Historia de la construcción, Madera

Laçaria, Arquitetura, Trigonometria, História da construção, Madeira

**Abstract | Resumen | Resumo**

Strapwork wooden domes are a rare type of joinery: only six such examples exist in the world. Maybe this is why, until recently, there have been few texts that allow us to understand their layout and constructive system. Our research goes beyond a mere formal analysis of the “half oranges”, for they also study other constructions that combine strapwork joinery and spherical geometry. Regarding the latter, there was extensive knowledge that was hardly ever applied in joinery. Today, in order to provide continuity to a trade that we seek to recover, we propose the development of domes based on polyhedral symmetry that respond to the strict layout of the strapwork wheels, and to the constructive logic of the *carpintería de lo blanco* (Mudejar joinery).

Las cúpulas de lacería constituyen una rareza dentro de la carpintería de lazo, puesto que sólo existen seis ejemplares a nivel mundial. Quizás por ello, hasta tiempos recientes, siempre escasearon los textos que permitieran la comprensión de su trazado y su sistema constructivo. Nuestra investigación trasciende el mero análisis formal de las “medias naranjas”, ya que se rastrean otras construcciones que aúnan lacería y geometría esférica. Sobre ésta existían abundantes conocimientos que apenas fueron aplicados en carpintería. Hoy, como continuación de un oficio que se pretende recuperar, proponemos el desarrollo de cúpulas basadas en la simetría poliédrica, que obedecen el estricto trazado de las ruedas de lazo, a la vez que a la lógica constructiva de la carpintería de lo blanco.

As cúpulas de laçaria constituem uma rareza dentro da carpintaria de laço, dado que apenas existem seis exemplares a nível mundial. Talvez por isso, até tempos recentes, sempre escassearam os textos que permitissem a compreensão do seu traçado e do seu sistema construtivo. A nossa investigação transcende o mero análise formal das “meias laranjas”, já que se rastreiam outras construções que reúnem a laçaria e a geometria esférica. Sobre esta existiam abundantes

conhecimentos que apenas foram aplicados na carpintaria. Hoje, como continuação de um ofício que se pretende recuperar, propomos o desenvolvimento de cúpulas baseadas na simetria poliédrica, que obedecem ao estrito traçado das rodas de laço, e ao mesmo tempo que a lógica construtiva da carpintaria estrutural.

## Introducción y antecedentes

Las cúpulas de lacería hechas en madera, también denominadas “medias naranjas” dentro del oficio de la carpintería de lo blanco, son construcciones de sección ultrasemicircular, en las cuales su composición estética y estructural está basada en una sucesión de ruedas de lazo intercaladas o no con otras formas, que permiten la continuidad visual del trazado ornamental.

A tenor de dicha descripción, solo se tiene constancia de seis cúpulas en todo el mundo que cumplan dichos condicionantes. Por orden cronológico, serían: los dos cupulines del Patio de los Leones de la Alhambra; la del Salón de Embajadores de los Reales Alcázares, en Sevilla; la de la Casa de Pilatos, también en Sevilla; la del desaparecido Palacio de los Cárdenas de Torrijos, hoy en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid; y finalmente, la del Convento de San Francisco de Lima.

A pesar de su escasez, su importancia dentro de la carpintería de lo blanco era fundamental, puesto que saber trazar una media naranja era una prueba exigible a quien quisiera obtener el grado de geométrico, el más alto del oficio. Ello no significaba que existiese un único camino para construirlas, puesto que entre los seis ejemplares existentes se observan cuatro métodos de trazado y de montaje distintos.

Salvo las cúpulas de la Alhambra, las demás son apeinazadas, es decir, construidas a base de camones colocados en direcciones paralelas a los meridianos que dividían la superficie esférica en husos, los cuales se montaban de forma

independiente. Sin embargo, los ejemplares granadinos son diferentes, tanto en su concepto estructural como geométrico, ya que se trata de cúpulas ataujeradas que usan como sustrato compositivo un poliedro proyectado sobre la esfera.

## Estudios sobre cúpulas de lazo

En cuanto a estudios sobre las cúpulas de lacería, por un lado están los tratados de carpintería del siglo XVII de Diego López de Arenas y Fray Andrés de San Miguel<sup>1</sup>, escritos cuando aún se realizaban armaduras de lazo, y por otro, los textos que a partir del siglo XX han pretendido estudiar las cúpulas y a su vez descifrar los tratados anteriores.

En el primer tratado, publicado por López de Arenas (1633), se intenta realizar una explicación del proceso de trazado de una media naranja apeinazada, el cual contiene tantos errores que lo hacen impracticable (Fig. 1). En el segundo tratado, siete años posterior, San Miguel (1640) realiza una aproximación gráfica al desarrollo plano de una esfera, obviando temas constructivos de la lacería.

Así pues, con dos tratados que no desgranar los pormenores de las cúpulas, los autores posteriores se enfrentaban a la tarea adicional de verificar sus afirmaciones. Prieto y Vives (1932) fue el primero en hacerlo, y, además de señalar los errores de Arenas, descifró particularidades geométricas de los cupulines de la Alhambra desde un punto de vista matemático, sin incidir en cuestiones propias de la carpintería. Después de él, diversos estudios sobre cúpulas

de lazo han intentado recuperar saberes nunca escritos, por lo que sólo mediante análisis formales y constructivos se pudo llegar a conclusiones válidas.

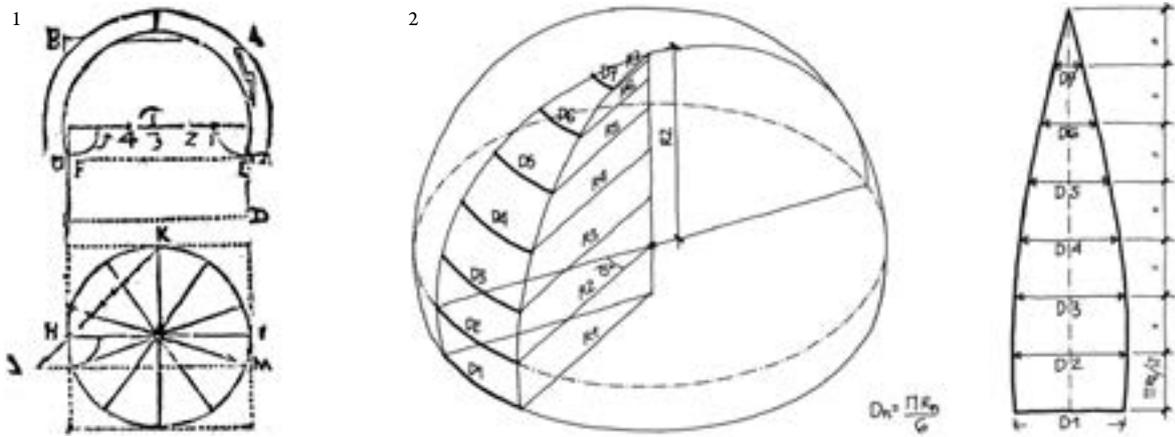
Nuere, usando la lectura dibujada, aplicada a los manuscritos de Arenas (Nuere 1985) y San Miguel (Nuere 1980), también dio testimonio de sus imprecisiones, y propuso un análisis constructivo de las medias naranjas que permitió el montaje de un gajo a tamaño real (Fig. 2). Posteriormente, Candelas-Gutiérrez (2000) escribió sobre el tema de las bóvedas y cúpulas de madera en los tratados, para después analizar la cúpula del Salón de Embajadores (Candelas-

Gutiérrez 2001). Por último, en Nuere *et al.*(2020), se analizó minuciosamente la cúpula de Torrijos, y se llegó a conclusiones aplicables al resto de las medias naranjas (Fig. 3).

Figura 1: Representación de una media naranja en el tratado de Arenas (López de Arenas 1633)

Figura 2: Esquema para el desarrollo plano de un gajo esférico (Nuere 1985)

Figura 3: Montaje de un gajo sobre los camones principales en la cúpula de Torrijos (Nuere *et al.* 2020)



### La carpintería de lo blanco y las cúpulas

No existe documentación sobre el proceso que dio lugar a las cúpulas de lazo, aunque contando con las armaduras presentes en España y sus cronologías, podría rastrearse una evolución desde las primitivas techumbres de lazo a cuatro aguas hasta las medias naranjas, representantes del apogeo del oficio.

En cualquier caso, la aproximación formal a la esfera, mediante la fragmentación de faldones y paños, creó armaduras de creciente complejidad, basada en poliedros con caras obtenidas por rotación alrededor de un eje. En un principio, las armaduras rectangulares dieron lugar a las ochavadas, añadiendo vertientes oblicuas respecto a las ortogonales. Incluso surgieron techumbres doceavadas y dieciseisavadas. En cuanto a la dimensión vertical, también existió una fragmentación que fue desde los tres paños habituales de las armaduras de par y nudillo hasta los cinco o siete paños. Así, el aumento de vertientes y paños aproximaba las armaduras hacia la forma esférica progresivamente, con la lacería contenida en las diferentes caras del poliedro, y sin abordar el cómo trazar ruedas de lazo sobre una esfera.

Por otro lado, la carpintería ya había generado formas curvas mediante el uso de camones, con multitud de bóvedas que los utilizan (Hurtado 2012). Tampoco hay que ignorar la carpintería de ribera, cuya tecnología para elaborar

cuadernas navales, si bien no era usada en edificación, tampoco es descartable que diera lugar a una transferencia de conocimientos entre ambos gremios. Sin embargo, no existen antecedentes de armaduras de lazo que usaran camones antes de la realización de las medias naranjas.

### Cúpulas de lazo *lefe*: las medias naranjas

Las cuatro cúpulas de lazo apeinado que subsisten comparten una misma tecnología y trazado, con algunas matizaciones entre ellas. El principal punto en común es el uso del trazado *lefe*, compuesto por ruedas de diez brazos que se unen entre sí, usando solo azafates redondos (Nuere 2008), esto es, con la longitud del *costadillo* igual a la de la media *aspilla*.

La trama básica que une los centros de las ruedas del trazado *lefe* es una malla rómbica cuyos ángulos agudo y obtuso son  $72^\circ$  y  $108^\circ$  respectivamente. En cada centro se cruzan dos líneas de la trama, provocando que cada rueda esté rodeada de otras cuatro semejantes de manera directa, y de dos de manera indirecta. Al igual que cualquier otra trama de lazo, necesita formas adicionales a las ruedas para poder completarse, pero es la única en la que esas formas son azafates idénticos a los que usan las propias ruedas. Quizás por ello está considerado como el más perfecto de los trazados de lazo (Fig. 4).

Figura 4: Silueta del huso esférico de una cúpula sobre el trazado de diez lefe

Figura 5: Representación plana de un gajo, desarrollada sobre un meridiano limítrofe entre dos gajos adyacentes (Enrique Nuere)

Figura 6: Representación plana de un gajo, desarrollada sobre el meridiano central del gajo (Enrique Nuere)

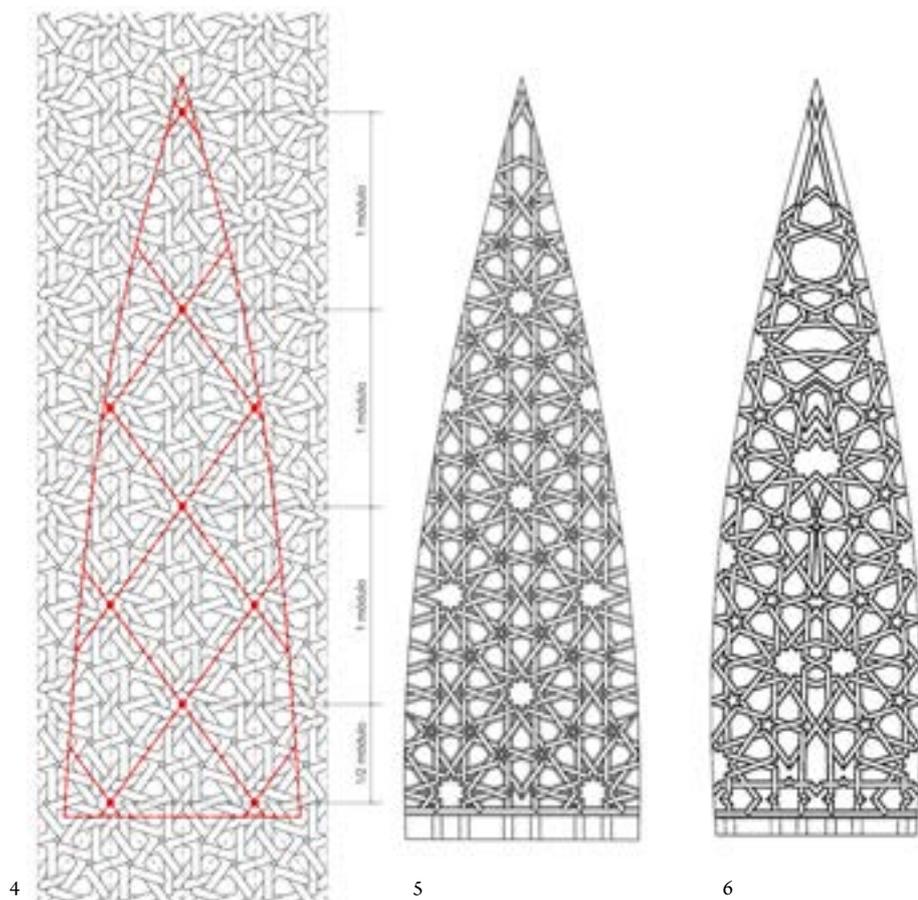




Figura 7: Sección de una media naranja por un plano vertical diametral (Nuere *et al.* 2020)

### Desarrollo geométrico y construcción

En las tres medias naranjas españolas se subdividieron las superficies esféricas en doce husos meridionales compuestos por camones que al unirse en la clave de la cúpula, generaban una rueda de doce brazos, a pesar de que el resto del trazado fuese de diez (Figs. 5 y 6). Por otra parte, al estar los camones imbricados en la lacería, guardaban la misma proporción de *calle y cuerda*, y alojaban entre sí los sinos de las ruedas que servían de base de la trama, y cuya separación coincidía con la diagonal larga de la trama rómbica (denominada “módulo” en el artículo).

Los bordes de cada gajo quedaban delimitados por los camones principales, debido a que en ellos la lacería era canónica y se introducía en el resto del gajo partiendo de dichos bordes, trazada a imitación del lazo de diez plano, con sus mismos cartabones. Así, al llegar al eje central del huso, las dos tramas colisionaban y se realizaba una zona de ajuste coyuntural para dar continuidad al trazado (Fig. 7).

### Los ejemplares subsistentes

A continuación se realiza una descripción de las características más elementales de los ejemplares de media naranja que aún subsisten:

#### - Cúpula del Salón de Embajadores de los Reales Alcázares

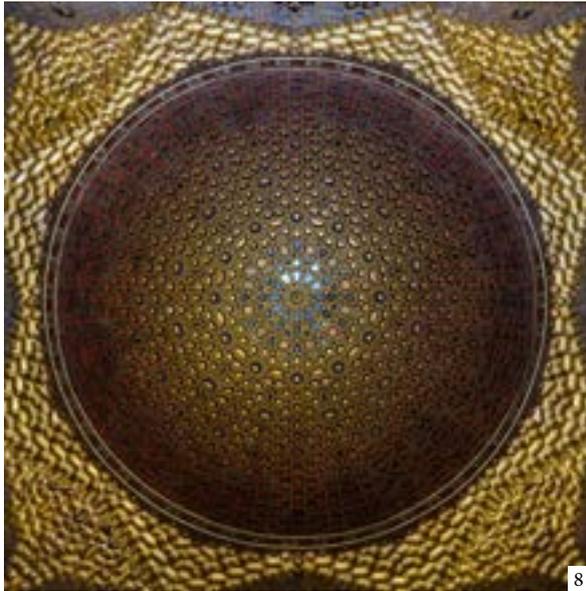
Construida en 1427 por el carpintero Diego Ruiz (González de León 1844), con trazado a *calle y cuerda* y un arco formado por 3,5 módulos. Su diámetro es de 9,28 metros y su bolsor de 0,36 metros. Los gajos se interrumpen a 1,22 m. de la clave, y el casquete esférico superior está compuesto como una pieza unitaria e independiente de los mismos (Candelas-Gutiérrez 2001). La escuadría de los camones es de 10 x 14 centímetros (Fig. 8).

#### - Cúpula de la escalera principal de la Casa de Pilatos

Construida en 1538 por el carpintero Cristóbal Sánchez, con trazado a *calle y cuerda* y un arco formado por 3 módulos. Su diámetro es de 6,38 metros y su bolsor de 0,89 metros. Al igual que en la cúpula anterior, los gajos se interrumpen a cierta distancia de la clave, y el casquete superior es independiente (Albendea 2011). Los camones miden aproximadamente 6,5 x 9 centímetros (Fig. 9).

#### - Cúpula del torreón noreste del Palacio de los Cárdenas

Construida en 1499, de autor desconocido, con trazado a *calle y cuerda*, y un arco formado por 3,5 módulos. Su diámetro es de 5,2 metros y su bolsor de 20 centímetros.



8



11

Figura 8: Cúpula del Salón de Embajadores de los Reales Alcázares.

Figura 9: Cúpula de la escalera principal de la Casa de Pilatos.

Figura 10: Cúpula del torreón noreste del Palacio de los Cárdenas.

Figura 11: Cúpula de la escalera del Convento de San Francisco de Lima.



9

Posee una subestructura oculta en el trasdós formada por camones principales de 9 x 7 centímetros, en la que se insertan los gajos (Nuere *et al.* 2020). La escuadría de los camones de los gajos es de 5,5 x 9 centímetros (Fig. 10).

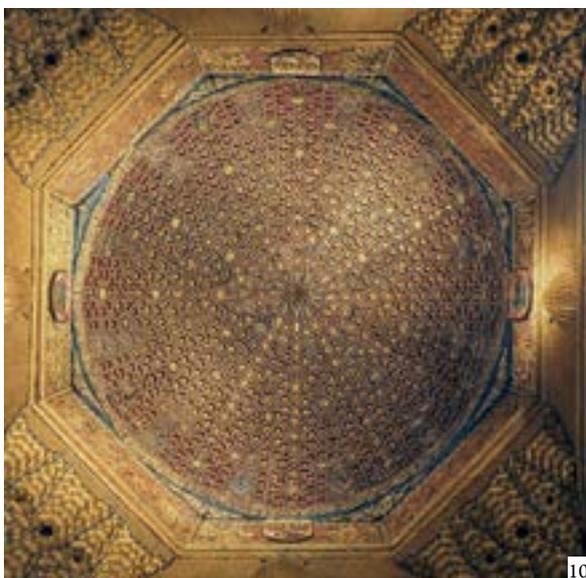
- Cúpula de la escalera del Convento de San Francisco de Lima

Reconstruida en 1973 tras su derrumbe, por el carpintero Juan de Dios Muñoz, con trazado a *calle y cuerda*, subdivisión en 8 gajos y un arco formado por 3 módulos. Su diámetro aproximado es 9,6 metros, y, según las descripciones, el arco que describe su sección es menor que un semicírculo (San Cristóbal 2006). Su sistema constructivo simula una armadura apeinazada, tras las cual está el entablado y una capa externa de hormigón armado (Fig. 11).

### Cúpulas de lazo basadas en geometría esférica: Cupulines del Patio de los Leones

Construidos a finales del siglo XIV, poseen un diseño basado en la trigonometría esférica, de manera que la lacería discurre en paralelo a la proyección de un octaedro truncado sobre una esfera circunscrita, con sus caras hexagonales falsamente elongadas en pirámides de cinco triángulos equiláteros y uno isósceles (Makovicky y Fenoll 2000).

Las ruedas de lazo presentan unos inusuales 11 brazos, a pesar de que el diseño parte de una trama plana de ruedas de 12 con una apertura entre sí de 30°. Al hacer coincidir el centro de la rueda en un vértice del poliedro generador, sucede lo siguiente: la esquina de la cara cuadrada (90°) abarca 3 brazos de la rueda, mientras que en las 4 triangulares equiláteras (60°) abarcan 2 cada una, resultando 8 brazos, que sumados todos hacen 11 en total. En los vértices que unen las caras triangulares equiláteras con la isósceles, la

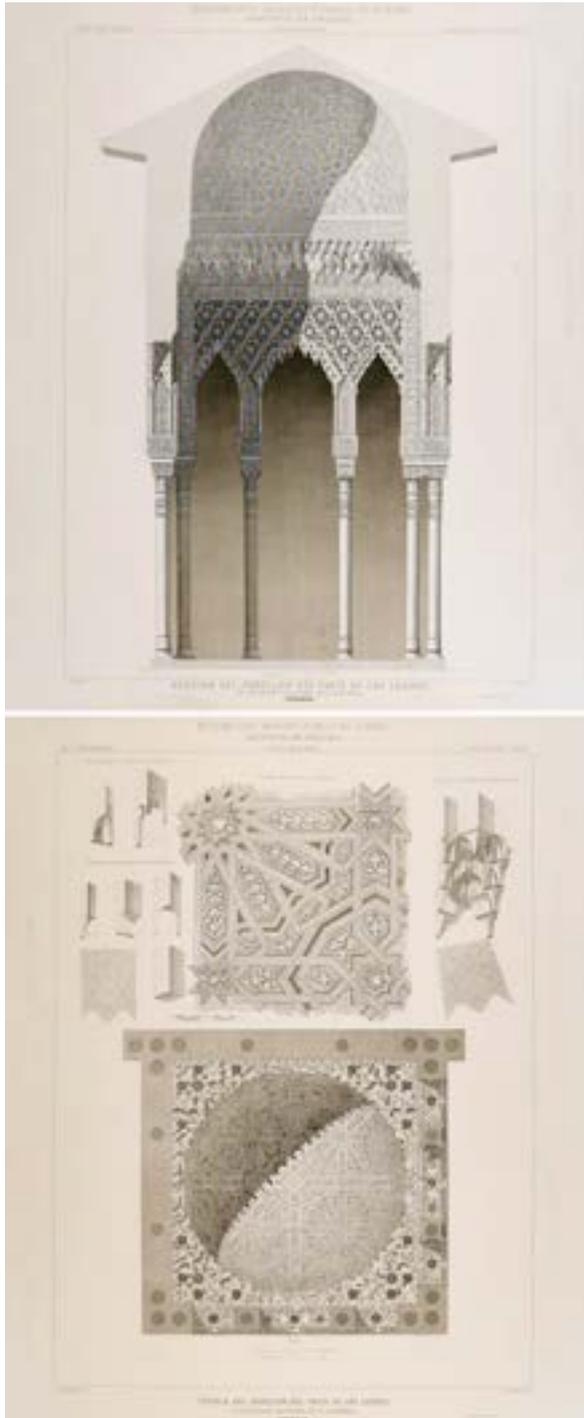


10

distribución sería de 2 brazos por equilátera y uno por la isósceles, que de nuevo sumarían 11 (Fig. 12).

Como es habitual, se necesitan formas adicionales a las ruedas para mantener la continuidad, que no obstante, al repetirse con regularidad y sortear con elegancia la indivisibilidad del número 11, hacen de esta cúpula un prodigio de la lacería aplicada a la geometría esférica.

Figura 12: Cúpula del Pabellón del Patio de los Leones. Monumentos Arquitectónicos de España (dibujo de Nicomedes de Mendivil, grabado por Joaquim Pi y Margall, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando)



El inevitable pragmatismo de la carpintería permitía eludir las imperfecciones geométricas que contenía el poliedro de base. De ello fue consciente Prieto y Vives (1932), que calculó cada uno de los triángulos, llegando a la conclusión de que los que parecen equiláteros no lo son, y que en realidad las cúpulas suponen un “caso típico de geometría aproximada, compuesta con grandísimo ingenio” (Fig. 13).

Constructivamente, son cúpulas ataujeradas con tablas que forman la esfera sobre las que se crea la lacería a base de cintas de poco grosor. Posteriormente, se marcaban sobre las tablas las formas del lazo, para luego cortar y replantear las cintas “in situ”. Es en esta fase del proceso en la que se tuvo que aplicar la proyección del octaedro truncado sobre la esfera, para, una vez definidos los centros de las ruedas, proceder a trazar el resto de las figuras mediante paralelas a las proyecciones de las aristas.

### Cúpulas de lazo en Oriente Medio

La lacería como decoración arquitectónica en Oriente Medio adquirió a partir del siglo XII un gran nivel de complejidad y de variedad de modelos, utilizándose incluso en superficies esféricas. Así cúpulas, mihrabs, y altorrelieves de piedra incluyeron lacería, siendo especialmente interesantes aquellos cuya concepción utilizó la simetría poliédrica como base de trazado (Bonner 2016). En un orden de complejidad, podemos citar las siguientes:

- Cúpula noreste de la Mezquita del Viernes en Isfahán

Construida en fábrica a finales del siglo XI, con un diseño que parte de la proyección de un dodecaedro sobre una esfera. Es la primera cúpula conocida que utiliza un poliedro para realizar un diseño de geometría no euclídea.

- Mihrab de la Mezquita de Maqam Ibrahim al-Sufli en Aleppo

Elaborado a finales del siglo XIII, actualmente desaparecido y del que se conserva testimonio gráfico. Presentaba un cuarto de esfera realizado en madera, con un trazado de estrellas de 6 y 5, inscritas en la proyección de un icosaedro truncado (Fig. 14)

Figura 13: Poliedro básico del trazado de los cupulines de la Alhambra (Interpretación del dibujo de Makovicky E. y Fenoll Hach-Alí, 2000)



- Mihrab de la Madrasa de Halawiyat en Aleppo

Realizado a mediados del siglo XII, el cuarto de esfera que corona el nicho posee un trazado de lacería esférica con una combinación de ruedas de 9 y 8 en la proyección de un octaedro.

- Altorrelieves en Susuz Han, Hatuniya y Karatay (Turquía)

En el sudoeste de la actual Turquía, durante el siglo XIII, aparecieron semiesferas en altorrelieve con decoración de lazo en las portadas de diversas madrasas y caravasares. En Susuz Han aparecen ruedas de ocho situadas en los vértices de la proyección de un octaedro. En la Madrasa de Hatuniye, son ruedas de seis brazos ocupando el casquete semiesférico, y finalmente, el lazo de diez en combinación con el de ocho se utiliza en las semiesferas de la Madrasa de Karatay.

### Cúpulas de fábrica de arcos cruzados en España

Las cúpulas de arcos cruzados surgieron en España a mediados del siglo X, en la Mezquita de Córdoba, para posteriormente difundirse tanto en Al Ándalus como en Castilla (Huerta y Fuentes 2010). Se diferencian respecto a las cúpulas de lazo en que son de fábrica y el único elemento que puede asimilarse a una estrella de lazo está en la clave, aunque su geometría y su proceso constructivo las colocan como precedentes de aquellas.

Por lo general, estas cúpulas partían de una base cuadrada y todas sus nervaduras describían arcos de igual radio que podían estar contenidos en una superficie esférica en determinados casos, como por ejemplo, en la *maqsurá* de la Mezquita de Córdoba, en la Mezquita del Cristo de la Luz, o en la cúpula de la iglesia de N<sup>a</sup> S<sup>a</sup> de la Oliva en Lebrija (Fig. 15), entre muchas otras. Para ello, era condición indispensable que los arcos estuviesen contenidos en planos cuya distancia al eje central fuese la misma. No obstante, ninguna de estas cúpulas incluye estrellas o ruedas adicionales a la de la clave.

### La geometría esférica y su aplicación a la lacería

Obviamente, los conocimientos que poseían carpinteros, alarifes u otros tipos de artesanos, distaban en gran medida de los que pudieran tener matemáticos o astrónomos. Sin embargo, un indicio de que podía existir transferencia entre ciencia y arte en cuanto a la geometría esférica está en la existencia de cúpulas y esferas de lazo precisamente en territorios en donde aquella estaba muy desarrollada, como Persia o Al Ándalus. En el caso hispano, es probable que la labor de personajes como Azarquiel, Al Jyyani o Jabir Ibn Aflah, precursores de la trigonometría esférica entre los siglos XI y XII, y, sobre todo, el alto nivel cultural reinante, hicieran posible la aparición de las misteriosas cúpulas de la Alhambra. No obstante, no existe a día de hoy prueba

alguna del método empleado para su creación, ni de su procedencia.

Como se puede deducir de los diferentes ejemplos de cúpula analizados anteriormente, a lo largo de la historia, las pocas construcciones que han solapado formas esféricas y trazados de lacería han seguido fundamentalmente dos estrategias para hacerlo: la división en husos y la simetría poliédrica.

#### División radial de husos esféricos

Esta opción ha sido la más socorrida debida a su pragmatismo, y ya se ha descrito parcialmente en el apartado de las medias naranjas. Aunque era necesario solventar cuestiones relacionadas con la geometría esférica en cuanto

Figura 14: Mihrab de la Mezquita de Maqam Ibrahim al-Sufi en Aleppo (Sir K.A. Cameron Creswell, <https://collections.vam.ac.uk/item/O1252727/the-lost-carved-wooden-mihrab-photograph-creswell-keppel-archibald>, consultado el 10/03/2021)

Figura 15: Cúpula de la iglesia de Nuestra Señora de la Oliva, Lebrija (Pablo MS, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bóveda\\_mudéjar.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bóveda_mudéjar.jpg), consultado el 01/03/2021)



a los camones estructurales, lo cierto es que la lacería se trazaba como si fuese plana, puesto que el número de gajos en que se dividía la esfera (en general doce), provocaba que cada uno de ellos fuese relativamente estrecho y pudiera obviarse su curvatura azimutal al introducir el lazo.

Los patrones geométricos de lacería se adaptaban al gajo, pero la regularidad del trazado se interrumpía en los límites del mismo y la continuidad se resolvía por simetría. Las cuatro medias naranjas conservadas están realizadas por éste método, que afecta no solo a la traza del lazo que las decora, sino también a su estructura, pues está concebida mediante una disposición radial de camones que siguen la dirección de los husos en que está dividida la esfera.

Simetría poliédrica

Se denomina simetría poliédrica a la introducción de un sistema geométrico basado en la proyección de un poliedro sobre una esfera circunscrita al mismo. Dicha proyección, de tipo central o gnomónica, consiste en radiar las aristas del poliedro desde el centro de la esfera hasta la superficie de la misma, de manera que se obtiene lo que algunos autores denominan un poliedro esférico (Nejad, Azizipour 2020), es decir, un mosaico formado por arcos que subdividen la esfera en regiones o polígonos esféricos. Los poliedros que pueden utilizarse son aquellos que son convexos y poseen todos sus vértices tangentes a una misma esfera, por lo que cabe mencionar los platónicos, los arquimedianos, los sólidos de Catalan y algunos sólidos de Johnson, así como los domos geodésicos de cualquier frecuencia.

La utilidad de este procedimiento reside en usar las caras del poliedro como contenedores de un trazado de lazo, cuyas direcciones coincidan total o parcialmente con sus aristas, para que así la proyección traslade dicho trazado del plano a la esfera. Obviamente, cualquier recta proyectada de forma gnomónica sobre la esfera se transformará en un arco de círculo máximo, por lo que surgirán deformaciones en todo lo relativo a ángulos y paralelismos, que dejan de conservarse (Fig. 16).

Figura 16: Icosaedro proyectado sobre una esfera circunscrita

Figura 17: Rueda canónica de ocho brazos, con las longitudes de la media espilla y el costadillo iguales



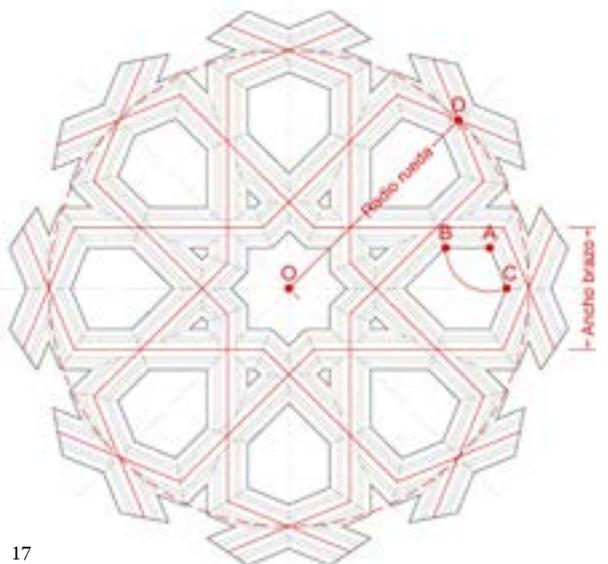
A pesar del interés geométrico y visual que ofrece la simetría poliédrica para los patrones de lazo en cúpulas esféricas, ha sido aplicada en contadas ocasiones. A diferencia de las cúpulas formadas por husos esféricos, en las que la lacería queda interrumpida, la simetría poliédrica permite la continuidad de la traza, además de innumerables combinaciones posibles de trazados que en el plano bidimensional no funcionarían.

**El trazado esférico de la lacería: Geometría canónica en desarrollos a calle y cuerda**

En la carpintería de armar española se aplicaron patrones decorativos islámicos de lazo con tal fortuna que a la postre se modificó la disposición de los elementos de las armaduras para adaptarla a ellos. Así, por ejemplo, la elección del ángulo de pendiente en una cubierta modificaba a su vez el ángulo diedro entre faldones adyacentes, y como la lacería había de adaptarse a él, sólo determinados diseños encajaban con ese encuentro.

Con el tiempo, se fue estableciendo que las características “canónicas” en lacería tenían tres puntos principales: las ruedas debían tener sus brazos paralelos para permitir su encaje en pares y nudillos; los *azafates* de las ruedas de 6, 7, 8, 9 y 10 brazos tenían que ser redondos; y finalmente, la relación del grosor de las cintas de las ruedas y su separación debía ser a *calle y cuerda*, es decir, la separación era el doble de su grosor (Fig. 17). Además, en los trazados regulares de lazo subyace siempre un patrón geométrico asimilable a tramas de cuadrados, triángulos, pentágonos, etc. (Duclós 1992), de gran ayuda a la hora de tener todo el diseño bajo control geométrico.

Por último, el uso de *azafates* redondos permite definir unívocamente el radio de la rueda, puesto que la relación entre el radio y la anchura del brazo (unidad de lazo), es



característica de cada rueda. Una vez conocida esa relación, se puede determinar la anchura de los brazos de una rueda conociendo su radio, y viceversa.

Correspondencia con la geometría esférica

Como ya se ha comentado, la proyección gnomónica de la cara de un poliedro a la superficie esférica circunscrita es la estrategia elegida para la adaptación de los modelos de lacería a espacios cupulares. A su vez, el método usado para que las ruedas de lazo pasen a formar parte de la superficie esférica consiste en la elección del poliedro adecuado para alojar ruedas o porciones de rueda en sus caras de manera que la traza sea continua entre las mismas. Para ello es imprescindible que las porciones de rueda cuyo trazado discorra por diferentes caras partan de una rueda con el mismo número de brazos, y que, si su centro coincide con un vértice del poliedro, el ángulo descrito por las aristas sea múltiplo o submúltiplo del que describen dos brazos de la rueda. En estos casos, las ruedas de un determinado número de brazos, sobre la esfera pasan a perder brazos, en función de la rueda y el poliedro escogido.

Por ejemplo, la trama en la que puede inscribirse una combinación de ruedas de 9 y 12 es triangular equilátera. Si se aísla uno de los triángulos de la trama, vemos que en cada ángulo queda un brazo completo central, y dos medios, uno en cada extremo del ángulo. Al componer un icosaedro, con 5 triángulos equiláteros por cada vértice, veremos 10 brazos en su proyección. Así pues, la combinación de ruedas de 9 y 12 se transforma en una de 9 y 10 al proyectar las caras del icosaedro contenedor del trazado sobre la superficie esférica (Fig. 18).

Cualquier trazado que genere un patrón asimilable a un sólido platónico será adecuado para ser adaptado a la superficie esférica, ya que permitirá su repetición por simetría polar respecto de ejes que vayan del centro de la esfera a los vértices.

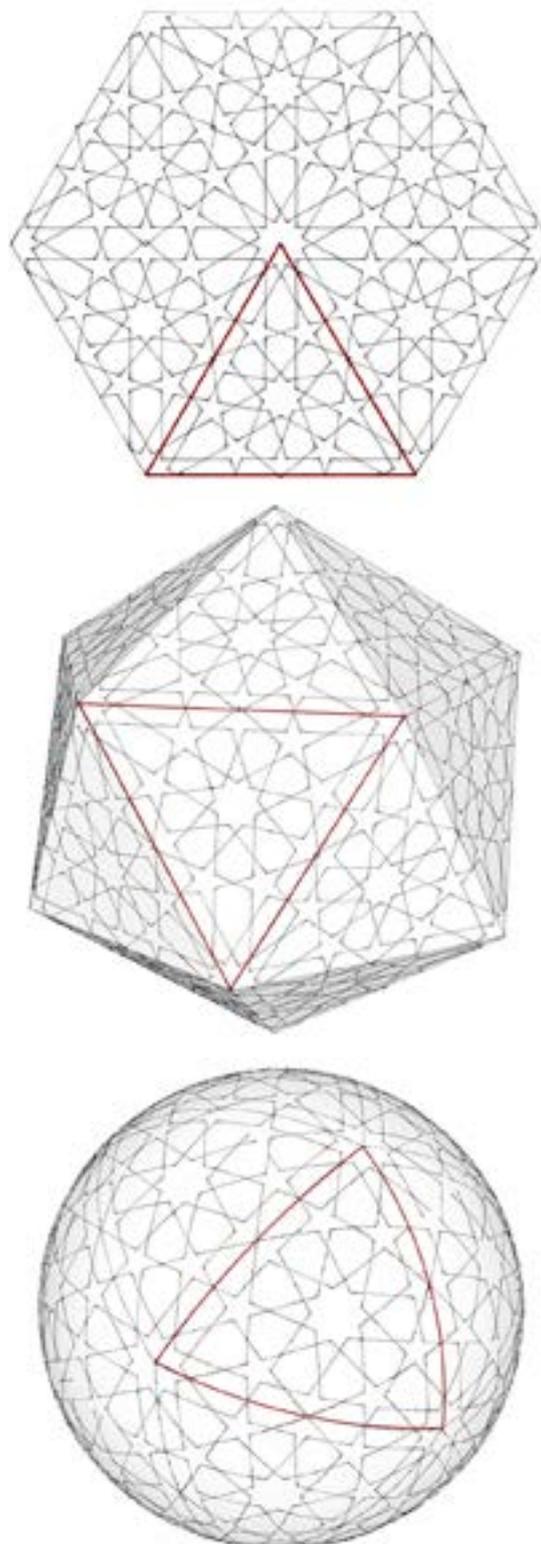
Rectificación y modificaciones de ángulos

En la superficie esférica, los ángulos canónicos de las ruedas de lazo únicamente se mantienen en el punto central de los sinos, puesto que, al estar contenidas en un casquete esférico, los ejes de sus brazos son arcos definidos por tres parámetros: radio, longitud y ángulo esférico entre ellos. Cuantas más ruedas de lazo por unidad de superficie, menor será la longitud de dichos arcos, y, por tanto, mayor la aproximación de los ángulos esféricos a los ángulos legítimos de la superficie plana. Por otra parte, el ángulo esférico que existe entre los ejes de los brazos no se conserva en la intersección de las cintas que materializan las ruedas, debido a que la distancia que separa ambos elementos obliga a que exista cierta diferencia.

El eje del camón es un arco con radio y centro igual al del eje del brazo, es decir, está contenido en la superficie esférica,

pero forma parte de un plano distinto al del eje del brazo, lo que implica que no serán paralelos. Estos dos planos forman un ángulo cuyo arco es la separación de ambos ejes en un punto, que estará en la mitad del radio de la rueda para minimizar la distorsión producida por la falta de paralelismo entre los ejes.

Figura 18: Secuencia de generación de un trazado de 9 y 10 sobre una esfera, usando un icosaedro de base



Con las premisas anteriormente descritas, se puede determinar el ángulo de encuentro entre los ejes de los camones, bien mediante cálculo trigonométrico, bien mediante aplicaciones informáticas. Finalmente, dicho ángulo sería el usado en taller para la realización de los ensambles correspondientes.

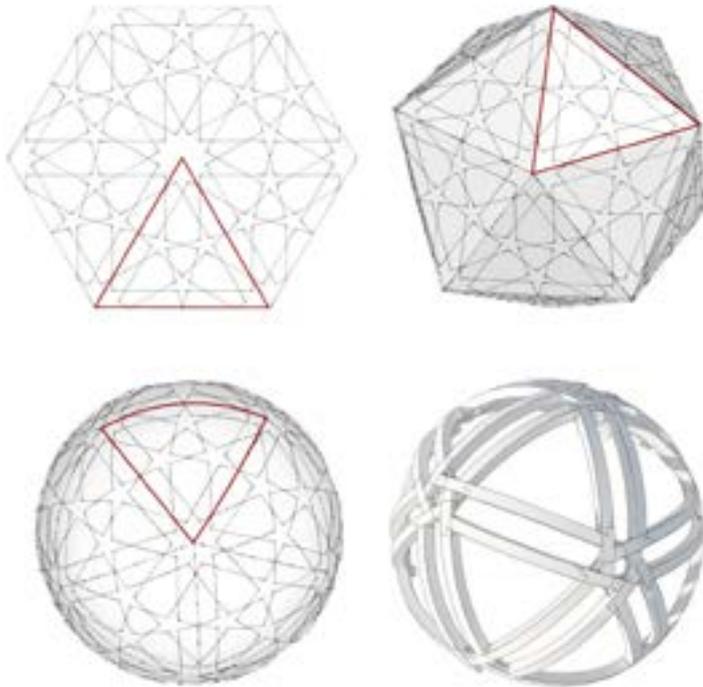


Figura 19: Generación de un trazado de 10 sobre una esfera mediante proyección de un icosaedro y módulo de estructura triangular adaptado al mismo

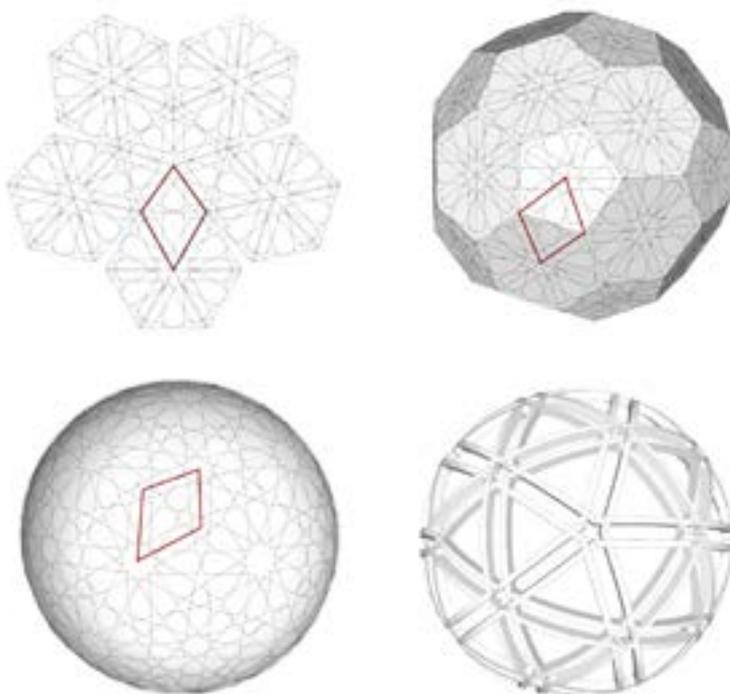


Figura 20: Proyección de un trazado de 10 y 12 sobre una esfera mediante un icosaedro truncado y estructura adaptada al mismo mediante un pentaquis-dodecaedro

### Cálculo de la cuerda a partir del radio de la esfera

Históricamente, la lacería de las medias naranjas siempre fue canónica, por lo que las variables que quedaban al arbitrio del diseño eran el bolsor y los módulos de lazo que describía el arco de la sección. Por ello, una vez establecidas, sólo restaba calcular el grosor de la *cuerda*, lo cual era relativamente fácil, puesto que sólo había que dividir la longitud del arco horizontal de la base del gajo, que era conocido, entre el número de *cuerdas* que cabían. Habitualmente rondaba las 24 *cuerdas*, de manera que el grosor de las mismas, en función del radio de la esfera, podía ir desde los 5,5 centímetros de la cúpula de Torrijos, hasta los 10 centímetros de la de los Reales Alcázares.

En cuanto a diseños basados en geometría esférica, el icosaedro suele ser el poliedro más utilizado, por lo que el trazado se compone mediante la proyección de cada una de sus 20 caras, que pasan a ser triángulos esféricos. Puesto que la longitud de los lados de cada triángulo esférico es conocida y proporcional al radio de la esfera, se puede calcular el radio de las ruedas incluidas en su superficie y, por tanto, el grosor de la *cuerda* elegida, definida por la unidad de lazo. Un proceso análogo puede seguirse con cualquier otro poliedro en el que se pueda establecer una relación de proporción entre los arcos proyectados, las ruedas y sus unidades de lazo.

### **Estructura de las cúpulas de lazo canónicas**

La búsqueda de estructuras efectivas en la construcción de cúpulas de lacería se fundamenta en adaptar los camones principales a patrones que se repitan en la totalidad de la superficie. A continuación, se describen los desarrollos más representativos de estructuras adaptadas a la geometría de lazo esférico.

#### - Ruedas de 10

El módulo estructural reproduce la división de triángulos equiláteros esféricos que surgen de la proyección del icosaedro sobre la esfera, cuya curvatura define la de los camones (Figs. 19 y 26). Estos se sitúan a una distancia del eje que coincide con las divisorias, y tanto el grueso como la distancia quedan determinadas según la distribución de *calle* y *cuerda* elegida. El ensamble entre camones se realiza a media madera, prolongando el cruce para que se complemente con el módulo triangular adyacente, mientras que la unión entre módulos se produce por el solapamiento de la prolongación de los empalmes de cada triángulo.

#### - Ruedas de 10 y 12

En esta cúpula, el módulo se adapta a la proyección de un pentaquisdodecaedro sobre una esfera, de manera que al unir los centros de las caras de un icosaedro truncado obtenemos el módulo triangular isósceles que será la

estructura principal (Fig. 20). Así, en los dos vértices iguales del triángulo se sitúan los sinos de la rueda de 12, y en el tercero, el sino de la rueda de 10 (Fig. 27).

- Ruedas de 9 y 10

Su trama de lazo, basada en un icosaedro y vista anteriormente (Fig. 18) se combina con un módulo estructural que sigue las directrices de un triacontraedro rómbico. Su trazado es sencillo, pues basta con unir cada centro de los triángulos esféricos equiláteros de un icosaedro esférico con sus vértices. El rombo resultante delimita un patrón de lacería de ruedas de 9 y 10. Los camones que forman el rombo esférico (Fig. 21) se solapan desde el cruce de cada vértice y se les quita media sección de forma alterna, mientras que los otros dos centrales se cruzan a media madera y se ensamblan, también de esta forma, con los anteriores. La disposición de los ensambles hace que sean autoportantes, lo que facilita su replanteo y posterior montaje (Figs. 28 y 29).

- Ruedas de 10 y 9

Como en el caso anterior, la división esférica en rombos de un triacontraedro delimita el módulo estructural (Fig. 22). La diferencia estriba en el número de ruedas que cada rombo posee, ya que en este modelo se sitúa una rueda de 10 en el centro del rombo, cuatro medias en los lados, otras dos cuyos sinos se alojan en los vértices más agudos, y, por último, dos más, éstas de 9, colocadas en los ángulos obtusos. Los camones del cruce central van doblados, y los ensambles con los camones del perímetro del rombo posibilitan que la estructura de cada módulo sea autoportante como en la cúpula de ruedas de 9 y 10 (Figs. 30 y 31).

### Modulación y ensamble de la estructura esférica

Los diferentes modelos de lacería y de relaciones de *calle* y *cuerda* dan lugar a gran variedad de alternativas en función de condicionantes como las dimensiones de la estancia o la escuadría disponible. En función de la unidad de lazo de cada rueda y del número de ruedas de cada modelo, podemos elaborar una tabla en la que figuran los gruesos por diámetro que tiene cada modelo (Fig. 23) y la luz resultante al establecer una cuerda de 10 cm. (Fig. 24), muy próxima a los usos tradicionales.

Figura 23: Trazados esféricos de lazo, con indicación del número de gruesos por diámetro, para una distribución a *calle* y *cuerda*

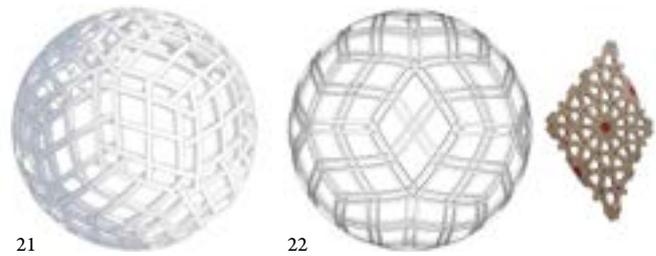
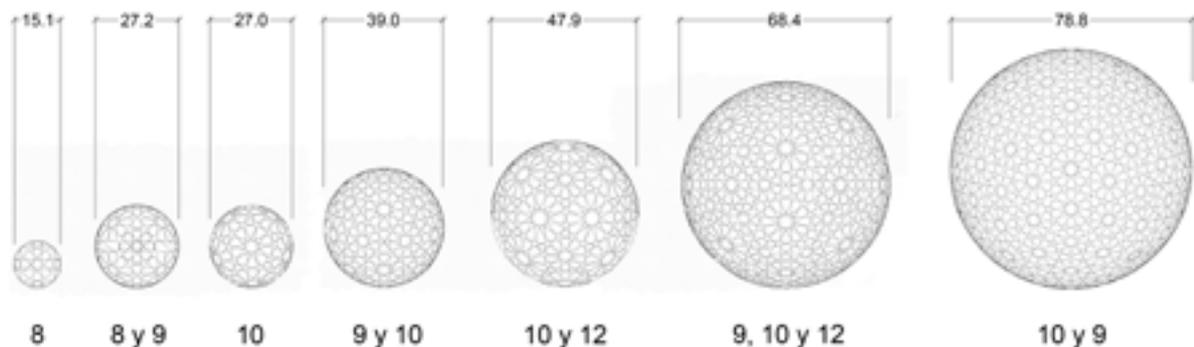


Figura 21: Estructura basada en la proyección de un triacontraedro rómbico, adaptada al trazado de 9 y 10

Figura 22: Estructura basada en un triacontraedro rómbico, adaptada al trazado de 10 y 9, e intradós de un módulo completo

### Inclusión del lazo en los módulos estructurales

Una vez configurada la estructura principal con la unión de los módulos, la labor de lazo seguirá el recorrido marcado por la estructura. La ley no escrita de la lacería obliga a que el trazado ha de pasar de forma alterna por encima y por debajo en cada cruce. Para ello se desarrollaron recursos técnicos y visuales que facilitaron su aplicación, como fueron el agramilado y el encuentro emboquillado de las cintas. Trasladar ambos aspectos al entramado estructural de la cúpula resulta complicado y laborioso, sobre todo cuando el número de ruedas es elevado, o si la alternancia de los empalmes no concuerda con la del lazo.

Hemos realizado, sin embargo, ejemplos en los que ha sido posible trazar, agramilar y emboquillar empalmes en los camones estructurales en una cúpula de 10 y 12 (Fig. 25). La exactitud de los encuentros afecta no solo a la

Figura 24: Tabla de valores de los diferentes trazados, con gruesos por diámetro, diámetro resultante para *calle* y *cuerda*, y para *calle* de 3 gruesos

Modelo	Gruesos/Ø	Ø (calle=2 c.)	Ø (calle=3 c.)
8	15,1	1,5 m.	2,0 m.
8 y 9	27,2	2,7 m.	3,6 m.
10	27	2,7 m.	3,6 m.
9 y 10	39	3,9 m.	5,2 m.
10 y 12	47,9	4,8 m.	6,3 m.
9, 10 y 12	68,4	6,8 m.	9,1 m.
10 y 9	78,8	7,9 m.	10,4 m.



Figura 25: Módulo estructural apeinado para una cúpula de ruedas de 10 y 12

superficie del intradós sino también a los perfiles, por lo que en su construcción hay que observar el ángulo de corte, que solamente en los encuentros ortogonales seguirá la dirección del radio esférico.

Para soslayar esta dificultad, otro método adoptado en la implementación de la lacería, es la de adosar al intradós

de la estructura, la labor de lazo en escuadría de pequeña sección. Esta técnica permite la exacta adaptación de ornamento y estructura y a su vez acoplar los elementos secundarios de sección completa al recorrido estricto del lazo.

### Conclusión

Como hemos visto, la carpintería de lazo desarrolló sistemas para la elaboración de cúpulas basadas en la división en husos meridionales, al margen de la simetría esférica, que, a excepción de los cupulines de la Alhambra, sólo tuvo un ligero desarrollo en Medio Oriente. Nuestra propuesta toma dicho método como base para realizar cúpulas de lazo cuyas enormes posibilidades formales y estructurales, aún dentro de lo novedoso, aluden a la tradición constructiva del oficio carpintero, y suponen el perfeccionamiento de una tradición artesanal cuya belleza y técnica constructiva están en plena sintonía con la historia y la cultura hispanas.

Por tanto, consideramos que esencialmente el aporte original hispano a la carpintería de lazo consigue la máxima aproximación posible de la lacería canónica apeinada a la superficie esférica (Fig. 32), situación que hasta la

Figura 32: Hipótesis constructiva de la sección vertical de una cúpula apeinada de ruedas de 10 y 12



fecha no ha tenido lugar o no ha trascendido. Ello supone el haber barrido los poliedros y los trazados compatibles y por lo tanto susceptibles de poder ser usados en una esfera. Además, como hemos demostrado, su realización es técnica y materialmente posible, y para ello pueden usarse medios al alcance de un profesional de nivel medio. Únicamente es

imprescindible seguir una metodología de diseño precisa, fundamentada en el uso de los mencionados poliedros esféricos, sin los cuales la continuidad homogénea del lazo sería imposible.

<sup>1</sup> San Miguel, Fray Andrés. 1640. Manuscrito. Conservado en la Universidad de Texas en Austin.

Figura 26: Unión de 5 módulos estructurales de una cúpula de ruedas de 10

Figura 28: Extradós de la maqueta de una cúpula de ruedas de 9 y 10

Figura 30: Extradós de una cúpula de ruedas de 10 y 9

Figura 27: Intradós de la maqueta de una cúpula de ruedas de 10 y 12

Figura 29: Intradós de la maqueta de una cúpula de ruedas de 9 y 10

Figura 31: Proceso de montaje de una cúpula de ruedas de 10 y 9, apreciándose tanto la estructura como el intradós de lacería



26



27



28



29



30



31

## References | Referencias | Referências

- Albendea Ruz, María Esther. 2011. *La Carpintería de lo Blanco de la Casa de Pilatos de Sevilla*. Tesis doctoral. Sevilla.
- Bonner, Jay F. 2016. The Historical Significance of the Geometric Designs in the Northeast Dome Chamber of the Friday Mosque at Isfahan. *Nexus Network Journal*, 18: 55–103.
- Candelas-Gutiérrez, Ángel Luis. 2000. Bóvedas de madera: ¿se pueden construir según describen los tratados?. En Graciani García, Amparo (ed.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, vol. 1, 193-204. Sevilla: Sociedad Española de Historia de la Construcción.
- Candelas-Gutiérrez, Ángel Luis. 2001. Geometría y proceso constructivo de la cúpula del Salón de Embajadores. *Apuntes del Alcázar de Sevilla*, 2: 5-25.
- Duclós Bautista, Guillermo. 1992. *Carpintería de lo blanco en la arquitectura religiosa de Sevilla*. Sevilla: Diputación Provincial.
- González de León, Félix. 1844. *Noticia artística, histórica y curiosa de todos los edificios públicos, sagrados y profanos de esta muy noble ciudad de Sevilla*. Sevilla: Imprenta de José Hidalgo.
- Huerta, Santiago; y Fuentes, Paula. 2010. Islamic domes of crossed-arches: Origin, geometry and structural behavior. *Arch' 10. 6th International Conference on Arch Bridges*. Fuzhou: College of Civil Engineering.
- Hurtado Valdez, Pedro. 2012. *Bóvedas Encamionadas: Origen, Evolución, Geometría y Construcción entre los Siglos XVII y XVIII en el Virreinato de Perú*. Tesis doctoral inédita. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- López de Arenas, Diego. 1633. *Breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes*. Sevilla: Luis Estupiñán.
- Makovicky, Emil; y Fenoll Hach-Alí, Purificación. 2000. Structure of the domes of pavilions in the Patio de los Leones, the Alhambra: a distorted octacapped truncated octahedron. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 23: 37-41.
- Nejad Ebrahimi, Ahad; y Azizpour Shoubi, Aref. 2020. The Projection Strategies of Gireh on the Iranian Historical Domes. *Mathematics Interdisciplinary Research*, vol. 5, 3: 239-257.
- Nuere Matauco, Enrique. 1980. *La carpintería de lazo. Lectura dibujada del manuscrito de Fray Andrés de San Miguel*. Málaga: Colegio Oficial de Arquitectos de Málaga.
- Nuere Matauco, Enrique. 1985. *La carpintería de lo blanco. Lectura dibujada del primer manuscrito de López de Arenas*. Madrid: Ministerio de Cultura.
- Nuere Matauco, Enrique. 2008. *La carpintería de armar española*. Madrid: Munilla-Lería.
- Nuere Matauco, Enrique; Candelas-Gutiérrez, Ángel Luis; y de Mingo García, Javier. 2020. Análisis constructivo de la cúpula de madera del desaparecido Palacio de los Cárdenas en Torrijos (S. XV). *Informes de la Construcción*, vol. 72, 559.
- Prieto y Vives, Antonio. 1932. La carpintería hispano-musulmana. *Arquitectura*, 9-10: 265-302. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos.
- San Cristóbal Sebastián, Antonio. 2006. *Nueva visión de San Francisco de Lima*. Lima: Institut français d'études andines.

## Biographies | Biografías | Biografias

## Javier de Mingo García

Arquitecto y Máster de Restauración por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Fundador del estudio LoBlanco, junto a Enrique Nuere y Elena Franco, dedicado en exclusiva a la carpintería de armar, y cuyos proyectos y restauraciones abarcan algunas de las techumbres históricas más importantes de España. Su trayectoria académica se centra asimismo en el estudio de la carpintería de armar, realizando cursos prácticos y ponencias en másteres oficiales como el Máster en Conservación y Restauración del Patrimonio Arquitectónico, el Máster en Construcción y Tecnología de Edificios Históricos o los cursos de verano de la UPM. Es profesor de Tecnología en el Grado en Arquitectura de Interiores en la ETSAM y colaborador habitual de diferentes estudios y empresas. Es el autor del blog Albanécar, dedicado a la carpintería de lo blanco y único en su género.

## Ángel María María Martín

Técnico superior en artes plásticas, lleva más de 20 años inmerso en el mundo de la carpintería histórica española y desarrolla su actividad en los ámbitos de la restauración, la obra nueva y la formación. Actualmente dirige el Centro de Interpretación de la Carpintería Mudéjar de Ávila (CICMA) donde a través de la implementación de cursos de formación se recupera el oficio de la carpintería de lo blanco. Como carpintero, centra su trabajo en la construcción de armaduras de cubierta, y en los últimos años investiga el desarrollo de nuevas alternativas para el diseño y la construcción de cúpulas de madera y la integración de la labor de lazo en la superficie esférica.