



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Mallas espaciales

Apellidos, nombre	Basset Salom, Luisa (lbasset@mes.upv.es)
Departamento	Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presentan las estructuras formadas por mallas espaciales. Tras una breve introducción histórica, se describen sus tipologías, características y su comportamiento estructural. Se acompaña el texto con ejemplos de mallas espaciales.

2 Introducción

Las estructuras trianguladas están formadas por barras rectas conectadas entre sí, trabajando a tracción y compresión. Si extendemos el principio de la triangularización al espacio, pasaremos de la celosía plana a la malla espacial donde, el elemento básico estable que sustituye al triángulo suele ser el tetraedro. Generalmente, las barras de la malla espacial están articuladas y, por lo tanto, desarrollan únicamente esfuerzos axiales. Si los nudos son rígidos, puede adoptarse como hipótesis de cálculo que están articulados, ya que los momentos producidos son despreciables.

3 Objetivos

El alumno, tras la lectura de este documento, será capaz de identificar las mallas espaciales, describir los sistemas utilizados para evitar los problemas de estabilidad y las uniones, determinar los condicionantes de diseño así como proponer ejemplos reales de edificios con esta tipología estructural.

4 Mallas espaciales

4.1 Antecedentes

El origen de las mallas trianguladas desde un punto de vista ideológico, considerando como gérmenes posibles de las mallas espaciales cualquiera de los cinco sólidos perfectos de Platón, puede remontarse a la antigua Grecia. Pitágoras y Platón interpretaban el Universo en términos de número y forma de algunas figuras geométricas. Platón relacionaba el mundo de las ideas con el mundo material y proponía la correspondencia entre cinco sólidos básicos, el cubo, tetraedro, octaedro, icosaedro y dodecaedro, con la tierra, el aire, el fuego, el agua y el cosmos (figura 1).

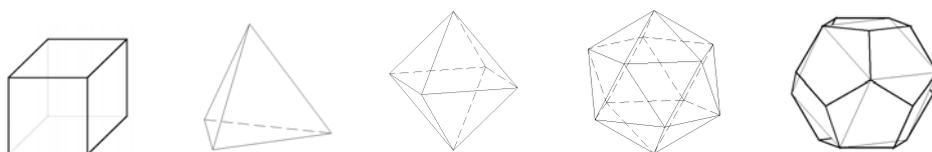


Figura 1. Los cinco sólidos básicos



Desde un punto de vista estructural y constructivo, las mallas espaciales derivan de la extensión del principio de triangulación de las celosías planas al espacio. Este paso se produce a finales del siglo XIX: tanto la Torre Eiffel en París (1889) como el Forth Railway Bridge en Edimburgo (1890) son ejemplos conocidos que indican la tendencia hacia la malla espacial (imagen 1).

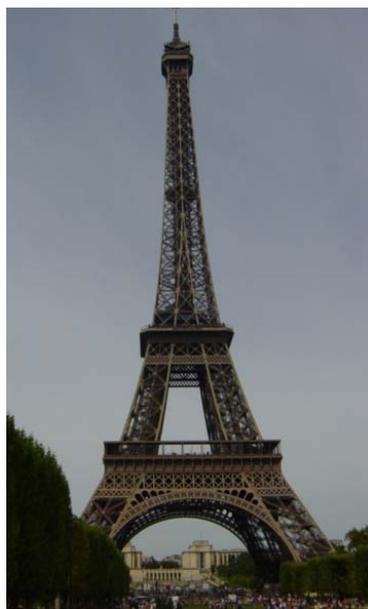


Imagen 1. La torre Eiffel, París

Alexander Graham Bell contribuyó al desarrollo de esa tipología ya que, hacia 1900, trabajaba con formas tetraédricas para conseguir la mayor resistencia con el menor peso, aplicado al ámbito de la ingeniería aeronáutica. Su torre de observación estaba formada por una malla de tetraedros y octaedros. Por su parte, Buckminster Fuller fue pionero en el diseño de mallas espaciales en el ámbito arquitectónico.

La idea de producción en masa de estas estructuras empezó hacia 1940 en Alemania con M. Mengerhausen (nudo Mero) y en Norte América con A.E. Fentiman (sistema Triodético) y C.W. Atwood (sistema Unistrut).

Otros arquitectos e ingenieros que contribuyeron a su desarrollo después de la segunda Guerra Mundial fueron Duchateau, Friedman, Emmerich, Lederer, Le Ricolais o Makowski, aunque la utilización consciente de las ventajas estructurales que se obtienen al combinar módulos triangulares es reciente.

El verdadero avance de las mallas espaciales se ha producido a partir del desarrollo de los ordenadores que permiten la resolución de sistemas de miles de ecuaciones que antes no se podían acometer. Por este motivo, las estructuras más notables en este tipo se han construido a partir de 1980.

Hoy en día, las mallas espaciales, por su ligereza y facilidad de construcción se utilizan para cubrir grandes espacios en edificios tales como gimnasios, salas de exposiciones, salas de reuniones, iglesias, piscinas, teatros, fábricas, etc.



4.2 Tipos de mallas espaciales y sus características

Las mallas espaciales pueden clasificarse en dos grandes grupos en función del número de capas que las forman:

- **Mallas formadas por una sola capa.**

Constituyen superficies estructurales tridimensionales (Imagen 2). Del mismo modo que las membranas delgadas, las mallas obtienen su resistencia a través de su geometría espacial, por lo que suelen estar plegadas o curvadas. Con una sola curvatura suelen formar bóvedas y con dos curvaturas superficies sinclásticas (cúpulas) o anticlásticas (paraboloide).

Estas mallas se distinguen entre sí según la retícula que las forma, pudiendo trabajar independientemente o conjuntamente con el revestimiento.



Imagen 2. Malla espacial formada por una sola capa

- **Mallas formadas por dos o más capas**

Se generan añadiendo unidades espaciales de tipo piramidal (poliedros formados al unir dos emparrillados mediante diagonales) o bien conectando dos mallas planas paralelas mediante elementos situados en planos verticales.

Al contrario que las de una capa presentan resistencia a la flexión producida por las cargas exteriores, por lo que no necesitan curvarse.

Estas mallas pueden ser de dos tipos:

1. Mallas directas o trianguladas(figura 2): las dos mallas son idénticas y están situadas exactamente una sobre la otra, formando mallas cuadradas bidireccionales paralelas o inclinadas respecto a los bordes (1) o bien mallas con elementos triangulares superpuestos sin desplazamiento (2).

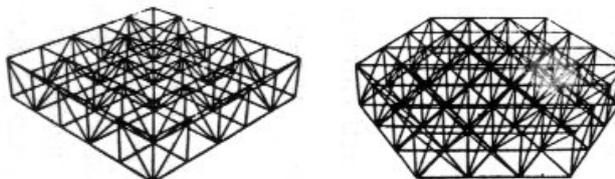


Figura 2: Ejemplo de mallas directas trianguladas (1/2)



2. *Mallas espaciales compensadas o diferenciales*

Mallas bidireccionales cuadradas compensadas (figura 3): capas iguales pero compensadas entre sí (por ejemplo, cuadrado sobre cuadrado por traslación oblicua (1) o bien modificaciones como aperturas en ambas mallas resultando una malla cuadrada sobre otra cuadrada grande (2).

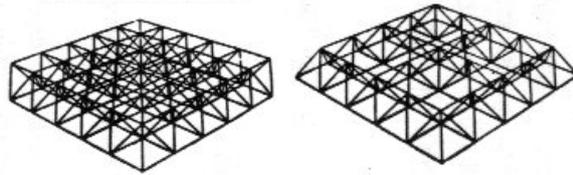


Figura 3: Ejemplo de mallas bidireccionales cuadradas compensadas (1/2)

Mallas bidireccionales cuadradas diferenciales (figura 4): capas superior e inferior diferentes, por ejemplo, una capa con malla cuadrada diagonal sobre una malla cuadrada pequeña (1), o una malla cuadrada diagonal sobre una malla cuadrada grande (2).

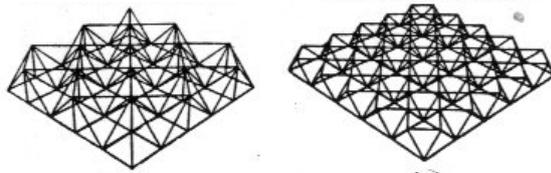


Figura 4: Ejemplo de mallas bidireccionales cuadradas diferenciales (3/4)

Mallas triangulares tridireccionales o modificaciones produciendo mallas compensadas o diferenciales (figura 5): malla sobre malla compensada generada por traslación oblicua (1) o malla formada por combinación de una triangular y hexagonal sobre otra triangular (2).

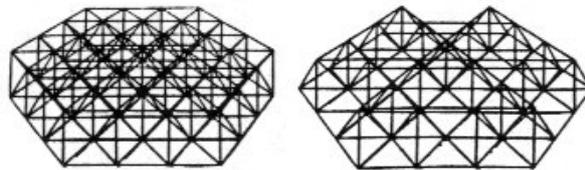


Figura 5: Ejemplo de mallas triangulares tridireccionales (1/2)

En todos estos casos las capas de la malla están conectadas entre sí por celosías continuas o alternas, verticales o inclinadas. Sin embargo, estas mismas mallas pueden formarse agregando poliedros.

Solo tres de los poliedros regulares de Platón (tetraedro, octaedro y cubo) y seis de los poliedros semirregulares de Arquímedes (tetraedro truncado, octaedro truncado, cuboctaedro, cuboctaedro truncado y rombo-cuboctaedro) son capaces de cubrir el espacio por sí mismos o en combinación con otros.



Aunque suele buscarse la estandarización, puede resultar, a veces, más adecuado utilizar elementos menos regulares, de distintas longitudes y dimensiones.

4.3 Estabilidad

La estabilidad de las mallas de una sola capa se consigue triangularizando las superficies, hecho que no es del todo posible en las mallas de dos o más capas. En estos casos se debe analizar con más cuidado el tema de la estabilidad porque, si bien una malla formada por unidades estables (tetraedro, octaedro y prisma triangular) será estable y una compuesta por combinación de poliedros estables e inestables (cubo) puede llegar a serlo conectándolas adecuadamente y creando unidades estables. Una malla compuesta por poliedros inestables será toda ella inestable.

También se puede estabilizar el conjunto de la malla añadiendo barras, generalmente en planos de compresión. Una malla cuadrada, por ejemplo, puede estabilizarse (figura 6) subdividiéndola en planta formando grandes triángulos (1 y 2), añadiendo diagonales que encierran a la estructura a lo largo de su perímetro (3) o triangularizando cada vano (4).

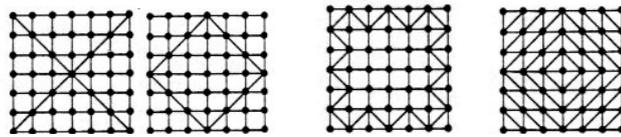


Figura 6: Soluciones 1, 2, 3 y 4 para estabilizar la malla espacial

4.4 Condicionantes de diseño

Cuando la malla espacial se utiliza en cubiertas, si es de doble capa, suele adoptarse una relación canto/luz entre 1/18 y 1/25. Si hubiese un vano en voladizo será 1/9 (imagen 3).



Imagen 3. Malla espacial de doble capa, Plaza del Zócalo, Méjico DF

El ancho del módulo puede depender de la altura si se adopta una composición regular. Sin embargo, dado que puede resultar más económico utilizar otras geometrías, conviene dar unos valores orientativos, teniendo en cuenta que el ancho del módulo dependerá, entre otros factores, de la situación y tipo de los apoyos, de las dimensiones del edificio, de la capacidad de las correas de la



cubierta, de la densidad de las barras (número de barras por unidad de área), de la inclinación, del tipo de barras y nudos, etc. Su valor deberá ser, en general, menor que un quinto de la luz y mayor que 1 m. (imagen 4)



Imagen 4. Malla espacial doble capa, Boston

A la hora del diseño deben tenerse en cuenta las condiciones del terreno, ya que una cubierta grande de este tipo, si apoya en pocos puntos, estará transmitiendo al suelo esfuerzos excesivamente grandes.

Resulta importante también el proceso de construcción, ya que, en función de la escala y secuencia de elevación se pueden necesitar apoyos intermedios o bien se puede construir todo en el suelo y levantarlo después (imagen 5).



Imagen 5. Elevación de la malla del centro de FP en la Celsa, Madrid

4.5 Nudos

La economía de una malla espacial está muy relacionada con el tipo de uniones. El número de nudos por metro cuadrado debe ser mínimo.

Para seleccionar el tipo de unión entre las barras hay que considerar el tipo y tamaño de las barras, los ángulos de intersección, la accesibilidad, la facilidad de montaje, la posibilidad o no de admitir tolerancias, etc.

Estas uniones pueden ser directas, atornilladas, soldadas o con conectores especiales que serán rectos, curvos, de una sola pieza o de varias, circulares, etc.



Hay muchas mallas estandarizadas y patentes que tienen su propio sistema de unión (imagen 6).



Imagen 6. Nudo Nuclos (Asteca estructuras)

5 Cierre

A lo largo de este tema hemos visto los tipos de mallas espaciales y sus características así como diferentes soluciones para conseguir que sean estables. Asimismo se han descrito distintos tipos de nudos y se han indicado criterios generales de diseño.

Se proponen las siguientes cuestiones:

1. Buscar ejemplos de mallas espaciales correspondientes a diferentes tipos descritos en el texto.
2. Identificar la solución adoptada para conferir estabilidad al sistema.
3. Identificar el tipo de nudo.

Algunos ejemplos son: Palau Sant Jordi de A. Isozaki en Barcelona (malla de doble capa formada por unidades estables, nudos sistema Ortz), Palacio de comunicaciones de Madrid (malla de una sola capa, estabilidad mediante triangulación, nudo sistema SLO).

6 Bibliografía

6.1 Libros:

[1] Basset, L.; Abdilla E. "Modelos estructurales y diseño estructural", Servicio de Publicaciones SPUPV-98.268, 1998.

[2] Schueller W. "Horizontal Span Building Structures" Ed J. Wiley and Sons, 1983

6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

[3] <http://www.wikipedia.org>

[4] <http://www.astecaestructuras.com/>



6.3 Figuras e imágenes:

Figura 1. Los cinco sólidos básicos.

Figura 2: Ejemplo de mallas directas trianguladas (1/2)

Figura 3: Ejemplo de mallas bidireccionales cuadradas compensadas (1/2)

Figura 4: Ejemplo de mallas bidireccionales cuadradas diferenciales (3/4)

Figura 5: Ejemplo de mallas triangulares tridireccionales (1/2)

Figura 6: Soluciones 1, 2, 3 y 4 para estabilizar la malla espacial

Autora de las figuras: Luisa Basset

Imagen 1. La torre Eiffel, Paris. Autora Luisa Basset

Imagen 2: Malla espacial formada por una sola capa. Autora Luisa Basset

Imagen 3. Malla espacial de doble capa, Plaza del Zócalo, Méjico DF. Autora Luisa Basset

Imagen 4. Malla espacial doble capa, Boston. *Autora Luisa Basset*

Imagen 5. Elevación de la malla del centro de FP en la Celsa, Madrid. Disponible en <http://www.astecaestructuras.com/>

Imagen 6. Nudo Nuclos (Asteca estructuras). Depositada en Wikimedia commons para uso de dominio público.

Disponible en: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ejemplo_nuclos.jpg y <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Semioctaedro.jpg>