

La idea fundamental de las estructuras laminares:

“Evitar en la medida de lo posible los esfuerzos de flexión mediante la forma adecuada”.

Félix Candela

Introducción

Las estructuras planas como las cubiertas han encontrado desde el comienzo de su desarrollo dificultades de cálculo ante la complejidad de las ecuaciones diferenciales que definen su equilibrio, y dificultades constructivas debido a la singularidad de su forma y de su encofrado.

Pero así como las dificultades de cálculo se han ido superando y simplificando con ayuda de los ordenadores y con ensayos sobre modelos reducidos, las dificultades de definición geométrica y de elaboración de sus encofrados siguen latentes, e incluso agudizadas, por la repercusión cada vez mayor de la mano de obra.

Estas circunstancias han motivado que las cubiertas o estructuras planas hayan alcanzado un gran desarrollo, con el análisis de sus grandes ventajas estructurales.

En los años veinte del siglo pasado se inicia la construcción de láminas de hormigón armado con directrices diversas, con las cuales se consigue cubrir grandes espacios con unos pocos centímetros de espesor y sin necesidad de nervios de refuerzo ni de apoyos continuos, tal como había sucedido en las bóvedas clásicas.

A partir de ese momento se suceden varias décadas en las que se ensayan nuevas configuraciones formales, y se superan espectacularmente los antiguos modelos en esbeltez y en luz.

Tipología de las cubiertas

Los elementos laminares (cubiertas) han encontrado en las superficies curvas las formas más adecuadas para conseguir la reducción de espesor, aunque también es posible conseguirlo con superficies planas si están solicitadas por fuerzas contenidas en el plano de su superficie media.

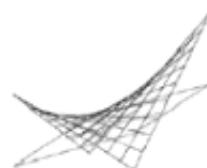
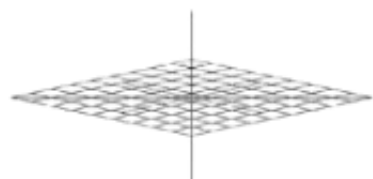
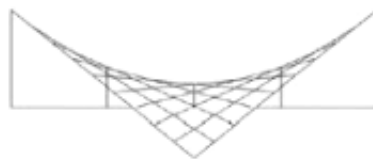
Dentro de las superficies curvas, son las de doble curvatura las que mejor se adaptan al estado ideal de membrana, sobre todo si ambas curvaturas tienen sentidos opuestos, como sucede en el paraboloides hiperbólico, el cual puede servir de base para el estudio geométrico y de referencia para el análisis constructivo de cualquier lámina en general.

Generación del paraboloides hiperbólico

El paraboloides hiperbólico se engendra a partir de dos parábolas mediante el deslizamiento de una de ellas, paralelamente a sí misma, sobre la otra. A la primera parábola se la denomina generatriz, porque “genera” la superficie, y a la segunda se le llama directriz, ya que “dirige” la operación.

Según que las dos parábolas tengan igual o distinta curvatura, que estén o no contenidas en planos verticales, y que éstos formen entre sí un ángulo recto o un ángulo cualquiera, resultan las siguientes combinaciones con sus correspondientes plantas:

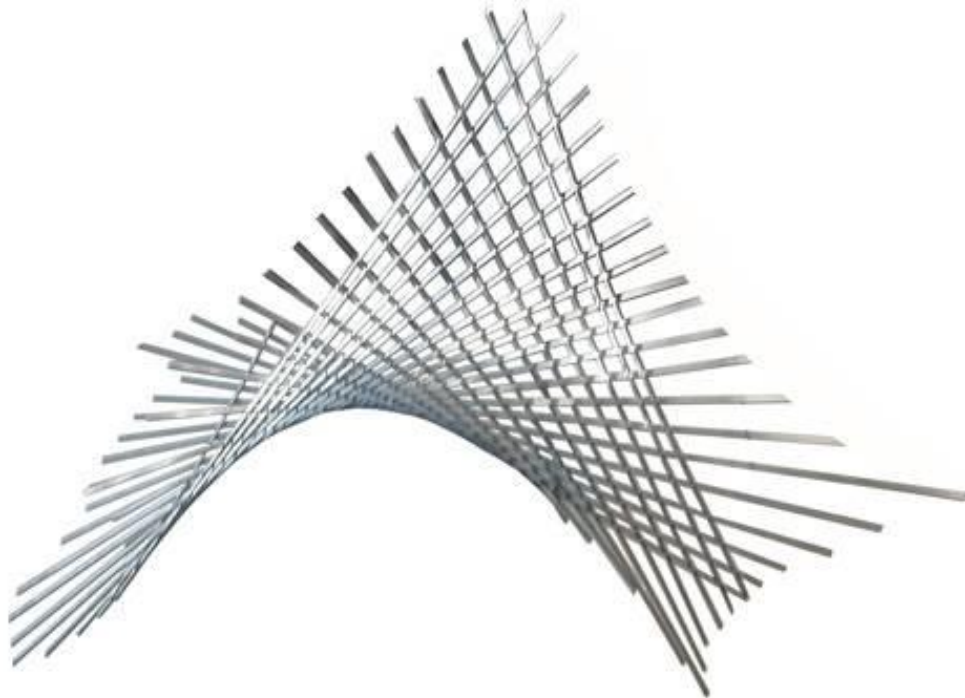
Parábolas	Planos	Angulo	Planta
Igual curvatura	verticales	recto	cuadrado
Distinta curvatura	verticales	no recto	rombo
Igual curvatura	verticales	recto	rectángulo
Distinta curvatura	verticales	no recto	romboide
Igual/distinta curvatura	Inclinado (uno)	recto	cuadrilátero simétrico
Igual/distinta curvatura	Inclinados	recto	cuadrilátero asimétrico



Paraboloide hiperbólico

Una de las superficies que más se han aplicado en arquitectura es la bautizada con el pomposo nombre de paraboloide hiperbólico. Gaudí fue uno de los que la emplearon, pero quien más la ha trabajado ha sido Félix Candela.

Sin embargo la propiedad realmente importante, la que motivó el interés tanto de Gaudí como de Candela, es el hecho de que el paraboloide hiperbólico, aun siendo una superficie curvada, se puede construir con líneas rectas. Lo único que se tiene que hacer es ir variando el ángulo de inclinación de una recta que se mueve encima de otra curva. Este tipo de superficies los geómetras las denominamos superficies regladas. El proceso de construcción de un paraboloide podría seguir los siguientes pasos: Dados cuatro puntos en el espacio que no estén en un mismo plano, hay un único paraboloide hiperbólico que pasa precisamente por estos cuatro puntos. Ésta es la misma propiedad que dice que dos puntos determinan una única recta. Lo que tenían que hacer los obreros era unir con sendas barras uno de los pares de puntos de una parte, y el otro par opuesto por la otra.



En el fondo, no es una figura tan extraordinaria, ya que muy a menudo, al contemplar construcciones habituales con ojos de geómetra, la podemos ver cuando se quieren hacer cosas mal niveladas (cubiertas, pavimentos), ya que el paraboloides hiperbólico es simplemente un plano alabeado.

También se denomina silla de montar o paso de montaña, ya que en una dirección tiene las secciones en forma de parábola con los lados hacia arriba y, en cambio, en la sección perpendicular, las secciones son en forma de parábola con los lados hacia abajo.

Las secciones según planos perpendiculares a los dos anteriores (según la tercera dimensión del espacio) son en forma de hipérbola. Si están por debajo del punto de silla, el centro de la figura, los lados de la hipérbola dan forma de valles. Si están por encima de este punto, las secciones de la hipérbola dan forma a los picos que flanquean el paso.

Si se hace una sección justo por el centro de la figura, el punto de silla, resultarán dos rectas que se cortan en el paso y que son precisamente las asíntotas de las dos hipérbolas anteriores, las de encima y las de debajo.

Cualquier plano tangente en cualquier punto de la superficie nos dará como sección un par de rectas de este tipo, ya que el paraboloides hiperbólico es una superficie reglada y por todos sus puntos pasan dos rectas, una de cada familia de las rectas generadoras.

Para ver que se trata de una superficie reglada, la mejor manera de generar el paraboloides hiperbólico es a partir de un cuadrilátero alabeado, es decir, de un cuadrilátero que no tenga los cuatro lados sobre un mismo plano. A partir de este cuadrilátero, si se hacen divisiones en partes en dos lados opuestos, al trazar rectas que unan ordenadamente estas divisiones obtendremos la superficie del paraboloides, y todas estas rectas formarán la primera familia de generatrices; siempre se podrá encontrar un punto de vista de modo que estas rectas se vean paralelas. Haciendo lo mismo con los otros dos lados opuestos, obtendremos la otra familia de generatrices.

Características geométricas

El vértice del paraboloides obtenido coincide con el vértice de la parábola directriz y con el de la parábola generatriz en su posición más baja.

Por cada punto de la superficie así obtenida pasan dos rectas que pertenecen a la superficie, y justamente las que se cortan en el vértice común son horizontales.

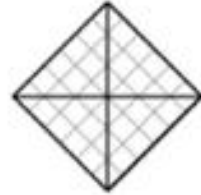
Las secciones verticales son parábolas que, según la orientación del corte, tienen curvatura positiva o negativa, y que para una posición intermedia se convierten en rectas.

Las secciones horizontales son hipérbolas cuyo eje disminuye al aumentar la altura de la sección, y que en el vértice del paraboloides se convierten en dos rectas que se cortan.

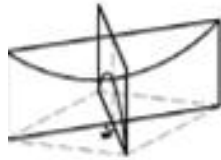
Generación de paraboloides hiperbólicos de bordes rectos



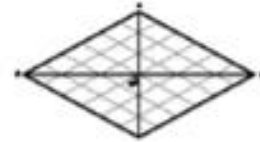
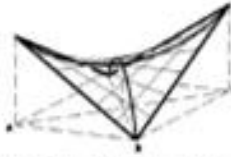
LOS DOS PARABOLOIDES DE IGUAL CURVATURA Y CONTENIDOS EN PLANOS VERTICALES FORMANDO ENTRE SI UN ANGULO RECTO



ISOMETRICO



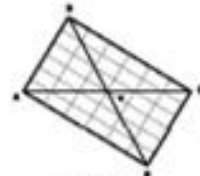
UN DE LOS PARABOLOIDES DE DISTINTA CURVATURA CONVEXA Y CONCAVA EN PLANOS VERTICALES FORMANDO ENTRE SI UN ANGULO RECTO



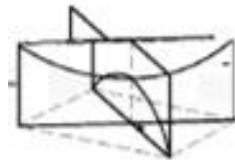
ISOMETRICO



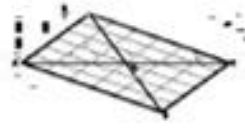
UN DE LOS PARABOLOIDES DE IGUAL CURVATURA Y CONTENIDOS EN PLANOS VERTICALES FORMANDO ENTRE SI UN ANGULO OBLICUO



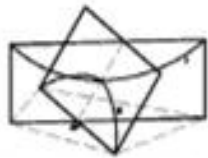
RECTANGULO



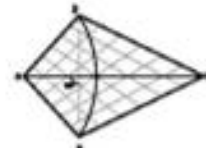
LOS DOS PARABOLOIDES DE DISTINTA CURVATURA Y CONTENIDOS EN PLANOS VERTICALES FORMANDO ENTRE SI UN ANGULO OBLICUO



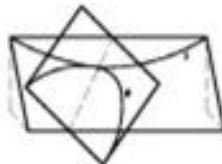
RECTANGULO



UN PARABOLOIDE Y UN CONTENIDO EN UN PLANO VERTICAL, Y EL PARABOLOIDE Y UN CONTENIDO EN UN PLANO OBLICUO



PARABOLOIDES RECTANGULO



LOS PARABOLOIDES 1 Y 2 CONTENIDOS EN PLANOS OBLICUOS



PARABOLOIDES RECTANGULO

Alejandro Zohn

Estudió ingeniería civil en la Universidad de Guadalajara, recibiendo en 1955 con la tesis profesional que tuvo como tema el proyecto del Nuevo Mercado Libertad en el Barrio de San Juan de Dios en Guadalajara, Jalisco. Aún cursaba la carrera de ingeniero cuando conoció a Mathias Goeritz, recién llegado de Europa, quien provocó en Zohn el interés por estudiar arquitectura. Fue así que obtuvo el título de arquitecto en 1962, con una tesis sobre las características constructivas del concreto armado.

En 1959 realizó en la ciudad de Guadalajara el **Nuevo Mercado Libertad**, una de sus obras más significativas, que sustituyó al antiguo Mercado de San Juan de Dios de 1880. En esta obra se aprecia la habilidad creativa de su autor, así como la innovación tecnológica del momento con el diseño de áreas cubiertas, destacando la zona central como un gran espacio a triple altura, **cubierto por mantos alabeados, paraboloides hiperbólicos,**



entremezclados con triángulos de luz. Toda la estructura es a base de concreto, con una modulación de seis por seis metros, con muros de block esmaltado de barro artesanal, como muestra del manejo de los materiales de la región como son la piedra brasa en combinación con el barro esmaltado, y a la vez jugando con los elementos arquitectónicos compositivos tradicionales como son los patios, escalinatas, celosías y aleros. Originalmente el proyecto fue diseñado para albergar dos mil puestos, después fue remodelado por el propio arquitecto Zohn en 1981-1982, ampliando un nivel más en la zona poniente y agregando setecientos puestos más, logrando liberar algunas áreas comunes. Esta obra fue declarada *Monumento Artístico* mediante el Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el 4 de abril de 2005.

Continuando con la poética arquitectónica del *Mercado Libertad*, también en 1959 construye



obras como el *Puente Peatonal* y una **Concha Acústica en el Parque Agua Azul en Guadalajara**, donde el concreto y el cascarón persisten en su sueño creativo. En el rubro de vivienda, destacan la *Casa Dubín*, en Manzanillo, Colima (1962), y *Edificio de Apartamentos Yuca* en Zapopan, Jalisco (1969), *Casa Redonda* en Puerto Vallarta, Jalisco (1972), la *Unidad Habitacional Ricardo Flores Magón* en Guadalajara, Jalisco (1976), dentro de un sistema organizado por la

autoridad municipal que combinó un sistema organizado de autoconstrucción con un plan especial de financiamiento. Destaca también la *Unidad Habitacional CTM Atemajac* en Guadalajara, Jalisco (1977), donde la forma del terreno aportó a la imaginación constructiva de Zohn un juego escalonado en los muros y cubiertas de las viviendas.

Construyó en 1978 el *Mercado Río Cuale* en Puerto Vallarta, Jalisco (1978), donde se aprecia la armonía entre el diseño arquitectónico y estructural de los espacios interiores y exteriores, con el ambiente natural del lugar que implicaba la forma irregular del terreno. El tema del mejoramiento

urbano también estuvo presente en su desarrollo profesional como fue el gran trabajo de *Mejoramiento Visual y Vial del Centro de Tlaquepaque, Jalisco* (1977- 1979).

En los años 1985-1990 realizó el *Edificio para los Archivos del Gobierno del Estado de Jalisco*, localizada en una de las principales avenidas de Guadalajara, dentro de una zona destinada a edificios públicos y administrativos, resulta una muestra de integración de arquitectura y escultura, con imponentes cuerpos verticales de concreto, todo un juego volumétrico lúdico, con un notable manejo del espacio, de la luz y una vez más el concreto como material protagonista.

Alejandro Zohn utiliza frecuentemente los paraboloides hiperbólicos en sus obras arquitectónicas, generalmente como cubiertas que sirven para eficientar la función, o para enfatizar un espacio (accesos, espacio fisonómico, etc.).



Concha acústica en el parque agua Azul, Guadalajara



Está construida a base de un paraboloides hiperbólico que se apoya en dos de sus vértices, los cuales transmiten las cargas a unos muros de piedra brasa, que a su vez delimitan el espacio.

El paraboloides hiperbólico se vuelve más largo de un extremo, su forma es novedosa y un reto de la arquitectura y de ingeniería. En la cara inferior de la cubierta se pueden ver unos puntos que bien pueden ser el remate de cada una de las varillas del armado. Ya que un paraboloides hiperbólico es una estructura curva a base únicamente de rectas.

En nuestro proyecto es lo que quisimos demostrar de una manera práctica y específica, cómo pudo haberse construido la armadura que se usó para construir la concha acústica para después recibir el concreto.

La Concha Acústica es un proyecto ícono de la ciudad de Guadalajara, de Alejandro Zohn, que se construyó a mediados de los 50. Fue el primer lugar para hacer espectáculos en la ciudad, ahí estuvieron los grandes artistas de la época y tiene un muchos atributos, pero el más importante es que mantuvo la idea de tener un espacio abierto. Por esta razón se justifica que tengamos un paraboloides hiperbólico de cubierta pues a la vez que delimita discretamente el espacio, mantiene relación con el resto de la plaza en donde se encuentra.