

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I
DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES A L'ARQUITECTURA

Optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura.

**Análisis de las direcciones principales identificadas por sus
líneas isostáticas.**

TESIS DOCTORAL

ROGER SEÑÍS LÓPEZ

DIRECTORES

Dr. D. RAMON SASTRE SASTRE

Dr. D. ROBERT BRUFAU NIUBÓ

Mayo de 2014

Capítulo 3 Las mallas espaciales como sistema estructural en la arquitectura

El capítulo anterior se ha concluido con un estudio básico acerca del rendimiento de estructuras tridimensionales (entramado de vigas de celosía “en K”). De acuerdo a los resultados obtenidos en dicho estudio comparativo, se infiere que el mismo planteamiento de optimización utilizado para el estudio comparativo en estructuras de dos dimensiones (vigas de celosía o armaduras), conforme a la disposición “lógica” de las barras, se puede implementar en el análisis de estructuras de mayor complejidad, en este caso, en estructuras espaciales que conforman un sistema de barras tridimensional, en lugar de un esquema estructural bidimensional.

Por lo tanto, en base al estudio comparativo en tres dimensiones realizado de acuerdo al estudio bidimensional, se desprende que las estructuras espaciales de entramado, con un mismo estado de cargas y condiciones de equilibrio, son más óptimas y eficientes cuando su diseño se adapta a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos estructurales de alma llena equivalentes bajo las acciones solicitantes ^[1].

Este paralelismo en el comportamiento y rendimiento estructural de armaduras de tres dimensiones, también conocidas, en el ámbito de la arquitectura e ingeniería estructural, como **mallas espaciales**, con respecto a las estructuras de entramado en dos dimensiones, se debe a que dicha tipología estructural en 3D es el resultado de la optimización estructural en base al aligeramiento o vaciado, al igual que ocurría en las vigas de celosía, de las estructuras espaciales resistentes de alma llena equivalentes, según las acciones a soportar y las condiciones de equilibrio, como se aprecia en la figura 3.0-1, y se infiere de las conclusiones del capítulo anterior.

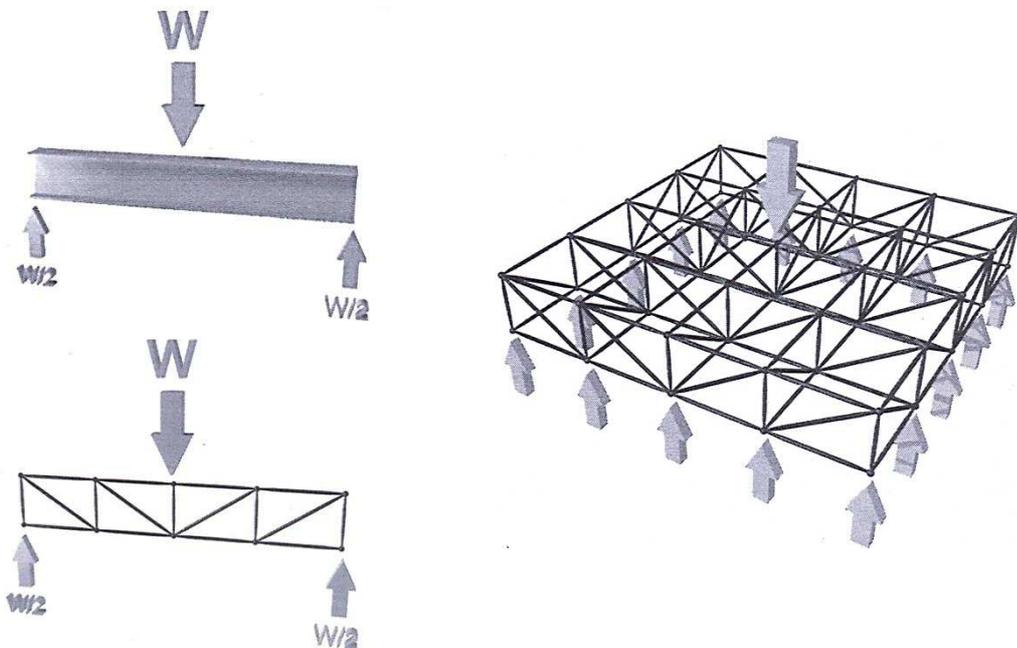


Figura 3.0-1. Analogía entre una estructura de entramado de dos dimensiones y una de tres dimensiones, en base el concepto de optimización. (Imágenes tomadas de [Chilton 2000, 13]).

[1] Señas, R.; Sastre, R.; Brufau, R.; Carbajal, E.C. (2014). *Estudio para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones, en base al análisis de sus líneas isostáticas.* [In press]

Esta extensión al concepto espacial, de dos a tres dimensiones se puede llevar a cabo, simplemente como indica Subramanian ^[2], uniendo estructuras en dos dimensiones con barras en una tercera dimensión, desde la apariencia de un formalismo estético, como se muestra en la figura 3.0-2a, obteniendo una tipología estructural que permite cubrir grandes superficies libres de soportes intermedios, como se aprecia en la figura 3.0-2b, necesarias para proyectar y construir ciertas tipologías de edificaciones como son pabellones de deportes, edificios industriales, auditorios, hangares, etc.

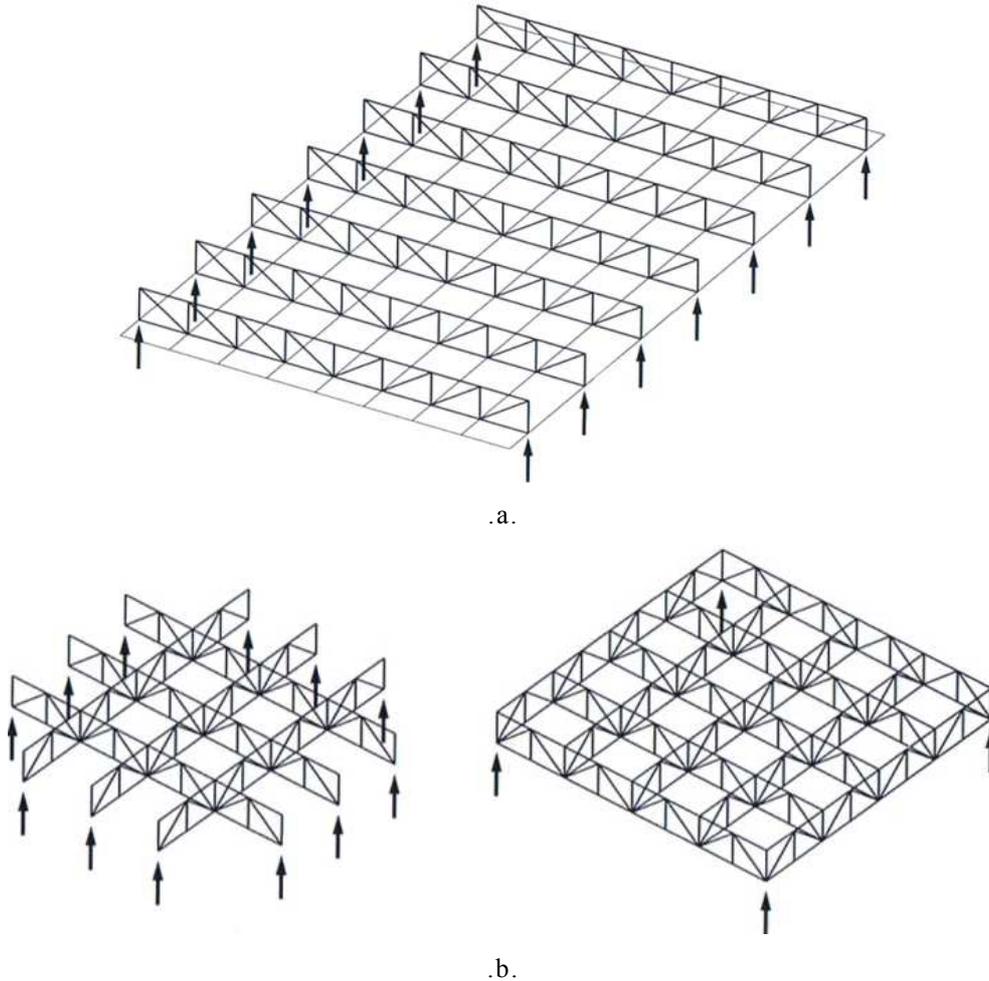


Figura 3.0-2. a) Estructura de vigas de celosías dispuestas en planos paralelos unidas con correas, b) Entramados de celosías con soportes en el perímetro o en las esquinas. (Imágenes tomadas de [Muttoni 2011, 157]).

En definitiva, destacar que las estructuras que se conciben en tres dimensiones permiten introducir la tipología estructural que conforman las **mallas espaciales**, las cuales, surgen del mismo concepto de optimización que las estructuras en dos dimensiones: el aligeramiento de las estructuras con respecto a las de alma llena equivalentes, en este caso, estructuras espaciales continuas, que pueden ser planas o curvas, con un claro objetivo de ahorrar en material y economizar las estructuras, mejorando así su eficiencia, como se aprecia en la figura 3.0-3. Este planteamiento es posible, en parte gracias a la aparición de nuevos materiales y sistemas estructurales, así como de las técnicas de industrialización y producción que van asociadas a éstas, como se tratará en el presente capítulo.

[2] Subramanian, N. (1999). *Principles of Space Structures*, p. vii.

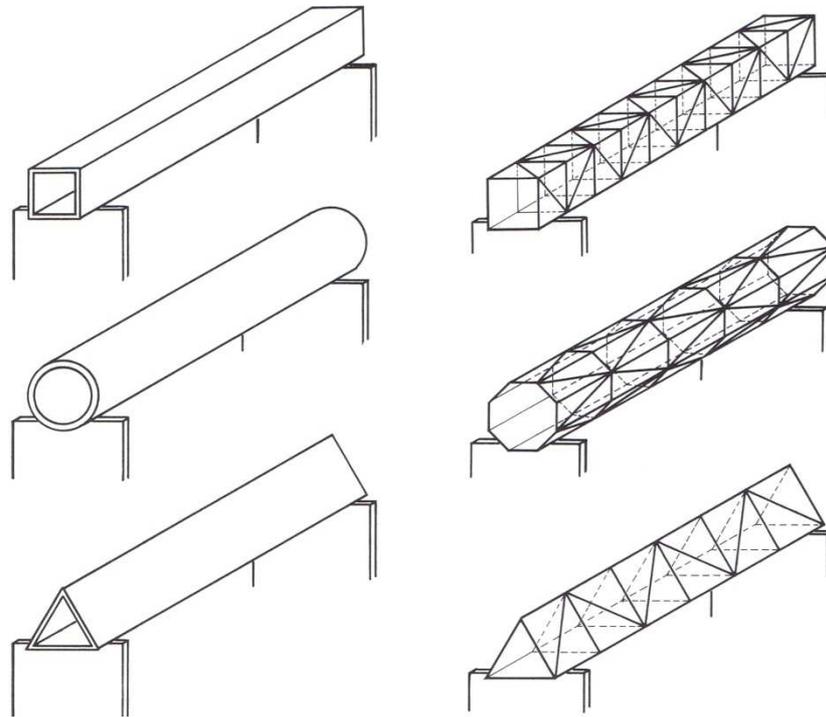


Figura 3.0-3. Formas tubulares compuestas por elementos superficiales y las correspondientes geometrías trianguladas, conformadas por barras, para su optimización estructural. (Imagen tomada de [Zannos 1987, 100]).

En la figura 3.0.4, se aprecia el mismo proceso de optimización mediante el vaciado de un elemento resistente superficial, en este caso una cúpula, para obtener su correspondiente estructura espacial compuesta por elementos lineales o barras, cuyo comportamiento se caracteriza por una mayor eficiencia estructural, en parte, gracias a su ligereza.

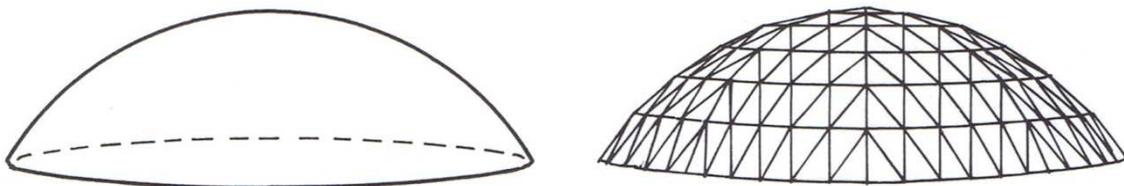


Figura 3.0-4. Estructura laminar continua en forma de cáscara y la correspondiente cúpula espacial triangulada, compuesta por barras, para su optimización estructural. (Imagen tomada de [Zannos 1987, 100]).

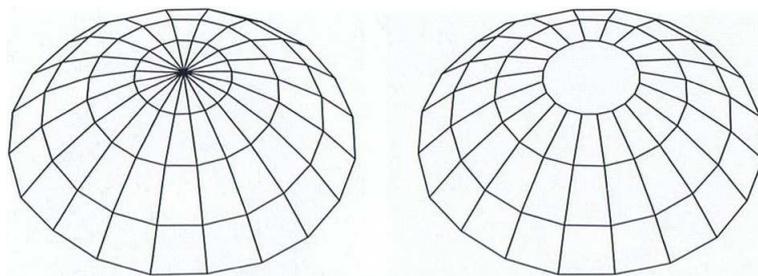
Cabe indicar que la geometría espacial de la figura 3.0-4 que, a pesar de su optimización mediante el vaciado del elemento resistente equivalente de alma llena, no identifica los esfuerzos axiales y, por lo tanto, las líneas isostáticas de compresión y de tracción.

En este sentido, en la figura 3.0.5a, se muestra la cúpula de la Galería de Vittorio Emanuele II de Milán (1865), obra del arquitecto e ingeniero italiano **Giuseppe Mengoni** (1829-1877), cuya geometría identifica las isostáticas de compresión (meridianos) y las isostáticas de tracción (anillos paralelos), de acuerdo a las cargas gravitatorias, de la misma manera que en la cúpula del Parlamento alemán (*Reichstag*) en Berlín, obra del arquitecto británico **Norman Foster** (1935-), como se aprecia en la figura 3.0.5c. Por lo tanto, las cúpulas en entramado mostradas son

un ejemplo de estructura espacial que dispone de las barras de acuerdo a las direcciones de las tensiones principales, ya sean de compresión o de tracción, para obtener un diseño en base a la optimización estructural.



.a.



.b.



.c.

Figura 3.0-5. a) Estructura espacial para la cúpula de la galería de Vittorio Emanuele II de Milán (1865), b) Esquemas de estructuras espaciales que identifican las líneas isostáticas, c) Cúpula del Parlamento alemán (*Reichstag*), en Berlín, obra de Foster. (Imágenes tomadas de [Muttoni 2011, 98] y [Charleson 2007, 46] respectivamente).

De acuerdo a las características y prestaciones arquitectónico-estructurales que proporcionan las tipologías estructurales que conforman las estructuras espaciales, permiten atender, entre otras, las necesidades de proyectos que requieren grandes superficies diáfanas y libres de soportes verticales intermedios, en base al concepto de optimización desde la forma/geometría y, en definitiva, en la concepción de estructuras de mayor eficiencia y rendimiento estructural. Ello ha permitido que se conviertan en una opción estructural ampliamente utilizada a lo largo de los siglos. Esta característica se puede observar de forma más continua desde que se realizaron las construcciones medievales y renacentistas, caracterizadas por las grandes naves, así como cúpulas de mampostería que coronan las majestuosas catedrales y basílicas como son, ejemplo de ello, San Pedro de Roma, Santa María del Fiore en Florencia o *Saint Paul* en Londres, dando paso a las tipologías estructurales, propias de la evolución material-técnico-constructiva en al ámbito de la construcción en general y de la arquitectura en particular.

Las grandes ventajas y prestaciones arquitectónico-estructurales que proporciona esta tipología estructural, generalmente metálicas, para cubrir grandes superficies, explican que haya tenido históricamente una importancia destacable en distintos proyectos, especialmente, en edificaciones arquitectónicamente significativas, como se aprecia en la figura 3.0-6, así como para la construcción de puentes en el ámbito de la ingeniería estructural, como se ha expuesto en el primer capítulo, entre otras aplicaciones de gran relevancia.



.a.



.b.

Figura 3.0-6. Cubiertas con estructura espacial mallada: a) Cubierta del *British Museum* de Londres después de la remodelación de Foster, b) Cubierta del Museo de Historia de Hamburgo a cargo de Schlaich. (Imagen propia, 2010, e imagen tomada de [Manterola Armisén 1998, 29] respectivamente).

En la figura 3.0-6 se muestran dos proyectos de reconocimiento internacional como son, por ejemplo, la remodelación del Gran Atrio de la Reina Isabel II, en el año 2000, del *British Museum* de Londres diseñado también por Foster, de característi-

cas similares a la cubierta del Museo de Historia de Hamburgo del ingeniero estructura alemán **Jörg Schlaich** (1934-). Ambos proyectos se identifican por las mallas espaciales resistentes de cubierta, aspecto característico al igual que algunas de las obras de referencia de Frei Otto (1925-), Arata Isozaki (1931-), Masimiliano Fuksas (1944-) o Shigeru Ban (1957-), como ejemplo de arquitectos de reconocido prestigio internacional a lo largo de las últimas décadas.

Esta tendencia arquitectónica, concebida y proyectada desde la estructura, es posible gracias a los avances tecno-tecnológicos, así como a la evolución de las estructuras espaciales en busca de la optimización estructural desde el diseño, y a la aparición de los ordenadores que han permitido el desarrollo de esta tipología estructural en boga y de tanta relevancia en el ámbito de la arquitectura y de la ingeniería estructural.

La confluencia de las anteriores características expuestas permite todo tipo de formas y geometrías, como indica Eekhout^[3], favoreciendo la relación del binomio que conforman el diseño arquitectónico y el concepto estructural.

En este contexto, es significativo mencionar, a modo de ejemplo, el nuevo Estadio Nacional conocido por su diseño como el “Nido de Pájaro”, mostrado en la figura 3.0-7, que se proyectó en el año 2003 y se finalizó su construcción en 2008 como estadio para los Juegos Olímpicos celebrados en Beijing en el mismo año. El proyecto del estadio Olímpico de Beijing es obra de los arquitectos suizos **Jacques Herzog** (1950-) y **Pierre de Meuron** (1950-). Se caracteriza por su audacia estética y estructural, que le otorga la imponente malla espacial exterior de acero cubierta en la parte superior por una membrana.



Figura 3.0-7. Estadio Nacional “Nido de Pájaro” proyectado y construido para los Juegos Olímpicos de Beijing celebrados en 2008. (Imagen propia, 2012).

En esta línea, cabe destacar hasta qué punto las mallas espaciales estructurales se han convertido en una tipología estructural frecuente en edificios que requieren unas altas prestaciones resistentes, de acuerdo a sus características formales y geométricas. Las características mecánicas que ofrece esta tipología la convierten en una opción estructural adecuada para resistir edificios en altura, tendencia, ésta, que se ha utilizado de forma amplia en las últimas décadas en la concepción arquitectónico-estructural, especialmente, de forma eficaz en edificios en altura como se expondrá en la parte final del presente capítulo abordándose de forma exhaustiva en el cuarto capítulo, dada la relevancia de esta temática en el desarrollo de la propia Tesis.

[3] Eekhout, M. (1989). *Architecture in Space Structures*, pp. 11 y 12.

3.1 Las estructuras espaciales

3.1.1 Concepto y características de estructuras espaciales

El término **estructura espacial** se utiliza, en el ámbito de la arquitectura y de la ingeniería estructural, para referirse a un sistema portante que envuelve tres dimensiones, formado por un conjunto tridimensional de elementos resistentes, que requiere de un espacio en tres dimensiones para desarrollar su comportamiento estructural y ser estable. Esta concepción espacial permite soportar cargas aplicadas en cualquier punto y en cualquier dirección o ángulo con respecto a la superficie de la estructura de forma que, sus acciones exteriores, fuerzas internas y desplazamientos se producen más allá de un único plano a diferencia de una estructura plana, en la cual las acciones externas e internas se encuentran, en este caso, en un único plano ^{[1][2][3][4]}.

A pesar de la complejidad que supone clasificar las estructuras espaciales, debido a la numerosa variedad de posibles formas, Makowski ^[2] establece las siguientes tres categorías diferenciadas por su comportamiento estructural y el método de análisis necesario para su comprobación:

- Estructuras de entramado (diagonalizadas/arriostradas).
- Sistemas de membranas tesadas.
- Estructuras suspendidas (cable o membrana).

De hecho, las estructuras espaciales son una denominación que sirve para referirse a un conjunto de familias estructurales como son las mallas espaciales continuas (losas, cáscaras, membranas, etc.), estructuras espaciales malladas o de entramado (partes discretas) o estructuras espaciales bifformes (partes discretas y partes continuas), para englobar los distintos tipos de formas como son vueltas de cañón, cúpulas, sistemas de membranas, formas *Tensegrity*, etc. que se construyen utilizando distintos materiales como acero, aluminio, madera, hormigón u otros materiales de construcción o una combinación de ellos ^{[1][4]}.

Como indica asimismo Eekhout ^[1], el concepto de estructura espacial se puede definir desde distintos puntos de vista:

- **Estructuralmente:** las estructuras espaciales son un sistema portante que requiere de un análisis tridimensional que no puede ser analizado en términos de cooperación de elementos en dos dimensiones o planos.
- **Topológicamente:** las estructuras espaciales en arquitectura son las estructuras destinadas al logro de un mayor espacio o superficie arquitectónica, como son las estructuras de cubierta.
- **Arquitectónicamente:** las estructuras espaciales definen un espacio impactante, envolviendo al espectador en las tres dimensiones.
- **Funcionalmente:** las estructuras espaciales requieren de un espacio en tres dimensiones para desarrollar su comportamiento resistente, y se caracterizan por sus grandes dimensiones que les permite contener un gran volumen libre.

[1] Eekhout, M. (1989). *Architecture in Space Structures*, p. 11.

[2] Makowski, Z.S. (1967). *Space structures. A short review of their development*, p. 2.

[3] Subramanian, N. (1999). *Principles of Space Structures*, p. 1.

[4] UniS (s.f.). *What is a space structure?*

Las estructuras espaciales se caracterizan por sus prestaciones arquitectónicas necesarias en proyectos que requieren de grandes superficies libres de soportes verticales intermedios. Pero además esta tipología estructural ofrece otras ventajas arquitectónico-constructivo-estructurales, las cuales se describen a continuación en acepción a Subramanian ^[5]:

- El coste elevado de la escasa mano de obra especializada ha producido su simplificación en el diseño, para obtener así geometrías y formas prefabricadas e industrializadas que permitan un ensamblaje/montaje sencillo y rápido que no requiere de encofrados caros y complejos, especialmente, en los casos de acero y madera. Así mismo, es posible el desmontaje posterior de las tipologías construidas con acero y/o madera.
- El reducido tamaño de las piezas o elementos que componen las estructuras espaciales, permiten que se puedan manejar, elevar y montar con cierta facilidad.
- Se trata de una tipología estructural apta para cubrir grandes superficies libres de pilares o soportes verticales como requieren edificios industriales, deportivos, teatros, etc.
- Las estructuras espaciales se caracterizan por su agradable apariencia y estética, otorgando al proyecto arquitectónico un interés especial.
- La alta rigidez estructural de esta tipología, facilita la disposición y colocación de los pilares o soportes, hasta el punto, que es posible cambiar su disposición si afectar de forma relevante su comportamiento e integridad.
- Ofrecen una gran rigidez para una determinado ratio entre la longitud del vano y la profundidad, la cual permite resistir grandes cargas concentradas y asimétricas, con unas deformaciones considerablemente menores gracias a su comportamiento espacial global (sistema bidireccional de malla diagonalizada de doble capa o entramado de celosías), frente al comportamiento bidimensional propio de otras tipologías estructurales como puede ser un sistema de celosías individuales dispuestas en planos paralelos. Ambos comportamientos estructurales se muestran en la figura 3.1-1, frente a una gran carga concentrada en un punto.

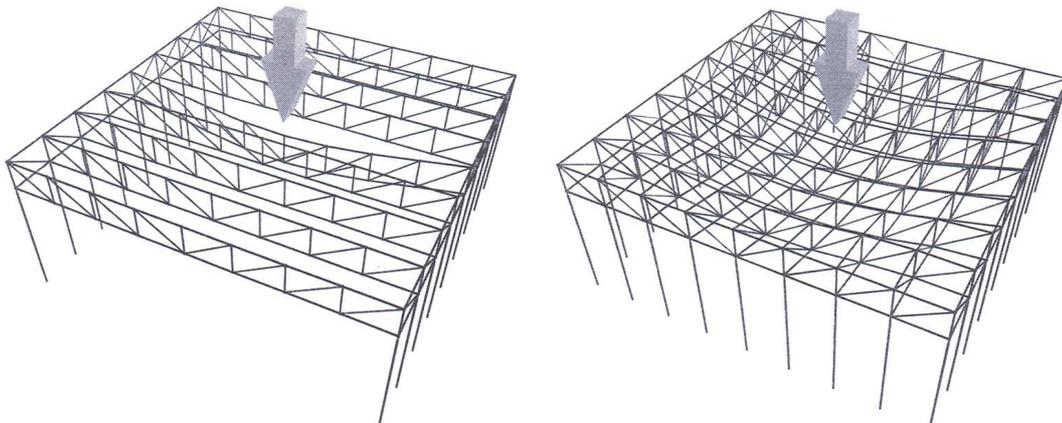


Figura 3.1-1. Deformación y comportamiento de un sistema estructural de celosías individuales paralelas y de un sistema bidireccional de entramado de celosías bajo la acción de una carga concentrada. (Imágenes tomadas de [Chilton 2000, 13]).

[5] Subramanian, N. (1999). *Principles of Space Structures*, pp. 5 y 6.

- Además de los materiales convencionales en el ámbito estructural, como son el acero, el hormigón o la madera, las mallas espaciales confieren una tipología estructural que permite el uso de otros materiales menos habituales, en dicho ámbito, como son el aluminio y el plástico.

No obstante, como indica Subramanian ^[6], las estructuras espaciales tienen algunas desventajas que cabe destacar:

- La tendencia a simplificar las formas y geometrías por cuestiones de producción y montaje se convierten en una limitación en cuanto al diseño se refiere.
- Las uniones de las estructuras espaciales supone un coste elevado con respecto al resto de la estructura, así como el encofrado en el caso de estructuras de hormigón de cierta complejidad.
- En el caso de la ejecución de las estructuras espaciales en el suelo, su erección puede resultar costosa.
- Pueden surgir problemas durante el proceso de diseño, pero también durante el proceso de montaje (problemas de precisión, etc.).

Por lo general, como se desprende de las ventajas y desventajas previamente descritas, las estructuras espaciales se convierten en una tipología estructural que ofrece importantes prestaciones arquitectónicas, pero también constructivas y estructurales. A lo largo de la historia se han utilizado en distintas construcciones, ya fueran las más primitivas, pasando por las majestuosas edificaciones medievales y renacentistas, a las cuales se les hizo referencia en el primer capítulo.

En este sentido, cabe destacar la utilización de forma asidua de las estructuras espaciales en el diseño y construcción de distintos proyectos vanguardistas de gran relevancia como son por ejemplo, las estructuras de cáscara delgada, proyectadas por arquitectos e ingenieros estructurales tan influyentes como son Anton Tedesco (1903-1994), a quien se le atribuye, en gran parte, el éxito de las estructuras de cáscara fina construidas en Estados Unidos de América; Pier Luigi Nervi (1891-1979), ingeniero italiano que popularizó las geometrías curvas complejas en hormigón armado mediante obras como el hangar de aviones de Orbetello (1936-1940) y la sala de exposiciones de Turín (1948-1950); Eduardo Torroja Miret (1899-1961), ingeniero de caminos, así como su alumno Félix Candela (1910-1997), han sido algunos de los referentes mundiales por sus significativas obras, como indica South ^[7], las cuales se han tratado de forma amplia en el primer capítulo.

En el caso de estructuras espaciales de entramado de barras, cabe destacar las grandes prestaciones de esta tipología, en base a su concepto esencial: la relación dimensiones/peso de la estructura, de forma que constituyen una solución constructivo-estructural que se caracteriza por su ligereza, sin mermar su rigidez estructural global, constituyendo, así una tipología estética y visualmente agradables ^[6].

Efectivamente, estas características geométricas (forma) y estructurales (función), propias de las mallas espaciales resistentes, elevan a la máxima potencia la relación esencial en el desarrollo de la presente Tesis: **la relación función-forma**. Es por ello, que se requiere de una búsqueda histórico-evolutiva, la cual se tratará a continuación, que permita establecer el grado de relevancia de las mallas espaciales como elemento estructural en la arquitectura vanguardista y moderna de las últimas décadas.

[6] Subramanian, N. (1999). *Principles of Space Structures*, pp. 5 y 6.

[7] South, N. (2009). *The History of Thin-shells and Monolithic Domes*.

3.1.2 Las mallas espaciales como elemento estructural

Una **mall**a espacial, también conocida como armadura de tres dimensiones, como se ha expuesto anteriormente, es una estructura formada mediante la unión de barras que forman un sistema tridimensional, de forma que los esfuerzos, de acuerdo a las acciones solicitantes, se distribuyen en las tres dimensiones del espacio. Por ello, también son conocidas como estructuras tridimensionales o estructuras espaciales. En acepción a la *International Association of Spatial Steel Structures IASS*, (“Asociación Internacional de Estructuras Espaciales de Acero”), las estructuras espaciales se definen consecuentemente de la siguiente manera:

“La mall

a espacial es un sistema estructural ensamblado de elementos lineales dispuestos de modo que las fuerzas se transmiten tridimensionalmente. En algunos casos, los elementos constitutivos pueden ser bidimensionales. Macroscópicamente, una malla espacial a menudo toma la forma de una superficie plana o curva.”

IASS (1984), citado por [Subramanian 1999, 1].

El aspecto que caracteriza las mallas espaciales de entramado es su ligereza, a la vez que su rigidez, de acuerdo al concepto de optimización estructural en el cual se basa su concepción, la desmaterialización o vaciado de las estructuras de alma llenas equivalentes, como se ha expuesto en la parte inicial del presente capítulo, y se ejemplifica de forma esquemática en la figura 3.1-2, en base a la optimización de geometrías poliédricas básicas (tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro), y el comportamiento de sus respectivas estructuras de entramado de barras.

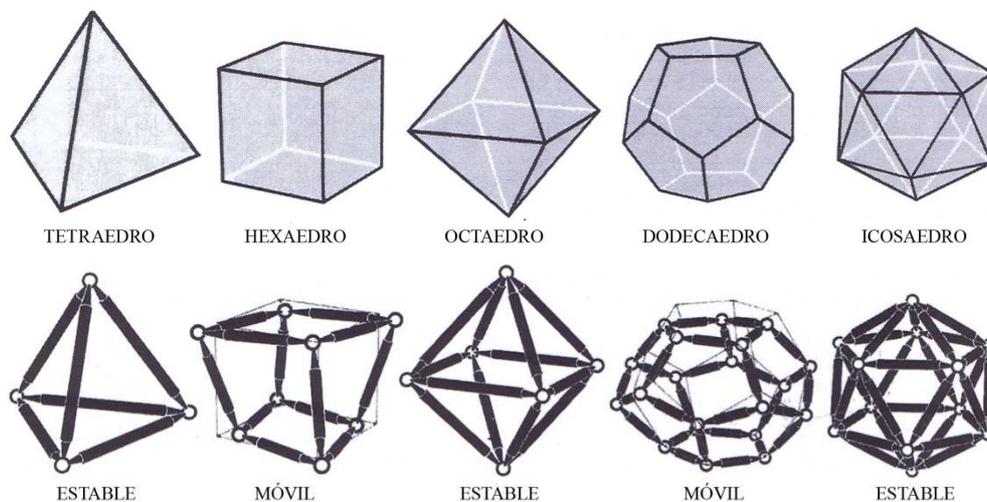


Figura 3.1-2. Poliedros (tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro) y el comportamiento de sus respectivas estructuras de entramado de barras. (Notación adaptada de [Chilton 2000, 16]).

La eficiencia estructural de las mallas espaciales se debe al mismo concepto que a las vigas de celosía trianguladas, ya que se caracterizan por ser estructuras geoméricamente acordes al principio de las pequeñas deformaciones, (producidas por esfuerzos axiales, de acuerdo a la ley de Hooke), como se infiere de las geometrías 1, 3 y 5, (tetraedro, octaedro e icosaedro), de la figura 3.1-2. Estas características le confieren unas altas prestaciones estructurales, y por ello, es un sistema estructural ampliamente utilizado en el ámbito de la arquitectura e ingeniería estructural, y en constante evolución a lo largo de las últimas décadas como se expone a continuación.

3.1.3 Evolución histórica de las mallas espaciales en la arquitectura

El inicio de las estructuras de mallas espaciales, en el ámbito de la arquitectura, se remontan al periodo que va de 1806 a 1811 con el diseño y la construcción de la primera cúpula mallada de hierro del mundo: el *Halle au Blé* en París. El mercado del trigo de París, el cual se muestra en la figura 3.1-3, es un edificio de planta circular obra del arquitecto francés **François-Joseph Bélanger** (1744-1818) y del ingeniero **François Brunet** (-), cubierta por una cúpula hemisférica de hierro fundido de 40 metros de diámetro, aprovechando los conocimientos técnicos de los ingenieros de la época derivados de la construcción de puentes ferroviarios que cubrían grandes luces, demostrando así la alta fiabilidad depositada en la utilización del hierro como material para la construcción ^{[8][9][10]}.

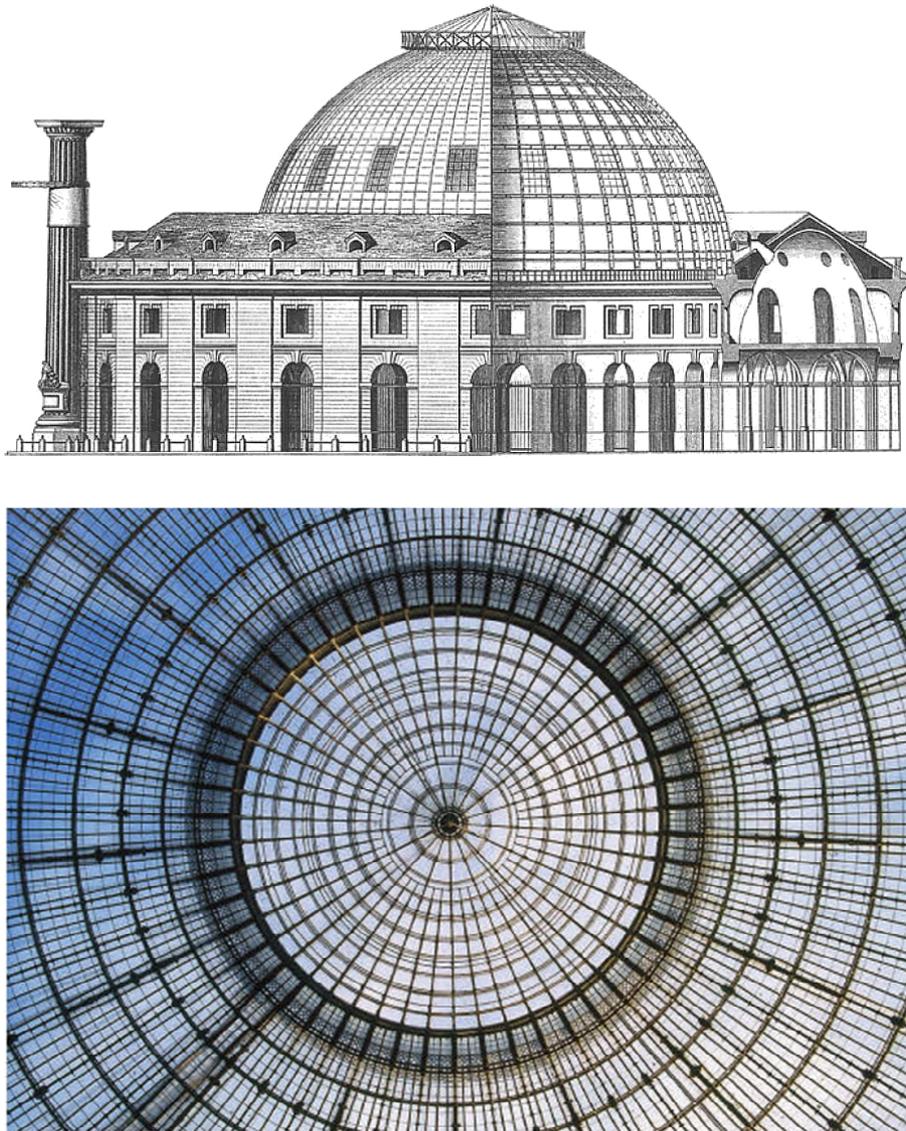


Figura 3.1-3. Cúpula con esqueleto de hierro fundido del edificio circular *Halle au Blé* en París. (Imágenes tomadas de [Prieto 2013/2014, 19] y [Wurm 2007, 11] respectivamente).

[8] Federov, S.G.; (1996). *Early Iron Domed Roofs in Russian Church Architecture: 1800-1840*, p. 44.

[9] Eekhout, M. (1989). *Architecture in Space Structures*, p. 12.

[10] Strike, J. (2004). *De la construcción a los proyectos: La influencia de la nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000*, p. 34.

Unos años más tarde, en Inglaterra, se diseñaron y construyeron las primeras cúpulas de hierro. Entre 1815 y 1823, se levantó la primera cúpula inglesa de hierro sobre el *Royal Pavilion* de Brighton, antigua residencia real que inició sus obras en 1786, a cargo del arquitecto **John Nash** (1752-1835), entre otros. En 1827, se construyó el invernadero de la *Syon House*, diseñada por el arquitecto inglés **Charles Fowler** (1792-1867), y cubierta asimismo por una cúpula de hierro ^[11].

A estas primeras construcciones en base a mallas espaciales de hierro, les siguieron otras construcciones de grandes dimensiones y prestaciones, especialmente para el uso de invernaderos, como son el *Great Stove* (Chatsworth, 1836-1840), *Palm House* (Kew Gardens, 1845) o el *Crystal Palace* en Hyde Park (Londres, 1851) de **Joseph Paxton** (1803-1865) para albergar la Gran Exposición Mundial celebrada en 1851, el cual se muestra en la figura 3.1-4, estableciendo, así, una tipología estructural para cubrir grandes dimensiones, convirtiéndose en un hito de la Revolución Industrial y una construcción sin precedentes (600 x 120 metros en planta ^{[12][13][14]}).



Figura 3.1-4. Vista del *Crystal Palace* en Hyde Park construido en 1851 en Londres. (Imagen tomada de [Prieto 2013/2014, 46]).

Pero sin duda, en cuanto a cúpulas portantes de entramado metálico se refiere, es oportuno destacar la figura del ingeniero **Johann Wilhelm Schwedler** (1823-1894), a quien se considera el inventor de las cúpulas de este tipo, al ser el primero en hacer la transición a una cúpula que trabajara en las tres dimensiones. Es de relevancia mencionar que hasta esa fecha, las cúpulas se calculaban como armaduras planas dispuestas radialmente, sin considerar la transmisión de la cargas en tres

[11] Eekhout, M. (1989). *Architecture in Space Structures*, p. 12.

[12] Chilton, J. (2000). *Space grid structures*, p. 1.

[13] Costales Calvo, I. (2012). *El pretensado en las estructuras de acero*, p. 29.

[14] Prieto, E. (2013/2014). *Arquitectura y urbanismo del siglo XIX: Arquitectos e Ingenieros*, pp. 30-49.

dimensiones. Por ello, Schwedler puede ser considerado un pionero en el diseño, el análisis y la construcción de cúpulas, en base al entramado de barras que recibió su nombre, cúpula Schwedler, ampliamente utilizada hasta el año 1900 ^[15].

Algunos de los proyectos de Schwedler fueron la estructura en forma de cúpula sobre el *Imperial Continental Gas Association*, construida en 1861, la cúpula ejecutada en 1863 para cubrir el gasómetro en *Holzmarktstraße 28*, ambas en Berlín o la cúpula portante que construyó en 1875 para la fábrica de gas en *Fichtestraße*, Berlín-Kreuzberg, con unas dimensiones de 54,9 metros de diámetro y 12,2 metros de altura que actualmente existe, y la cual se aprecia en la figura 3.1-5. El sistema estructural propuesto por Schwedler se caracteriza por ser estáticamente indeterminado, no siendo válido el método clásico de análisis de barras ^[15].

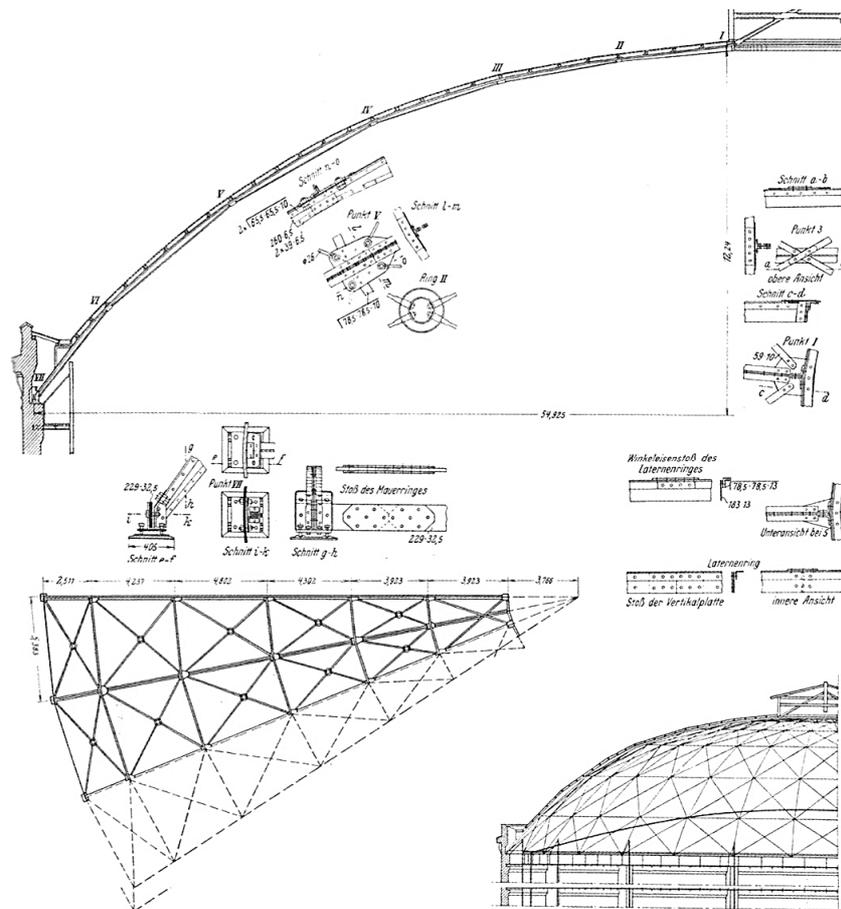


Figura 3.1-5. Cúpula Schwedler sobre la fábrica de gas en *Fichtestraße*, 1875. (Imagen tomada de [Kurrer 2008, 477]).

Por lo tanto, la geometría propuesta por Schwedler para el diseño y construcción de cúpulas, requirió de un planteamiento previo simplificado, “definiendo su cúpula como una forma curva continua elástica en dos dimensiones, para poder resolverla” como indica Kurrer ^[15]. Posteriormente el ingeniero alemán **August Otto Föppl** (1854-1924) desarrolló un método, en base a la aproximación de Schwedler, para incluir otras estructuras de entramado diagonalizadas en forma de cáscara, utilizado hasta la aparición de los ordenadores, en los años 60 (siglo XX), para el análisis de este tipo de estructuras espaciales en base a la cúpula Schwedler, como refiere Kurrer ^[15].

^[15] Kurrer, K.-E. (2008). *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, pp. 475 y 476.

Föppl, profesor de Estática Gráfica en la Universidad Técnica de Munich, fue uno de los primeros científicos que centró parte de su trabajo en la investigación para el desarrollo de cerchas de acero en 3D. Este trabajo formó parte de sus estudios acerca de la estática tridimensional, además de otros campos como la dinámica de fluidos y el electromagnetismo. Föppl, escribió el primer libro acerca de la Teoría de estructuras o sistemas espaciales de entramado, titulado, *Theorie des Fachwerks*, sobre la Teoría de sistemas de entramado, en 1880 ^[16]. Estableciendo, así, teorías sobre el cálculo de estructuras de entramado, las cuales en un principio no tuvieron muchos seguidores, aunque uno de ellos fue **Alexandre Gustave Eiffel** (1832-1923), en base a la monografía titulada *Das Fachwerk im Raume*, publicada en 1892 ^[17], acerca del comportamiento de entramados espaciales, consecuencia de su investigación, sobre la formación de estructuras espaciales y las leyes estructurales estáticas, que incluía el método de Föppl ^{[18][19][20]}, previamente mencionado. Como indica Kurrer ^[19], Föppl también propuso en 1883 un sistema de cúpula de entramado, pero que no publicó el método de cálculo hasta tiempo después ^[21].

Atendiendo a Kurrer ^[19], en la misma línea del diseño de cúpulas de entramado iniciada por Schwedler, cabe destacar la aportación e innovación de los ingenieros **Hermann Zimmermann** (1845-1935) y **Wilhelm Schlink** (1875-1968) durante la fase clásica, la cual se establece aproximadamente entre los años 1875 y 1900, en el diseño y construcción de cúpulas portantes de entramado, y que fue secundada por la evolución de la teoría estructural clásica a cargo de autores como los que se exponen a continuación:

- Heinrich Franz Bernhard Müller-Breslau (1851-1925), [1891/1892, 1898, 1899/a, 1899/b, 1902, 1903/b, 1903/c, 1903/d].
- Otto Mohr (1835-1918), [1876, 1902/a, 1902/b, 1903].
- Ernst Lebrecht Henneberg (1850-1933), [1886, 1894, 1902, 1903, 1911].
- Wilhelm Schlink (1875-1968), [Schlink 1904, 1907/a, 1907/b].

Como indican Kurrer ^[19] y Makowski ^[22], posteriormente, la teoría de las estructuras espaciales de entramado tuvo continuidad con la época de consolidación entre los años 1900 y 1950, periodo en el cual destacan las obras que describen, en base a la Estática Gráfica, la técnica de la proyección ortogonal en planos verticales y horizontales desarrollada, ente otros, por los siguientes autores:

- Benjamin Mayor (-), [Mayor 1910, 1926].
- Richard Edler von Mises (1883-1953), [von Mises 1917].
- William Prager (1903-1980), [Prager 1926, 1927].
- Robert Sauer (-), [Sauer 1940].

En el caso de Zimmermann que siguió los pasos de Schwedler proponiendo un nuevo diseño que desarrolló con la ayuda del arquitecto **Paul Wallot** (1841-1912), obteniendo una ingeniosa cúpula que recibió el nombre de cúpula Zimmermann

[16] Föppl, A.O. (1880).

[17] Föppl, A.O. (1892).

[18] Eekhout, M. (1989). *Architecture in Space Structures*, p. 12.

[19] Kurrer, K.-E. (2008). *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, pp. 475, 476, 478 y 485.

[20] Subramanian, N. (1999). *Principles of Space Structures*, p. 2.

[21] Föppl, A.O. (1888). *Das Fachwerk im Raume*.

[22] Makowski, Z.S. (1967). *Space structures. A short review of their development*, pp. 2 y 3.

(1889/1890), cuya resolución se basa en un novedoso método de cálculo que no reveló hasta once años después, en concreto en 1901 ^[23], el cual le permite eliminar valores de fuerzas desconocidas, obteniendo, así, una estructura estáticamente determinada ^[24].

Ya en la fase final de la etapa clásica (1875-1900) y a principios del periodo de consolidación (1900-1950), en la evolución de la teoría de mallas espaciales, cabe destacar las cúpulas de Schlink, que propuso altamente influenciado por las geometrías analizadas por sus predecesores, Schwedler y Zimmermann. Todas ellas se muestran en la figura 3.1-6. Se caracterizaban por estar conformadas con perfiles de acero laminado, ensamblados mediante uniones remachadas que unían barras de distintas dimensiones. La evolución de las mallas espaciales, en este periodo, estuvo íntimamente ligada a la era de la productibilidad técnica que derivó en la Segunda Revolución Industrial ^[23].

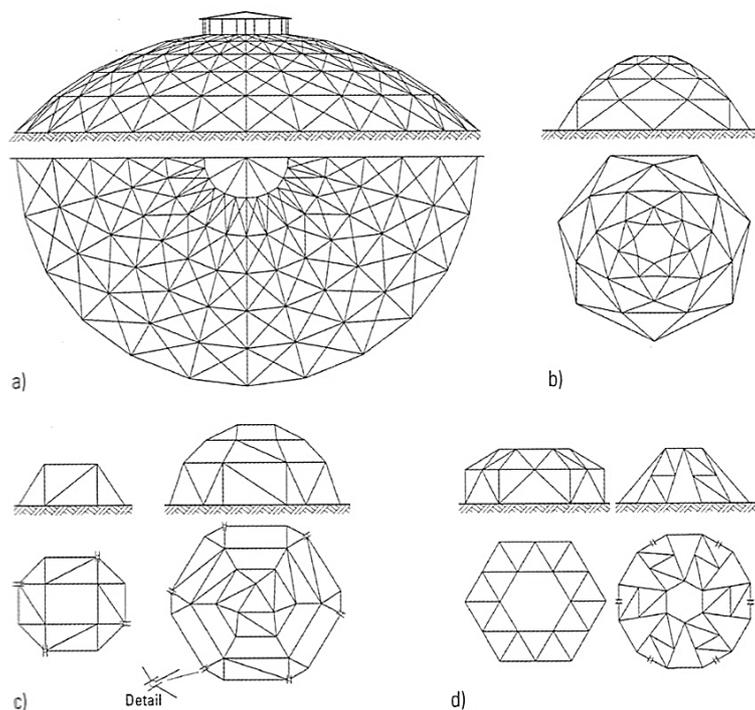


Figura 3.1-6. a) Cúpula Schwedler, b) Cúpula Föppl, c) Cúpula Zimmermann, d) Cúpula Schlink. (Imagen tomada de [Kurrer 2008, 485]).

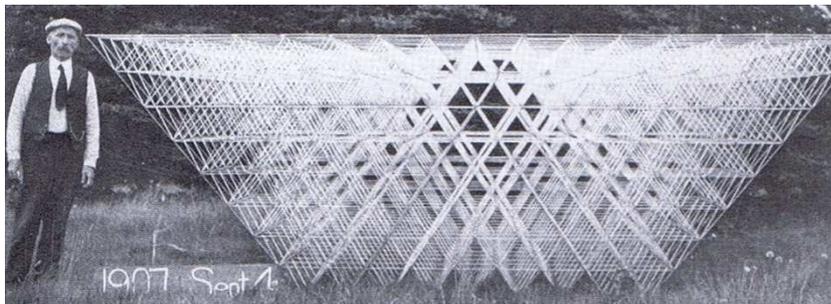
Estas primeras referencias geométrico-constructivas, acerca de las estructuras espaciales de entramado de Schwedler (1863, 1875), Föppl (1883), Zimmermann (1889/1890) y Schlink fueron la base de la evolución de esta tipología estructural que tuvo un periodo de consolidación entre 1900 y 1950, de acuerdo a distintos proyectos de innovadoras características constructivo-técnicas a cargo de influyentes seguidores como Alexander Graham Bell (1847-1922), Vladímir Shújov (1853-1939), Walther Bauersfeld (1879-1959) y Franz Dischinger (1887-1953), Richard Buckminster Fuller (1895-1983), Zygmunt Makowski (1922-) y **Max Mengerinhausen** (1903-1988), como indica Kurrer ^[24], especialmente tratados por Mengerinhausen por su influencia en el diseño, cálculo, producción y construcción de estructuras de mallas espaciales, debidas al sistema de construcción tubular para

^[23] Zimmermann, H. (1901). *Über Raumfachwerke, neue Formen und Berechnungsweisen für Kuppeln und sonstige Dachbauten*.

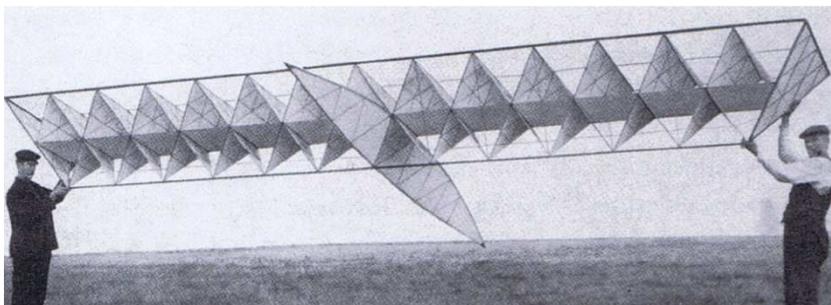
^[24] Kurrer, K.-E. (2008). *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, pp. 475, 476, 478 y 485.

estructuras de entramado que recibió el nombre, en 1942, de **MERO** (MEngeringhausen ROhrbauweise). El sistema introducido Mengerlinghausen estuvo disponible comercialmente en 1943, y fue de especial relevancia durante los años de la década de 1970 a 1980, como una aplicación informática que actualmente es conocida como MERO-TSK Group ^{[25][26][27][28]}.

Sin embargo, fue el inventor y científico **Alexander Graham Bell** (1847-1922), conocido principalmente por ser el inventor del teléfono pero, también, por sus investigaciones en otros sectores como el naval, el de la aviación, el diseño estructural, medicina, ingeniería eléctrica o biología, entre otros. Popularizó las estructuras de entramado espaciales entre la población con sus diseños hacia 1900. Bell realizó los primeros diseños de mallas espaciales metálicas multicapa de tetraedros prefabricadas en 1907, mostrada en la figura 3.1-7a, con el fin de desarrollar estructuras muy rígidas para el sector naval, pero especialmente para el ámbito de la ingeniería aeronáutica, una tecnología que empezaba a nacer con fuerza en aquella época. En el mismo año, coincidiendo con su etapa en Canadá, diseñó y construyó un modelo de aeroplano con una estructura formada por un sistema espacial de barras de madera cubierto con lona, como se aprecia en la figura 3.1-7b. Posteriormente, Bell desarrolló un aeroplano capaz de transportar personas ^{[26][28][29]}.



.a.



.b.

Figura 3.1-7. Sistemas espaciales de barras de Bell: a) Primera malla espacial multicapa de tetraedros prefabricada, b) Modelo de planeador. (Imágenes tomadas de [Kurrer 2008, 486]).

Cabe destacar la relevancia del sistema estructural espacial propuesto por Bell, ya que se caracterizaba por su técnica de ensamblaje de barras para, en acepción a Kurrer ^[26], “formar una unidad tecnológica materializada en base a la función, a la construcción y a la forma natural de manera artística”. Bell diseñó, así, nuevas formas que crearon tendencia y fueron desarrolladas desde el punto de vista cientí-

[25] Chilton, J. (2000). *Space grid structures*, p. 2.

[26] Kurrer, K.-E. (2008). *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, pp. 478, 486, 487 y 490.

[27] Makowski, Z.S. (1967). *Space structures. A short review of their development*, p. 1.

[28] Muttoni, A. (2011). *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture*, p. 158.

[29] Eekhout, M. (1989). *Architecture in Space Structures*, pp. 12 y 13.

fico-técnico para establecer nuevas técnicas de construcción que emergieron, en el ámbito de la edificación, durante el Estilo Racionalista que surgió en los años de la década de 1920 a 1930, como se tratará de forma amplia en el próximo capítulo.

También es de suma relevancia destacar, en el ámbito de las estructuras espaciales de entramado, el impresionante trabajo del ingeniero y científico **Vladimir Shújov** (1853-1939), que inventó, diseñó y calculó estructuras espaciales que se caracterizaban por su simplificado proceso de producción, pero especialmente por su ligereza, en comparación con otras de las mismas características, reduciendo así de forma significativa el peso propio de las estructuras, como eran los sistemas espaciales para cubiertas. Shújov, siendo ingeniero jefe en la empresa Bari, la cual tenía la sede en Moscú, utilizó sus nuevos diseños en cubiertas para cubrir ocho pabellones de la exposición que se celebró en la ciudad rusa de Nizhni Nóvgorod, en el año 1896, en la cual aprovechó para exhibir la torre estructural de forma hiperbólica que proyectó para la construcción de torres de agua, antenas de radio y postes de electricidad.

La torre de electricidad, que consta de cinco secciones para una altura total de 128 metros, se sitúa en la orilla del río Oka cerca de Dzerzhinsk, y es la única torre con malla de doble diagonal ^[30], tal como se muestra en la figura 3.1-8.

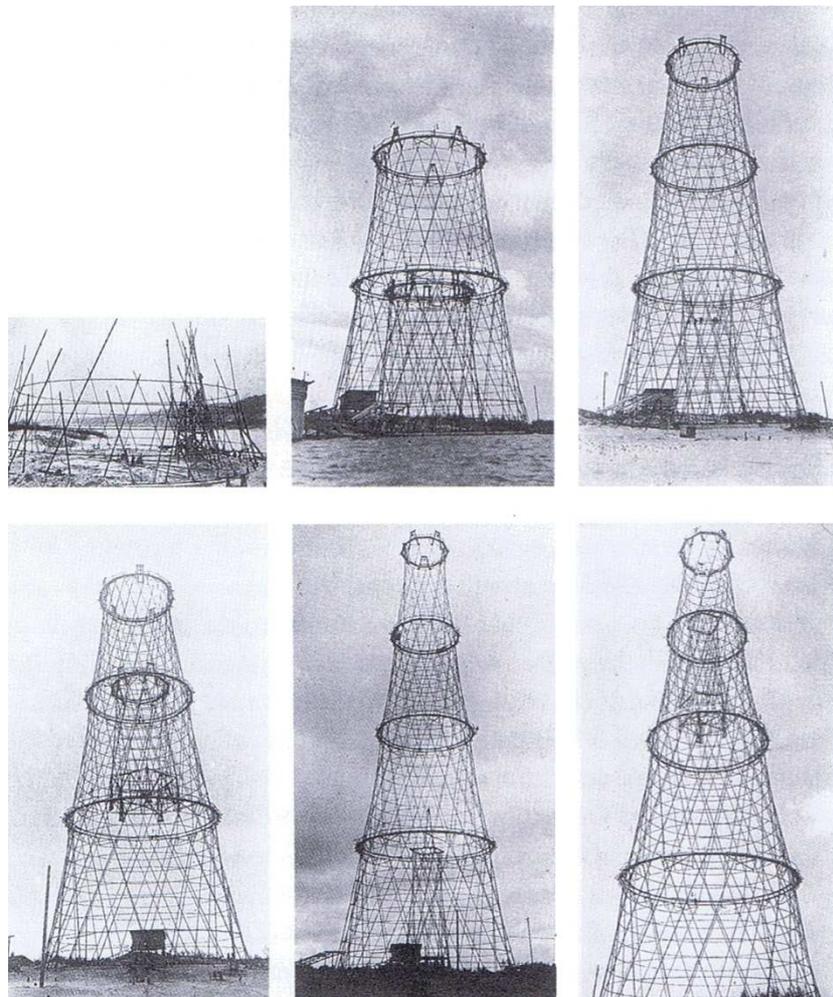


Figura 3.1-8. Montaje torre de electricidad de 128 metros de altura (1927-1929) de cinco secciones para cruzar el río Oka. (Imagen tomada de [Kurrer 2008, 488]).

^[30] Kurrer, K.-E. (2008). *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, p. 487.

Los ingenieros alemanes **Walther Bauersfeld** (1879-1959) y **Franz Anton Dischinger** (1887-1953), proyectaron en el año 1912 una cúpula óptica de 16 metros de diámetro, bajo el encargo de la compañía alemana *Carl Zeiss Optical Works Corporation*, en la cubierta del edificio ubicado en Jena, propiedad del reconocido óptico Carl Zeiss (1816-1888), para poder construir el observatorio que les permitiera el seguimiento de los cuerpos celestes. El proyecto que se muestra en la figura 3.1-9, se desarrolló bajo la supervisión de la firma *Dyckerhoff & Widmann AG*, también conocida como *Dywidag*, en la cual Dischinger estaba como ingeniero jefe, mientras que Bauersfeld era empleado de Zeiss ^{[31][32]}.



Figura 3.1-9. Planetario de Jena, proyectada por Bauersfeld y Dischinger en 1912, y construida por la compañía *Dywidag* en 1923. (Imagen tomada de [Manterola Armisén 1998, 22]).

La cúpula proyectada por Bauersfeld y Dischinger, construida en los años posteriores a la I Guerra Mundial, se considera la primera cúpula geodésica, finalizada en 1923 y que proyectó el planetario por primera vez en 1925. Es conocida como la cúpula de *Zeiss-Dywidag* de acuerdo al sistema *Zeiss-Dywidag* que consiste en una cáscara resistente de dieciséis metros de diámetro con un total de 3.480 lados en base a una estructura rígida espacial de hormigón gunitado ^{[32][33]}, como se muestra en la figura 3.1-10.

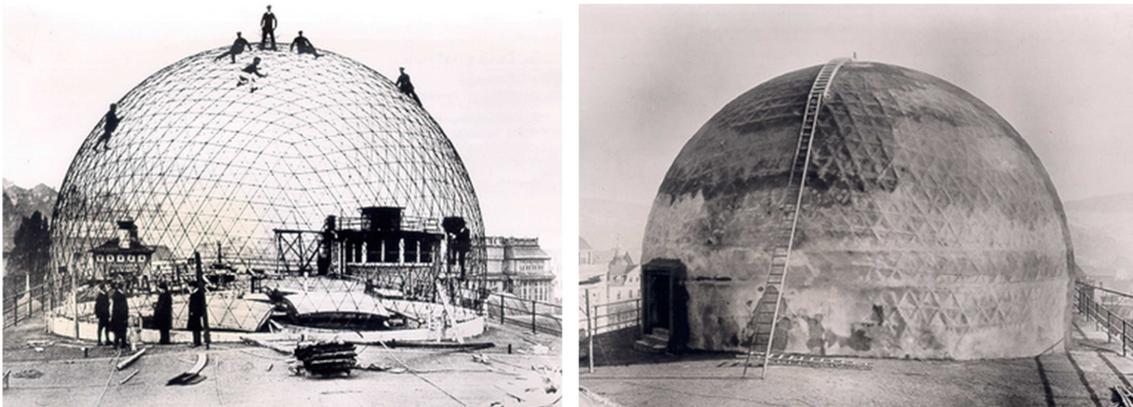


Figura 3.1-10. Construcción de la cúpula del planetario de Jena, en 1923. (Imágenes tomadas de [Domos Geodésicos 2006]).

[31] Kurrer, K.-E. (2008). *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, p. 488.

[32] Domos Geodésicos (2006). <http://domosgeodesicos.blogspot.com/2009/10/historia-walter-bauersfeld-los-primeros.html>.

[33] South, N. (2009). *The History of Thin-shells and Monolithic Domes*.

El sistema *Zeiss-Dywidag* de cáscara estructural delgada de hormigón utilizado para la construcción del Planetario de Jena, lo patentó en Estados Unidos de América el ingeniero estructural **Anton Tedesko** (1903-1994), uno de los máximos exponentes de esta tipología constructiva, la cual aprendió cuando estuvo trabajando para la empresa de Carl Zeiss en Europa. La licencia de la patente estructural fue para la empresa Roberts & Company ^[34].

Por lo tanto, la cúpula del Planetario de Zeiss, fue la primera cúpula geodésica construida, veinte años antes que las que proyectó y popularizó **Richard Buckminster Fuller** (1895-1983), como se tratará posteriormente, que caracterizó sus obras basándose en las formas geométricas de la naturaleza, ya que se caracterizan por su excepcional rigidez estructural y ligereza, como indica Makowski ^[35], en base al lema de Fuller que exponía sucintamente este concepto de optimización, siguiendo la ley de la naturaleza:

“Ganancia máxima de las ventajas con la mínima entrada de energía.”

Richard Buckminster Fuller, citado por [Makowski 1967, 1].

Esta idea de eficiencia, de aplicación en el ámbito tecnológico en general, y en el de las estructuras en particular, era ampliamente compartida por el ingeniero francés **Robert Le Ricolais** (1894-1977), profesor e investigador de la Universidad de Pennsylvania de EE.UU. que argumentaba consecuentemente:

“En cualquier investigación estructural concerniente a la forma, es útil observar el repertorio de formas naturales.”

Robert Le Ricolais, citado por [Mimram 1983, 24].

Como indican Makowski ^[35], Mimram ^[36] y Subramanian ^[37], Le Ricolais, en 1940, analizó la configuración del esqueleto de ciertas formas naturales, como es el Radiolario (*Tuscaretta globosa*), mostrado en la figura 3.1-11, para el estudio de sistemas espaciales tridimensionales. Le Ricolais se inspira en esta especie marina de forma esférica, la cual se caracteriza por tener en la superficie un esqueleto estructural de forma geodésica, como una solución para resolver ciertos problemas particulares para el ahorro del material desde el diseño de las mallas estructurales, siendo por ello uno de los máximos exponentes de las estructuras espaciales. Le Ricolais las define, en base a la forma del Radiolario, de la siguiente manera:

"Tal vez los radiolarios permitan algunas analogías que nos ayudarán a resolver algunos problemas, pero creo que también es importante encontrar una solución determinada, que sirva para crear una visión global del problema.

[...] Estos extraordinarios y hermosos organismos pequeños marinos despliegan una variedad de artificios técnicos que superan, por mucho, la tecnología actual, que plantea problemas insuperables para nosotros, no sólo las condiciones físicas de su hábitat, sino también mucho más, como ejemplo de crecimiento y reproducción”.

Robert Le Ricolais (1950), citado por [Mimram 1983, 24 y 25].

[34] South, N. (2009). *The History of Thin-shells and Monolithic Domes*.

[35] Makowski, Z.S. (1967). *Space structures. A short review of their development*, pp. 1 y 2.

[36] Mimram, M. (1983). *Structures et formes. Étude appliquée à l'œuvre de Robert Le Ricolais*, p. 24.

[37] Subramanian, N. (1999). *Principles of Space Structures*, p. 2.

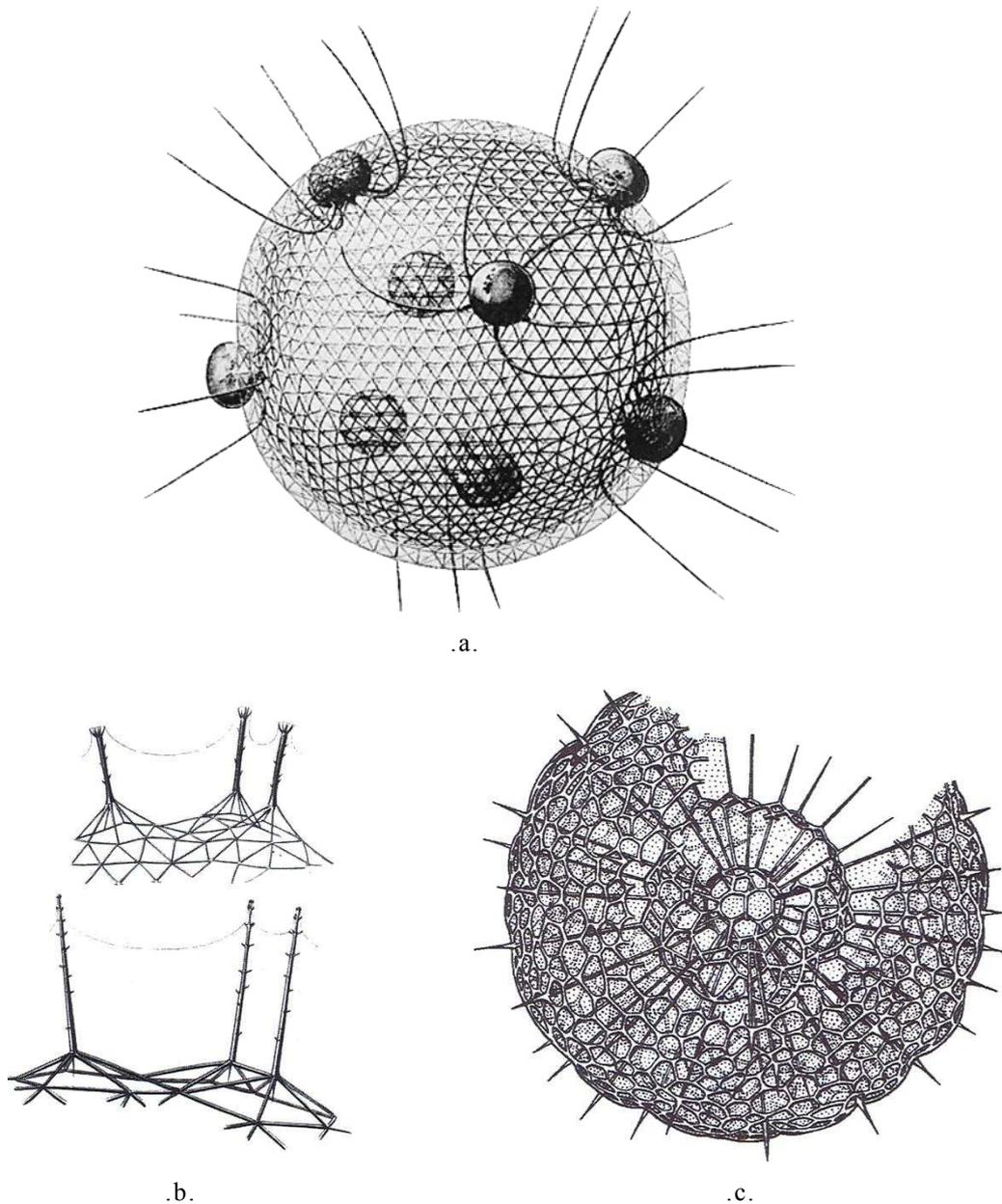


Figura 3.1-11. a) Forma geodésica de malla en el esqueleto estructural de la Radiolaria *Tuscaretta Globosa*, b) y c) Estructuras de Radiolarios según Le Ricolais, en 1940. (Imágenes tomadas de [Makowski 1967, 2], [Mimram 1983, 25] y [Thompson 2003, 156] respectivamente).

Cabe destacar que, aunque no realizara prácticamente ninguna construcción, Le Ricolais centró su investigación en el desarrollo de distintas estructuras experimentales y modelos teóricos que influyeron, de forma significativa, en posteriores vías arquitectónicas de alta tecnología. La contribución de Le Ricolais permite acotar el significado de la invención de las estructuras espaciales como una forma completa de entender el problema tensional y la relación entre la materia, la forma y la solución más óptima posible. Las propuestas de Le Ricolais daban respuesta a las pretensiones constructivas para lograr grandes luces y capacitar grandes volúmenes con estructuras de mínimo peso propio, mediante la conjunción de técnicas basadas en un óptimo “trabajo por la forma” [38][39].

[38] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, p. 53.

[39] Brufau Niubó, R. (1998/99). *Introducció a les estructures. Les funcions de l'estructura*, p. 22.

Pero fue sin duda, el mencionado diseñador e ingeniero Fuller, quien promocionó, tomando las referencias previamente expuestas, las mallas espaciales en el mundo de la arquitectura adquiriendo esta tipología un papel de mayor relevancia con respecto al que tenía hasta la fecha. Fuller lo consiguió reinventando las cúpulas geodésicas en los años 50 del siglo XX, siendo considerado su inventor, a pesar que ya se hubieran construido previamente, ya que a él le pertenece la patente de las cúpulas geodésicas del año 1954. Fuller las desarrolló en las década de los 40, pero su punto álgido se produce en el año 1967, en la Exposición Internacional de Montreal, con la cúpula geodésica más conocida, correspondiente al pabellón de Estados Unidos con un diámetro de 76 metros y 41,5 metros de altura, la cual se muestra en la figura 3.1-12.



Figura 3.1-12. Cúpula geodésica de Fuller en la Exposición Internacional de Montreal en 1967. (Imagen tomada de [Manterola Armisén 1998, 22]).

Las cúpulas geodésicas están conformadas por miles de pequeñas barras, que se agrupan geoméricamente, normalmente formando triángulos, aunque también las encontramos con base hexagonal con intercalaciones pentagonales, los cuales son necesarios con cierta frecuencia como elemento auxiliar de cerramiento ante la formación, con triángulos y hexágonos, de la cúpula esférica ^[40], como se aprecia en la figura 3.1-13.

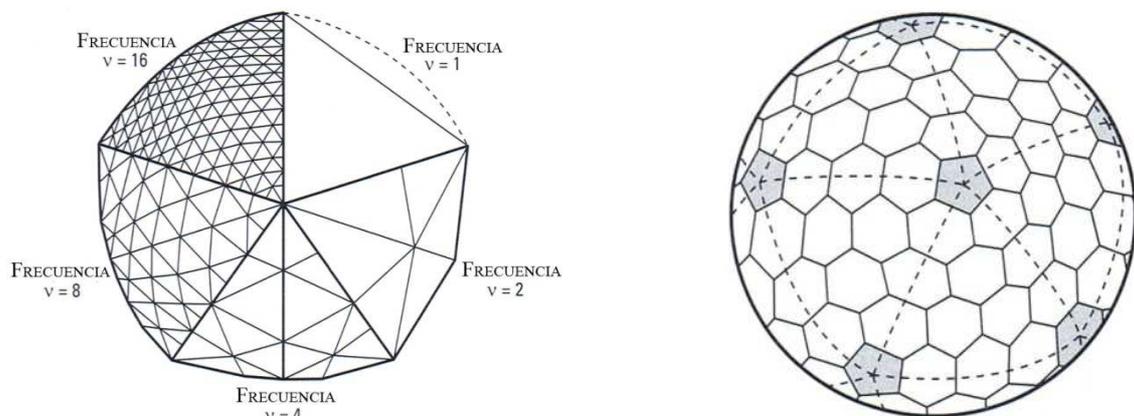


Figura 3.1-13. Subdivisión geodésica en triángulos (para distintas frecuencias de densidad) y en hexágonos (con pentágonos intercalados). (Notación adaptada de [Kurrer 2008, 489]).

[40] Brufau Niubó, R. (1998/99). *Introducció a les estructures. Les funcions de l'estructura*, p. 20.

De acuerdo a lo expuesto previamente, a pesar de existir ejemplos anteriores de las cúpulas geodésicas antes de que Fuller desarrollara la idea y registrara la patente, las mallas espaciales no tuvieron un papel relevante hasta los años 50 del siglo XX, cuando se aplicaron en el mundo arquitectónico, especialmente de la mano de Fuller. Paralelamente aparecieron las membranas tensadas, desarrolladas por **Frei Otto** (1925-), las cuales se popularizaron en los años de la década de 1960 a 1970, a la vez que sus proyectos con mallas espaciales, como por ejemplo el pabellón polivalente de Mannheim (1971), mostrado en la figura 3.1-14, y que proyectó junto con, el también arquitecto, **Carlfried Mutschler** (1926-1999). Otra obra de proyección mundial, de Frei Otto, son las mallas atirantadas con cables para la cubierta del estadio de los Juegos Olímpicos de Munich (1969-1972), que representó un punto de inflexión en los planteamientos tridimensionales de estructuras de mínimo peso propio ^[41].



Figura 3.1-14. Malla espacial del pabellón polivalente de Mannheim (1971). (Imagen tomada de [Manterola Armisén 1998, 22]).

En el ámbito de las estructuras espaciales, destacar dos arquitectos que podrían considerarse deudores de Fuller en cuanto al planteamiento conceptual de su arquitectura, como eran el alemán **Konrad Wachsmann** (1901-1980) y el español **Emilio Pérez Piñero** (1935-1972). La relevancia de la obra de Wachsmann reside en su aportación a una nueva tipología de estructuras espaciales conformadas mediante miles de barras de pequeñas dimensiones, ensambladas normalmente por uniones prefabricadas.

Una de las pocas obras que se conservan del arquitecto Pérez Piñero es la cúpula del Teatro-Museo Dalí en Figueras, como se muestra en la figura 3.1-15, que el propio Pérez Piñero no pudo ver finalizada al fallecer de forma prematura en un accidente de coche. La obra fue terminada por su hermano y colaborador en el proyecto. En relación a la obra de Pérez Piñero destaca sobre todo un estudio de las estructuras móviles y desplegadas siendo considerado por ello, como indica Escrig ^[42], como el inventor de esta tipología estructural, la cual se muestra en la figura

[41] Brufau Niubó, R. (1998/99). *Introducció a les estructures. Les funcions de l'estructura*, p. 23.

[42] Escrig Pallarés, F. (2013). *Emilio Pérez Piñero: Inventor of deployability*, p. 17.

3.1-16. La estructura móvil propuesta por Pérez Piñero, la cual pretendía que fuese automontable, fue una evolución de las cúpulas geodésicas de Fuller.

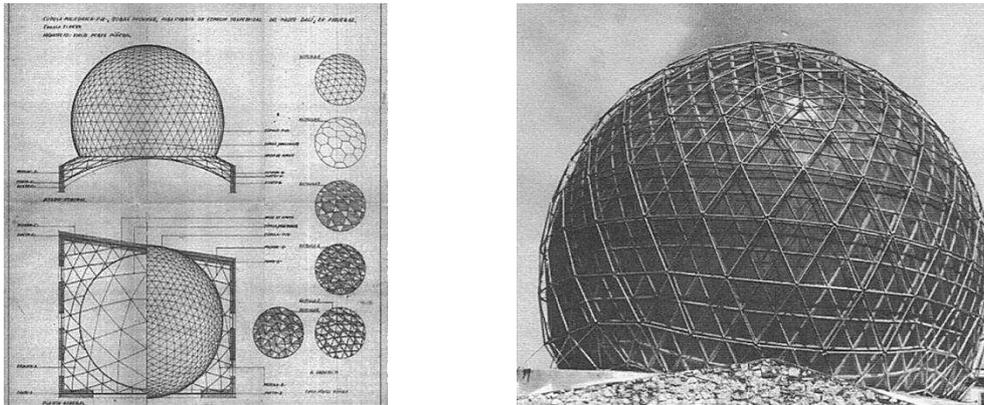


Figura 3.1-15. Cúpula geodésica de doble malla en el Museo de Dalí, Figueras. (Imagen tomada de [Escrig Pallarés 2013, 20]).

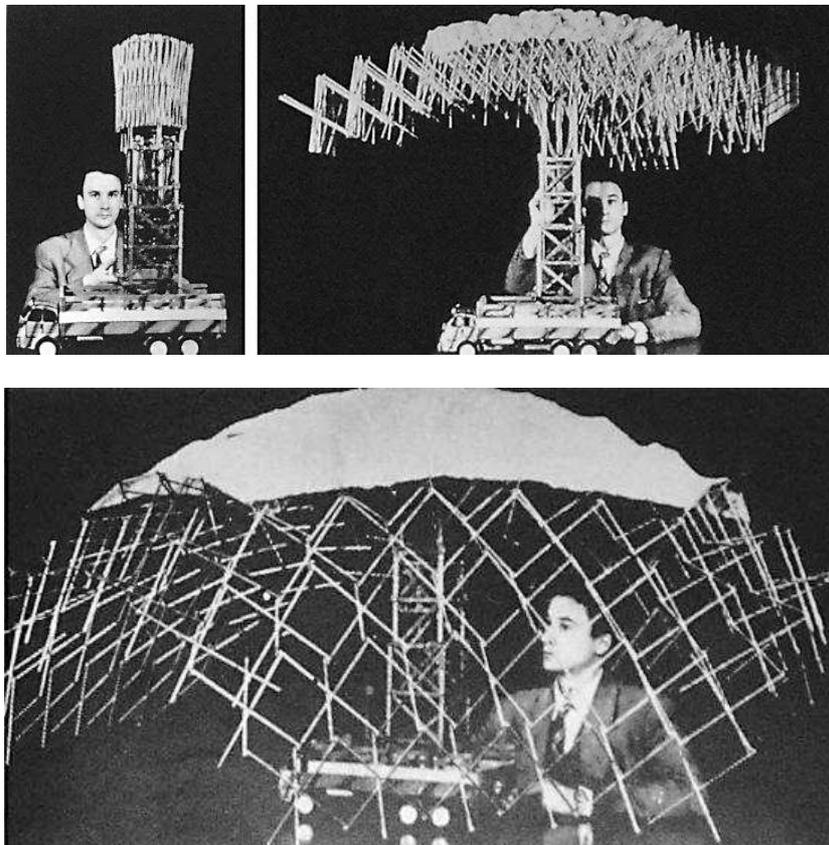


Figura 3.1-16. Prototipo de estructura laminar desplegable de Pérez Piñero. (Imagen tomada de [Robbin 1996, 41]).

En una línea similar de los anteriores arquitectos e ingenieros, destacar las obras de autores de referencia en el ámbito de las estructuras espaciales como son **David Geiger** (1935-1989) y **Horst Berger** (1928-)^[43], dando continuidad a la relevancia de esta tipología estructural en el ámbito de la arquitectura.

^[43] Brufau Niubó, R. (1998/99). *Introducció a les estructures. Les funcions de l'estructura*, p. 24.

3.2 Las mallas espaciales en la arquitectura como sistema estructural de torres y edificios en altura

Como ya se ha avanzado en la introducción del presente capítulo, las mallas espaciales se han convertido en una tipología estructural habitual en proyectos arquitectónicos. En la siguiente tabla 3.2-1, se muestran algunos ejemplos de proyectos que se caracterizan por su verticalidad y disponen, como elemento resistente principal, de una malla espacial envolvente de entramado de doble diagonal, tal y como lo recoge Moussavi ^[1]:

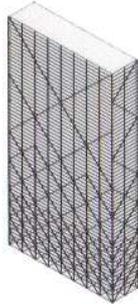
<p><i>Glass Pavilion</i>, Colonia, Alemania, 1914</p>	<p>Bruno Taut</p>	<p>Cúpula de malla estructural de doble diagonal</p>	
<p>Proyecto final de carrera, 1953</p>	<p>Myron Goldsmith</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal generando una malla envolvente de densidad uniforme</p>	
<p>Proyecto final de carrera, 1953</p>	<p>Myron Goldsmith</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal generando malla de densidad decreciente en base a la identificación de los esfuerzos solicitantes</p>	
<p><i>Millenium Tower</i>, Tokyo, Japón, 1989</p>	<p>Norman Foster & Partners</p>	<p>Estructura vertical helicoidal de doble diagonal envolvente de un edificio en forma cónica para mejorar su aerodinámica</p>	

Tabla 3.2-1. Ejemplos de estructuras de malla envolvente en edificios verticales. (Imágenes tomadas de [Moussavi 2009, 97-113]). Continúa →

[1] Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*, pp. 97-113.

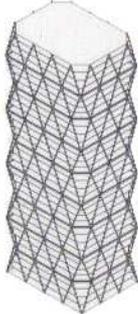
<p><i>30 St. Mary Axe</i>, Londres, UK, 1997-2004</p>	<p>Norman Foster & Partners, Arup, Sandy Brown Associates</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal adaptada a la forma aerodinámica del ovoide</p>	
<p><i>Hearst Headquarters</i>, Nueva York, USA, 2000-2006</p>	<p>Norman Foster & Partners, Adamson, Cantor Seinuk Group y Sandy Brown Association</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal generando una malla envolvente triangulada uniforme</p>	
<p><i>Water Drop Tower</i>, Cheogna, Corea del Sud, 2008</p>	<p>Sanders Wang Macleod - Swimcau</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal para edificio que se ensancha en la base mejorando su estabilidad</p>	
<p><i>CCTV – TV Station</i>, Beijing, China, 2002-2009</p>	<p>Rem Koolhaas, Arup</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal de densidad variable de acuerdo a la identificación de los esfuerzos solicitantes</p>	
<p>Propuesta de geometría. Trabajo investigación de Moussavi ^[2]</p>	<p>Farshid Moussavi</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal adaptada a edificio de formas curvas</p>	

Tabla 3.2-1. Ejemplos de estructuras de malla envolvente en edificios verticales. (Imágenes tomadas de [Moussavi 2009, 97-113]). ← Continúa →

[2] Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*.

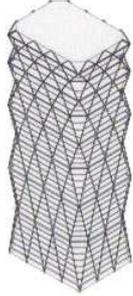
<p>Propuesta de geometría. Trabajo investigación de Moussavi ^[3]</p>	<p>Farshid Moussavi</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal de acuerdo a la identificación de los esfuerzos solicitantes</p>	
<p>Propuesta de geometría. Trabajo investigación de Moussavi ^[3]</p>	<p>Farshid Moussavi</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal de planta variable en busca del formalismo estético del edificio</p>	
<p>Lotte Super Tower Hotel, Seúl, Corea del Sud 2011</p>	<p>SOM (Skidmore, Owings & Merrill)</p>	<p>Estructura vertical de doble diagonal de planta variable mejorando las prestaciones aerodinámicas del edificio</p>	

Tabla 3.2-1. Ejemplos de estructuras de malla envolvente en edificios verticales. (Imágenes tomadas de [Moussavi 2009, 97-113]). ← Continúa

Estas referencias arquitectónicas, de acuerdo a la tabla 3.2-1, son el reflejo de la versatilidad en cuanto al diseño y construcción de edificios se refiere, en base a proyectos que disponen de mallas espaciales como tipología estructural envolvente de los edificios. Esta evolución arquitectónico-constructiva, ha sido posible gracias a los grandes avances tecno-tecnológicos en el ámbito de la ingeniería estructural, pero también, a partir de los años de la década de 1980 a 1990, por el desarrollo computacional que han brindado las herramientas necesarias para el diseño y análisis de estructuras estáticamente indeterminadas de alta complejidad, con gran rapidez de análisis, que anteriormente no se podían emprender.

En este sentido, acerca de la evolución de las mallas espaciales utilizadas recurrentemente en el ámbito de la arquitectura, cabe destacar la gran influencia que ha tenido sobre el diseño arquitectónico de las últimas décadas, especialmente, estructura resistente envolvente de edificios en altura, algunos de ellos mostrados en las figuras 3.2-1 y 3.2-2, en referencia al Hotel Arts y la Torre Diagonal ZeroZero.

^[3] Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*.



Figura 3.2-1. Ejemplos de edificios en altura con malla estructural envolvente: Hotel Arts y Torre Diagonal ZeroZero de Barcelona. (Imágenes propias, 2013).

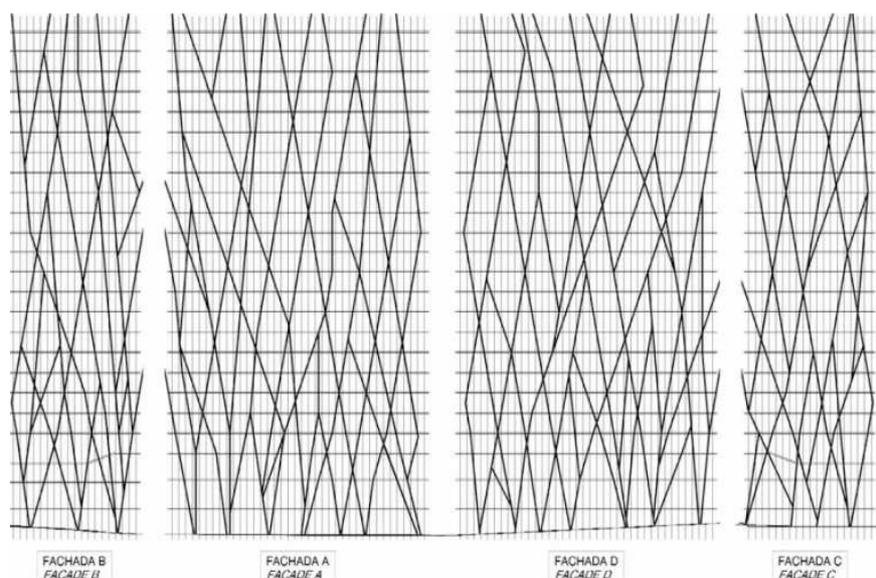


Figura 3.2-2. Alzados capa exterior fachada Torre Diagonal ZeroZero. (Imagen tomada de [Martínez Calzón et al. 2012, 23]).

Conforme a la figura 3.2-2, es oportuno mencionar que, parece ser que en un principio, la disposición de las barras de la malla envolvente de la Torre Diagonal ZeroZero no responde a una función resistente, de acuerdo a la trayectoria lógica de las fuerzas que debe soportar, sino que su geometría puede que se base, principalmente, en el formalismo estético definido desde una vertiente básicamente arquitectónica. No obstante, cabe destacar que sí se observa una mayor densidad de malla en la parte inferior, respondiendo así a la concentración de las cargas que descienden desde la parte superior a la base.

Este planteamiento de optimización, según la variación de la densidad de las mallas envolventes, corresponde a la metodología de análisis estructural reiterativo que se basa en la definición de la geometría de la malla resistente de acuerdo a la identificación de los esfuerzos, en base a las cargas actuantes y las condiciones de equilibrio del edificio. Un ejemplo de este tipo de análisis se observa en la figura 3.2-3, que corresponde al estudio realizado por Arup con el objeto de definir la geometría de la malla envolvente para resolver la estructura del edificio de la sede de la Televisión Central de China (CCTV), en Beijing construido el año 2008.

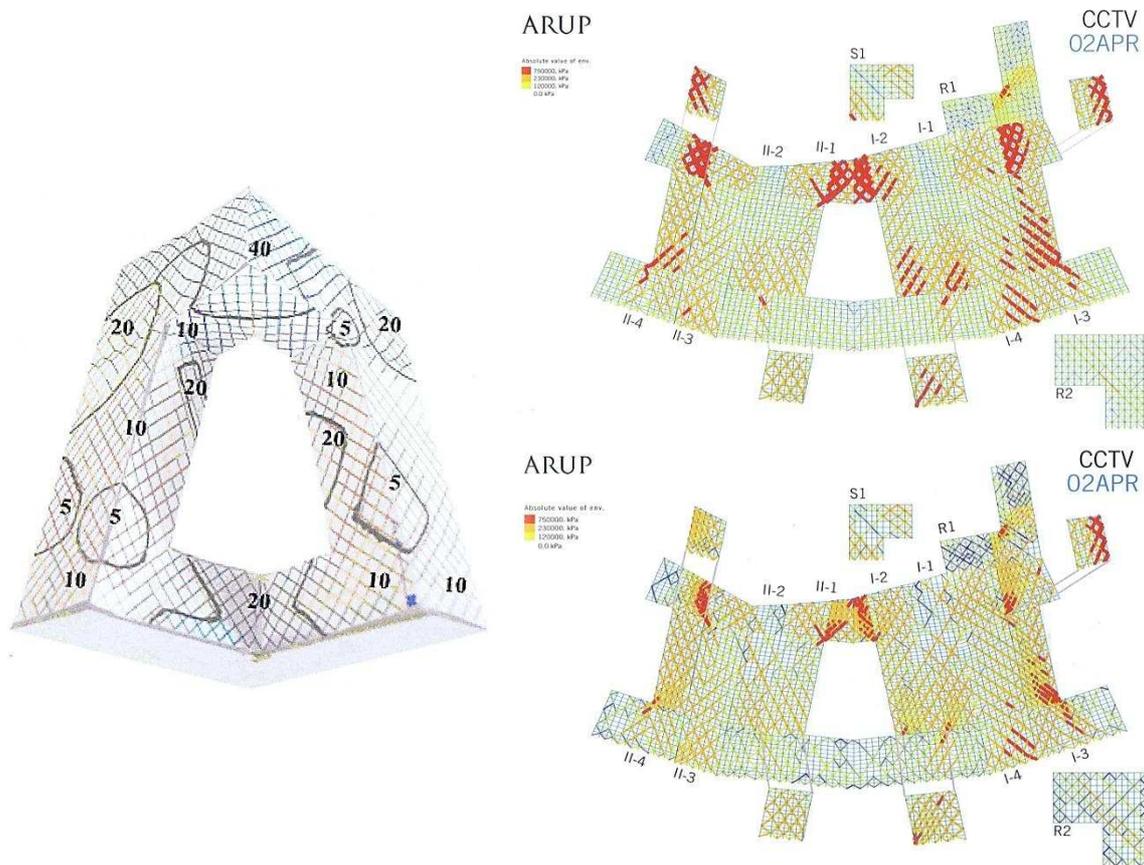


Figura 3.2-3. Visualización del análisis estructural de la malla envolvente del edificio para la sede de la Televisión Central de China (CCTV) en Beijing según Arup. (Imágenes tomadas de [MoMA 2003, 106 y 107]).

En la figura 3.2-3, se aprecia cómo se modifica la disposición de las barras de la malla envolvente de acuerdo a la distribución de tensiones según las cargas solicitantes y las condiciones de equilibrio. La evolución y la influencia de las mallas espaciales, en el diseño de edificios en altura, se abordará en el próximo capítulo de forma amplia, en base a una búsqueda exhaustiva, dada la relevancia de dicha temática, la cual es objeto de estudio en el presente trabajo de investigación.