

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
TALLER FEDERICO MARISCAL Y PIÑA



FUNDAMENTOS DE DISEÑO EN MEMBRANAS
TEXTILES PARA CUBIERTAS LIGERAS

TESIS TEÓRICA QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
ARQUITECTO



PRESENTA:

VÍCTOR ARMANDO MÁRQUEZ CARPINTEYRO

ASESORES:

MTRO. JESUS ENRIQUE SALAZAR VALENZUELA

ARQ. FERNANDO RIVAS LADRON DE GUEVARA

MTRO. IVÁN RODRIGO LÓPEZ CAFAGGI

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX JUNIO 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1 - LA MEMBRANA - MARCO TEÓRICO	
CONCEPTO Y ORIGEN.....	12
CATENARIA Y PARÁBOLA.....	14
LA TRACCIÓN DEL SIGLO XX.....	17
LA FORMA LIBRE.....	29
CAPÍTULO 2 - TENSOESTRUCTURAS, CASOS DE ESTUDIO	
COMIENZO EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	38
PARQUE “EL LAGO” EN CHURUBUSCO.....	40
TERRAZA FACULTAD DE QUÍMICA CU.....	46
CENTRO UNIVERSITARIO DE TEATRO EN CU.....	52
CUBIERTA PALACIO DE MINERÍA.....	58
PREMISAS DE DISEÑO.....	64
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTOS DE DISEÑO PARA MEMBRANAS	
DICOTOMÍA: LA FORMA LIBRE TIENE LEYES.....	68
BÚSQUEDA DE LA FORMA.....	71
MATERIALES.....	76
TIPOLOGÍAS.....	80
LOS FUNDAMENTOS.....	87
CONCLUSIONES.....	94
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXO: EXPERIMENTOS PROPIOS.....	100

PALABRAS CLAVE

MODELOS FÍSICOS

MEMBRANA

FORMA
ESTRUCTURA

CURVATURA DE GAUSS

TRACCIÓN - COMPRESIÓN

INTRODUCCIÓN

A lo largo de su historia, la arquitectura es la disciplina que interrelaciona la forma con la estructura, la geometría además de brindar estética tiene cualidades mecánicas, es decir que poseen: movimiento, equilibrio y fuerzas, conceptos importantes para la estructura de un edificio. Sin embargo la llamada “técnica”, condicionaba o ampliaba las posibilidades en la geometría de la arquitectura, entiéndase por técnica, los conocimientos, recursos y posibilidades tecnológicas que se tienen para transformar la materia en la naturaleza a un objeto arquitectónico. Por ejemplo, el apilamiento de piedras en arco de medio punto, dio en su momento una solución estética, que gracias al trabajo geométrico por su forma y a las cualidades mecánicas de la piedra resulta estable. Al darnos cuenta que el arco de medio punto generaba empujes horizontales, de nuevo es la geometría quien dio solución al conflicto, con los arcos apuntados u ojivales, que gracias a su forma más vertical, disminuyen el empuje horizontal. Así con los cuatro grandes materiales constructivos: Pétreos, madera, metales y vidrio, cada uno narra su propia historia, sus propiedades y su geometría óptima. A mediados del siglo XX se popularizó el quinto material constructivo, las conocidas membranas textiles.

La membrana en su aseveración más amplia y correcta se define como: una piel delgada, o bien, una lámina de pequeño espesor y flexible. En arquitectura es una lámina fina quizás de material elástico, su liviandad y flexibilidad permitió utilizarlas entre otras opciones, como “cubiertas ligeras”, una norma de estas membranas como cubiertas, es la tensión a la que deben someterse, de ahí su nombre estructural: Tensoestructuras.

Las tensoestructuras se conforman de cables, membranas y postes, y aunque su flexibilidad permite propuestas formales del tipo “forma libre” o bien de geometrías conocidas y complejas como los paraboloides hiperbólicos, existen criterios de diseño que satisfacen: ejecución o construcción, Sustentabilidad, Estética y Costos, todo ello gracias al eficiente trabajo entre geometría-estructura.

¿En qué afecta el diseño y construcción errónea de una Tensoestructura? Como en cualquier proyecto arquitectónico la seguridad de la estructura es primordial, en las tensoestructuras la complejidad formal suele afectar proporcionalmente lo complejo de su comportamiento estructural. Por ello el estudio mecánico y físico por medio de maquetas y uso de la tecnología, han logrado materializar estéticas propuestas. Por tanto, estudiaremos la participación de estas herramientas de diseño y las opciones para su aplicación.

Con otros retos a lograr en su diseño, vale preguntarnos ¿Por qué se popularizó esta arquitectura y cuál es su novedad contra otras alternativas? Posteriormente formar el marco rector de diseño, una brújula que guíe el quizá infinito diseño de formas libres. Sin perder la naturaleza del edificio; la habitabilidad, el arquitecto morirá buscando explotar mejor su materia prima, el espacio, del contenido y el continente, y para ello soy entusiasta de la espacialidad sin restricciones de forma.

Reconociendo el potencial en el trabajo geometría-estructura y las ventajas de tensoestructuras, se presenta necesario plantear pautas para el diseño y proyección de membranas arquitectónicas, posiblemente un arquitecto no especialista en cabañas de madera pueda resolver la necesidad de esta, y en su labor de investigador encuentre abundante información como: que respetar en las construcciones de madera, que elementos siempre están presentes, las propiedades mecánicas de la madera, tipologías, etc. Esa introducción en el tema de Tensoestructuras es la buscada en esta Tesis.



1 Bailarines probando los límites de la tela en el espectáculo Gravity Fatigue por el modista Hussein Chalayan. foto: Manuel Vaso

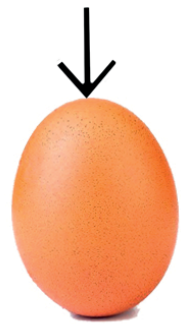
CAPÍTULO 1 - LA MEMBRANA

La historia de su profesión es la base de cualquier profesionalista; esta visión personal constantemente me lleva a conocimiento nuevo e inagotable, tomar un objeto de estudio y conocer sus antecedentes e historia, le otorga un valor mayor a este, pero lo más importante, facilita las ideas futuristas para la nueva evolución y aplicación del objeto estudiado. A mayor conocimiento histórico, mayor herramientas para innovar.

Con la membrana textil como nuestro objeto de estudio, trataré en el capítulo 1 de manera sucinta; describir e interiorizar el pasado, el presente y su potencial, iniciando por definirla. Ya que la tesis busca proporcionar herramientas para su diseño, toda la información de este capítulo tiene como objetivo el aprender sobre la evolución histórica de las membranas.

CONCEPTO Y ORIGEN

Marco Teórico



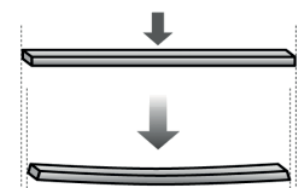
2 Si una carga se coloca, por la curvatura del cascarón, solo tenemos un esfuerzo tangencial, por tanto, no hay carga puntual.

La membrana es una piel o lámina de pequeño espesor con la cualidad de ser liviana y generalmente flexible. Los cascarones de huevo son un ejemplo de lámina. En el cascarón y la membrana arquitectónica su geometría curva es importante para conseguir la liviandad y su delgadez, (2) y a su vez, el pequeño espesor y curvaturas no permiten cargas puntuales y no se desarrollan grandes tensiones de flexión, (2.1) sino que se trasladan las cargas y consiguen su equilibrio principalmente por esfuerzos de tracción. (2.2)

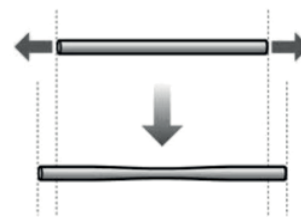
De acuerdo a lo anterior, en la arquitectura, toda estructura laminar de pequeño grosor debería entenderse como una membrana, por ejemplo un cascarón de concreto armado como los diseñados por Félix Candela, más livianos y de menor espesor en comparación a un sistema estructural de concreto que no trabaja apoyado en su geometría curva. Es posible que popularmente se llaman solo membranas a la arquitectura textil, por ser el material más liviano hasta ahora en la construcción, o bien, algunos arquitectos o textos consideran membrana tanto la arquitectura textil como a mallas de cables.

El uso textil en la arquitectura es realmente antiguo, idear en el pasado una solución tan sencilla que en el presente representa un interesante objeto de estudio, con variados conceptos que lo definen y las leyes de la física que le rigen, invita a preguntarnos ¿Cuáles fueron las circunstancias que concibieron la membrana?

Etapa del Paleolítico, esta inicio en el 2.85 millones a.C. y se conforma de tres periodos, el ultimo llamado Paleolítico Superior, que fue entre el año 40,000 a.C. al 10,000 a.C. En este periodo además nace el concepto de la familia, este hombre, el Cromañón, llamado así por el nombre de la cueva en Francia donde se hallaron sus primeros fósiles, era seminómada, dependiendo el clima o la estación y la zona geográfica, se refugiaba en cuevas o en las pri-



2.1 Flexión; combinación de esfuerzos de compresión y tracción



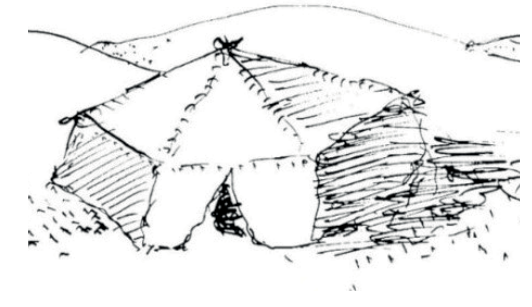
2.2 Tracción; esfuerzo provocado por 2 fuerzas en sentido contrario que tiende a estirarlo.



3 Vivienda nómada de Arabia



3.1 Vivienda Tipi o Teepe, tradicional en Norteamérica



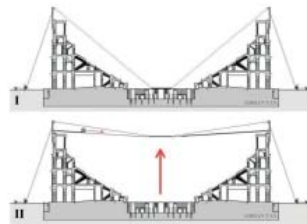
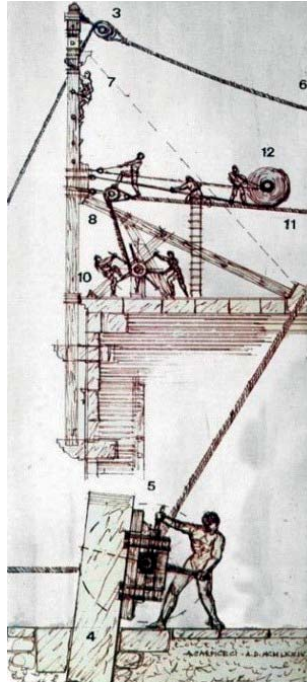
3.2 Vivienda Mongol en Asia central

meras estructuras hechas por nuestra mano, construidas a base de madera con troncos y ramas, que eran cubiertas con una envolvente, algunas veces vegetal con grandes hojas y otras con piel de animal. Los arqueólogos y arquitectos sostienen que, en algunos casos, hacían excavaciones que luego cubrían con ramas y hojas, siendo el punto intermedio entre las cavernas y las primeras construcciones completamente realizadas por el hombre, cuando levantaban moradas portátiles o tiendas. (Simancas, 2003). Tal que, las envolventes con piel de animal ya son la primera expresión de una membrana arquitectónica; ¡Así es! Las membranas fueron la primera solución pensada desde cero para una vivienda y con más de 12,000 años de antigüedad.

Para estas viviendas el uso de la herramienta rudimentaria, la facilidad de obtener la madera, las pieles de animal y factores climáticos, permitieron modelar las primeras membranas, “no existen restos de ellas, pero en las cuevas hay dibujos que permiten confirman su existencia” (Simancas, 2003, p. 53). Además se dice que al ser seminómadas, constantemente cuando debían mudar, viajaban con todo y la piel envolvente de su vivienda o refugio para el próximo asentamiento temporal. Observamos ahí una relación entre la ligereza de la envolvente, su transporte y su facilidad de montaje-desmontaje. Podríamos ir encasillando la membrana en la tipología de arquitectura efímera.

La edad de piedra está conformada por el Paleolítico, Mesolítico y Neolítico, en el Mesolítico perfeccionan aún más la construcción de las viviendas a base de madera y pieles, y están a punto de convertirse en sedentarios, haciéndose un hecho en el Neolítico. La arquitectura además tiene más relación con el clima, con el frío las cavernas eran el refugio perfecto, a medida que nos expandimos hacia el Sur del globo terráqueo las temperaturas comienzan a subir y los cambios de estación a diferenciarse aún más, así que preferimos viviendas de pieles que brindan sombra y al mismo tiempo mayor frescura en comparación a la caverna.

En Norteamérica, las viviendas de los pieles rojas son conocidas como “Tipis”, (3.1) aquí la membrana está elaborada con tejidos de fibras naturales, lo que representa la evolución de la envolvente de piel de animal, hojas de palma, matorrales o ramas secas. La colocación radial de la madera generaba un hueco en la parte central de la vivienda, que se aprovechaba para la salida del humo provocado por la fogata.



4 superior; Sistema de poleas para plegar la cubierta.
inferior; proceso de levantamiento del velarium por Carpacezi.

En Asia los mongoles (3.2) y árabes, y en el norte de África pobladores de hoy Nigeria y Egipto, se trasladaban junto con sus ovejas, camellos, caballos y viviendas, actualmente se siguen utilizando. Igualmente la vivienda se conformaba de la estructura de madera en disposición radial, pero con menor altura y sin el hueco cenital en comparación con la vivienda de los pieles rojas. Estos grupos ocuparon piel de ganado para solucionar la envolvente o membrana de sus hogares.

Más reciente en la historia, en el año 336 a.C. Alejandro Magno tras heredar el poder de Macedonia, inicia campañas de conquista utilizando estas tiendas ligeras para poder acampar con el ejército y cargar con ellas con facilidad, el imperio romano las hereda y mantiene su uso en los conflictos bélicos. El uso en circos y teatros itinerantes en Roma fue tal, que el arquitecto Carpacezi plantea en su tesis sobre toldos desmontables en el coliseo romano, una posible cubierta textil (Ontiveros, 2008). (4 y 6)

Posterior a esto no hay significativa evolución de las membranas, el uso en espectáculos y circos se mantuvo hasta el siglo XIX muy estable en diversas culturas. Otros materiales ofrecían una mayor durabilidad, incluso valores térmicos, las estructuras de madera continuaron en gran parte del mundo y con materiales terrosos al alcance, solían elaborarse los muros, tanto en las viviendas como en la arquitectura político-ceremonial, incluso lo vegetal perduro en las cubiertas y aglomerados. Gran cantidad de la historia de la arquitectura consiste en materiales pétreos y estructuras a compresión, quedando subordinada la membrana.

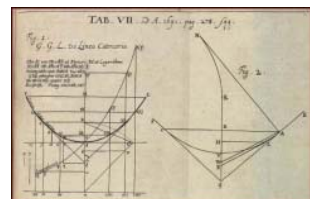
Fue hasta el siglo XX cuando se retomó su gusto y evolución, nuevos personajes en la historia de la membrana tuvieron que pensar soluciones ingeniosas para retomar la membrana, las nuevas tecnologías, el acero, y la búsqueda de innovación fueron ingredientes para reemplazar el confiable arco por geometrías similares en apariencia, como las catenarias o paraboloides.

CATENARIA Y PARÁBOLA

Catenaria es la curva que describe un cable o elemento lineal que está sujeto por sus 2 extremos, y únicamente ejercen sobre él, la fuerza de su propio peso. Desde varios siglos atrás esta curva dibujada por una cadena colgando interesó a matemáticos e intelectuales, el propio Galileo Galilei, a los 74 años de edad en el año 1638 erró al decir que el cable colgando es una parábola. (Jimenez, 2006).

En matemáticas, en el año 1646 Christiaan Huygens a los 17 años demostró sin dar con la fórmula de la catenaria, que no describía una parábola. “En 1690 el suizo Jakob Bernoulli propone un desafío en la prestigiosa Acta Eruditorum¹,

¹ En el siglo XVII en Europa, se popularizaron las primeras revistas académicas, “Acta Eruditorum” es el nombre de la revista Alemana que publicó por casi un siglo.



5 Soluciones enviadas a Bernoulli por Leibniz y Huygens para su publicación en “Acta Editorum”



6 Oleo; Ave Cesar Morituri te Salutant, Jean-Léon Gérôme, 1859



7 Puente con Arco Parabólico. Puente de los Tilos, Isla de la Palma España.



8 Palacio de Ctesifonte en la antigua Persia, siglo III. Arco Catenario, sigue en pie pesar de las ruinas a sus costados.

descubrir la fórmula matemática que definiera la verdadera forma de la curva de la cadena colgante” (Anónimo, 2015, p. 3). Y un año después su hermano menor con el que tenía gran rivalidad, Johann Bernoulli junto con Christiaan Huygens, cada uno por su cuenta, dan con la solución. (5)

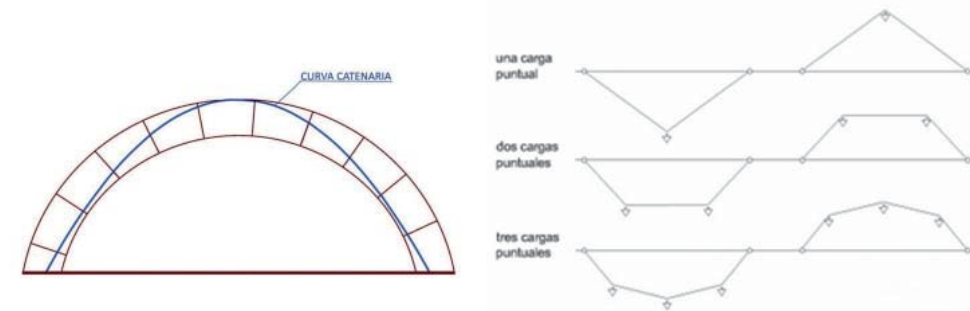
Mientras que en arquitectura, para el año de 1670 el científico inglés Robert Hooke plantea la pregunta en la Royal Society² ¿Cuál sería la forma ideal de un arco? cinco años después ofrece la solución encriptado en un anagrama. (Anónimo, 2015)

“igual que cuelga un hilo flexible pero invertido se sostendrá un arco rígido”.
Robert Hooke.

Y en 1697 el matemático David Gregory afirmó;

“si el resto de arcos se sostienen es porque hay una catenaria en su interior”
(9) D. Gregory

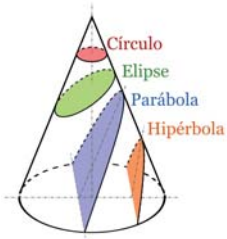
La cuerda colgando no permite una carga perpendicular en su geometría curva, por este motivo cuando es sometida a cargas puntuales modifica su geometría hasta alcanzar el equilibrio en estado de tracción de todos sus elementos. Por ejemplo, con una carga puntual, la cuerda cambia su curvatura a dos rectas, la primera de un extremo hacia la carga, y la segunda desde la carga hacia el otro extremo. A esta geometría se le llama polígonos o curvas funiculares. (10) (La línea recta tiene curvatura igual a cero)



9 Visión de Gregory de curva catenaria en el interior del típico arco de medio punto

10 Polígonos funiculares con distintas cargas y sus arcos funiculares.

² Royal Society es una de las sociedades científicas más antiguas del mundo con más de 350 años de existencia y sede en Londres.



11 Disecciones de un cono:
Plano Horizontal - Círculo
Plano Inclinado - Elipse
Plano paralelo a superficie - Parábola
Plano Oblicuo - Hipérbola

El arco de medio punto, como casi todos los arcos, trabaja a compresión, al igual que el descubierto por R. Hooke al invertir la cadena o conocido como arco catenario, así como el arco funicular y el arco parabólico. Es decir, la curva de una cadena puede modificarse dependiendo la carga ejercida en ella, pero no modifica su equilibrio estático, la curva catenaria, la parabólica y la funicular, encuentran su equilibrio en tracción cuando la curva es negativa, o a compresión cuando la curva es positiva.

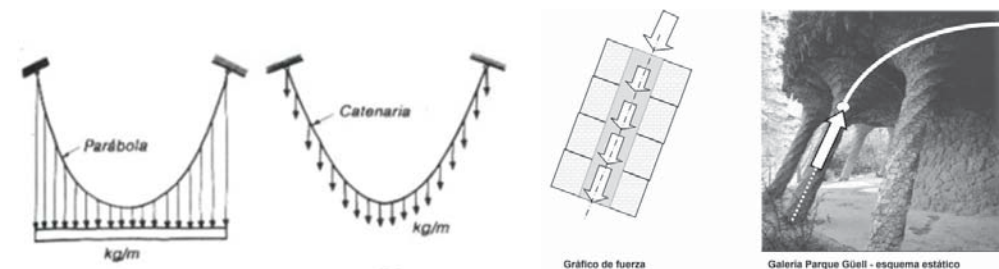
La parábola se define como el lugar geométrico de todos aquellos puntos que se ubican en un mismo plano y equidistan respecto a un punto fijo llamado foco y a una línea recta llamada directriz. (11.1) Pertenece a las curvas conoides, por que se crea a partir de la acción de un plano que es paralelo a la generatriz y que disecciona un cono circular. (11) La parábola esta descrita por una ecuación cuadrática, en cambio la catenaria por funciones hiperbólicas. (11.2) Christiaan Huygens también demostró que al aplicar cargas uniformes en proyección vertical, la curva catenaria se modifica a curva parabólica (12) y gracias a esto se pudieron construir puentes colgantes en remplazo de puentes apoyados en arcos no parabólicos.

Recordemos que tanto arco parabólico como arco catenario trabajan a compresión, como tenemos fuerzas horizontales y verticales en cada punto de la curva, tendremos una resultante con una dirección (ángulo) diferente a cero. Para que el arco trabaje a compresión óptimamente, necesitamos garantizar la transmisión de los esfuerzos que finalizan en los extremos, es decir, conservar el principio de transmisibilidad, con elementos de igual pendiente como se ve en las Galerías del parque Güell de Antoni Gaudí. (13)

Gracias a lo anterior podemos agregarles cargas y peso a estos dos arcos, construyendo con el mínimo de material, de lo contrario un pequeño peso aumenta considerablemente el tamaño del cimiento o la columna.

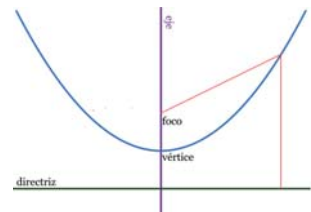
Cuando las curvas trabajan a tracción, para respetar este mismo principio, se deben articular los extremos o colocar la unión perpendicularmente al ángulo de la curva. (12)

En la curva parabólica, dada la carga uniforme, su curvatura está definida por la luz o claro y su flecha, sin importar la magnitud de la carga, la fuerza en sus extremos es la que varía. Dependiendo el proyecto se puede diseñar la curva sin tener en claro la carga a resolver.

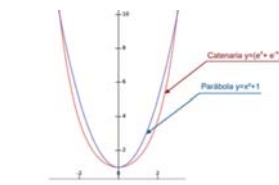


12 a) Carga uniforme en proyección vertical.
b) Carga uniforme. Extremos o apoyos perpendiculares a la curva.

13 Gráfica de fuerza en arco parabólico, la inclinación de la columna respeta el último vector resultante de XY del arco. Reprod. con fines didácticos, elaborado por Arq. Virginia Casañas.



11.1 Parábola; se ve la distancia de un punto con respecto al foco y la directriz.



11.2 Las funciones hiperbólicas incluyen funciones exponenciales e^x ($e=2.7182$) y su inversa e^{-x} . Se denomina función hiperbólica al seno hiperbólico, al coseno hiperbólico y las funciones derivadas de ellas. Siendo la catenaria el coseno hiperbólico.



14 Puente colgante Q' eswachaca; Qéswa: trenza y Chaca: puente. Incas 15 Puente colgante parabólico Golden Gate tejiendo el puente

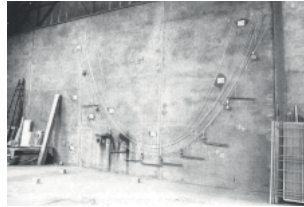
Un caso especial de estructura a tracción es el puente colgante de Q' eswachaca en la región inca de Perú (14), que año con año se renueva con más de cinco siglos de antigüedad, previo a la llegada de Españoles, tiene 30 metros de largo y 3700 metros de altitud. Elaborado con "Qoya ichu" un tipo de paja de la región andina, que se golpea para ablandarla y poderla trabajar y posteriormente se remoja, esta paja tiene como mayor resistencia el esfuerzo a tracción, al igual que la madera y el acero. Los múltiples trenzados que le realizan a la paja sirven para aumentar dicha cualidad y elaborar el puente.

Los Incas descubrieron como utilizar la Qoya Ichu para construir un puente que permite cruzar el cañón del Apurímac. Sobre el conocimiento tradicional y el científico, el Dr. en Física Derek Muller reflexiona que: "la cultura funciona como la memoria de esa (una determinada) población... la tradición puede ser una manera de codificar el conocimiento" (m 5:49). y así perpetuar lo que funciona. Cuando algo parece funcionar se procede a comprender el ¿Cómo y Por qué? Y en ocasiones esto nos acerca a una mayor eficiencia, hoy sabemos a que debe su resistencia el puente de Qéswachaca, incluso esta el ejemplo en la histórica evolución de los arcos a compresión, se emula lo que funciona, se estudia, y se mejora.

LA TRACCIÓN DEL SIGLO XX

La forma arquitectónica de membranas textiles siempre tiene como principio las curvas, la catenaria y la parábola evolucionaron con auge en el siglo XX, pasaron de ser usadas como curvas bidimensionales a curvas tridimensionales. La cadena colgando se convirtió en objeto de diseño para Gaudí, o se transformó en maquetas de tela suspendida en sus cuatro puntos y conservar su trabajo a tracción, la parábola ha sido usada con múltiples variaciones en puentes y soluciones ingenieriles, mientras que arquitectos tomaron nuevas formas de doble curvatura como los paraboloides hiperbólicos.

La historia del último siglo y medio abarca algunas generaciones y cambios significativos, más aun si se trata por ser el más reciente, del siglo con mayor evolución tecnológica. La maqueta, la eficiencia en material, la búsqueda de



16 Fotografía de modelos de cables para los arcos diafragma de la casa Milá.

nuevas formas y el empirismo dieron vida a innumerables objetos arquitectónicos de gran valor estético.

Estas obras arquitectónicas tienen el sello personal de sus autores, aunque Frei Otto suele ser el máximo exponente en el tema de membranas o tensoestructuras, otros arquitectos de trascendencia dejaron en su historia aportes en la evolución de las geometrías curvas, principios que rigen sin importar el material constructivo de su preferencia. El arquitecto nunca cesará en su búsqueda de la forma ideal, algunos de ellos encontraron la respuesta en superficies de doble curvatura.

No es intención de la tesis elaborar un trabajo exhaustivo sobre la evolución y aplicación de geometrías curvas, sin embargo la membrana textil no puede ser estudiada de manera aislada, así como cada etapa artística tiene su conjunto de valores y contexto que le conforman, la membrana textil no la consideraría una tipología arquitectónica, sino un sencillo ejemplo dentro de la tipología conocida como forma libre, el cual profundizaremos más adelante, o bien, arquitectura laminar.

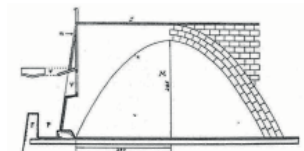
Por lo anterior, interesa la herencia de los citados arquitectos del siglo XX, aportan contexto y cualidades en el estudio de la membrana textil y razonamientos sencillos para construir maquetas y modelos poco materializados en la práctica, que rompieron tendencia y brindaron nuevos paradigmas.

Antoni Gaudí

Arquitecto español nacido en 1852, máximo exponente del Modernismo Catalán o bien del Art Nouveau, el cual se inspira en formas de la naturaleza, para diferenciarlo del "modernism", raíz del cual se desprende el funcionalismo. Por escritos de sus discípulos y otras anécdotas se sabe del toque irreverente que caracterizó a Gaudí, tildado de mal estudiante pero autodidacta, prefería el empirismo antes que la teoría.

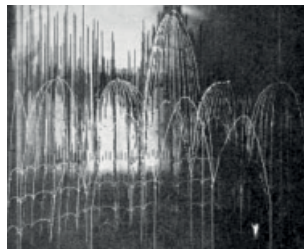
Si bien en Reino Unido y zonas alemanas ya se había puesto en práctica el uso de arcos catenarios propuestos por Hooke desde su descubrimiento, Gaudí incorpora el diseño estructural como medio de expresión modernista, usa las curvas catenarias y parábolas como elementos jerárquicos en sus obras, y así logra provocar una nueva tendencia de cara al siglo XX. Son escasos los ejemplos contemporáneos de estilo Gaudiano, la tendencia se mira desde el origen filosófico y práctico, la arquitectura no había logrado antes de él resolver su estructura con la sencillez convexa propia de la naturaleza, a pesar de que la teoría y las matemáticas ya sugerían a arquitectos su aplicación.

Existen tres métodos de diseño para estas curvas, cálculos matemáticos, métodos gráficos y modelos colgantes. Huerta (2008) explica: "Gaudí necesitaba una herramienta de proyecto, que permitiera realizar cálculos rápidos y variar el proyecto a voluntad" (p.142). El arquitecto y profesor Santiago Huerta relata que croquis de cálculo y fotografías dejan evidencia de los métodos usados por Gaudí. El proceso no es directo sino iterativo, como ejemplo los arcos funiculares de la casa Milá. (16 y 16.1)



16.1 Superior: Dibujo frontal del arco funicular tipo en casa Milá.

Inferior: fotografía estado actual de la arcada en el ático.



17 Pequeño modelo de estudio invertido de Gaudí para una iglesia. Observar los cables principales que representan los empujes.



17.1 Foto invertida del modelo para la iglesia Güell tras ser colgados los sacos de arena



17.2 Pintura aguada sobre la foto anterior para visualizar el espacio interior.



17.3 Izquierda: Foto de modelo iglesia de la colonia Güell revestido con papel, escala dimensiones 1:10 y escala pesos 1:10,000. Derecha: Pintura aguada sobre fotografía para estudiar el exterior.

Se cuelga un cable simple y se calculan los pesos que actuarían sobre él, midiendo las distancias verticales (peso propio de los muros de los riñones) y sumándoles peso correspondiente del forjado. Se añaden esos pesos al cable que cambia su forma. Se miden de nuevo las distancias verticales y se modifica el peso propio. El cable... toma una forma muy aproximada a la matemática exacta. (16)

(Huerta, 2008, p.142)

Para estos arcos del ático en la casa Milá, Gaudí dominaba ya el uso de modelos, representan un uso bidimensional sencillo, mientras que para la Basílica de la Sagrada Familia y la Iglesia de la colonia Güell la estática a resolver es tridimensional, explorar estas ideas le tomó en la Iglesia de la colonia Güell diez años de proyecto más ocho de construcción de la cripta, dejando inconclusa la iglesia.

El proceso de diseño es parecido, primero se forma un esqueleto de distintas catenarias agrupadas generando volúmenes, los cables principales representan las trayectorias de empujes, (17) segundo se carga el modelo con saquitos de arena, (17.1) naturalmente se modifica la forma y se calculan pesos y superficies, así el proceso iterativo controlando dos variables; carga (se debe considerar la escala del modelo, para realizar las mismas conversiones en esta) y geometría de catenarias (por ejemplo variando la longitud de cuerda o los puntos donde se suspenden, que representan el arranque de las columnas) lo que da forma al diseño. Posteriormente Gaudí estudiaba la volumetría tomando una fotografía para luego pintar con gouache o técnicas aguadas sobre ella, (17.2) algunas ocasiones colocaba papel delgado en el interior del modelo previo a la foto. (17.3) Por último media sobre el modelo para poder dibujar los planos.

Huerta (2008) resume de forma técnica: Gaudí maneja solo las ecuaciones de equilibrio de la estática, unas veces emplea modelos, otras aplica la estática gráfica, pero solo maneja estas ecuaciones. Las otras dos ecuaciones estructurales que hacen afirmaciones sobre el material o sobre la geometría de la deformación (compatibilidad) están completamente ausentes. (p.155)

Por medio de ecuaciones de equilibrio no se conoce realmente como la estructura transmite sus cargas al terreno, un primer intento para solucionarlo por parte de los ingenieros contemporáneos a Gaudí fue aplicar cálculo elástico, es decir, las cualidades del material y las de compatibilidad (continuidad

de los elementos y condiciones de contorno) sin embargo el trabajo estructural continuaba siendo indeterminado, hasta que a finales de siglo XX nace la Teoría Plástica, y a su vez El Teorema de la seguridad. Sobre este Huerta (2008) afirma que:

Resuelve el dilema de la tarea imposible de encontrar el estado “real” de la estructura: si es posible encontrar una distribución de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas exteriores que no viola la condición de límite o cedencia del material, la estructura es segura, no se colapsará. (p.158)

Dicho de otra forma, la estructura no trabajará como el calculista proyecte, sin embargo antes de hundirse encontrará el equilibrio pensado, solo tiene que ser posible dicha situación, el dibujar vectores de empujes en equilibrio. Los modelos de Gaudí son sistemas en equilibrio. (18)

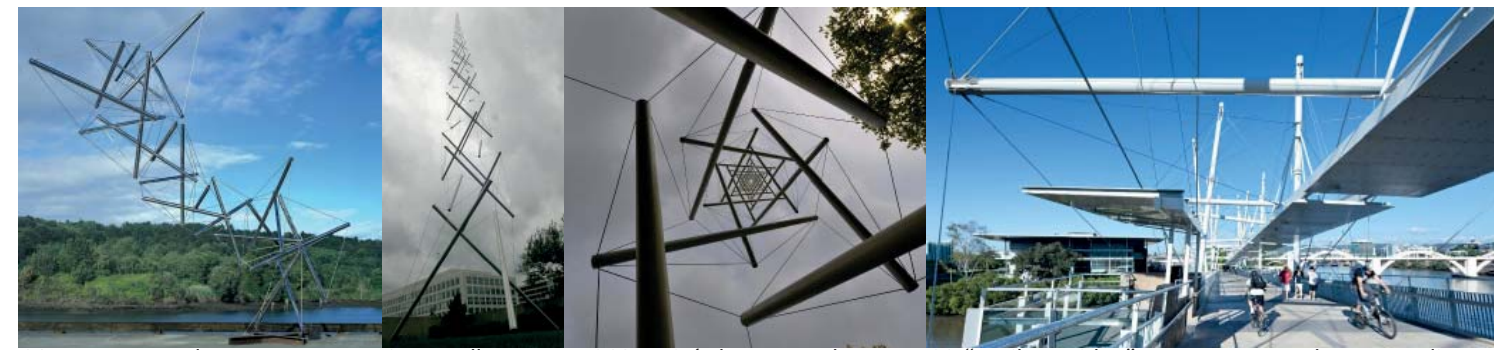
“En un mundo cambiante lo único estable no es el estado real (de la estructura)... sino el conjunto de principios en los cuales se basa su comportamiento”
Ing. Jacques Heyman

El diseño de la Iglesia de la colonia Güell está justificado por el Teorema de la seguridad, Gaudí no manejaba las propiedades del material pero fue pionero en buscar y construir con el equilibrio de geometrías orgánicas, incluso en la Basílica de la Sagrada Familia el diseño considera centros de gravedad para dar forma a las columnas arbóreas y que puedan bajar los vectores de cargas verticales. De su obra vale remarcar 4 pautas en la proyección de membranas;

- 1- La estabilidad mecánica es inherente a su geometría
- 2- Esta estabilidad se obtiene al encontrar equilibrio en las líneas de empujes
- 3- La forma de la maqueta colgante está dada por el equilibrio natural de sus componentes
- 4- Se diseña controlando variables conocidas (un principio del diseño paramétrico)



18 Modelo reproducción de la Iglesia de la colonia Güell elaborado por estudiantes de la Universidad de Stuttgart y el prof. Frei Otto. 19 Iglesia de la Colonia Güell



20 Dragon; Escultura y fotografía de Kenneth D. Snelson

21 Needle Tower, 1968; quizás la mayor obra reconocida de Kenneth D. con 18m de alto, es un ejemplo de mástil de compresión discontinua

22 “Kurilpa Bridge” Puente peatonal en Australia, Cox Rayner Architecs y Arup. Los postes horizontales flotan por tensegrity y cargan la cubierta.

Tensegrity

Blanco (2010) narra: “La palabra Tensegrity proviene de la contracción de “integrity” y “tensional”, que fue acuñada por Fuller a principios de los 60 ‘s” (p.2). Richard Buckminster Fuller y Kenneth D. Snelson en Estados Unidos así como paralelamente David Georges Emmerich en Francia, comparten el crédito de inventar estas estructuras.

Diversas definiciones surgieron desde entonces, Pugh (1976) lo aseveró así: “Un sistema Tensegrítico se establece cuando un conjunto discontinuo de componentes sometidos a compresión interactúa con un conjunto continuo de elementos sometidos a tracción definiendo un volumen estable en el espacio” (Gómez, 2008, p.4). Por lo general es la más aceptada por ser técnica, breve y contundente.

Richard Buckminster Fuller nacido en Massachussets en 1895, es conocido popularmente como arquitecto debido a su más recordado legado, la cúpula geodésica materializada en la exposición internacional de Montreal en 1967 por el pabellón de Estados Unidos, aunque nunca logro concluir la carrera debido a que en dos ocasiones ingreso a la prestigiosa Universidad de Harvard y en ambas ocasiones fue expulsado. Bucky Fuller diseño e invento múltiples objetos, escribió numerosos libros, tenía un interés por descifrar el futuro del hombre, llegando a escribir sobre corrientes como el polémico transhumanismo. Bucky fue pionero en sistematizar predecir el futuro, como profesor, influyó en el propio Robert Kiyosaki (2015) quien menciona una lección de su querido profesor “para ver el futuro, mira el pasado”. (p 10).

En geometría Fuller es el principal padre teórico de la Tensegridad. Es importante conocer un poco de su mentalidad dada la similitud de visión respecto con otros arquitectos mencionados y la esencia misma de las cubiertas ligeras. De acuerdo con R. Kiyosaki (2015) un principio generalizado que le aprendió a Fuller fue “entre a más gente sirva más eficiente seré” (p 86). Buscando un conocimiento global y estudiando conceptos como; economía de materiales, formas en la naturaleza, ligereza y gasto de energía, llevaron a Buckminster a sus creaciones y nuevos postulados como la geometría energética o “dymaxion”, término con el que nombro sus inventos por englobar en ellos, tensión máxima dinámica. Estos postulados fascinaron a su alumno Kenneth D. Snelson que para el curso de verano en 1949 le llevo sus esculturas a Bucky aplicando

sus conceptos de geometría, Fuller insistía en utilizar un tetraedro de base, su alumno en cambio realizó la maqueta con una base en “X” inspirado en los papalotes de juguete pero incorporando una tercera barra, por esto se le reconoce a Kenneth D. el primer mástil de compresión discontinua. (21) (Gómez, 2008).

La búsqueda de la forma de Kenneth igualmente está asociada a modelos, la experimentación kinestésica e intuitiva demuestran la viabilidad de una idea. Existen métodos de cálculo dado un sistema tensegrítico para justificar su comportamiento, sin embargo por ser métodos a posteriori resultan poco útiles para un proceso de diseño, por lo que la maqueta sigue siendo primordial en la proyección de estos sistemas.

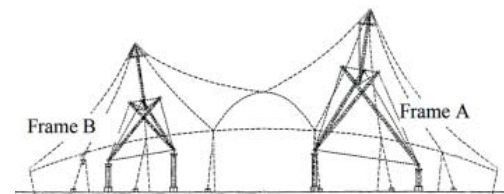
Desde entonces la Tensegridad se ha visto con muchísimo potencial no solo para arquitectos, ingenieros y diseñadores, en biología y medicina por ejemplo, permitió nuevos inventos e hipótesis.

El investigador de biomecánica Steven Vogel logro demostrar que las estructuras músculo-esqueleto de varios animales terrestres, incluyendo los 206 huesos humanos, trabajan a compresión y “flotan” a pesar de la gravedad dentro de los tejidos blandos, así músculos, tendones y ligamentos trabajan a tracción (Blanco 2010). Visto el cuerpo humano así permitió conocer que la causa de una dolencia puede encontrarse en una zona lejana de donde aqueja, por ejemplo, un dolor de cuello podría deberse a una incorrecta postura al caminar, al igual que en un modelo tensegrítico que se le aplique una carga puntual, este deformara su geometría y cada uno de sus componentes tanto de compresión como de tracción serán sometidos al esfuerzo gracias a la interconexión del sistema.

En general en arquitectura los principios de tensegridad se usan para cubiertas ligeras y en obras con sistemas mixtos, un buen caso de estudio se ubica en Japón, el edificio White Rhino, una cubierta de membrana del tipo conoide, normalmente esta forma se logra con un poste flotante por medio de vectores (cables) que trabajan a tracción, en el caso de White Rhino un sistema “simplex” (23) el modelo tensegrítico más sencillo herencia de Kenneth, es el encargado de mantener un poste elevado a la vez. (24 y 25)



23 Izquierda: sistema “SIMPLEX” derecha: en magenta 3 tendones que mejoran mucho la rigidez estructural del marco, la pauta estructural es simple, completar las caras bidimensionales en la geometría, en este caso triangulares, similar al Form Finding en una Geodésica.



24 Corte arquitectónico edificio White Rhino, conoide B con 7m de alto, conoide A con 10m.

25 White Rhino, nombre por su apariencia exterior con 2 conoides. Se ve cada poste flotante con su respectivo sistema tensegrítico simplex.



26 Estadio Wanda Metropolitano. Cubierta ligera a base de membrana, anillo de acero a compresión sobre graderías y cables, y anillo interior a tracción.

Destacadas cualidades y ventajas de sistemas tensegríticos;

Eficiencia - dado que los materiales estructurales sólo son necesarios en las trayectorias de cargas, lo que además da ligereza. También son energéticamente eficientes, ya que sus elementos almacenan la energía en forma de tracción o compresión. (Blanco 2010).

Compactibilidad - Una estructura simplex o generada a partir de poliedros, comparte una cara superior e inferior paralelas entre sí, lo que permite la sucesión de estructuras similares, este es el principio de las esculturas de Kenneth, y un amplio campo de estudio como estructuras de aterrizaje de la nasa o puentes desplegables. Los elementos a compresión a la vez que permiten esto generan un gran reto, la posibilidad de compactar una estructura se debe a la ubicación tridimensional y sistemáticamente radial de los elementos a compresión, pero con el inconveniente de la congestión de barras, este último conflicto incluso está a medida que los claros aumentan en una estructura tensegrítica.

Gómez (2008) afirma “La indeterminación cinemática de las tensegridades es, en ocasiones, una ventaja. En sistemas plegables, sólo una pequeña cantidad de energía sería necesaria para cambiar su configuración, ya que la forma cambia con el equilibrio de la estructura y viceversa” (p.7).

- No requieren ni de la gravedad ni de un anclaje para mantener la estabilidad mecánica de su forma.

- La resiliencia o rigidez de la estructura depende de los materiales y de su modo de ensamblarlos, pudiendo resultar, en función de ellos, muy flexibles y maleables o de gran rigidez y firmeza.

- Trabajan como un todo, por lo que cualquier carga puntual a la que se les someta es transmitida uniformemente y absorbida por toda la estructura, es decir, el funcionamiento explicado con los huesos y tejidos blandos. Las fuerzas que aparecen en el sistema, se transmiten a través de la distancia más corta.

Gómez (2008) explica:

- El hecho de que estas estructuras vibren ostensiblemente en todo su conjunto indica que están transfiriendo fuerzas muy rápidamente, y por tanto dichos esfuerzos no aparecen localmente. Esto es muy indicado para aquellos casos en los que sea necesario absorber impactos o vibraciones sísmicas. (p.7)

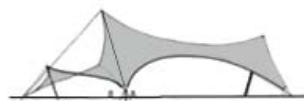
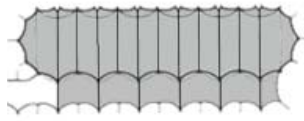


27 Modelos de estudio con pompas de jabón. Se ven 2 conoides en dirección opuesta.

Las estructuras tensegrity también tienen varias desventajas en su aplicación arquitectónica, existen propuestas y tesis para llevar más allá su uso y construir edificios con este sistema estructural. Sin embargo estas desventajas no son inconvenientes si hablamos únicamente de cubiertas ligeras, por lo que resulta útil tener presente los principios en los cuales basan su comportamiento así como sus ventajas o aportes. Integrar sistemas tensegrity, o bien, generar diseños mixtos junto con las cubiertas ligeras, puede agregar valor en la forma y en la aplicación del sistema estructural.

Una vez el mundo conocía estas estructuras, Bucky Fuller recurría a menudo a la comparación con la rueda de radios para explicarlas, por sus propiedades de compresión discontinua y tracción como sustento principal. (Gómez, 2008).

En 2017 se completó la reinauguración del nuevo estadio del equipo español Atlético de Madrid, el cual llamó la atención por su sencilla y atractiva cubierta, diseño del ingeniero alemán Mike Schlaich, la cual funciona como una rueda de radios inmensa.



28 Sala de olas, Hamburgo 1963. Planta y elevación.

La estructura de la cubierta está formada por un anillo exterior de compresión de acero, un anillo interior de tracción formado por cables, y dos grupos de cables radiales que conectan los anillos. La estructura está cubierta por membranas en el espacio entre los dos anillos. (26)

(Marzo, 2018, p. 6)

Las membranas arquitectónicas desde sus orígenes consisten en postes, cables y materiales elásticos, las estructuras tensegríticas poseen cualidades físicas y mecánicas que son de utilidad para comprender como quedan suspendidas las cubiertas de membrana, y también pueden convertirse en la imagen del edificio como en el caso de White Rhino.

Frei Otto

El Arquitecto alemán nacido en 1925 es un punto de inflexión en la arquitectura textil. A los dieciocho años inicia su carrera de arquitectura, pero se ve interrumpida por ser llamado a participar en la segunda guerra mundial, posteriormente cayó prisionero por lo menos un año en Francia y actuó como arquitecto de campo, encargado de los campamentos de tela temporales. En 1954 concluye su tesis doctoral ("El techo suspendido, forma y estructura") e inicia una fructífera colaboración con el constructor de tiendas de tela Peter Stromeyer, la década de los 50's le da popularidad a Otto por sus trabajos con Stromeyer y también llamando la atención su estilo empírico de entender las estructuras con modelos físicos, similar al estilo de Antoni Gaudí o Richard Buckminster Fuller.

Entre los casos más escultóricos y complejos se encuentra la carpa "Wave Hall". (28) Era asimétrica en su geometría y también por incluir dos estructuras distintas. La propia sala ocupó superficies anticlásticas (de doble curvatura inversa) entre crestas paralelas para, alternativamente, apoyar o delimitar la membrana. Los mástiles que modelaron las crestas, eran más altos en un lado que en el otro, provocando la deflexión asimétrica de los contornos en la cresta. El segun-



28.1 sala de olas, Hamburgo 1963



29 Pavellón Aleman, Montreal 1967. Fotografía aérea.



30 ILEK: 1964, Perspectiva exterior, detalle interior de cubierta y perspectiva interior con modelos de trabajo.

do elemento, una galería de paso que en la mitad de su longitud se conectaba directamente a la membrana principal, y lo conforma una fila de simples sillas de montar (Glaeser, 1972).

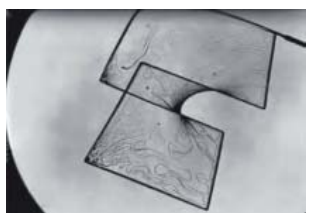
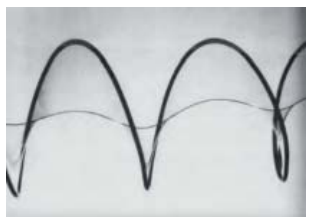
Muchos profesionistas del diseño y las artes han encontrado inspiración en la naturaleza, más allá de su belleza, por los cientos de especies y elementos que desde el enfoque de eficiencia, parecen cerrados y perfectos, como si a estos organismos no les faltara ni sobrara nada. Otto observó esto y lo convirtió en su obsesión de estudio, lo que le resultó muy fructífero. Gracias a esto el ganador post mortem del premio Pritzker buscó el mínimo consumo de material con "pompas de jabón" y dedicó su vida al estudio de estructuras en la naturaleza como; cristales, plantas, estructuras ramificadas, microorganismos, entre otras, así como publicar algunos libros de su trabajo.

"En la actualidad, el arquitecto se desentiende voluntariamente de las ciencias naturales, pero comete un grave error pues la construcción es una ciencia de la naturaleza aplicada"

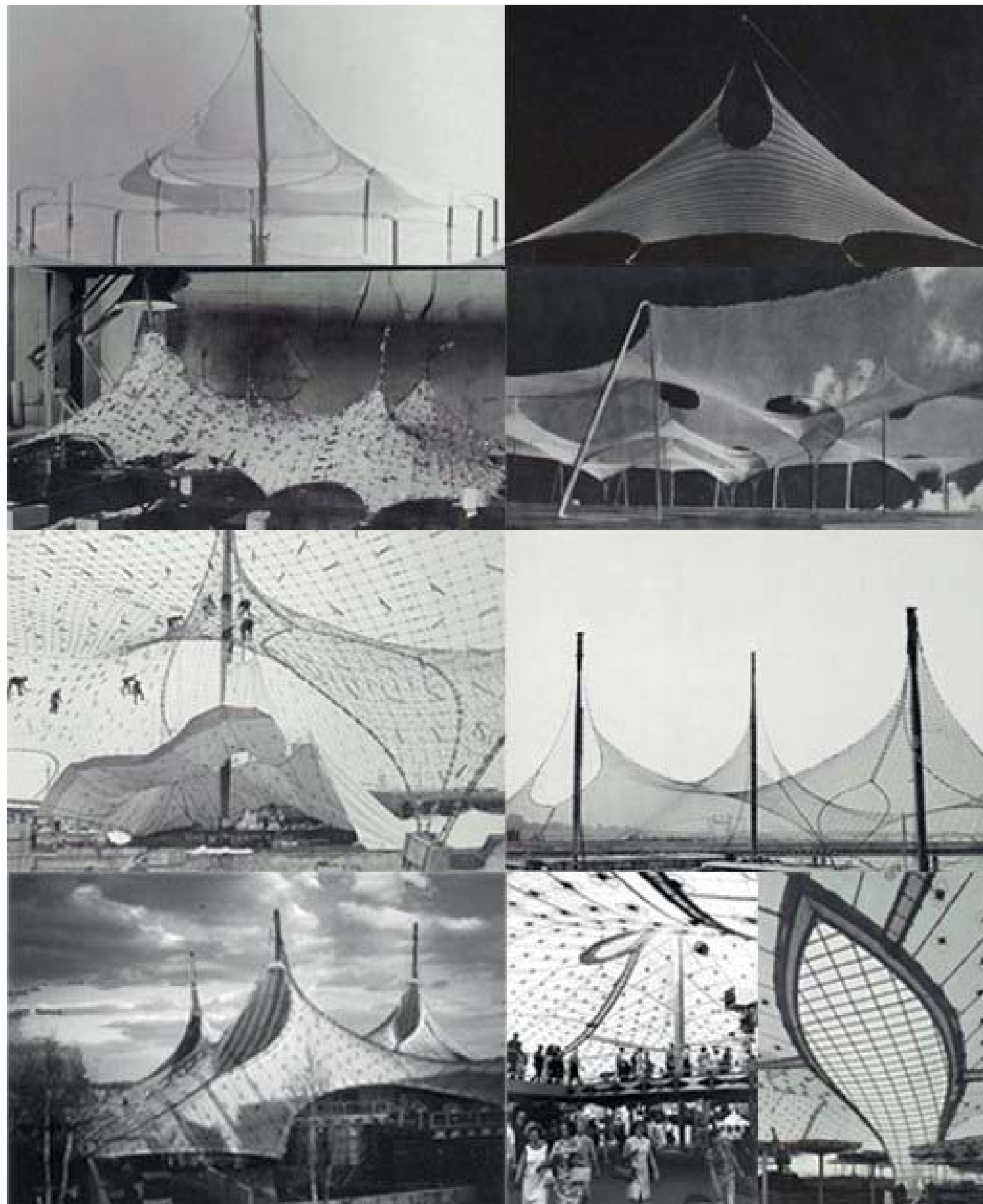
Frei Otto

El arquitecto alemán utiliza el concepto de "autoformalización estructural", el cual se refiere al proceso en que la naturaleza da forma a las especies y su ambiente abiótico. Este proceso lo estudia con lo que él llama "camino inverso", de acuerdo a Otto citado en Pino (2016) "El método del camino inverso hace posible reconocer los procesos de formación en la naturaleza animada e inanimada en la medida que tales procesos se ponen en marcha artificialmente. Esto es realizado mediante la experimentación y el desarrollo de la técnica de construcción. Los desarrollos técnicos conducen adelante hacia un alto nivel de cualificación que permite un mejor conocimiento de las construcciones no técnicas de la naturaleza. Esto es conocido como el 'camino inverso'. La naturaleza no es copiada, pero se hace comprensible a través de desarrollos técnicos" (p 3).

En 1964 forma el Instituto de Estructuras Ligeras (ILEK) en la Universidad de Stuttgart que continúa hasta la fecha con publicaciones y estudios sobre la generación de geometrías en la naturaleza y su aplicación en la arquitectura. (30)



31 Ensayos con superficie de pompa de jabón a partir de un marco metálico



32 Collage: Montreal 1967, Pabellón Alemán. Se ven 2 modelos de estudio, 2 maquetas; la primera para mediciones y estructura, la segunda para estudio de forma, 2 trabajos en obra y 3 fotografías con la membrana en uso con vista interior y exterior.



33 Nave multiusos en Mannheim, estado actual tras reciente remodelación; 1- Vista interior, zona mas larga y alta 2- Vista de pájaro 3- Acceso con arco catenario.

La estructura para el ILEK se construyó como ensayo para el pabellón alemán de la expo Montreal 67 (32), después de que el gobierno canadiense solicitara una demostración de estabilidad con un prototipo. La forman dos redes simétricas anticlásticas que cuelgan de un mástil de diecisiete metros de altura y entre ellas un gran ojal cubierto por una tercera red. Ya que había servido como modelo de estudio se aprovechó para el instituto de estructuras, Otto la cubrió por el interior con paneles de madera y el ojo central transparente con paneles de vidrio. Logro con esta y otras obras permanencia de las membranas, hoy en día abundan proyectos y propuestas no efímeras de membranas o cascarones, en especial con grandes claros y de uso público, poco o mucho pero con influencia académica de Frei Otto.

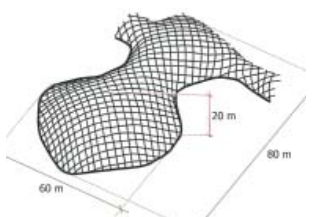
La estructura del pabellón cubría una superficie de $8,000m^2$, la gran malla de acero se suspendía sobre ocho postes que estaban colocados irregularmente y atirantados por cables, ambos de acero. Sobre esta estructura se colocó una membrana textil de poliéster translúcido. Igualmente al diseño le acompañan múltiples ojales, elemento recurrente en las obras de Otto para permitirle acceso al sol. Los postes, la gravedad y las caídas al suelo le permiten libertad a la malla generando el paisaje de curvas paraboloides.

Este mismo concepto se utilizó para el conjunto olímpico en Múnich en 1972, ahí diseñó el primer estadio con cubierta hecha con redes de cables y revestida con placas de acrílico translúcido, que tienen la función de membrana, es decir, funcionan estructuralmente.

El propio Otto reconocía no saber matemáticas, ni cálculo estructural, ni computación (Oliva, 2015). Su equipo de ingenieros además no podía resolver las complicadas formas por los métodos tradicionales o las opciones de software que apenas comenzaban en los años 60's. Para su proceso de diseño y estudio comenzaba con las pompas de jabón (31) utilizaba técnicas de fotogrametría y aparatos de medición directa que aportaban información en un proceso iterativo. Con esto el equipo de Otto podía materializar las formas y observar cómo se deforman de modo elástico. Las pompas de jabón ofrecen una geometría pura y precisa pero inestable en el tiempo, ya que encontraba la superficie mínima con las pompas de jabón procedía a construir la maqueta con cables a escala y les colocaba cargas para comprobar su resistencia.



34 Centro Multifuncional de Mannheim. Maqueta colgante escala 1:100 con pesos para la obtención de la forma.



34.1 Esquema de Mannheim o maqueta invertida

Otra línea de trabajo y proceso de diseño interesante es la evolución y uso que dio a catenarias, dejaba a gravedad mallas de cadenas cargadas con pesos a control para encontrar la forma, similar a Gaudí pero por tratarse de mallas obtenía tramas deformables con apariencia a “bóvedas de celosía”. (34) Otto bautizó estos proyectos como “grid-shell” o cascara de rejilla, aquí si trabajaba en paralelo con software para entender las retículas (Malmanger, 2005).

Un equipo germano-japonés había estado trabajando con Otto en el ILEK desde 1971 con estas grid-shell, y construyeron varias obras utilizando listones de madera en lugar de cadenas (Malmanger, 2005). Si colgamos una tela cuadrada sostenida en sus cuatro vértices y le añadimos un peso puntual, como ya se ha mencionado con la cadena, la forma adoptada de la tela está en su equilibrio natural, pero trabajar con mallas permite observar la deformación gradual de los nodos, similar a la cadena funicular pero en dos direcciones, creando una forma tridimensional.

Así, variando los puntos de apoyo, las alturas de estos y las cargas puntuales, obtenemos una forma con dobles curvaturas, justificadas con información del proyecto, pero también de la estética buscada a través de la experimentación. (34.1)

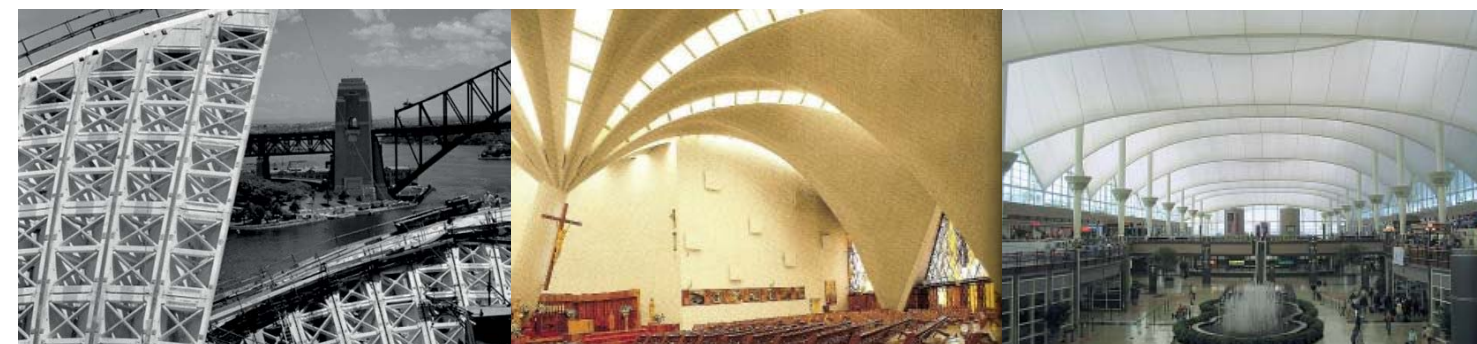
Otto aprovechó exitosamente el proyecto de una cubierta para una nave multiusos en Mannheim (33) Alemania y ahí construir su primer grid-shell, dejando anécdotas del proyecto y logros arquitectónicos.

Acude a los ingenieros de Ove Arup en Londres y en concreto conoce a Ted Happold... tras dos modelos proponen un tercero a escala real, los cálculos tienen una enorme precisión, se pensaban 80mm de deformación contra los 79mm reales en el modelo. (Pino, 2016, p. 112)

Así estas tramas se construyen mediante nudos flexibles y por capas superpuestas, lo que permite flexibilidad y la sección suficiente para evitar el pandeo. Para resolver el problema de estabilidad de la estructura en Mannheim, estratégicamente se colocan cables de acero que circulan como diagonales en los cuadrados de la malla. La malla se construyó plana sobre el suelo, como una hoja de papel, y se fue doblando hasta llegar a la posición y forma diseñada, con un sistema de subestructura de apoyo parcial. Al final se coloca la piel del edificio de fibras de poliéster que permiten el 30% del paso de luz. Mannheim logra con listones de madera con sección de 5cm por 5 cm cubrir un claro de 80m, una superficie de 9500m² y una construcción de sesenta días, compensando para obras futuras los contratiempos estructurales de esta.

“La discusión sobre el concepto de infinito es de extrema importancia, algo que la mayoría de los arquitectos no entienden, que existen infinitas posibilidades para la arquitectura del futuro. No hay límites.” Frei Otto

En su arquitectura de membranas textiles Otto solía dejar los bordes libres en relinga, en la arquitectura no efímera predominaron los bordes rectos, mucho



35 Construcción de la Ópera de Sidney. Estructura modulada con doble curvatura esférica.

36 Iglesia de Santa Mónica, Arq. Lopez Carmona

37 Aeropuerto Internacional de Denver, Arq. Curtis W. Fentress

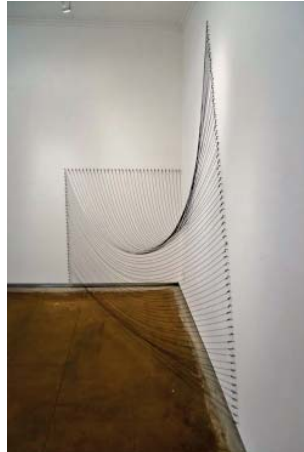
tiene que ver las maquetas, por ejemplo los bordes rectos de los marcos usados para pompas de jabón.

Con una mente inquieta y una infancia cercana al oficio, Otto fue cantero como Gaudí calderero, su aproximación para la comprensión de la realidad es empírica antes que racionalista, tienen método inductivo y no deductivo, parten de observaciones particulares en la naturaleza que al ser sumadas a la experiencia resultan en su propio sello arquitectónico reflejado en el grueso de sus obras. Visto así con las circunstancias y la cosmovisión, no es capricho estético, sino derivado de la observación, experimentación y ejecución, que la forma libre es una opción válida de diseño y la doble curvatura la opción formal más eficiente.

LA FORMA LIBRE

La estética y vanguardia que otrora podía plasmar en papel la mano humana, ahora son software quienes tienen la capacidad de en poco tiempo asistimos en cientos de novedosas soluciones arquitectónicas. Se presenta la pregunta ¿Cómo generamos estas formas y continuamos innovando? El uso de estos programas en modelado 3D ya es inseparable del ejercicio arquitectónico, el primer paso es conocer los parámetros y elementos que moldean la forma para después insertar la información en el software, de ahí un proceso iterativo entre la información de maquetas, modelos digitales y las intenciones iniciales del diseñador, este muy generalizado proceso está respaldado por sus pioneros artesanales que hemos visto, como también por los despachos actuales especialistas en este estilo al que nombramos; “la forma libre”.

Como en otros campos de diseño, el arquitecto puede gustar de justificar sus obras en la relación que mantienen los distintos elementos que las componen, o bien diferenciar la estética y el funcionamiento, justificando el ornamento y el resultado final con otros valores. En la arquitectura de forma libre también hay ejemplos de ambos casos, los profesores Azagra y Bernabeu (2012) de Reino Unido y España respectivamente, han propuesto según el proceso de diseño y su relación estructural de estas formas libres, cuatro categorías de las cuales he resumido dos:



38 Sabine Reckewell, Linear Installations.

Formas escultóricas - Son de trazo libre a mano por el arquitecto, la forma da origen a todo el proyecto, no pesa la arbitrariedad, por tanto la estructura no acompaña en el proceso de diseño, sino se debe ajustar a la forma deseada, ejemplos gráficos son el museo de Guggenheim de Frank Gehry o la Ópera de Sidney por el arquitecto Jorn Utzon (35). El uso de software asiste primero en la replicación de la forma y segundo en la solución estructural, generando así dos geometrías, una estructural y otra arquitectónica.

En la fotografía 35 de la Ópera de Sidney observamos la doble curvatura de la estructura, este diseño trato de resolverse con formas parabólicas, hiperbólicas y elipsoides, al final fue una segmentación esférica la que logro modular y resolvió el problema de estructurar el diseño. La esfera solo trabaja a tracción si está completa y su trabajo a compresión no es ideal.

Con esto es valioso identificar que existen formas libres con dobles curvaturas, por lo que tampoco permiten cargas puntuales, pero no son membranas por que la relación de superficie y grosor no resulta en delgadez y liviandad. Por esta razón no se puede construir una cubierta de membrana textil de "forma escultórica", de acuerdo a la clasificación de Azagra y Bernabeu, dado que una cubierta textil no puede construirse sin contemplarla como parte de la estructura, o en su defecto la proyección de una segunda estructura, el ejemplo sería una carpa armable de jardín o incluso una sombrilla.

Formas de generación estructural - Son formas de gran complejidad y libertad geométrica, su justificación podría entenderse como el resultado natural en que una película de jabón se comportaría al ser sometida a los mismos condicionantes propuestos por el arquitecto y/o del proyecto, este proceso de diseño además defiende la posibilidad de modificar las condicionantes con el propósito de optimizar el comportamiento estructural y la estética. Este fuerte vínculo entre estructura-forma, permite una infinidad de variantes geométricas mediante la modificación de parámetros que la definen, al mismo tiempo esto tiende a provocar formas de gran complejidad que dificultan su ejecución y pone en cuestionamiento su construcción.

Ejemplos pioneros de generar estas formas son los cascarones construidos en México de los arquitectos López Carmona, Félix Candela o Juan Antonio Tonda, y un buen caso actual es la membrana textil en el proyecto del aeropuerto internacional de Denver en Estados Unidos. (37) A modo de dogma; las tensoestructuras se diseñan con este vínculo estructura-forma, garantizando esto se preservan sus cualidades medio ambientales con el mínimo gasto de material.

Como vimos, además de los requerimientos que demande el proyecto, la visión del diseñador está presente en el proceso, así que para construir una membrana textil podríamos iniciar por preguntarnos si; ¿Puede una enorme tela ser bella? ¿Y cuáles son los recursos que un arquitecto en su labor de artesano de membranas dispone? El principal lenguaje de la belleza son nuestros sentidos, la razón queda subordinada en la mayoría de estas experiencias. El problema con la tela es que en principio parece no tener mucha gracia para generar sensaciones, sumando la repetitividad formal de tensoestructuras que encontramos actualmente.



39 Akio Hamatani, W-Órbit 2010

40 Sabine Reckewell, Doble catenaria 2013

41 Hotel Amarin, Croacia. Red azul recreativa.

Existen buenos casos de artistas contemporáneos que toman la catenaria e hilos como su objeto de expresión, y afortunadamente aquí las obras no deben responder a una función específica, lo que además de dar mayor libertad nos permite observar la parametrización como estilo.

Recuerdo una de las primeras lecciones en la carrera de arquitectura, el como la sucesión de puntos genera la línea, la sucesión de líneas el plano, y la sucesión de estos el volumen, el ejercicio enriqueció cuando tomamos líneas o planos como módulos y se les modificó sistemáticamente con conceptos como; adición, sustracción, rotación, torsión, escalar, mirror, dirección, forma, etc. más la posibilidad de combinar, generando volúmenes interesantes. Puedo ver este sencillo ejercicio que da vida a envolventes más fáciles de realizar que de imaginar, en las obras de Akio Hamatani (39) o Sabine Reckewell (38) al igual que en cascarones del siglo XX.

"Desde 2010 he construido instalaciones tridimensionales del tamaño de una habitación. Me interesa ubicar las obras de arte en un contexto arquitectónico determinado y utilizo materiales lineales, repetición y geometría para crear volúmenes. Pienso en ellos como dibujos tridimensionales."

Sabine Reckewell

Al mismo tiempo veo en todos estos casos una limitante en la parametrización que también se da en la membrana textil, el borde tiene mucha jerarquía en la envolvente resultante. Existen membranas con borde libre o fijo, y recto o curvo, dependiendo la función y/o las intenciones de diseño. Exceptuando razones constructivas en la arquitectura, el borde no tiene por qué ser estático, podría parametrizarse, lo que es un hecho es que el borde es un parámetro más a diseñar desde los modelos físicos.

LÍNEA DE TIEMPO, CUBIERTAS DE MEMBRANA TEXTIL

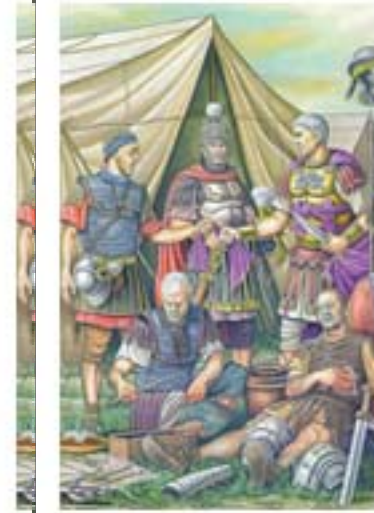
Poblaciones nómadas han utilizado tiendas de campaña y pabellones. Al oeste de Asia y norte de África, con envoltentes de piel de animal, lana de cabra y hojas secas. Estructura de carpa y campamento de la meseta de Ajdir en la zona central de los montes atlas.



Los Pieleros Rojas, heredaron una organización neolítica seminómada. Los Tipies fueron hogar de algunas culturas en Norteamérica.



Hebreos; antiguo pueblo establecido en el año 616 a.C. al ser seminómadas la tienda de campaña los acompañó, incluso celebraban el "Sukkot" (fiesta de las tiendas), para conmemorar la búsqueda de tierra prometida. El tabernáculo era un templo móvil de los Israelitas, elemento central del campamento.



Campamentos y hospitales militares romanos, donde cientos de tiendas tipo canadiense se distribuían en filas, reservando la más grande y lujosa para el alto mando.

Las tiendas médicas colocadas estratégicamente, debían permitir el reposo sobre hojas secas o sacos de paja para los heridos.



Tiendas del Imperio Otomano conocidas como Jaima. El sultán acompañaba a su ejército, la lujosa Jaima contenía todas las comodidades para compararse con su palacio, lo que requería una estructura y sus encargados dedicados a la labor.



10,000 a.C.

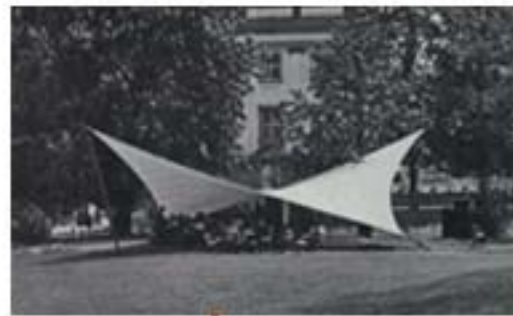
3,000 a.C.

616 a.C.

27 a.C.

1,299 d.C.

Primera estructura de tracción de Frei Otto en ser construida, el Quiosco de Kassel de 1955, es la solución prototípica anticlástica o en forma de silla de montar. La membrana se apoya en dos puntos opuestos.



Cubiertas retráctiles; como velas las membranas pueden moverse a lo largo de sus cables de soporte por medio de poleas, cabrestantes o tractores de cable diseñados expresamente para estas cubiertas. 1960; Cubierta teatro al aire libre, Nijmegen



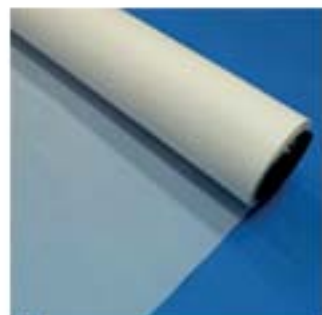
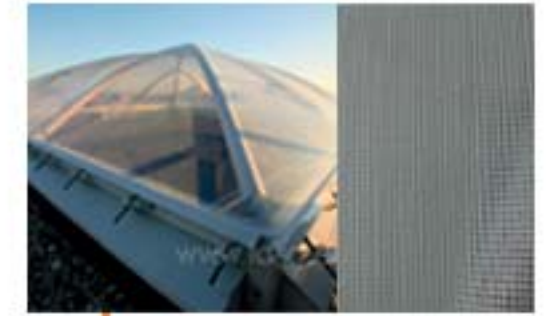
Cubierta de piscina, Lyon 1970

ETFE; Polímero termoplástico, se empleó por primera vez en la arquitectura en 1983 como remplazo del vidrio y poco después en geometrías geodésicas con función estructural, desde entonces en mallas de acero con PTFE como membranas.



Proyecto Eden, Nicholas Grimshaw. 1996

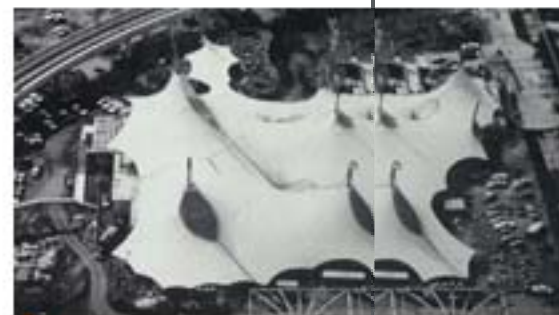
Mallas microperforada; alternativa para control solar y en su momento alternativa para emplear color y transparencia a la cubierta.



Tras mecanizarse el hilado y tejido de tela, el PTFE sale por primera vez a la venta, mientras poco a poco descubrimos sus aplicaciones dentro de la arquitectura.



Segundo tipo de estructuras incorporadas por Otto, de escala media, solían acompañar grandes arcos de acero como soporte y varios postes de apoyo. En este año se construye el Arco de Entrada en Colonia, Alemania.



Estructuras de gran escala. Afectó la variedad formal debido a los empujes del viento, sin embargo tipologías de puntos

altos se adaptaron con sencillez. Redes de cables con soportes de arcos y postes dan forma a las membranas.



Mallas de PVC durante los 80's comenzaron a utilizarse como alternativa para las membranas. Logrando mejorar el mantenimiento así como su durabilidad.



Listones de madera, lona blanca y cables de acero han permitido envoltentes paramétricas. La tracción de la membrana se alcanza mediante el ajuste de los NURBS, que representan los puntos de contacto de los postes con la membrana.

NURBS; non uniform rational B-spline

1946

1955

1957

1960

1965

1983

1985

1990

2005

Como vimos, la arquitectura textil tiene presencia desde el 10,000 a.C. y aunque se trata de un invento tecnológico su evolución ha sido lenta, tiene potencial para que en las próximas décadas tenga un uso y rediseño digno de un hito histórico en su línea de tiempo. Lo anterior gracias a herramientas de diseño y constructivas nuevas, crecimiento y avances en su industria, su presencia en múltiples espacios y climas, entre otras cualidades.

Es posible que una cubierta textil aspire a evocar movimiento, que la primera percepción llega con la vista, una membrana textil no permanece inadvertida, como vimos su concepción suele tener apego y respeto a la naturaleza, sin embargo, no está en su propia esencia mezclarse con el paisaje, ya sea natural, urbanizado o cuando se adhiere a un edificio, la integración formal de una membrana está dada únicamente por el contraste, así la membrana le pertenece al paisaje, y este a su vez le pertenece a ella.

“Más que imitar a Gaudí ... deberían inspirarse en la actitud del arquitecto de Reus: aspirar a edificar las proyecciones imaginadas que los materiales y la técnica todavía creen impracticables...un campo de energía que sirviera para sentarse, seguiría siendo una silla.”
Nicolás Boullosa.

Una membrana textil en arquitectura se usa como; envolvente o piel, cubierta, fachada y en espacio de interior, aunque el ejercicio de esta tesis responde únicamente a su uso como cubierta, los valores desde sus orígenes como eficiencia y mínimo gasto de material, uso temporal, adaptabilidad y manejo de escalas, son valores en común de estas estructuras. Conservando estas cualidades, el espíritu autodidacta y empírico, y la generación de la forma, pronto veremos una planta arquitectónica suspendida gracias a la tensegridad o membranas paramétricas y cinemáticas respondiendo a la dimensión del tiempo.

Estas formas resistentes de doble curvatura se han infiltrado con prudencia, no pueden ser aplicadas a cualquier programa arquitectónico y en específico la membrana textil suele utilizarse en: áreas deportivas, de espectáculo, áreas de exposiciones o actividades similares tanto temporales como permanentes, equipamiento urbano, la industria, interiores, recinto arqueológico o patrimonial, actividades comerciales y vivienda.

Los cuatro grandes materiales constructivos pueden envidiarle a la membrana textil su presencia histórica y su libertad formal, su limitante no se encuentra en ella, sino en el diseñador. Tal capacidad de expresión no puede habitar sola, la curva y formas contraintuitivas completan nuestro entorno visual, y el espacio contenido en ellas, con facilidad se diferencia al refugiarnos en él.

Tan interesante como la propuesta formal es el proceso de búsqueda y creación de ella, ahí trabajan dos campos de conocimiento como son la comprensión de los principios de la forma estructural y al mismo tiempo el arte para traducirlos a una espacialidad arquitectónica, cuando ambos se bordan con armonía, tenemos un sólido inicio a construir una membrana textil.



42 Estructuras Paramétricas a tracción. Zaha Hadid Architects (ZHA). Tela tensada en estructura de acero en bucle, abstracción de patrones de flujo de aire generados por un avión, elaborados para la restauración del piso de matemáticas en Winton Gallery Londres.

CAPÍTULO 2 - TENSOESTRUCTURAS, CASOS DE ESTUDIO

COMIENZO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Las membranas llegan a México primero en cascarones de concreto armado. Los ingenieros británicos idean agregarle acero al concreto para suplir su trabajo a la flexión, este conocimiento se materializa en México gracias al exilio español. Así la segunda mitad del siglo XX tiene tanto mano española como mexicana y Félix Candela con sus “cubiertas ala”, Enrique de la Mora o Fernando López Carmona construyen su legado con las geometrías anticlásticas.

Las cubiertas textiles por su parte ganan popularidad en Europa, E.U.A. y Canadá gracias a la tecnología y medios de producción, posteriormente a finales de los años 70 y principios de los 80 comienzan a figurar en América Latina, se ven en México, Perú, Venezuela, Brasil, Argentina y Uruguay (Santomauro, 2008). En México figuraron para uso efímero principalmente para carpas de circos y cubiertas de mercados, imitando la modernidad que estaba surgiendo en el extranjero.

Formalmente el conocimiento y desarrollo de este tipo de estructuras se inicia en el laboratorio de estructuras laminares (LE) de la UNAM en Ciudad de México con el mando del Arquitecto José Mirafuentes Galván (Ontiveros, 2008). Quien fuera discípulo de Frei Otto, sin embargo cuando fallece el ejercicio académico del LE queda interrumpido hasta el regreso del Dr. Juan Gerardo Oliva, primero alumno de Mirafuentes y después de Otto durante su posgrado en Alemania, así el académico de la UNAM toma la gestión del LE desde 1995, teniendo la influencia de dos mundos, los cascarones nacionales principalmente de Félix Candela y la escuela cercana de Frei Otto.

El LE al mando del Dr. Oliva ha realizado múltiples proyectos de investigación que son financiados por la UNAM y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). En 1996 se proyecta MODUNAM 1, (43) el primer proyecto del laboratorio, y desde entonces se han elaborado proyectos de velarías para el Instituto de Biología, la Dirección de Obras y Conservación, la Facultad de Derecho, el Instituto de Ingeniería, la Facultad de Ingeniería y el patio del museo del palacio “Espacio de la diversidad” en Oaxaca. Así como proyectos de cubiertas ligeras, como son la sala del pleno del Tribunal Federal Electoral y el cascarón reticulado de la Facultad de Arquitectura. (Gonzales, 2011)

Actualmente múltiples universidades en México cuentan con un espacio para proyectos sobre cubiertas ligeras, así como la inversión privada tanto en tecnología como en capacitación, lo que permite la posibilidad de abordar cualquier reto y disfrutar de varios ejemplos a lo largo del país. (Ontiveros, 2008)

México pertenece a la “Red Latinoamericana de Tensoestructuras” que entre sus múltiples metas tiene la de promover la enseñanza de arquitectura textil en las universidades, organizar simposios o generar contenido académico. Algunos egresados de las universidades nacionales, principalmente del LE de la UNAM ya cuentan con años de experiencia y marcas reconocidas, dando vida a la arquitectura textil donde se demande.



43 Modunam 1; Tensoestructura desmontable y modular, ha sido usada en múltiples ocasiones y toma alrededor de 5 horas construirla.

44 Plaza Portal Churubusco, CDMX. Cubierta textil con estructura flotante.

Solamente con recorrer las calles por la Ciudad de México encontramos una gran variedad de membranas textiles, de múltiples escalas y cubriendo edificios o espacios de carácter variado. He seleccionado cuatro casos de estudio que en una primera y sencilla lectura evidencian marcadas diferencias entre sí.

Desde niños ocupamos observar como objetivo para registrar información fiable del mundo y proceder a imitar las acciones o palabras, esta herramienta de aprendizaje nutre mucho nuestra capacidad como arquitectos de resolver una necesidad espacial y estética. En breve registro información fiable y valiosa de cada caso de estudio, que culmina de manera sintética en premisas de diseño que darán vida a los fundamentos de esta tesis.

Principalmente, se estudia el uso de los postes y la forma de las cubiertas, complementado con detalles específicos de cada caso de estudio. Cada proyecto seleccionado es acompañado de una calificación dividida en cuatro categorías; diseño, utilidad, cuidados y estructura. La calificación por categoría permite la comparación tajante entre los casos de estudio, donde la calificación más baja es el proyecto más sencillo hasta llegar al más complejo aquí visto.

Categorías evaluadas

Diseño - Evalúa principalmente la composición geométrica y su naturaleza de hiperboloide. No todo proyecto necesita complejidad formal, sin embargo, la habilidad para combinar superficies de doble curvatura entre ellas y a su contexto quedó implícito en cada obra.

Utilidad - Evalúa la pendiente y un posible acumulamiento de agua en la cubierta, así como la eficiencia de la cubierta para proyectar una sombra generosa en relación con su forma y espacio intervenido.

Estructura - Estudia el libre apoyo y articulación de los elementos a compresión, se hablará a detalle de esto en las siguientes páginas del capítulo. También supervisa el equilibrio de los elementos que conforman la cubierta, como vimos en el primer capítulo estos sistemas son un conjunto complejo que no permanece estático, y tiene relación intrínseca entre forma y estructura.

Cuidados - Puede faltar información para la crítica de cada caso y sus aparentes deterioros, pero observando un poco se puede intuir algo de la planeación para posible limpieza, reparación y movilidad de la membrana.



45 Perspectiva cubiertas en el parque.

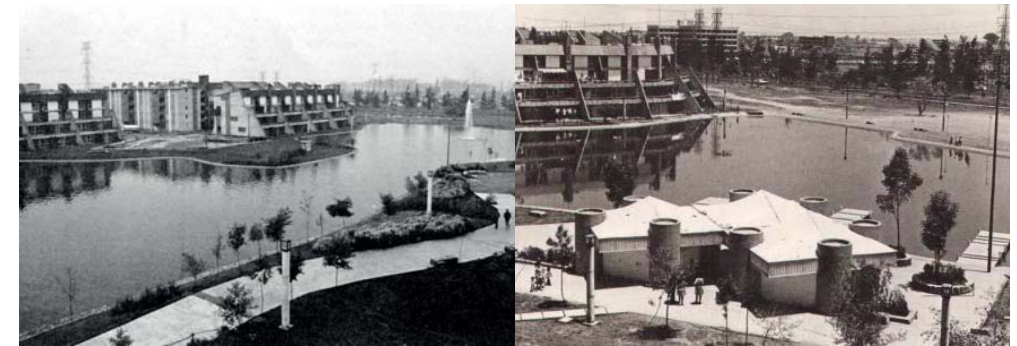
PARQUE
EL LAGO
 EN
CHURUBUSCO

Diseño: Desconocido

Año: 2020

Superficie: 38 m²

Ubicación: Parque ex-lago en la unidad habitacional Infonavit Churubusco, Iztacalco, CDMX, México



46 Antiguo lago, la ubicación de las velarias actuales es cercana al chorro de agua de la primera foto

En 1973 se inició la construcción de la unidad habitacional Iztacalco del Infonavit, situada a un lado de una de las vías más importantes de la época, la Avenida Río Churubusco. El pasado lacustre de Iztacalco justificó la incorporación de un gran lago artificial como uno de los elementos de recreación, así como sus funciones bioclimáticas dentro del conjunto (Villasana y Gómez, 2018). (46)

El miércoles 14 de marzo de 1979 tuvo lugar un sismo de gran magnitud, el cual provocó una falla estructural que dio fin al lago, desde entonces hasta el año 2004 el conjunto tuvo una situación de abandono gubernamental. Aunque se manejó la propuesta de restaurar el lago, los vecinos prefirieron la adecuación de un parque social y deportivo de acceso público. Del gran lago artificial a una grieta que servía como zona de juegos, fiestas, clases deportivas, entre otras, y finalmente la proyección del nuevo parque.

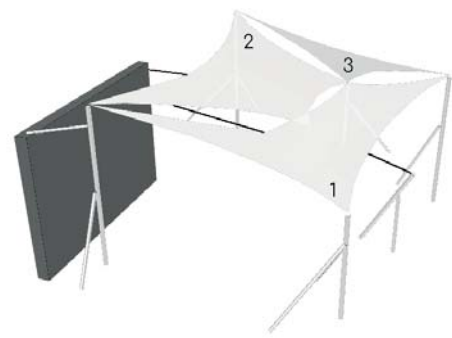
A pesar de aquella adecuación, el parque del ex-lago no contó con el mantenimiento adecuado. Recientemente en febrero 2020 se concluyó con una remodelación del parque, entre los cuales destacan dos pequeños grupos de velarias.

El primer grupo reúne cuatro velarias de simple curvatura con forma de bóveda cilíndrica, también conocidas como superficies de curvatura nula, por ser superficies desarrollables, es decir que pueden extenderse en un plano. Está cubierta útil para el resguardo del sol, únicamente usa la curvatura para evitar la acumulación de basura y agua de lluvia, este es un ejemplo de arquitectura textil que no es tensoestructural. (47)

La velaria no adquiere su forma a partir de la tracción, sino que adopta la forma de una segunda estructura.



47 Cubierta velaria con forma de bóveda cilíndrica



48 Numeración de velarias para su estudio. *Elab. propia.*

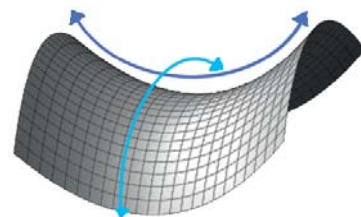


49 Grupo de velarias a estudiar *Elab. propia.*

El segundo grupo de velarias lo conforman tres cubiertas pequeñas, (48 y 49) posan sobre una zona de mesas y bancas fija. La dimensión del parque es tan grande que ambos grupos de velarias se necesitan para darle continuidad visual de isla blanca textil en isla. Aun así este recurso de cubiertas solo se encuentran en apenas una pequeña porción del gran parque, interactuando con las canchas de Basquetbol, mesas con tablero de ajedrez y la fuente que se proyecto como hito.

Forma y Curvatura

En cada caso de estudio se analiza la forma y curvatura de las cubiertas, su relación con la geometría, sus pendientes y composición como conjunto.



50 *Elab. propia.*

Parabolóide Hiperbólico: Superficie alabeada formada por parábolas perpendiculares, donde una es directriz y la otra de signo opuesto generatriz.

Forma popular como base de muchos diseños de cubiertas membranas

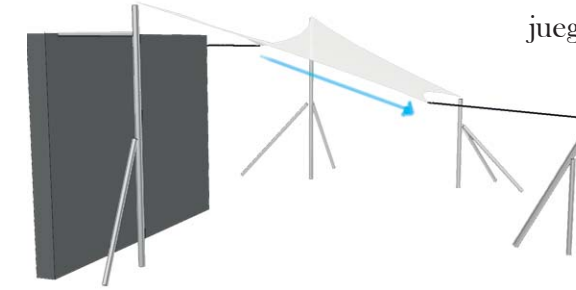
VELARIA 3



51 Perspectiva *Elab. propia.*

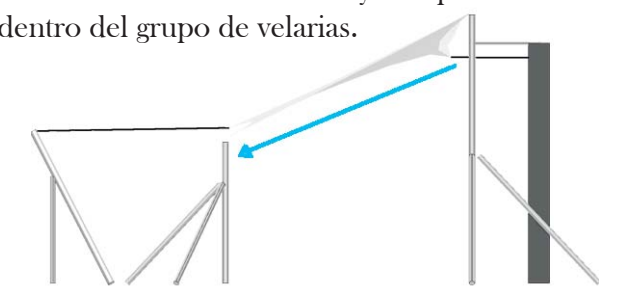
Tres puntos cualquiera definen un plano, como en el caso de tercer velaria, con tres vértices, por lo que no está trabajando a tracción, teniendo los elementos estructurales solo de ornamento. La sombra de esta membrana por su forma e inclinación es poca, seguramente esto provocó al diseñador colocarla en un costado, no tiene mucha utilidad.

VELARIA 2



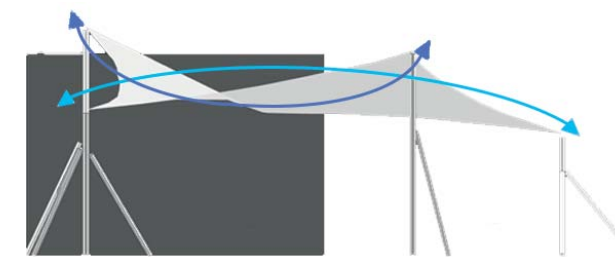
52 Perspectiva *Elab. propia.*

Si bien no es una superficie plana, no existe en la segunda una intención de curvar la membrana, predomina una forma de cubierta con pendiente, únicamente resolviendo evitar acumular lluvia y complementar el juego dentro del grupo de velarias.

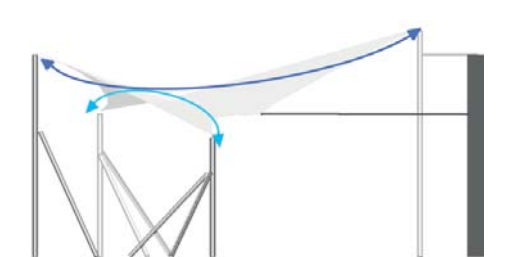


53 Vista Lateral. *Elab. propia.*

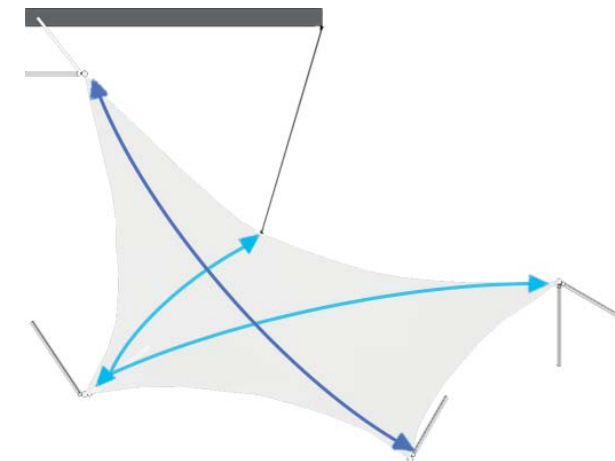
VELARIA 1 (MONTEA)



54 Vista Frontal. *Elab. propia.*



55 Vista Lateral *Elab. propia.*



56 Planta. *Elab. propia.*

La superficie está formada de trazo libre, con naturaleza de parabolóide hiperbólico, con dos curvas negativas, una de ellas secundaria, y una curva positiva.

■ Indica curva positiva

■ Indica curva negativa

Postes y Cables

En cada proyecto encontramos alguna diferencia en la solución de estos elementos de la estructura. En el capítulo 1 vimos el esfuerzo a tracción de la membrana, y desde este proyecto se ejemplifica que fuerzas positivas y negativas provocan dicho esfuerzo, también sabemos que los postes trabajan a compresión, al menos en una cubierta óptima, en cada caso estudio responderemos ¿qué le está sucediendo a los postes?



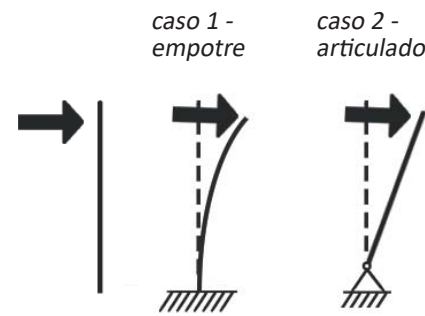
57 Detalle cables al muro

Tipos de unión

Tenemos un poste al que le aplicamos una fuerza, la cual posee dirección, magnitud y orientación, por lo que;

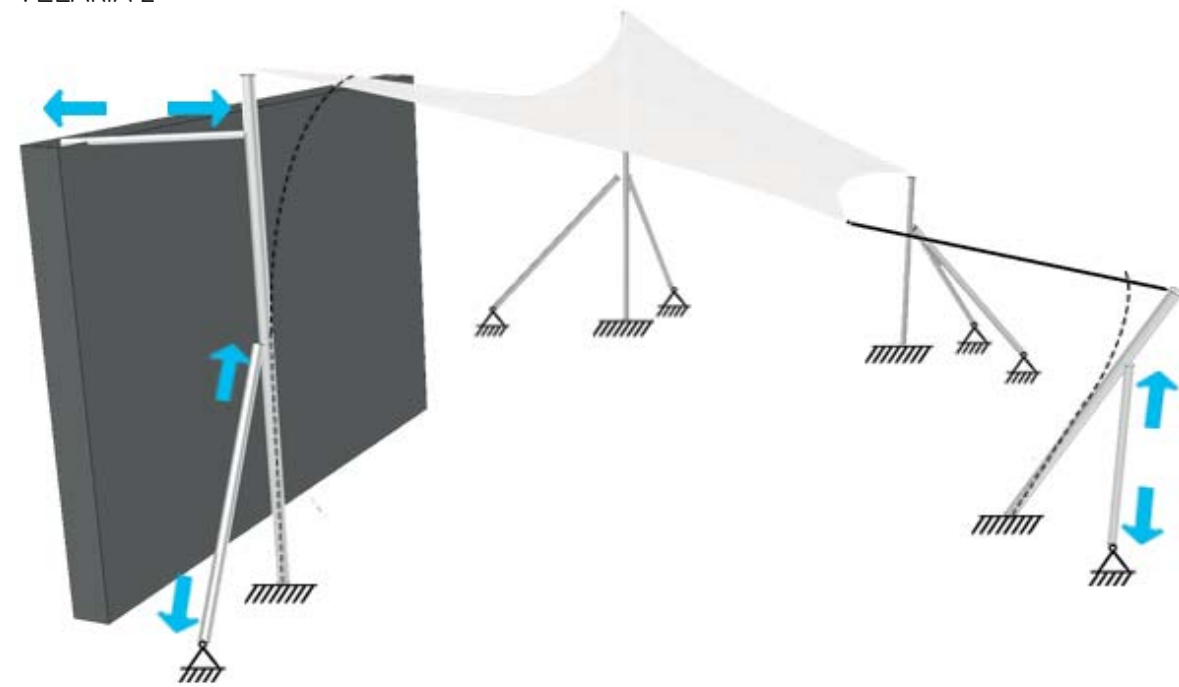
En el caso 1, si el poste está empotrado sufrirá una flexión, el momento provocado por esto tendría que solucionarse aumentando el diámetro de la pieza.

En el caso 2, El poste libremente apoyado o también se conoce como articulado, no tiene deformación y por lo tanto carece de un momento, razón por la cual es la unión óptima del poste al suelo.



58 Diagrama poste empotrado y articulado. Elab. propia.

VELARIA 2



59 Perspectivo. Elab. propia.

Esfuerzo a tracción soportado por postes complementarios.



60 Detalle de empotramiento en postes principales

Nombraremos postes principales a aquellos que soportan la cubierta y postes complementarios a aquellos que completan el sistema estructural. Los postes principales a excepción de uno, se construyeron a 90° en relación con el suelo, y todos empotrados al piso, (60) así la línea punteada indicaría la deformación (flexión) a soportar de cada poste provocada por la membrana. (59 y 62)

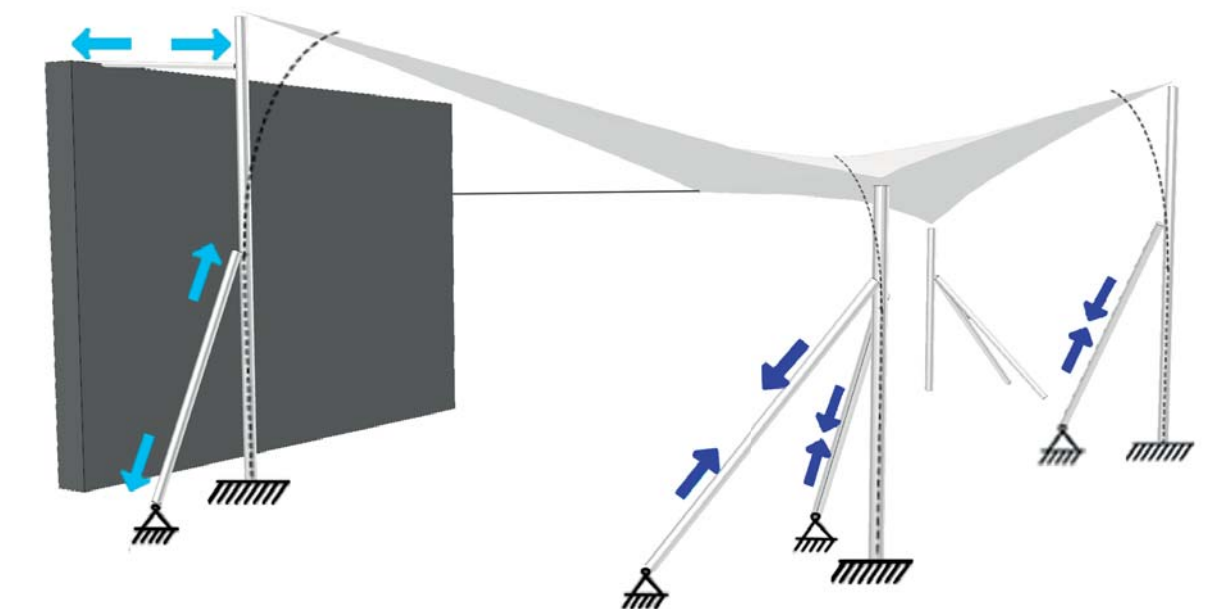
Las cubiertas dos y tres ejercen por si solas una fuerza despreciable sobre los postes que las sujetan, porque no se forman de doble curvatura opuesta, es decir, por medio de tracción. Posiblemente la percepción de seguridad de un elemento fijo en lugar de articulado provocó los postes empotrados, mientras que los complementarios están articulados.



61 Detalle de articulación en postes complementarios

Los postes complementarios, en su mayoría, están trabajando a tracción. Estos postes articulados responden al movimiento del poste principal, que a su vez está siendo deformado por la cubierta. En este caso, cuando el poste se ubica al interior del área techada, trabaja a compresión (ver imagen 62 azul oscuro), si el poste complementario se encuentra al exterior del área techada, trabajará a tracción (ver 59 y 62 azul claro). Para el esfuerzo a tracción normalmente se ocupan cables de acero y no postes.

VELARIA 1



62 Perspectiva Elab. propia.

Esfuerzo a Compresión por postes complementarios.

Esfuerzo a Tracción por postes complementarios.

DIAGNÓSTICO

El proyecto tiene deficiencias formales y debilidades en el trabajo estructural. Nos enseña que elementos fijos y abundancia de material no son sinónimo de eficiencia, este tipo de cubiertas no permanecen estáticas y lo importante es conocer su estado de equilibrio, en beneficio estético y económico.

La membrana dos desagua en una zona de pasto, pero no impide el paso de la lluvia cerca del muro, en ocasiones puede ser un reto preservar la doble curvatura con la utilidad de proveer sombra y refugio.

Es un planteamiento interesante el ocupar un poste debidamente articulado para sujetar más de una cubierta.

Diseño	● ● ● ● ● ● ● ●
Utilidad	● ● ● ● ● ● ● ●
Estructura	● ● ● ● ● ● ● ●
Cuidados	● ● ● ● ● ● ● ●



63 Perspectiva cubierta en terraza.

FA
CULTAD
DE
QUIMI
CA
EN
CU

Diseño: Arq. Víctor Roldan

Año: Agosto 2006

Superficie: 200 m²

Propietario: Facultad de Química
UNAM

Ubicación: Facultad de Química
en Ciudad Universitaria, Coyoacán,
CDMX, México



64 Perspectiva desde azotea edificio adjunto. Se observa el apoyo de algunos postes o cables sobre una techumbre existente

La historia de esta facultad tiene más de 100 años, cuando primero en 1916 nace la Escuela Nacional de Química Industrial en Tacuba, posteriormente en 1917 se incorporó a la UNAM y finalmente desde 1965 lo que conocemos como la Facultad de Química en Ciudad Universitaria.

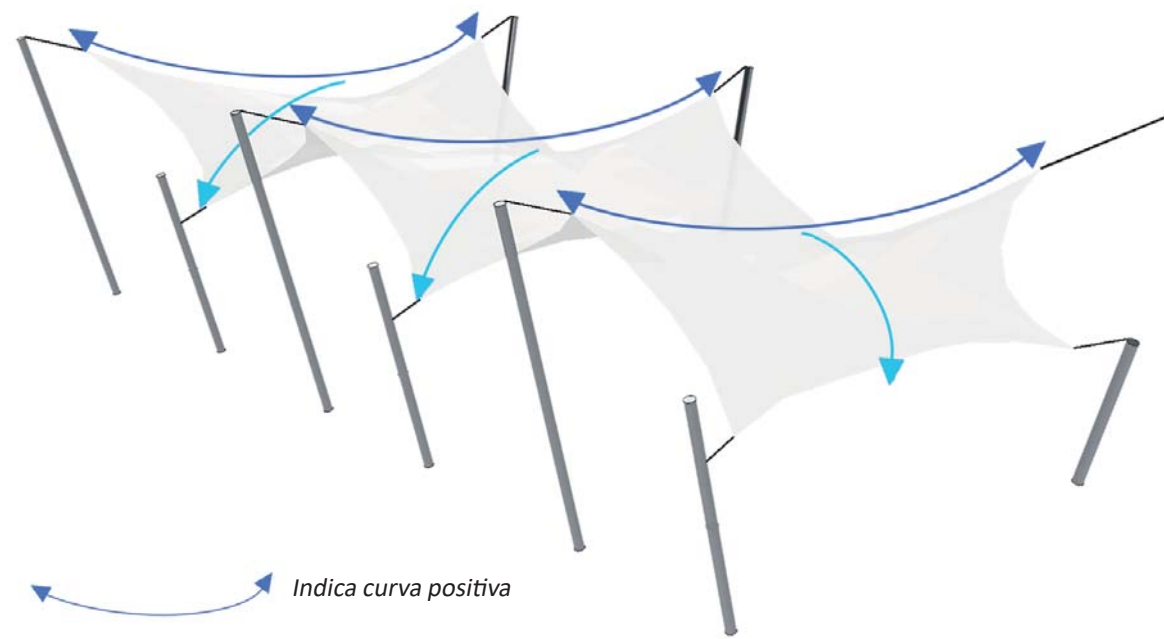
Varios edificios y laboratorios conforman la facultad de Química, en el campus central Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, a un lado de la Facultad de Medicina se ubica el edificio B de Química. Aquí una terraza estudiantil ofrece sombra a estudiantes y académicos.

La membrana textil permite 200 m² de sombra para actividades de estudio y almuerzo al aire libre. Su diseño fue obra del Arq. Víctor Roldán, quien fuera alumno del Dr. Oliva.

La cubierta tiene forma rectangular vista en planta, soportada por postes a lo largo de su longitud y un cable sujeto a la estructura del edificio. Alternando la altura de los postes adquiere un oleaje de curvas paraboloides, una propuesta sencilla que cumple con el propósito climático para la terraza.

Los postes articulados reposan principalmente en una zona de azotea del edificio B de la facultad, así el desagüe de la lluvia pasa de la membrana a la azotea para seguir sus pendientes. También permite cubrir la terraza sin necesidad de apoyos en el área de movilidad, aprovecha los elementos estructurales del edificio que contiene la zona de estudio.

Forma y Curvatura

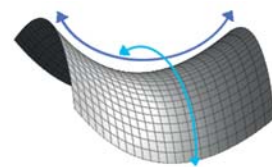


Indica curva positiva

Indica curva negativa

65 Diagrama. *Elab. propia.*

La forma podría describirse como una serie o sucesión de tres paraboloides hiperbólicos, de esta manera mantiene la tracción en toda su superficie. Permite la ventilación del área estudiantil por los costados de la cubierta.

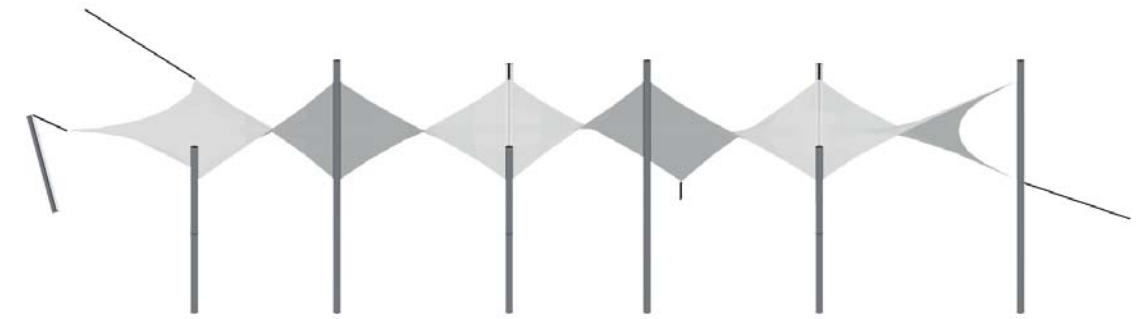


La velaria es casi simétrica, intercala puntos elevados con bajos para dar forma al oleaje de curvas finalizando el diseño con las relingas, un borde libre y curvo. En la zona derecha termina con dos puntos más bajos que rompen la simetría a la par que se ajusta al contexto.

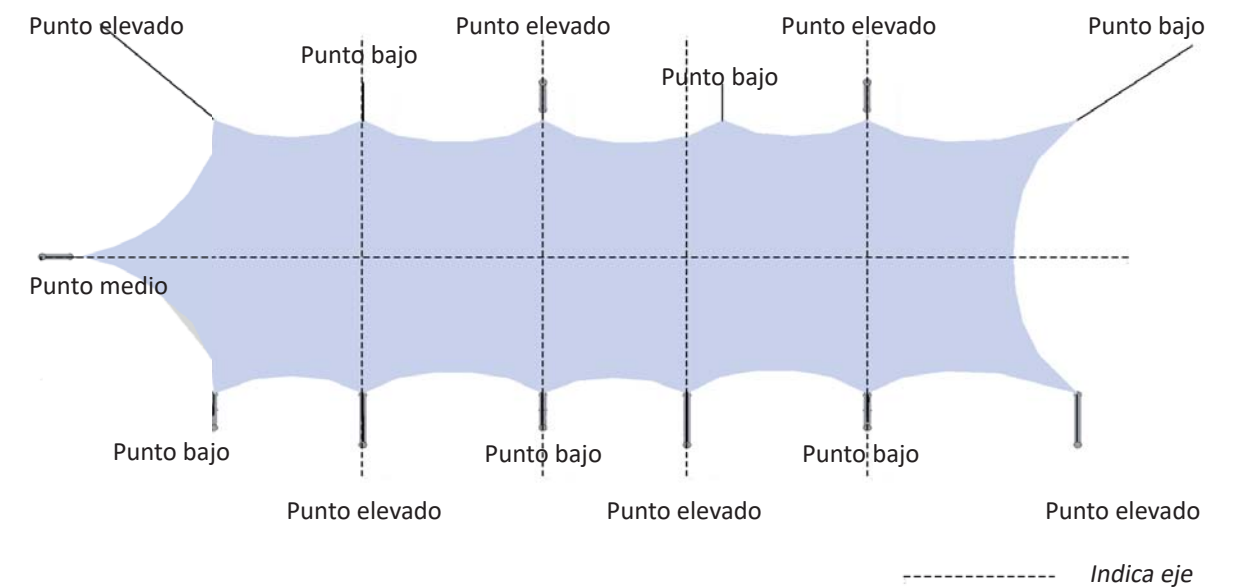


66 Planta, edificio B con sus azoteas y cubiertas.

67 Perspectiva, Comúnmente los alumnos descansan, estudian y toman alimentos ahí.

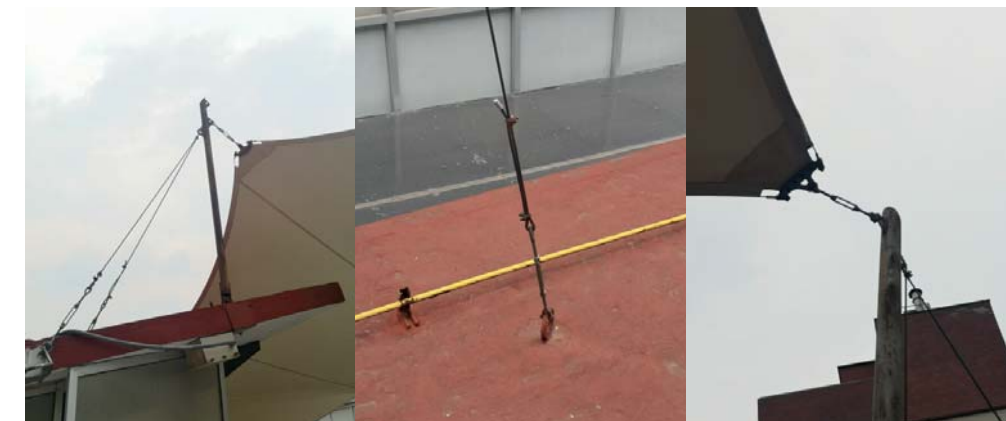


68 Vista Frontal. *Elab. propia.*



69 Planta *Elab. propia.*

----- Indica eje



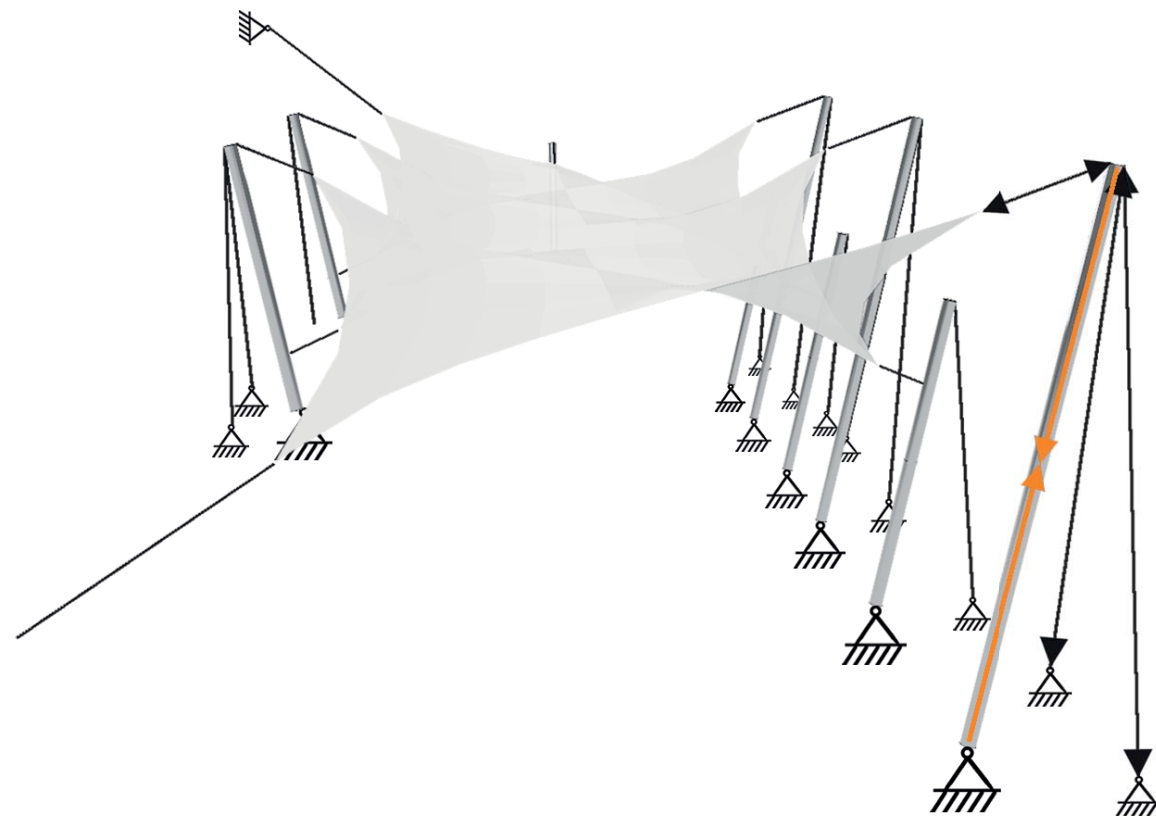
70 Detalles de Postes y cables con sus grilletes en los extremos.

Postes y Cables



Tanto los postes como los cables (tensor) están articulados para evitar el momento sobre cada uno de los postes.

A diferencia del caso velaria Ex-lago, todos los postes cuentan aquí con una inclinación y no están ortogonales con respecto al suelo. Ambas opciones son posibles, pero fuerzas como vientos pueden molestar sobre la membrana en el pretensado al momento de moverse si se colocan los postes a 90° respecto al suelo. La relación entre el ángulo del poste con el tensor hacia la velaria se mantiene igual o semejante al ángulo entre el poste y cada tensor hacia el suelo.

En este diagrama observamos la dirección de fuerzas en los tensores y en el poste, para ejemplificar el esfuerzo a tracción y compresión.



71 Diagrama. *Elab. propia.*

-  Indica libre apoyo/articulación
-  Indica direcciones de esfuerzo a compresión
-  Indica direcciones de esfuerzo a tracción



73 Detalle de articulación de poste sobre durmiente de concreto.

Patronaje

El patrón de corte o despiece en esta cubierta, está elaborado aproximadamente a cada 2.4 m de ancho. Comúnmente se proyecta del lado más corto, además de facilitar el corte, esto permite que se formen mejor las curvas de la membrana, ya que el material es pretensado, a diferencia de algunas maquetas elaboradas con tela. Profundizaremos en este tema en el capítulo 3, por ahora es importante observar el patrón de corte en cada análogo.



73 Patronaje horizontal favoreciendo el pretensado.

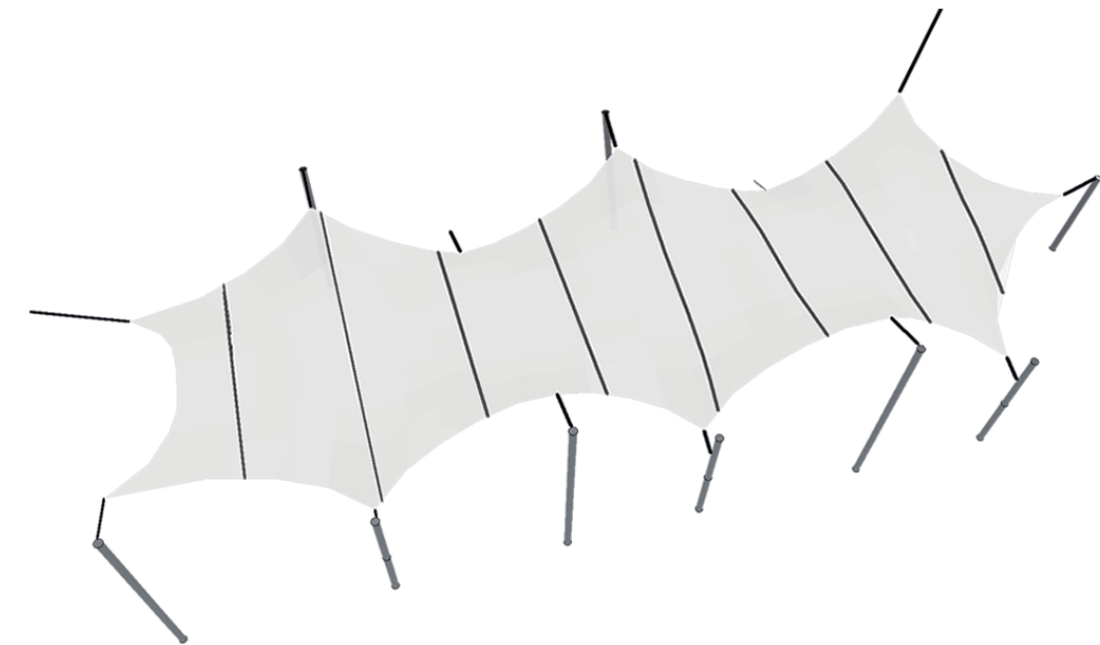


Diagrama. *Elab. propia.*

DIAGNÓSTICO

Este ejemplo nos ofrece una solución muy sencilla y funcional, ya que cubre un claro amplio sin necesidad de mucho material, tiene poca inversión económica y es reversible.

Actualmente el poco mantenimiento y su tiempo de vida han deteriorado su apariencia.

Diseño	● ● ● ● ●
Utilidad	● ● ● ● ●
Estructura	● ● ● ● ●
Cuidados	● ● ● ● ●



74 Perspectiva de cubierta.

CENTRO
UNIVERSITARIO
 DE
TEATRO
 EN **CU**

Diseño: Laboratorio de Estructuras Ligeras, Facultad de Arquitectura

Año: 2015

Superficie: 400 m²

Propietario: Centro Universitario de Teatro UNAM

Cálculo: Hyparch

Ubicación: Ciudad Universitaria, Coyoacán, CDMX, México

La membrana del Teatro CUT de la Universidad Autónoma de México se integró a obras de Hersúa Sebastián y Mathias Goeritz. La cubierta tiene forma de doble conoide, son dos linternillas elípticas las que reposan elevadas generando un par de ventanas al cielo desde el patio y que permiten el paso de luz.

Cubre alrededor de 400 m² y elementos como los postes flotantes arbóreos y su escala apreciable alrededor del recinto, dieron lugar a una propuesta interesante.

El laboratorio de estructuras ligeras de la Facultad de Arquitectura se apoyó en la empresa Hyparch para el estudio del Túnel de viento, cálculo estructural y el detallado de estructura y herrajes.

En la página del laboratorio de estructuras ligeras podemos encontrar la premisa del diseño, donde “los puntos altos de la geometría juegan a ser el eco del perfil montañoso que rodea la cuenca del Valle de México”.³

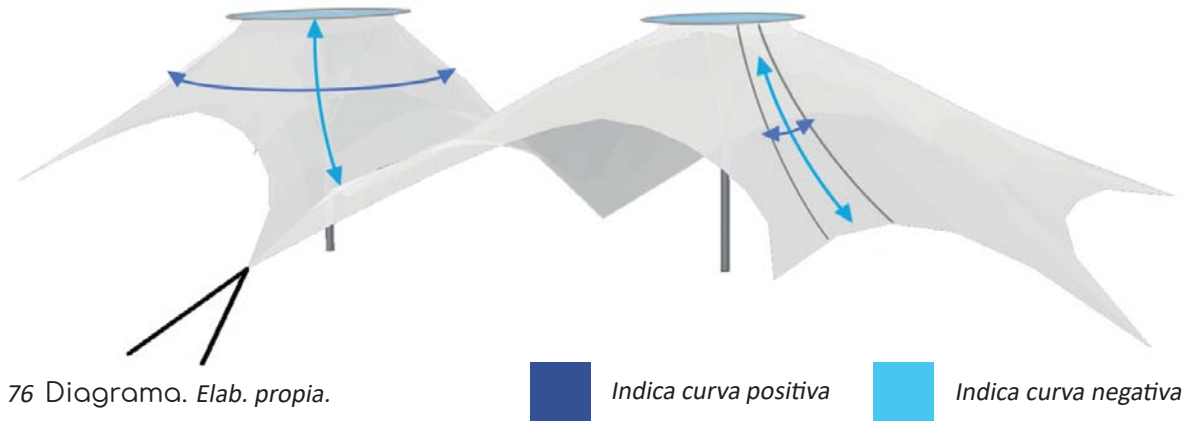


75 Vista desde la azotea, la propuesta no coloca elementos estructurales en el patio.

³ Sitio Web del Laboratorio de estructuras: <https://arquitectura.unam.mx/estructuras.html>

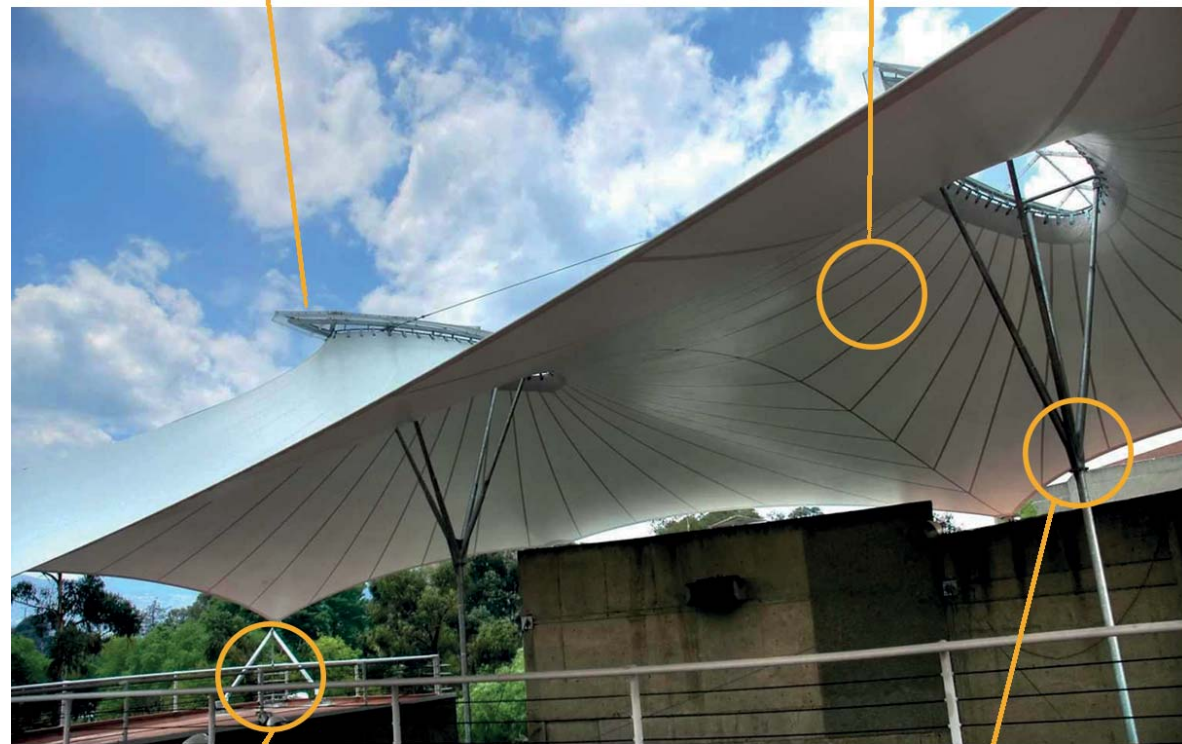
Forma y Curvatura

Membrana con forma conoide, esta forma tiene doble curvatura inversa porque la superficie se conforma de una circunferencia que tiene signo positivo y tendría función de directriz, de curvas negativas como generatriz. Esta tipología es recurrente en las propuestas de velarias, en este caso dos conoides con borde libre se unen por uno de ellos, adaptándose al contexto arquitectónico.



Linternillas elípticas recubiertas de policarbonato sólido transparente de 6 mm.

Patronaje de mayor complejidad que un paraboloides hiperbólico, despiece de menores dimensiones.



Dos postes con un grillete tensor al centro que liga postes con barandal.

Poste flotante arbóreo de acero

Patronaje

Las secciones de corte en relación a la cubierta son pequeñas, esto facilita el pretensado, observar además que en la unión de ambos conoides, se cuida que tengan el mismo ancho cada sección.



Uniones y Accesorios

Las uniones son articuladas por medio de tensores grillete, algunos vértices de la cubierta se sujetan de postes, o bien directamente de cables de acero al piso de la azotea.



Esta movilidad le permite a la membrana resistir la fuerza del viento. En otras palabras, en los postes se diseñan su colocación, inclinación, cables y uniones, para dar forma a la cubierta y soportar su interacción con el viento, esto depende que el sistema este articulado.

En la fotografía 79 los bordes libres tienen cable en su interior que llegan hasta el vértice o esquina, donde la unión metálica es el lugar de encuentro de cuatro tensores grilletes.



Postes y Cables



82 Perspectiva desde planta azotea.

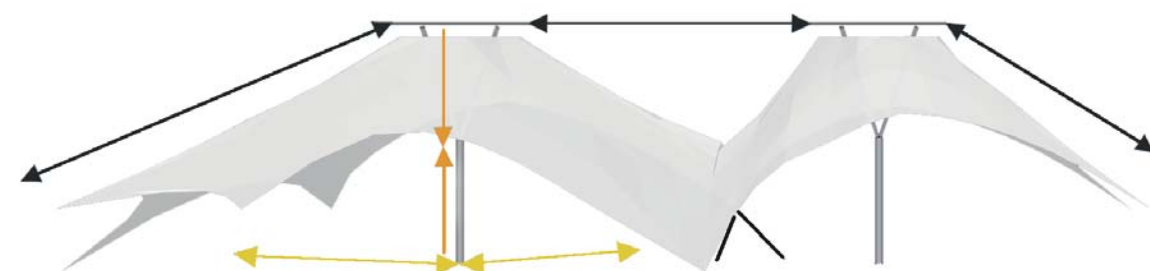
La cubierta del Centro Universitario de Teatro ocupa pocos postes para formarse, aprovecha la estructura del edificio para ser sujeta por cables en todo su alrededor. Sin embargo los postes flotantes, uno en cada conoide y que forman los puntos altos y la apertura para el paso de luz, son un caso interesante de tensigrity como lo vimos en el edificio White Rhino en el capítulo primero.



Existen algunos métodos para conocer el resultado de sumar vectores. Uno de ellos es muy didáctico, es un método gráfico y sencillo.

Recordemos que un vector posee magnitud, dirección y sentido. Colocando el primer vector y el segundo al final del primero de acuerdo a su sentido y dirección, y así sucesivamente hasta dibujar el total de vectores, se traza un

vector resultante del principio del primero al final del último. (83) La imagen 84 representa con vectores en negro y amarillo la dirección de dos fuerzas opuestas, estos son los cables trabajando a tracción, mientras que en naranja dos fuerzas con origen en las puntas del postes hacia su centro, este es el esfuerzo a compresión del poste flotante.



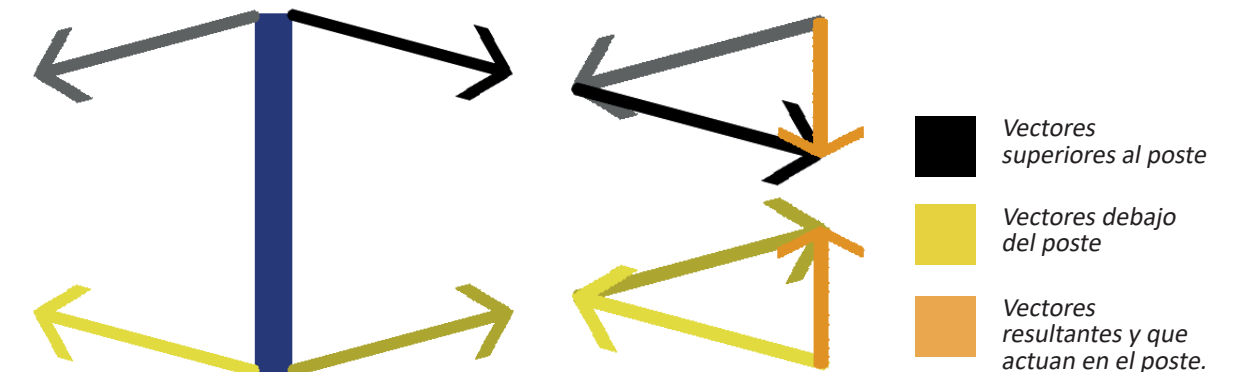
84 VISTA LATERAL - Diagrama *elab. propia.*

En el poste flotante están participando varios factores a considerarse, como el peso de la cubierta, el peso de la linternilla y la propia gravedad. Las linternillas son el lugar de encuentro de varios cables, el vector resultante de estos afecta al poste al ser el encargado de elevarla.

Para comprobar como los cables provocan el esfuerzo a compresión sobre el poste, pode-

mos sumar los vectores, no importa el orden como se inicie la suma, pero debe respetarse el punto de partida, en este caso de izquierda a derecha tanto los vectores de arriba como los de abajo. (85 y 86)

Finalmente resaltar el diseño tipo árbol del poste, para poder sujetar la linternilla en cuatro puntos y como recurso estético que ornamenta el patio.

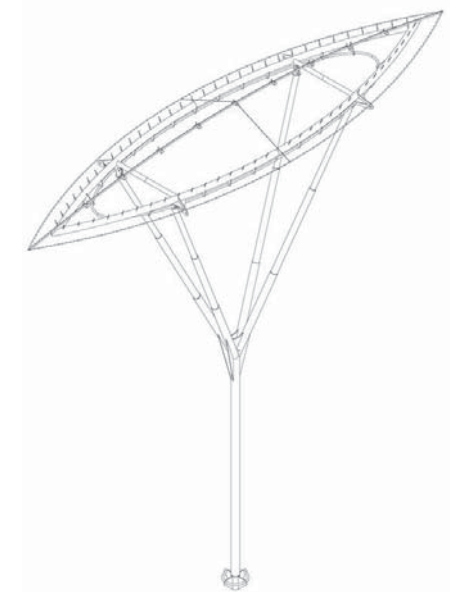


85 Vectores que sostienen al poste gracias a su equilibrio. Diagrama *elab. propia.*

86 Suma de vectores. Diagrama *elab. propia.*



87 Perspectiva desde el patio del CUT



88 Dibujo de linternilla y poste realizado por el laboratorio de estructuras ligeras.

DIAGNÓSTICO

La membrna aporta al paisaje del teatro tanto en una perspectiva alejada con sus formas conoides, como en el patio con su poste flotante y sus ventanas cenitales.

Queda por verificar la facilidad para dar mantenimiento o limpieza.

Diseño	● ● ● ● ● ●
Utilidad	● ● ● ● ● ●
Estructura	● ● ● ● ● ●
Cuidados	● ● ● ● ● ●



89 Vista aérea de cubierta.

CUBIERTA PALACIO DE MINERÍA

Diseño: Dr. Arq. Gerardo Oliva,
Arq. Ernesto Nataren, Mauricio
Cortez Mauricio Rojas, Cinthya
Échave, Víctor Roldán

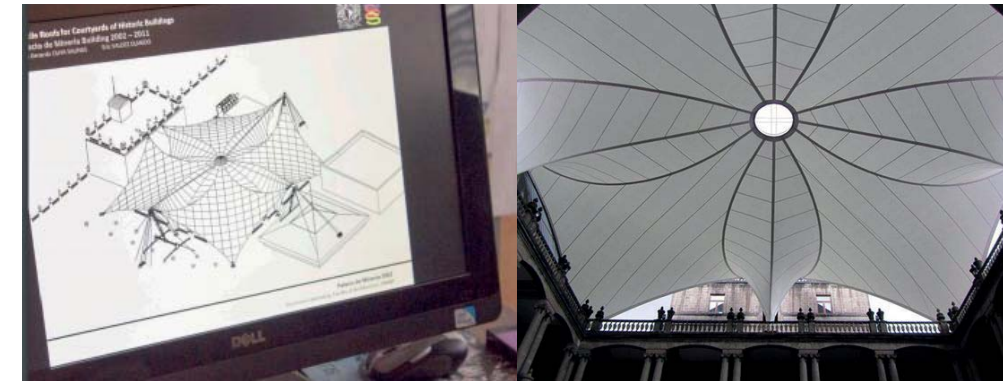
Año: 2002

Superficie: 1,225 m²

Propietario: Facultad de Ingeniería,
UNAM

Ubicación: Centro Histórico,
CDMX México

Cálculo: Enrique Pappaqui



90 Modelo estudio de la propuesta

91 Vista desde el patio principal del placio

Esta cubierta se da por medio de un concurso que tenía como objetivo principal la intervención en inmuebles universitarios con valor patrimonial y con tipología similares, lo que permitía buscar una intervención de cubierta tipo. El proyecto ganador construido en el Palacio de Minería con más de 200 años es removible y respeta la estructura e imagen del recinto.

El terreno se ubica en la zona lacustre, integrada por depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme muy dura y de espesores variables de centímetros a metros.
(Solís, 2015, p.)

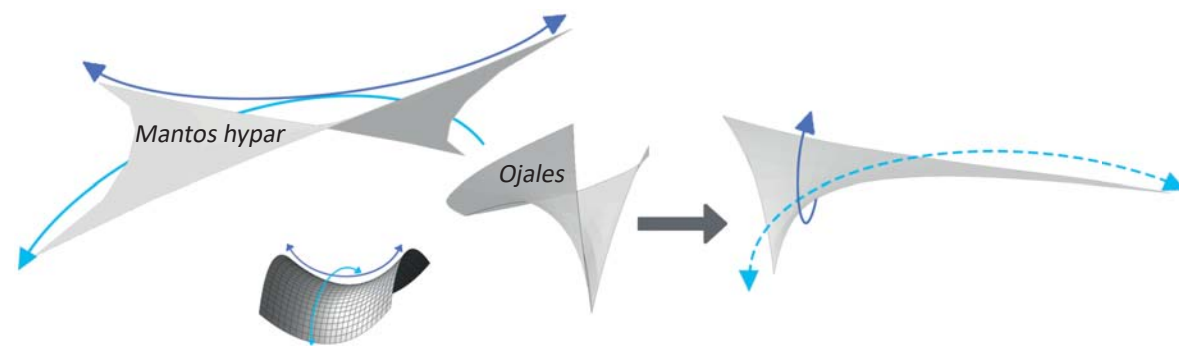
La arquitectura a cielo abierto mesoamericana se fusionó con la tipología española, los mexicanos hemos ido heredando desde entonces el patio central, entre sus tantas funciones están las del clima como permitir la ventilación e iluminación. El palacio de Minería fue diseño del arquitecto español Manuel Tolsá, con estilo Neoclásico y fue parte de la ola de edificios que rompieron el estilo barroco en México.

El concurso buscaba una cubierta que proteja de la lluvia pero permite el paso de luz y viento en patios de grandes claros y en inmuebles con carácter y valor histórico que debía respetarse. El palacio articula los espacios por medio de patios, el patio principal de 24 m x 24 m define la propuesta de cubierta, es una propuesta radial, formada por mantos con superficie de doble curvatura inversa, trabajando cada uno a tracción y con una linternilla al centro para la iluminación cenital. Naturalmente le acompañan postes y cables para completar el sistema estructural de la membrana. Los elementos metálicos (postes, placas y anclajes) se fabricaron en acero al carbón, con capas de anticorrosivos y pintura horneada.

La forma obtenida con membrana permite el paso de iluminación y ventilación por los bordes durante el día, y además en esta propuesta, por la noche se aprovecha para una iluminación reflejada sobre mantos por medio de reflectores colocados estratégicamente sobre el borde de las azoteas y ocultos a la vista desde el patio central (Oliva, 2001). El Dr. Oliva además explica que la solución fraccionada permite desmontar la estructura por partes y llevar a cabo la reparación, limpieza y mantenimiento de cada una de las secciones de manera independiente.

“La estructura se soporta por cuatro sistemas de apoyos, tres de ellos ubicados sobre los ejes de los muros perimetrales de los pasillos del claustro (en muertos de concreto existentes), y un cuarto sistema utilizando el volumen del edificio identificado como el observatorio”. (Oliva, 2001, p. 55). Los tres sistemas de poste están doblemente articulados, se conforman por un mástil principal en cuyo vértice convergen los cables que soportan el punto central (la linternilla) y otros más de algunas relingas de los puntos superiores.

Forma y Curvatura



92 Diagrama. *Elab. propia.*

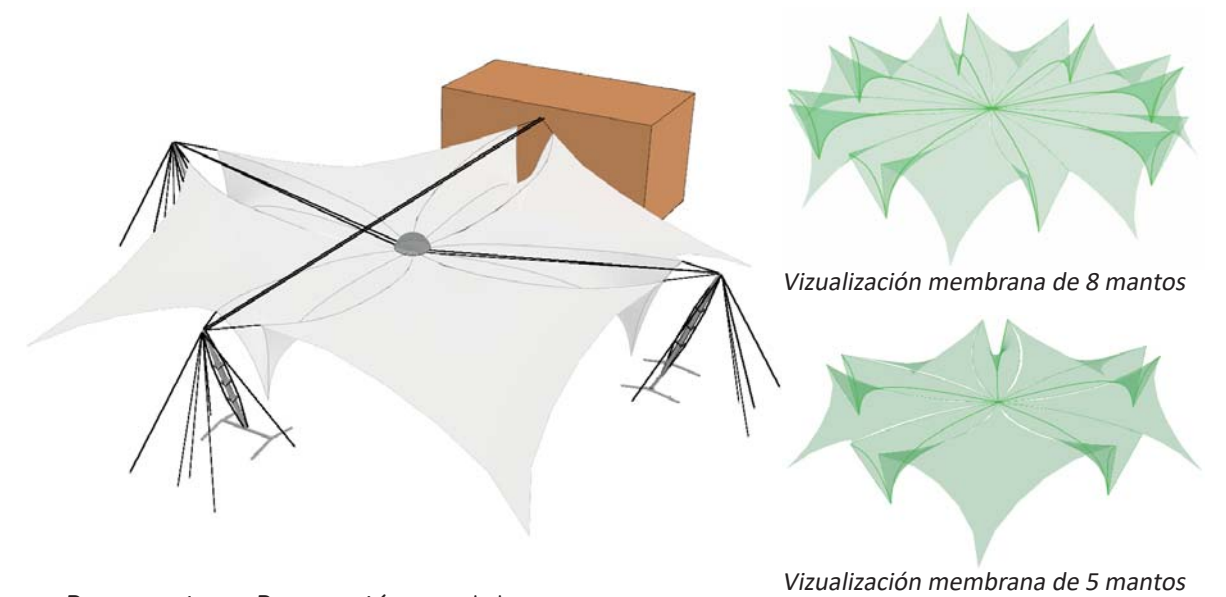


Dos geometrías de doble curvatura modulan en composición radial la cubierta. Las superficies de mayores dimensiones tienen forma de paraboloides hiperbólicos (hypar). Sus bordes son libres y curvos, y tienen sus directrices en forma de catenarias gracias a la elevación de sus dos extremos.

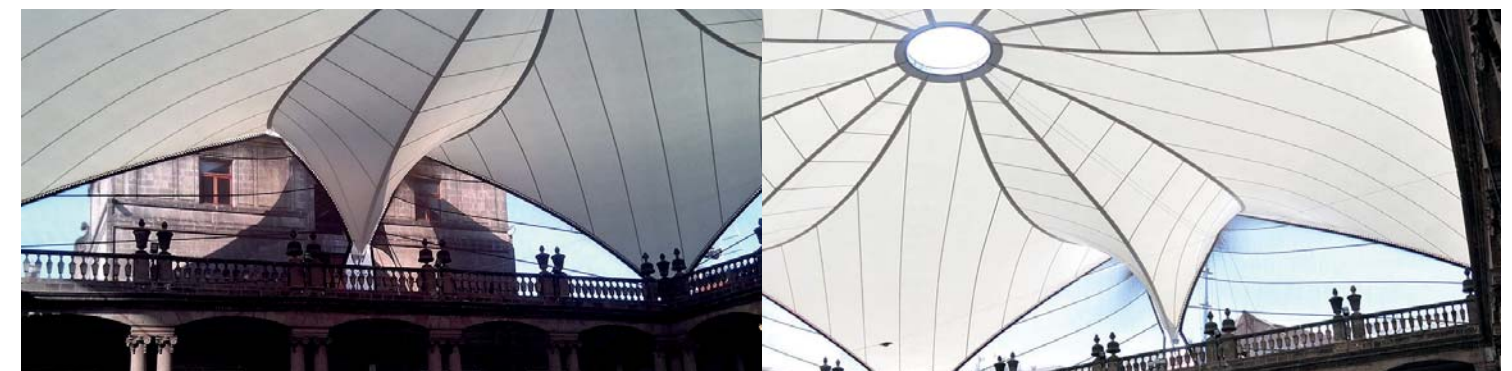
Las geometrías secundarias se ubican entre cada manto hyperboloides, formalmente son un peso muerto que completa el diseño formando un ojal cada uno,

estructuralmente contienen un cable central que sirve de arriostramiento, es decir que aportan estabilidad limitando los desplazamientos de los hyperboloides. También tienen la función de descargar las aguas pluviales al igual que los mantos.

En verde probé el ejercicio de la propuesta de modulación para proyectos alternativos, se ven ejemplos de un modelo de ocho y otro de cinco mantos.



93 Perspectiva y Recreación modular. *Elab. propia.*



94 Perspectiva detalle.

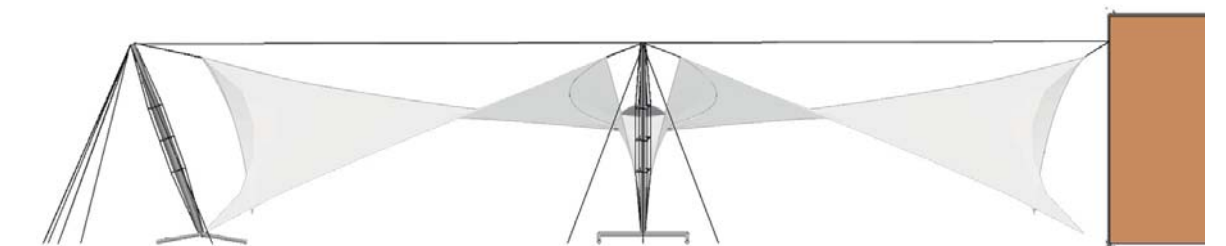
95 Perspectiva detalle.

Linternilla

Dos postes sujetan la linternilla con el principio de tensegrity o la rueda de bicicleta. Los cables que unen a cada poste con la linternilla al ser tensores también son útiles en el equilibrio del sistema, por tal motivo al tercer poste se le colocan cables tensores hasta el

observatorio del recinto como se muestra en la imagen.

La elevación de la linternilla queda por debajo de estos últimos cables, esta elevación también sirve para elevar los mantos de la cubierta y puede variarse a gusto del diseño.



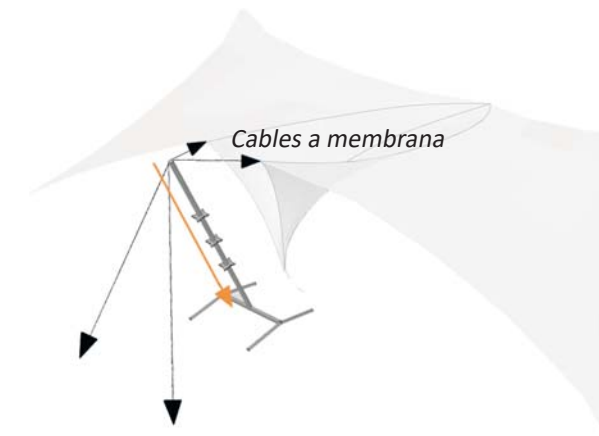
96 Vista lateral. *Elab. propia.*

Postes y Cables

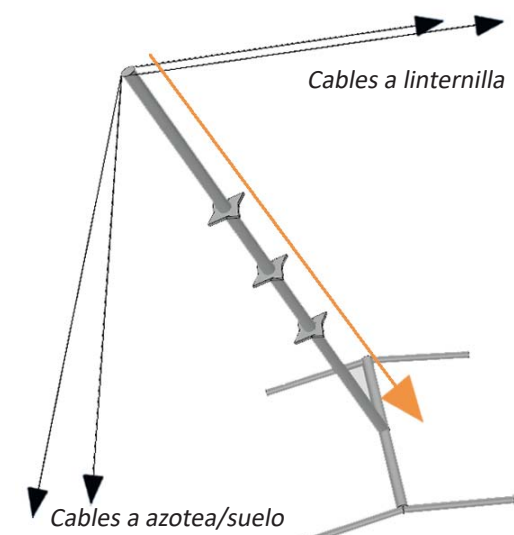
La estabilidad de los postes y su inclinación se da por medio de la oposición de fuerzas ejercidas en él, es decir los cables que le rodean, en este caso diez por cada poste. Los diagramas indican en negro la dirección de fuerza del cable ejercida sobre el poste, lo que provoca una resultante dibujada en color naranja.

El diagrama 1 ejemplifica el equilibrio entre dos pares de cables. En los diagramas 2 y 3 los cables en la derecha de cada poste están en oposición a los cables de la izquierda.

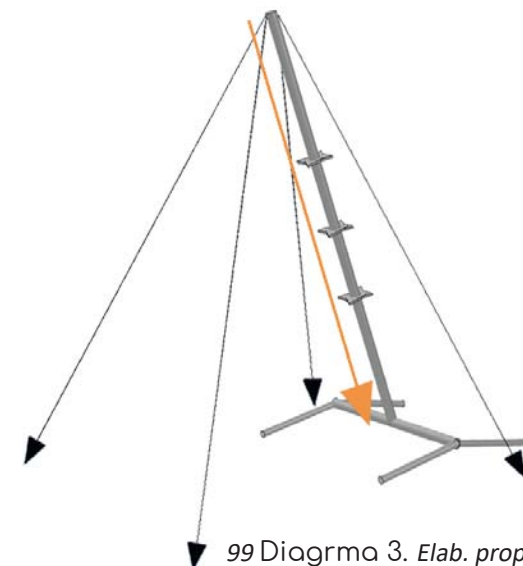
■ Indica vector de cable sobre poste ■ Indica vector resultante



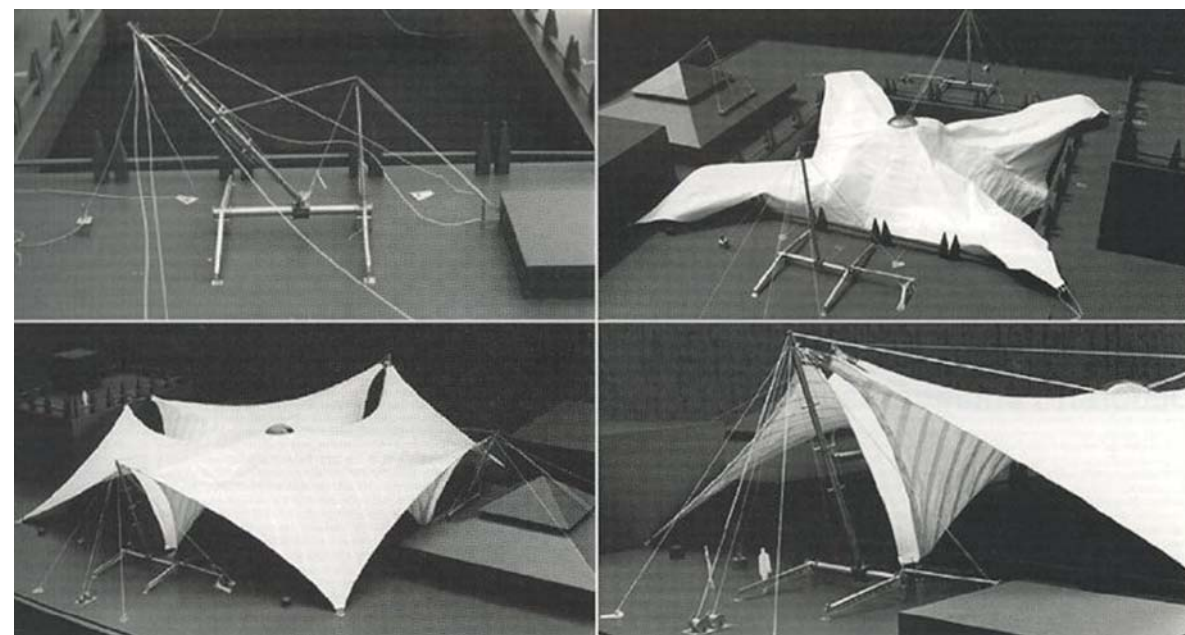
98 Diagrama 2. Elab. propia.



97 Diagrama 1. Elab. propia.



99 Diagrama 3. Elab. propia.



100 Maqueta elaborada por los participantes del concurso.

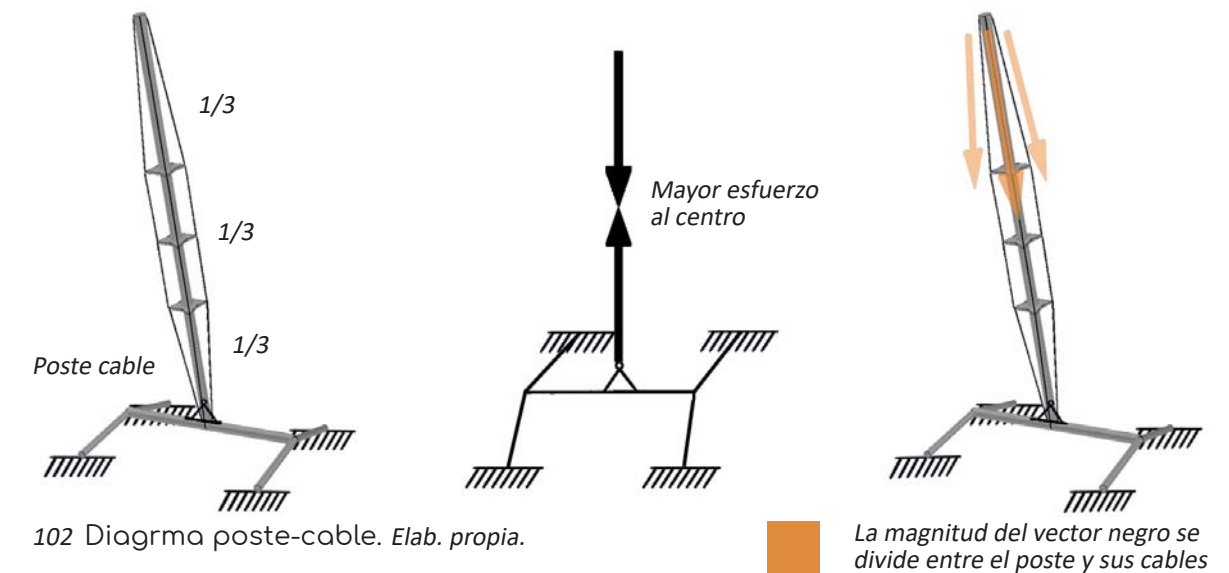
Poste Cable

Los postes están libremente apoyados sobre un soporte de barras ancladas sobre firmes de concreto que aterrizan sobre ejes estructurales del edificio.

El trabajo a compresión del poste resulta en un diámetro variable del poste para resistir el esfuerzo, es decir, que la sección ideal mínima es mayor en el centro y menor en los extremos. Como alternativa para economizar costo y material, colocaron tres cables que van de extremo a extremo alrededor del poste y que se separan del poste en cada tercio o también puede ser cada cuarto, para mitigar así el vector resultante de todos los cables antes dibujado de naranja, esto se conoce como poste-cable. (102)



101 Maqueta. vista lateral, se observa un poste cable.



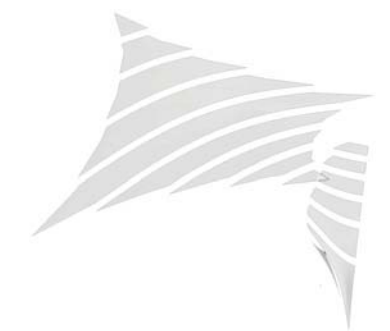
102 Diagrama poste-cable. Elab. propia.

■ La magnitud del vector negro se divide entre el poste y sus cables

Patronaje

La imagen 103 ejemplifica el diseño de patronaje en la membrana. Al diseñarse cada plantilla en todas las membranas se agregan las pestañas de unión.

Las plantillas de los mantos se trazaron de vértice a vértice, mientras que los ojales se cortaron de lado a lado generando piezas pequeñas y gruesas.



103 Despiece o patronaje en mantos y ojales

DIAGNÓSTICO

Esta propuesta cumple en su totalidad su aspecto funcional a la par de cuidar cada posible detalle estructural, por lo que su eficiencia es máxima.

En ocasiones las propuestas arquitectónicas más sencillas y estéticas son más complicadas de obtener en el proceso de diseño, esta cubierta tiene esa cualidad.

Diseño	● ● ● ● ● ● ● ●
Utilidad	● ● ● ● ● ● ● ●
Estructura	● ● ● ● ● ● ● ●
Cuidados	● ● ● ● ● ● ● ●

PREMISAS DE DISEÑO

Con apoyo de la información investigada de los casos de estudio, se identificaron patrones que están presentes en varias membranas, o bien, que al no considerarse se vio comprometido el funcionamiento o resultado final.

Los casos de estudios se seleccionaron procurando que su concepción y resultado se contrastara entre cada uno de ellos, para así ampliar la información observada, sin embargo, son pocos ejemplos para concluir tajantemente, para lograr esto se completa la investigación en el capítulo 3.

En ocasiones puede resultar contraintuitivo el uso óptimo de los elementos en estas cubiertas, algunos observados serían; ocupar perfiles tubulares en lugar de cable de acero para soportar esfuerzos a tracción, empotrar los elementos, o cubiertas con poca curvatura en búsqueda de una pendiente pronunciada o reducir los esfuerzos.

La complejidad formal no impacta en las premisas obtenidas, y podríamos anticiparnos a que tampoco impacta sobre los fundamentos finales. Gracias a esto, al comprender los fundamentos finales de la tesis, se nos facilitará fijar la atención en la propuesta formal y la metodología en su búsqueda.

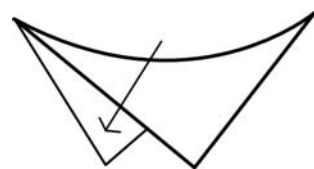
Composición - Para resolver la necesidad de cubrir un espacio, muchos casos toman una tipología común y la adaptan al proyecto con conceptos de diseño como: sucesión, simetría, asimetría, radial, escalar, etc.



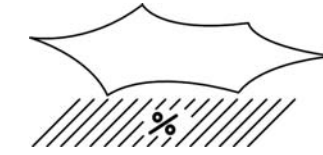
Superficie si, Plano no - Las membranas tienen como característica su doble curvatura inversa, una superficie plana no es una membrana, por lo que incorporar cuadrados, triángulos o cualquier polígono inclinado en una composición de velaria es un error.



Pendiente - Un propósito de la doble curvatura es evitar el acumular agua o nieve sobre la cubierta, por lo que superficies con áreas de poca pendiente requieren mayor mantenimiento y pierden funcionalidad. A mayor curvatura de la superficie mayor la pendiente en toda la membrana.



Impacto Ambiental - Una cualidad de las velarias es el uso mínimo de material, se logra con la correcta aplicación del diseño del sistema. Para que tenga una máxima utilidad deberá considerarse la relación entre tamaño de membrana con la sombra que provee, casos fallidos son membranas con diseños demasiado verticales.



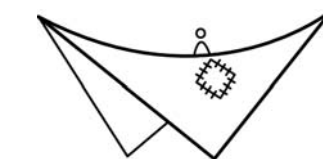
Equilibrio - Este se define como un estado de inmovilidad de un cuerpo sometido a dos o más fuerzas de la misma intensidad que actúan en sentido opuesto, por lo que se contrarrestan o anulan. Tanto los postes como la membrana están sometidos a las fuerzas de los cables y tensores, su dirección y fuerza definen el estado de equilibrio y por tanto de seguridad de la membrana.



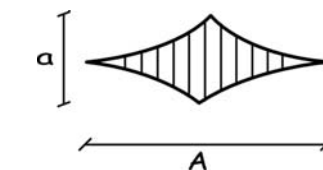
Libre Apoyo - Se debe evitar que la estructura trabaje con momento, el libre apoyo o articulación impide un momento en el poste y por lo tanto deformaciones en él, que tendrían que solucionarse con mayores diámetros del material.



Mantenimiento - Considerar el mantenimiento de la membrana mientras esta sea resuelta, dependiendo el proyecto y la ubicación existen opciones; fácil acceso en la parte superior de la cubierta, fácil montaje y desmontaje, herramientas de apoyo para su cuidado. De lo contrario puede reducirse considerablemente su tiempo de vida y su aspecto verse deteriorado.



Patronaje - Se diseña siempre de manera que el corte sea lo más angosto posible, puede ser de vértice a vértice o de lado a lado.





104 Cubierta velaria o tensoestructura para alberca, autor desconocido.

CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTOS DE DISEÑO PARA MEMBRANAS

DICOTOMÍA: LA FORMA LIBRE TIENE LEYES

Curva y Superficie

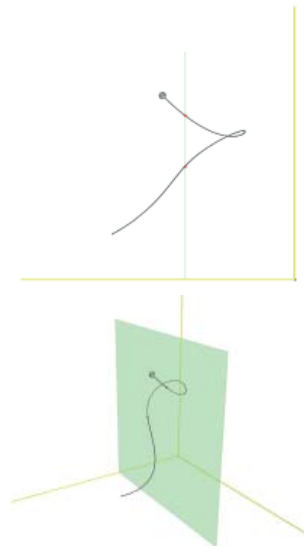
Durante el capítulo primero nos familiarizamos con algunas curvas que han sido amigas de arquitectos; círculo, catenaria y parábola, trate de señalar la generación de forma en geometría descomponiendo sus elementos; del volumen al plano, y del plano a la línea. Ahora me permito reemplazar el concepto línea por curva, y plano por superficie, dado que los primeros son solo ejemplos de los segundos, y en seguida se presenta necesario diferenciarlo.

Toda tensoestructura es una superficie, por lo tanto, diseñar estas bellas cubiertas consiste en diseñar superficies. Para validar esta afirmación nos preguntamos ¿Qué es una superficie y cómo se conforma? Con tantas maneras de estudiarla como concepto cito al matemático Alías (2004): “por superficie entendemos una porción de naturaleza bidimensional dentro del espacio ambiente en el que vivimos”. Desmenuzando la definición, primero guardemos la idea “espacio ambiente en el que vivimos” también llamado espacio Euclídeo, es tridimensional con propiedades de largo, ancho y alto.

Hasta ahora vimos ejemplos de curvas planas, que son aquellas contenidas dentro de un plano bidimensional, como son las curvas conoides, pero ¿Qué pasa si observamos el vuelo de una mosca? Esta sería una *curva alabeada*, que son aquellas que no están contenidas en un plano.

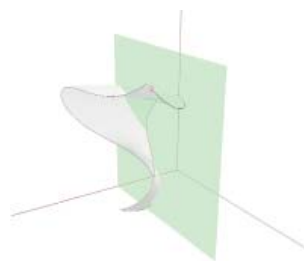
Alías (2004) afirma: “Una curva tiene naturaleza unidimensional, porque a lo largo de ella solo nos podemos desplazar en una dirección”. (p. 17) Así la curva alabeada tiene origen unidimensional, abstracción bidimensional y realidad tridimensional. (105) Además de medir su curvatura se puede saber cuánto de alabeada está por medio de la torsión.

El cascarón de huevo; nos permitió abordar el concepto de membrana, y debería ser consistente con el concepto de superficie. Tomemos un huevo en posición vertical, dibujando una línea de extremo a extremo, obtenemos una curva, y además una línea geodésica, a esta curva le aplicamos una revolución en su eje z, obtenemos de vuelta la superficie del huevo, generado a partir de la sucesión de nuestra curva. (106) Importante señalar el interior del huevo, es el espacio contenido por la cascara, por este motivo el huevo no es un volumen, sino que se trata de una superficie cerrada. Así el cascarón tiene naturaleza bidimensional, ya que solo te puedes desplazar en el en dos direcciones, la curva generatriz y la directriz, y ocupa sólo una porción en el espacio Euclídeo, llegando a contener otra porción en su interior.

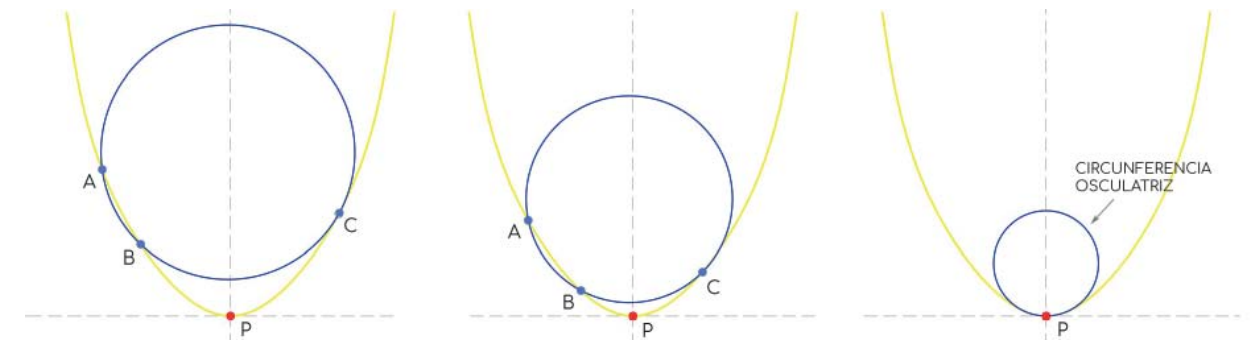


105 Superior; Vista Frontal, permite ver la curva alabeada sin conocer su forma en nuestra percepción o espacio tridimensional, la línea verde es un plano perpendicular a la vista, se ve que corta la curva en 2 puntos.

Inferior - isométrico; Los puntos en rojo, son aquellos donde el plano corta o intersecta a la curva alabeada.



106 Superficie de revolución; a partir de la curva aleatoria dibujada por la mosca



107 Tres puntos de la curva amarilla definen una circunferencia, al encontrarse con el punto P se obtiene la circunferencia oscultriz, esto define; $K(P) = 1/(r(P))$ que puede leerse como; la curvatura en el punto P, es igual al inverso del radio de la circunferencia oscultriz en el punto P.

Curvatura de una superficie

Durante el siglo XVIII el matemático suizo Leonhard Euler introdujo los conceptos de longitud y curvatura en el estudio de la geometría intrínseca de la curva. Sáenz (2018) expresa: “Una forma de decir que una línea está más curvada que otra, es si su cambio de dirección es mayor cuando recorremos la misma distancia”. Por ejemplo, una línea recta de igual longitud a una circunferencia, ambas tienen una curvatura constante, la línea recta tiene curvatura cero al no cambiar nunca su dirección, mientras que la circunferencia se dobla lo mismo en todos sus puntos y termina en el mismo punto donde inicio el recorrido.

Existe una relación entre la curvatura y el radio, una circunferencia de radio pequeño tiene una curvatura grande, en cambio, la circunferencia con radio grande tiene curvatura inferior, de esta relación inversa obtenemos:

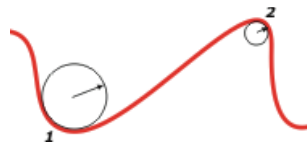
$$k = 1/r \quad (\text{curvatura} = 1/\text{radio})$$

Por consecuencia, si la curvatura es una razón matemática (una relación de dos magnitudes), y el comportamiento de dicha razón es constante en una circunferencia, la circunferencia es útil para conocer la curvatura de una curva, es decir, equivaldría a reconocer el lenguaje desconocido y cambiante de una curva, para traducirlo al lenguaje confiable y constante de una circunferencia.

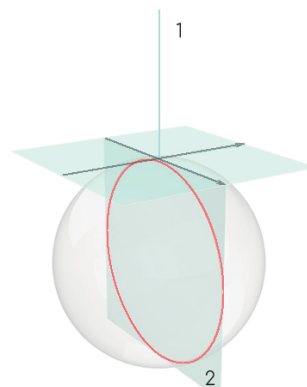
Recordemos ahora que tres puntos no alineados dibujan una circunferencia. Dibujemos tres puntos en la curva; A, B y C que se aproximan a un punto P, en el momento en que todos los puntos coinciden en P, tenemos una circunferencia límite, la cual se llama *circunferencia oscultriz*, (107) porque besa en un punto a la curva, en otras palabras, se busca una circunferencia que sea semejante al punto P en nuestra curva, así la conocida matemática de la circunferencia nos indica la curvatura en un punto específico de la curva.

En la imagen 108 se observa la relación inversa entre el radio y la curvatura con dos circunferencias oscultriz de diferentes tamaños.

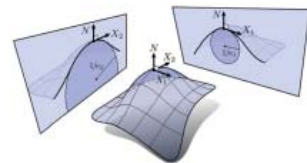
En matemáticas se acostumbra simplificar un problema, tal que lo conocido y ya validado, nos encamina a resolver las nuevas inquietudes. La idea básica de Euler fue cortar transversalmente una superficie con planos perpendiculares,



108 El punto 1 con radio mayor tiene una curvatura menor, mientras que el punto 2 con radio menor tiene mayor cambio de dirección, es decir mayor curvatura. Ambas son circunferencias osculatrix.



109 Esfera con plano tangente, direcciones tangentes en gris, el no. 1 indica el vector normal y el no. 2 el plano perpendicular que corta la esfera, que dibuja a su vez la curva normal (circunferencia en este caso) señalada en rojo.



110 Planos direcciones tangentes, tenemos las curvaturas principales, que a su vez son como se observa con sus radios, la curvatura máxima y la curvatura mínima.

así en lugar de buscar la curvatura de una superficie en un punto cualquiera; estudio la curvatura de la curva obtenida de la disección (Alias, 2004).

Cada punto de una superficie posee su respectivo plano tangente, con sus respectivas direcciones tangentes y su vector normal, esto determina un plano perpendicular a la superficie en el punto P, este la corta a lo largo, a lo que obtenemos una curva plana y no alabeada, la cual se llama *curvatura normal*. (109) Una tangente en el mismo punto con distinta dirección, variará el plano y la curvatura normal, a esta familia de planos perpendiculares a la superficie en un punto P, se le conoce como haz de planos.

Fijado un punto P, dentro del haz de planos existen dos direcciones tangentes sobresalientes, que son aquellas en que la curvatura normal alcanza sus valores mínimo y máximo. Estas dos direcciones son perpendiculares entre sí, y a las curvaturas normales resultantes se les llaman *curvaturas principales* (Alias, 2004). (110)

$k_1(P)$ = valor mínimo de la curvatura normal,

$k_2(P)$ = valor máximo de la curvatura normal.

Fue el matemático alemán Carl Friedrich Gauss, quien resolvió que el producto de las dos curvaturas principales, indicaba la curvatura de una superficie, o lo que conocemos como la *curvatura de Gauss* ($K = k_1 \cdot k_2$)

Si bien el “Theorema Egregium de Gauss” ilustra un descubrimiento primoroso sobre la naturaleza de las superficies, debo fijar la atención en los tres tipos de geometrías que existen, las superficies que tienen curvatura negativa (curvatura anticlástica), curvatura positiva (curvatura sinclástica) y curvatura cero.

$$K = 1 / r_1 \cdot r_2$$

Para identificar a que grupo geométrico pertenece una superficie basta con multiplicar los signos de los radios de las curvaturas máxima y mínima. En el ejemplo de la esfera, ambas curvas perpendiculares son circunferencias del mismo radio con valor mayor a cero, por lo que $+ \cdot + = +$, la esfera es superficie sinclástica.

Dos curvas perpendiculares parábolas de signo opuesto describen un paraboloides hiperbólico, una con función de directriz y la otra de generatriz. Mucha arquitectura sinclástica se inspira en estructuras neumáticas, mientras que las cubiertas de nuestro interés son anticlásticas.

Conocer los conceptos matemáticos de las superficies, puede tener aplicación en la búsqueda de la forma, quizás en el uso de diseño paramétrico, o para reinventar el concepto de cubierta velaria con una propuesta atrevida. Geometría y matemáticas siempre tienen un vínculo natural como la geometría con los arquitectos.



111 Palacio de los deportes terminado en 1968, cubre más de 27,000 m2 con su cúpula conformada de superficies anticlásticas o hyper suspendidos en arcos de acero que dan forma sinclástica al edificio.

BÚSQUEDA DE LA FORMA

Es momento de tejer los conceptos con la información específica de cada proyecto, para esto planteo definir necesidades arquitectónicas y climáticas que intervendrán en la solución óptima de la membrana. Estos factores son un resumen de la experiencia en actuales profesionistas de membranas textiles.

Como en otros proyectos, el arquitecto realiza un análisis de sitio para satisfacer la necesidad, “Por regla general, salvo excepciones, el primer objetivo de las cubiertas es la protección contra agentes climáticos como la lluvia, el viento o la radiación solar, para que las distintas actividades humanas se desarrollen satisfactoriamente”. (Santomauro, 2008, p.54). Esta información en ocasiones nos sugiere alguna forma conocida dentro del catálogo de tipologías.

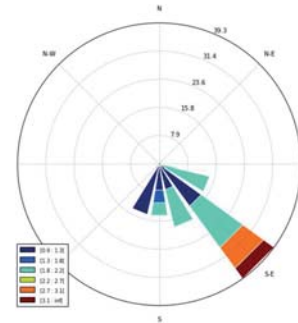
En los primeros ejercicios es útil considerar errores típicos. El Arq. Luis Marroquín (2012) enlista los errores comunes al proyectar una membrana cubierta:

- Superficies planas y sin pendiente adecuada para la evacuación de aguas de lluvias o por limpieza y mantenimiento de la cobertura.
- Generación de formas sin considerar la geometría apropiada y variables estructurales de las superficies.
- Desconocimiento de los materiales y accesorios adecuados para construir la cobertura.
- Ausencia de estudio de asoleamiento y recorrido solar para dimensionar la cobertura.
- Colores en la membrana que se deterioran rápidamente y no favorecen una iluminación natural adecuada de las tribunas
- Materiales de rápido deterioro por corrosión, hongos y radiación ultravioleta.

Posteriormente integramos las condicionantes y demandas específicas del proyecto, estas pueden abstraerse a fuerzas y premisas que pueden actuar en una malla plana inicial, lo que provocara un primer acercamiento a la forma, tal y como Frei Otto diseño la nave multiusos en Mannheim.

A continuación una breve descripción de cómo cada factor climático y arquitectónico tiende a influir en la geometría y toma de decisiones en el diseño de la membrana.

Climáticos



112 Rosa de vientos

Viento - Las membranas son material hermético, aunque esto no aplica para los otros elementos del sistema, por tal motivo la circulación del viento en relación con el contexto arquitectónico o urbano, influye en salidas de aire por medio de linternillas y ojales. También considera vectores de fuerza en sitios con vientos intensos.

Para el confort climático puede influir en la forma general de la cubierta, por ejemplo una propuesta tipo conoide que permite la salida de aire caliente en su cúspide, o bien accesos de aire en las partes bajas. Dependiendo el proyecto el viento toma mayor relevancia, la cubierta de un patio o un recinto deportivo de gran claro, o bien si la estructura se desplantara del suelo.

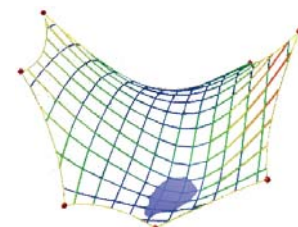
Ya que las membranas son de naturaleza bidimensional formadas por curvas de signo opuesto, contiene dos familias de parábolas, la carga del viento es tomada por la curva con la concavidad hacia la dirección de dicho viento, a costa de reducir la tensión en la otra familia de parábolas, lo que provoca arrugas, es decir, cuando se forman arrugas por cargas de viento únicamente trabajan una familia de pseudo parábolas. Estas arrugas son problema estético y no estructural.

Asoleamiento - La capacidad de permitir un porcentaje parcial de luz, dependiendo la membrana varía de un 5% hasta un 20%, tiene influencia indirecta en la forma. Se considera más en el confort y material deseado. Varía según la intención del proyecto y asoleamiento al que será sometida, posterior al estudio de asoleamiento del sitio, impacta la forma de acuerdo a la superficie que se desea dar sombra y las distintas horas del día, una membrana mal proyectada puede proveer poca sombra con relación al material ocupado y espacio intervenido.

Si tomamos el caso de una membrana que permita el pasaje de un 5% de luz sobre 75,000 luxes de un día soleado, obtendremos una iluminación interior natural de 3.750 luxes. Los niveles de iluminación pueden ser buenos o muy buenos pero no suficientes para el desarrollo de la vida vegetal. (Santomauro, 2008, p. 55)

Lluvia - Ya que una membrana funciona como impermeable se deben pensar los puntos de desagüe, esto influye en buscar la mayor curvatura posible para evitar zonas donde pueda acumularse el agua, para esto existen programas que miden las pendientes de la forma durante su diseño. Considerar una pendiente mínima del 8% y un estándar adecuado del 15%.

El poco espesor de las membranas las vuelve susceptibles a la condensación superficial, tanto interna como externa, dependiendo la actividad del espacio cubierto puede que necesite considerarse.



113 Modelo estudio de pendientes con software

Sonido - Las membranas no ofrecen aislación sonora adecuada, existen alternativas constructivas en unión con estas cubiertas. En cuanto a la forma, las superficies anticlásticas tienden a la difusión de los sonidos, llegando a ser suficiente dependiendo la forma, mientras que en las sinclásticas las reflexiones de sonido pueden acumularse en zonas o puntos específicos.

Santomauro (2008) afirma:

Si se busca una aislación sonora más eficaz se podrá buscar mediante la colocación de una segunda capa interior que puede ser tipo malla abierta, o lisa, dejando entre ambas una cámara de aire libre, o mejor aún, insertándole un material de mayor densidad y aislante acústico específico. (p. 58)

Arquitectónicos

Espacialidad - Las cubiertas membranas pueden integrarse o desde un inicio proponerse a un programa arquitectónico. El espacio contenido y el carácter del edificio o área a cubrir, guía al proyectista en criterios cualitativos de la forma en la cubierta.

Requerimientos Funcionales - ¿Qué actividades se realizarán? Detectar con claridad esto tiene peso en el diseño como puede ser; la duración estimada de la cubierta, si esta será permanente o itinerante, ubicación de elementos como postes o cables en el espacio, entre otros. Este factor se relaciona con el anterior, por ejemplo si se nos encarga una cubierta para un centro comercial, otra para un parque y una tercera para una terraza habitacional, podemos tener una idea de soluciones muy diferentes en dimensiones, duración, concepto y/o libertad de diseño.

Contexto Arquitectónico - Constructivamente son las membranas las que deben adaptarse a su contexto arquitectónico, detectando donde se apoyara la estructura. El contexto también facilita o complica la dirección de pendientes para la evacuación de aguas pluviales o circulación del viento. (114)

En el programa arquitectónico una membrana puede ser todo el proyecto o una parte de él, también ser el elemento de jerarquía o bien complementario.

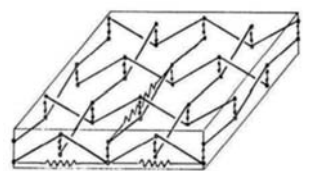
La suma de propuestas e ideas iniciales y las condicionantes tanto climáticas como arquitectónicas, conforman el axial del form finding o búsqueda de la forma.

Por lo general se trabaja con varias ideas, dibujos iniciales se transforman a superficies en maqueta físico y digital, valores cualitativos y cuantitativos poco a poco van encontrando autoequilibrio en un sistema complejo.

Estas estructuras tienen un fuerte vínculo con sus condiciones iniciales, lo que permite conocer exactamente su evolución en el tiempo, pero a la vez son estructuras complejas debido a la interacción de múltiples nodos y puntos de anclaje, lo que imposibilita un cálculo lineal. (115) Una membrana textil se com-



114 Cubierta en Facultad de Arquitectura de Perú, Arq. Aurora P Vildoso. Se sujeta de la estructura del edificio y descarga parte de las aguas pluviales en un jardín



115 Interacción de varios puntos durante la búsqueda de la forma

porta como un sistema caótico determinista, de acuerdo a la teoría del caos en matemáticas y física que estudia los comportamientos impredecibles y no lineales de los sistemas dinámicos, es decir, modificar un parametro cambia todo el conjunto de la cubierta, por este motivo aunque los anteriores conceptos climáticos y arquitectónicos son sencillos de considerar, hacerlo correctamente provoca un solido inicio del diseño.

Cuando se obtiene una forma satisfactoria, algunas condicionantes y detalles complementarios de la cubierta pueden ajustarse, con el propósito de optimizar la estética y trabajo estructural ya que al ser un sistema caótico o no-lineal, una modificación tiene impacto en el sistema global.

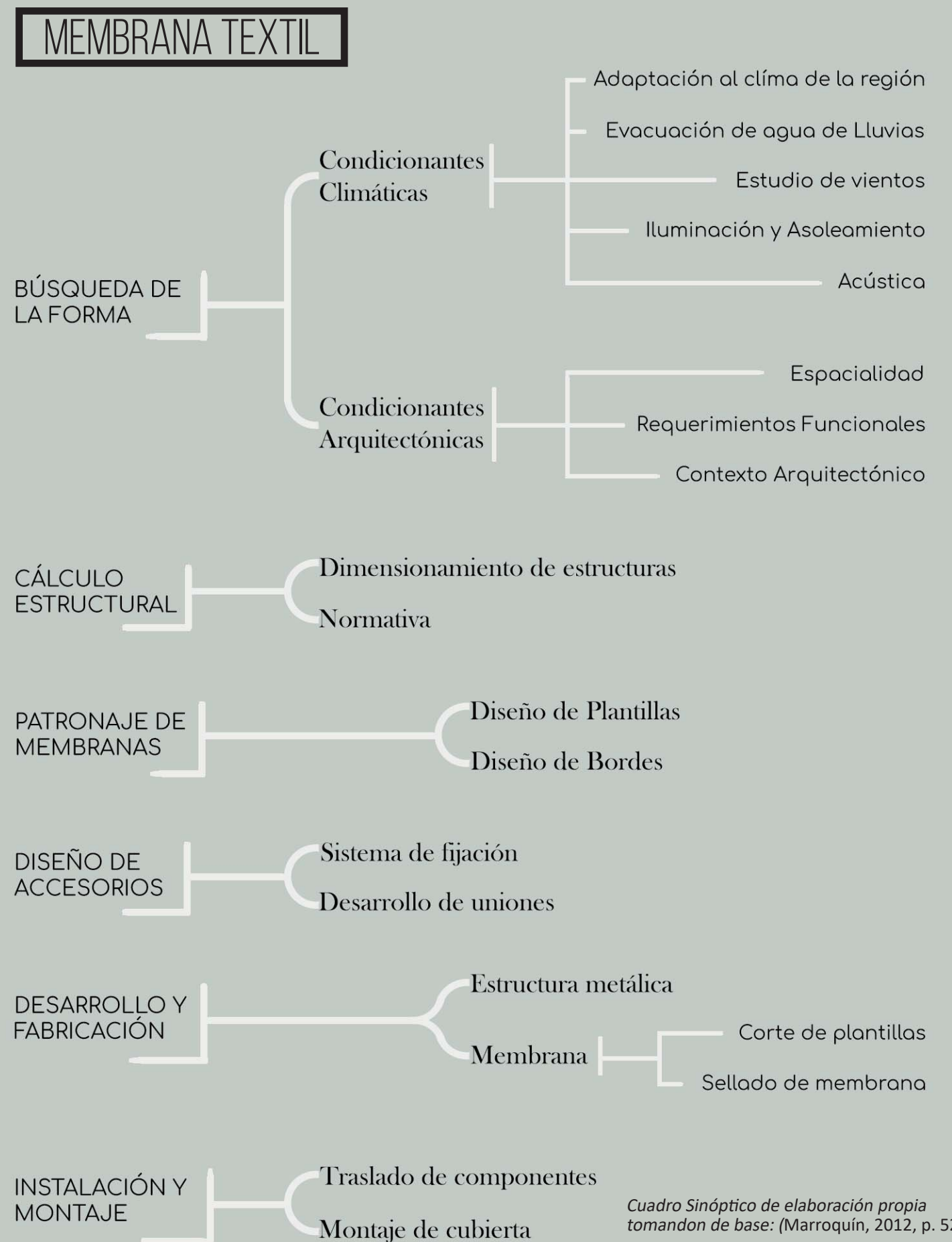
Para estudiar el despiece y diseño de plantillas una vez más se realizan modelos físicos de estudio pero con materiales que no sean textil. En el mapa mental de la derecha, se observan los pasos que continúan una vez que obtuvimos la forma de la membrana para que esta se pueda construir.

Estructura - Posteriormente de la forma se procede al cálculo estructural de los accesorios y elementos constructivos, así como la consulta de normativa. Se somete a pruebas de resistencia y comportamiento físico. Se seleccionan los materiales adecuados aplicando los coeficientes de seguridad correspondientes.

La temperatura provoca una vez pretensada la membrana esfuerzos internos que varían de forma inversa, en particular si los puntos de amarre están vinculados directamente a tierra. Si la membrana se tensa con temperaturas altas los esfuerzos de pretensado van a aumentar al reducirse la temperatura, si se tensa con temperaturas bajas al reducir la temperatura se observará un aflojamiento de la membrana con eventual formación de arrugas al aumentar de nuevo la temperatura. (Santomauro, p.63)

Cada proyecto suele tener particularidades a resolver como pueden ser; la fabricación de piezas o uniones específicas, el orden en que se montara la estructura, la pretensión de las membranas y cables, entre otros.

Son varios los factores que intervienen en la búsqueda de la forma, en ocasiones intuitivamente y por experiencia el diseñador puede proponer una solución que este cercana a una opción optima. En otras ocasiones métodos artesanales con maquetas y la abstracción de las condicionantes con apoyo de software, ya sea sumadas o por independiente, serán el camino a soluciones originales complejas no solo en lo estructural, sino en su aspecto visual.



Cuadro Sinóptico de elaboración propia tomandon de base: (Marroquín, 2012, p. 52)

MATERIALES

Los avances en la industria mejoran los materiales constructivos, sin duda esto acompañó el éxito de las cubiertas textiles en el último siglo. Como aprendimos, de manera resumida son postes, membranas y cables los que integran estas cubiertas, sin olvidar los accesorios complementarios y de anclaje, aquí pretendo sintetizar información valiosa para nuestras primeras construcciones de membranas.



Membrana

Las membranas son tejidos bi-direccionales textiles ordenados de manera ortogonal, y cubiertos por capas en ambos lados de materiales como; PVC, PTFE, Silicona, entre otros. Así los hilos finos le aportan resistencia a la membrana mientras que las capas de recubrimiento protección de los agentes climáticos. (116)

Además de las capas se agregan productos a la membrana para mejorar sus cualidades químicas, por ejemplo la de mayor énfasis en normativa, la resistencia al fuego. El resultado de hilos, revestimientos y productos líquidos, le otorgan a las membranas textiles; Resistencia al rasgado, impermeabilidad, difusión o no transmisión de luz, resistencia a rayos UV, resistencia a hongos, oposición a la suciedad, longevidad, color, entre otros.

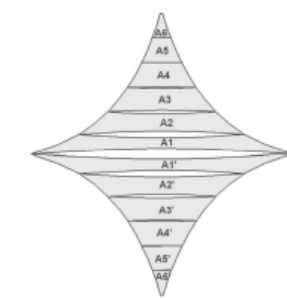
Las membranas más comunes son las cubiertas con PVC y PTFE. El PTFE es un polímero al que le han sustituido los átomos de hidrógeno por átomos de flúor, la principal virtud de este material es que no reacciona con otras sustancias químicas salvo excepciones, lo que permite sus fortalezas como la impermeabilidad.

Las membranas tienen buena relación costo - durabilidad, son además muy seguras, ya que son sometidas a múltiples pruebas de resistencia, tanto físicas como químicas, y como ya sabemos tienen una alta resistencia a la tracción.

Patronaje

La superficie de la cubierta diseñada es segmentada para poder cortar los rollos de tela, actualmente los mismos software que asisten en el diseño permiten realizar las plantillas de corte. Se busca cortar la superficie diseñada desde el sentido más corto ya que la membrana es pretensada y con segmentos más grandes se puede dificultar modelar la forma correcta. El diseño de corte también considera el ancho del rollo de la membrana, que varía según el proveedor, las terminaciones de los bordes y los descuentos por estiramientos.

Gracias a la curvatura de Gauss sabemos que en las zonas con mayor curvatura, se requiere un número mayor de patrones de corte y mayor radio de curvatura en las ojivas para lograr la superficie tridimensional al momento de unir los segmentos. (117)



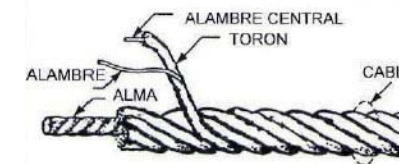
117 El ancho es menor y el radio ojival mayor en la parte central del hyper.

Al tratarse de cortes en superficies planas que serán pretensadas y finalmente serán superficies de doble curvatura inversa, se recomiendan maquetas a escala y en papel, cartón, o cualquier material que no se pueda tensar como una tela, y así verificar que los patrones de corte propuestos permiten modelar la forma.

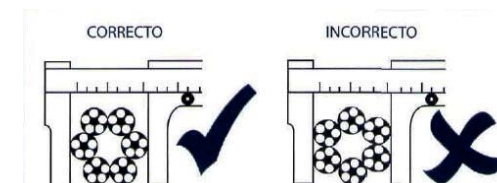
Los patrones de membrana se unen dependiendo el material, pueden ser por medio de soldadura de alta frecuencia (HF) que se basa en la generación de calor en un campo eléctrico alterno rápido a través de la presión de diodos metálicos sobre los materiales termoplásticos a soldar, o bien se unen con aire caliente a una temperatura aproximada de 160°C y una presión de 4 a 7 kg/cm² aprox. durante doce segundos, por último existe la generación del calor con máquinas de radiofrecuencia (RF).

Cables

Tanto para los cables como para los tensores, se ocupa principalmente el acero galvanizado, también se dispone del acero inoxidable. Estos cables de acero tienen por elementos básicos: alambres, torones y alma. Los alambres se fabrican en distintos grados de acero con acabados negro o galvanizado. Los torones se fabrican torciendo una cantidad de alambres entre sí, sobre un alambre central llamado alma. (118, 119)



118 Elementos de un cable de acero



119 Manera correcta como se mide un cable

Un cable flexible tiene alambres externos finos, y si se requiere un cable rígido se busca uno con alambres externos gruesos. La nomenclatura para los cables tiene cuantos cordones formados por cuantos alambres en torno al material del alma, por ejemplo un cable 6 x19+AA nos indica un cable de seis cordones formados con diecinueve alambres en torno a un alma de acero. (121)



120 Fotografía de un cable

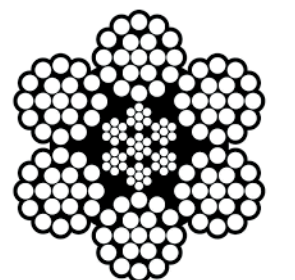
Las capacidades de un cable para seleccionar el adecuado son;

1.- Capacidad de carga adecuada - Es la resistencia a la ruptura, se considera un factor de seguridad de cinco a uno, es decir que la capacidad de carga de trabajo es igual a la capacidad de ruptura entre cinco.

2.- Resistencia a la fatiga: Capacidad para soportar los efectos de flexión y vibración a los que estará expuesto el cable una vez colocado.

3.- Resistencia a la abrasión: Es la propiedad de obtener el mínimo desgaste por fricción en relación directa a los factores abrasivos con los que puede estar el cable de acero.

4.- Resistencia a la corrosión: Capacidad de minimizar los factores corrosivos presentes en el ambiente en que trabaja el cable, ya sea mediante el galvanizado en los alambres, lubricantes especiales o de ambos.



121 Detalle de cable calibre 6 x19+AA

Accesorios y Uniones

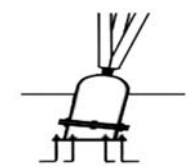
Uniones de acero, tensores y otros elementos rígidos conforman una parte jerárquica en estos sistemas, para empezar algunas de ellas son tan específicas como el proyecto. Marroquín (2012) explica que: Las tensoestructuras al ser un sistema conformado por materiales flexibles y mayor rango elástico... requieren de mecanismos que deben permitir cambios de dimensiones, realizar tensiones óptimas y lograr ajustes precisos.

La Universidad Politécnica de Catalunya en España elaboró una base de datos de detalles constructivos en arquitectura textil, la cual resulta muy útil consultar en su página web.⁴ A continuación recopilé un ejemplo entre varios que registrarán por cada categoría como muestra de la variedad de diseños en accesorios metálicos:



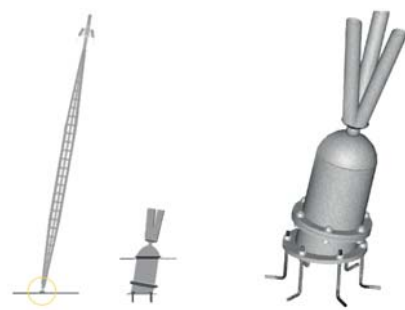
Categoría: Esquinas

Ejemplo: Esquina Recortada



Categoría: Bases

Ejemplo: Base de Mástil



Tubo de acero de 133mm Ø y 10mm de espesor de pared.

Plato de acero con perforación para encajar la esfera de acero.

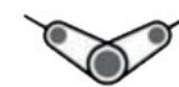
Tubo de acero de 510mm Ø

Placas de acero circular perforadas.

Espigas roscadas

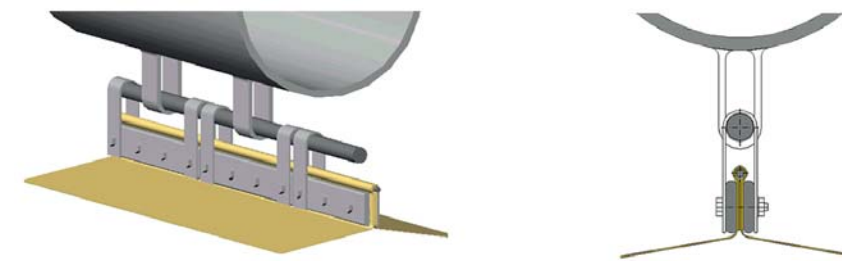


⁴ Se puede consultar el catálogo en el sitio web de la Universidad: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/28250?show=full>



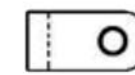
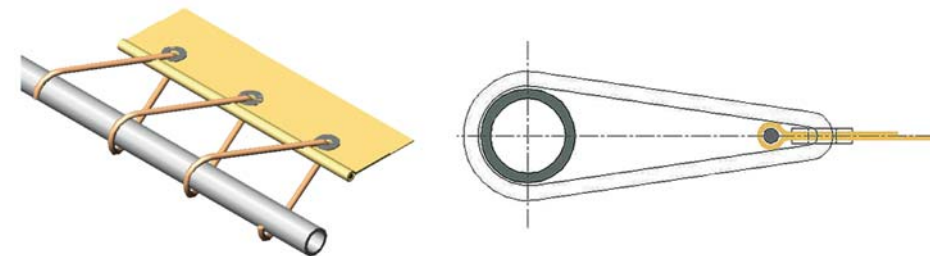
Categoría: Líneas internas

Ejemplo: Línea interior con cable exterior



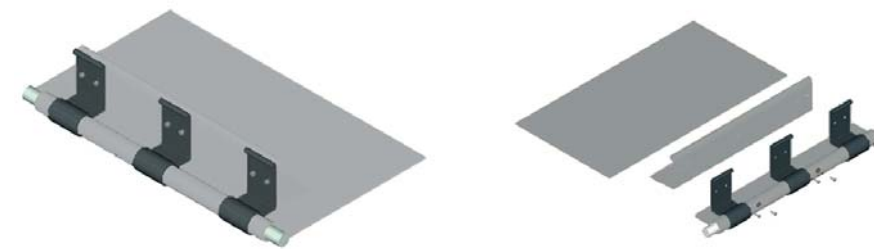
Categoría: Bordes

Ejemplo: Borde rígido acordonado a barra



Categoría: Accesorios

Ejemplo: Pieza de canal de agua en el borde

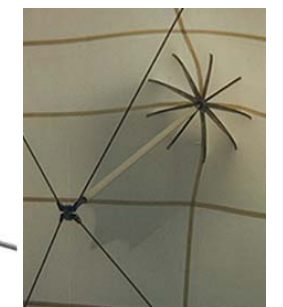


Puede usarse en bordes flexibles, una tira de tela soldada a la cubierta es levantada por planchas de acero, para formar una barrera y guía para el agua hacia las esquinas.



Categoría: Puntos elevados

Ejemplo: Punto apoyado con membrana continua



TIPOLOGÍAS

En arquitectura las tipologías tienen relevancia para dar lectura a proyectos que nos encontramos a diario, con motivos pedagógicos y de referentes para propuestas personales de diseño, clasificar patrones nos ayuda a interiorizar un conocimiento.

A diferencia de otros sistemas constructivos y estructurales, las membranas textiles para cualquier uso en arquitectura no encuentran fácilmente una clasificación de lenguaje universal, existen varias propuestas y alternativas que pueden tener diferente utilidad.

A continuación dos maneras de agrupar las cubiertas textiles con ejemplos fotográficos, la primera propuesta por Marijke Mollaert (2004) dentro de la Guía Europea de Diseño para Velarias citada en Ontiveros (2008) en donde expresa que: "hace referencia al tipo de espacio que genera, con un código gráfico de croquis de alzados, que considero una aproximación gratamente arquitectónica, sencilla y didáctica" (p.17)

	ABIERTO	CERRADO	ADAPTABLE
EXENTO			
INTERNO			
ADOSADO			

122 Clasificación de cubiertas textiles de acuerdo al vínculo cubierta - espacio.

La segunda clasificación es una propuesta personal, priorice el aspecto visual y la generación de la forma para los tipos de cubiertas. Ambas tipologías las encuentro útiles para los objetivos de la tesis, y para describir con fluidez varias cualidades de las tensoestructuras con las que interactuemos en adelante.

En las fotografías de ejemplos invito a notar la diversidad de alternativas en los bordes, la combinación de curvos o rectos, y fijos o libres. Este elemento puede transformar por completo el aspecto de dos cubiertas similares en escala y forma.

EXENTO ABIERTO

Spinne (araña)
Kiefer. Textile Architektur
Ubicación: Ludwigsburg, Alemania
2010

Cubierta con función recreativa y educativa. Cinco gajos en composición radial de distintas dimensiones dan forma al concepto de araña de la cubierta.

EXENTO CERRADO

Pabellón escenario del día nacional
Kiefer. Textile Architektur
Ubicación: Astana, Kazakhstan
2017 cliente: Expo 2017

Función: entretenimiento y recreación con uso efímero. La estructura consta de cinco vigas de celosía poligonales curvadas semicircular. Cubre 17m x 22.5m más el escenario con una altura máxima de 10.5m.

EXENTO ADAPTABLE

Cubierta Retráctil
Kugel + Rein Arq & Ing.
Ubicación: Fortress Kufstein, Austria
2005-2006
Superficie: 2,000 m2

Función: Recreativa. Cubierta reversible que no interfiere visualmente hacia la fortaleza de Kufstein. En 4 minutos toma lugar la cubierta, un anillo poligonal de 52m de diámetro, 15 segmentos iguales organizados radialmente a otro anillo con el principio de rueda de bicicleta.

INTERNO ABIERTO

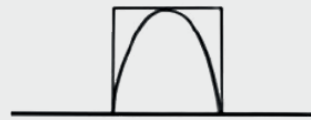


Velarias - Fin del arcoiris
Ubicación: Escuela de Arquitectura,
Madrid, España
2018
Superficie: 2,000 m2

Función: Educativa. Una serie de
cubiertas con diseños variados se co-
locan debajo del tragaluz en el patio
central de la escuela ETSAM-UPM
en Madrid. Son trabajo del taller de
arquitectura textil que se renueva
año tras año.



INTERNO CERRADO



Membrana escalera
Tritthardt + Richter
Ubicación: Malente Kiel, Alemania
2004
Función: Escultura

Escultura de luz en escalera de 7
pisos. Proyecto permanente, seg-
mentos de membrana translúcida
con forma de hiperboloide y caras
semitriangulares, adornan el ojo de
la escalera.



INTERNO ADAPTABLE

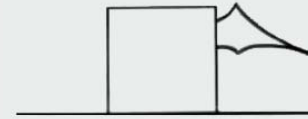


Zonas comunes en BBConstrumat
Josep Ferrando
Ubicación: Barcelona, España
2019
Función: Recreativo

Para el Barcelona Buiding Constru-
mat 2019, el Arq. J Ferrando expresa
3 ejes con las catenarias, familiares a
los barceloneses por Gaudí, la mo-
numentalidad con relación al recinto,
economía circular en relación con los
materiales, y el tercero es el didáctico



ADOSADO ABIERTO



Cubierta en piscina casera
Diseño y obra: Tensis
Ubicación: Mykonos, Grecia
2011
45 m2

Cubierta adosada para un
clima mediterraneo. Altura
máxima de 4m por 8m de
largo y forma anticlástica.
material de PVDF.



ADOSADO CERRADO



Centro de Arte Dagon
MAYU arch
Ubicación: Kaohsiung, Taiwan
2012
5640 m2

La membrana vincula cuatro gran-
des volúmenes; teatro, sala de ex-
posiciones, biblioteca y centro edu-
cativo. Módulos de tipo conoide
invertido permiten refugio en el es-
pacio público del edificio de lluvia y
altas temperaturas.



ADOSADO ADAPTABLE



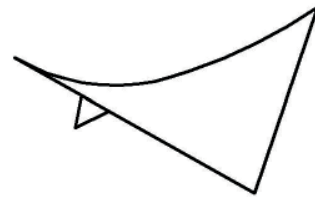
Restaurante Los Danzantes
J Oliva Salinas & M Ontiveros Hdez
Ubicación: Oaxaca, México
2005
130m2

Dos traves celosia carril, sopor-
tan siete módulos en forma de
"V". Motores y micro-sensores
permiten la apertura y cierre au-
tomático de la cubierta





PARABOLOIDE
HIPERBÓLICO



También se incluye
aquí a los Hypar de
abanico.



ARCOS Y CRESTAS



Superficie mínima for-
mada por una base de
puntos con uno o más
arcos sobre su área.



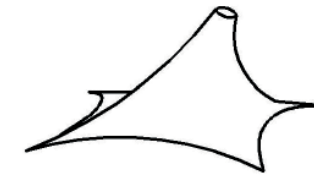
HIPERBOLOIDE



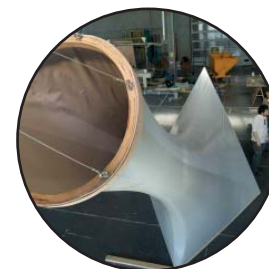
Superficie matemática de
revolución, que también
se construye por medio
de arcos.



CONOIDE



Una base de puntos
que tienen un punto de
atractor positivo o nega-
tivo dentro de su área.



TRASLACIONAL



Superficie mínima en la
transición de por lo menos
dos curvas, que pueden
ser cerradas o abiertas.



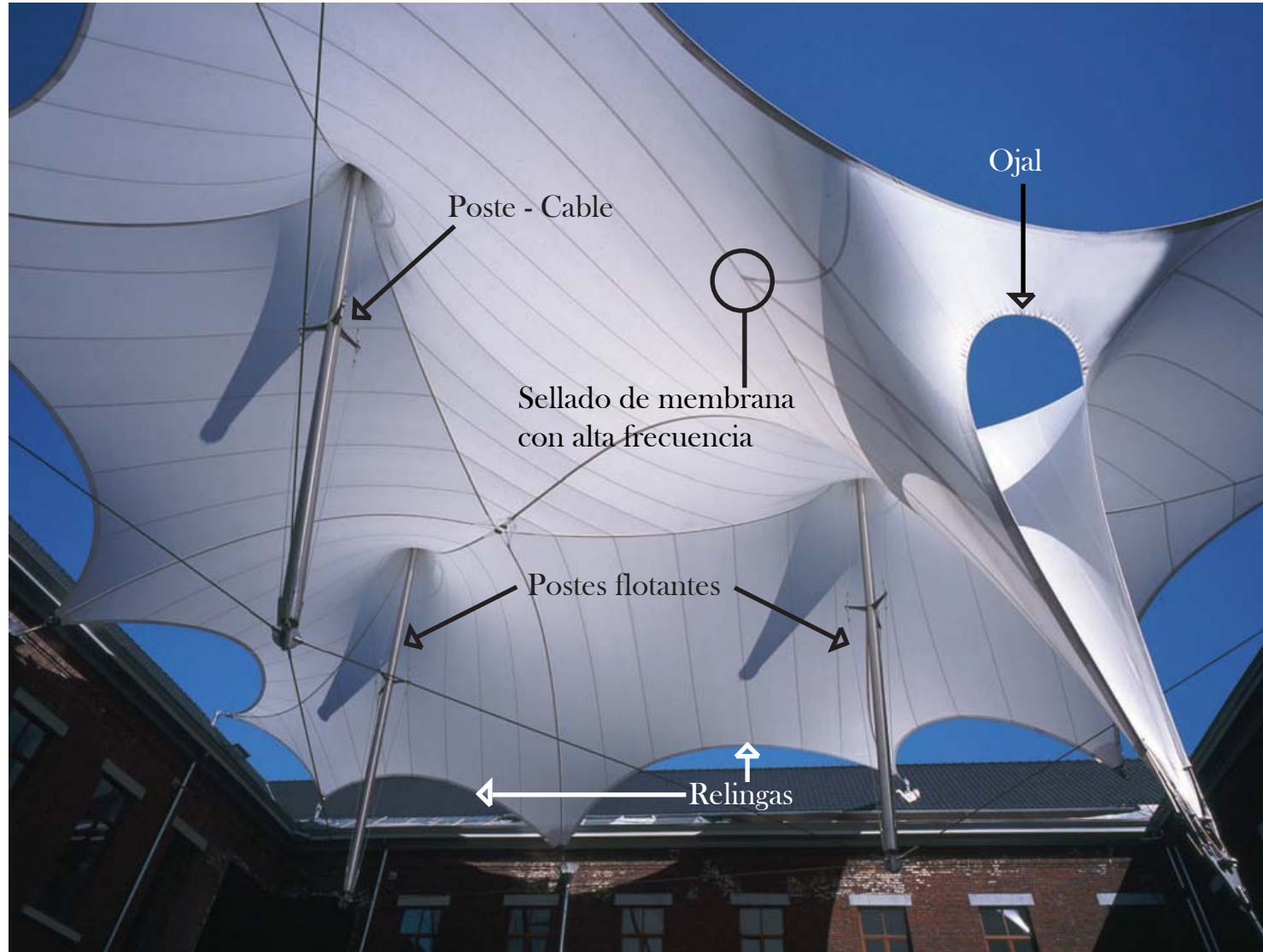
FORMA LIBRE



Se diseña el sistema que
modela la forma y no la
forma. Se evalúa el resul-
tado hasta ser satisfactorio



Elementos Comunes en una Tensoestructura



123 Cubierta del centro comercial "Julianus Tongeren" en Belgica



124 Detalle poste flotante y poste - cable

LOS FUNDAMENTOS

Al concluir el capítulo 2 resumimos el estudio de análogos en algunas premisas o bases, las cuales se notaron en los casos de estudio, ya sea por que estaban presentes, o bien, por que se diagnostico que alguna debilidad en comparación con sus similares. Dichas premisas evolucionan y complementan en el capítulo 3, dando vida a los siguientes fundamentos, una guía práctica y de facil consulta toda vez iniciado el interes y trabajo en las cubiertas membranas textiles.

Se define fundamento como un principio del que se sostiene una cosa. A lo largo del documento hablamos de los principios que definen a la cubierta membrana, encontramos bases técnicas, geométricas, metodológicas y tecnológicas. Los siguientes fundamentos surgen al identificar situaciones claves al momento de diseñar este tipo de cubiertas, se trata de patrones y características intrínsecas a las membranas textiles y típicos errores;

APROXIMACIÓN A LA FORMA

1 REQUISITOS DEL PROYECTO

- Asoleamiento
- Lluvia
- Viento
- Funciones y Actividades
- Contexto Arquitectónico
- Mantenimiento

2 ESTABILIDAD

- Doble curvatura inversa
- Tracción - Compresión
- Equilibrio
- Articular

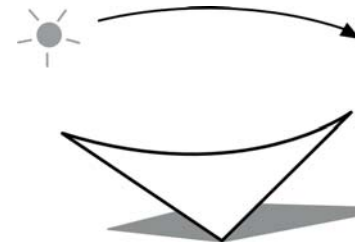
3 PROCESO DE DISEÑO

- Composición
- Maquetas
- Patronaje

4 CONSIDERACIONES FINALES

1 REQUISITOS DEL PROYECTO

Consiste en nombrar y definir aquellas condicionantes climáticas y arquitectónicas del proyecto. Son características particulares de cada demanda a resolver y su entorno. No son limitantes para la creatividad, son la base para las primeras propuestas y posibles soluciones. En este grupo encontramos:



Asoleamiento - La principal función de las membranas textiles es resguardarnos del sol. Para esto el primer paso será recabar la información pertinente; como las temperaturas promedio del sitio, orientación del espacio a cubrir y su recorrido solar.



Lluvia - Tan importante como el punto anterior, es también el resguardo de la lluvia. Se considera la precipitación típica del sitio, esto define una pendiente en sus puntos mínimos del 8% e idealmente del 15% para aprovechar la característica impermeable del material.



Viento - Se deberá conocer la dirección de los vientos dominantes y las actividades a realizar en el área a cubrir. Se diseña proyectando el acceso ideal de la corriente de aire y la salida del aire caliente, para que este ciclo pueda generar un microclima confortable.

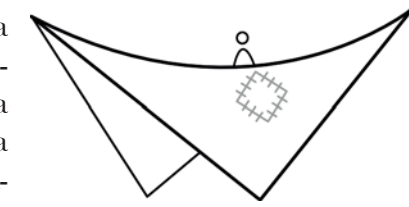


Funciones y Actividades - Sabemos que las membranas cubierta pueden proponerse en casi cualquier demanda arquitectónica. Con esto figuramos la escala de la cubierta, propuestas estéticas, microclima objetivo, tiempo de vida o permanencia, tipología óptima (por ejemplo si se requiere una cubierta estática o una adaptable) entre otras.



Contexto Arquitectónico - Al igual que el punto anterior, el contexto arquitectónico se interrelaciona con las características climáticas. Donde colocar los elementos estructurales de la cubierta, la integración visual de la superficie anticlastica y su contexto, la caída de agua pluvial, el impacto o huella que tendrá la cubierta al colocarse, el carácter del edificio y espacio a techar, corrientes de aire, etc.

Limpieza y Mantenimiento - Un punto negativo de estas cubiertas, es su aspecto deteriorado con cierta premura. Un amarillamiento en el material, opacidad o suciedad sobre la superficie, son algunas características que perjudican su imagen, sumado a esto la cubierta puede rasgarse o fisurarse y requerir alguna reparación. Considerar su limpieza y cuidados en la propuesta formal, puede extender su tiempo de vida e imagen, además dependerá del espacio y proyecto a cubrir.



En resumen, los requisitos del proyecto son información específica del proyecto, los podemos agrupar por climáticos y arquitectónicos, están ligados unos con otros, y tienen por objetivo generar confort en el área cubierta e integrar la volumetría de la membrana adecuadamente. Por este motivo, en muchos casos el solo contar con esta información más la experiencia del diseñador, ya se obtiene una buena imagen de lo que será la solución final, dependerá mucho de la complejidad y escala del proyecto.

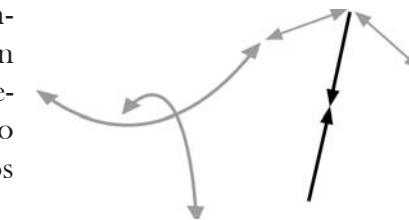
2 ESTABILIDAD

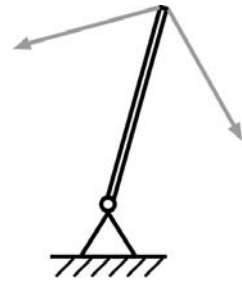
Son los conceptos físicos y geométricos presentes en las membranas. Es el entendimiento de la relación de fuerzas que interactúan en este sistema caótico, con el objetivo de alcanzar; Seguridad de la estructura, optimizar el material empleado, y tomar ventaja de su relación estructura-forma.

Doble Curvatura Inversa - Las superficies anticlasticas se modelan de dos curvas parabólicas perpendiculares de signos opuestos, una curva será la directriz y la otra generatriz. Esto es importante para comprender la continuidad de las fuerzas en los elementos restantes de la estructura, además de conseguir un elemento autoportante y no depender de una segunda estructura que sirva de soporte.



Tracción - Compresión - Análogamente a los sistemas Tensigrity, las velarias son un conjunto discontinuo de elementos a compresión (Postes), que interactúan con un conjunto continuo de elementos sometidos a esfuerzos de tracción (Membrana y Cables).





Equilibrio - Este se define como un estado de inmovilidad de un cuerpo sometido a dos o más fuerzas de la misma intensidad que actúan en sentido opuesto, por lo que se contrarrestan o anulan. Tanto los postes como la membrana están sometidos a las fuerzas de los cables y tensores, su dirección y fuerza definen el estado de equilibrio y por tanto de seguridad de la membrana.

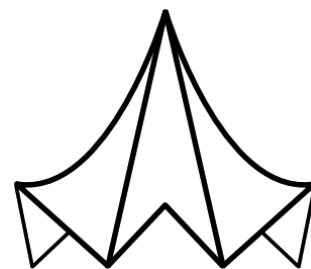


Articular - Se debe evitar que la estructura trabaje con momento, el libre apoyo o articular los elementos de la estructura impide un momento en los postes, y por lo tanto deformaciones en él, que tendrían que solucionarse con mayores diámetros del material.

Con estos conceptos se consigue la **Estabilidad** de la cubierta. Estos 4 principios físicos definen el comportamiento de las membranas textiles, garantizando un equilibrio armonioso en el sistema estructural.

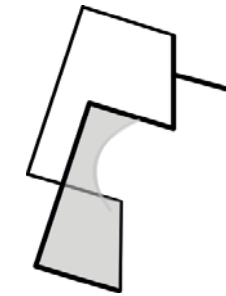
3 PROCESO DE DISEÑO

Teniendo clara la información específica del proyecto, y los conceptos que deberán estar siempre presentes, podemos empezar a proyectar las primeras hipótesis de solución a la cubierta, para esto invito a tener presente los siguientes pasos en el proceso de diseño:

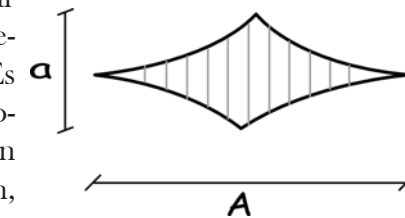


Composición - En el capítulo 3 estudiamos tipologías de diseño; la primera de acuerdo a la relación entre el espacio que se cubre y la cubierta, y la segunda de acuerdo al aspecto visual final. Al momento de diseñar, consultar las páginas 78 a 84 así como una búsqueda por internet, nos podría recordar la infinidad de opciones que permiten las membranas textiles. Ocupando como inspiración estos ejemplos podemos soltar la creatividad aplicando conceptos de diseño sencillos como la sucesión de formas, simetría, asimetría, radial, combinar o alternar, escalar, entre otros. Aquí podemos soltar ideas atrevidas que pondremos a prueba posteriormente con maquetas en un proceso itinerante.

Maquetas - Las maquetas toman mayor relevancia en el proceso de diseño si se trata de formas libres y anticlásticas. Como vimos, maquetas de pompas de jabón, mallas colgantes o catenarias son algunos ejemplos que permitieron innovar en las membranas, es posible que algún otro medio para maquetar este por descubrirse, no deberíamos limitarnos al momento de experimentar. Sin embargo, debemos tener presente que en estos sistemas las maquetas son un reflejo no solo de la imagen de la propuesta, sino de la manera en que el sistema trabajará, la forma que la maqueta adquiere es una narrativa de las cargas que soporta, sus articulaciones, y la relación de todos sus elementos que la componen.



Patronaje - Recordemos que la cubierta se construye con cortes de rollos de tela que serán pretensados, el reto implica transformar cortes de superficies planas que finalmente serán superficies de doble curvatura inversa. Es recomendable en el proceso de diseño elaborar maquetas con materiales que no se tensen como la tela, como pueden ser papel o cartón, para poder verificar que los patrones de corte diseñados, permiten a partir de las superficies planas, modelar la superficie anticlástica.

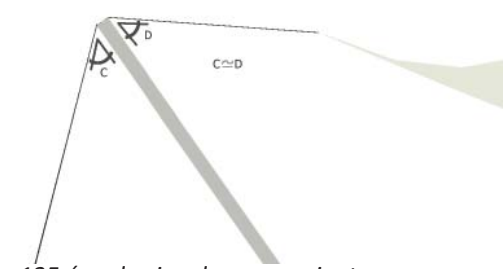


Lo más importante es recordar que se trata de un **proceso itinerante**, de experimentación, ensayo y error reiterativo que inevitablemente nos acerca en cada intento a una propuesta satisfactoria y óptima. También podemos apoyarnos de herramientas digitales en la medida que aprendemos a ocuparlas, sin embargo se puede trabajar sin estas para comenzar a diseñar nuestras primeras cubiertas membranas de tela.

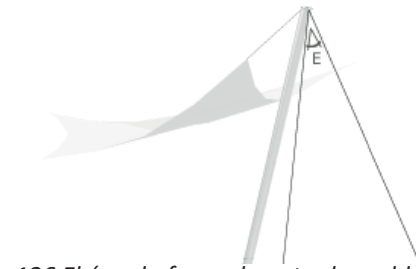
4 CONSIDERACIONES FINALES

Postes inclinados - No es recomendable colocar los postes verticales o perpendiculares al suelo o muro de apoyo. Como vimos, los postes tendrán cables a tracción que sirven de “contrapeso” a la fuerza que la membrana ejerce sobre el poste, al mismo tiempo el poste debe estar articulado para permitir movimientos ejercidos por fuerzas externas como el viento, por tal motivo no tiene justificación estructural diseñar el estado de equilibrio del poste en vertical.

Ángulos en los cables - Los ángulos formados entre los cables que rodean el poste, idealmente deberán ser los mismos o semejantes. Igualmente los cables que soportan el poste no deberían salirse del margen de 30° a 90° del ángulo formado entre ellos.

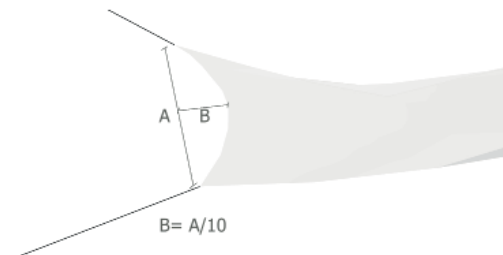


125 ángulos iguales o semejantes.



126 El ángulo formado entre los cables secundarios debería ser entre 30° a 90° según convenga.

Radio de 10% - Como receta, y solo por razones estéticas, se recomienda para el diseño de relingas, que la flecha en la relinga tenga una relación del 10% con respecto de la luz o largo que forma el arco de la relinga.



127 En el arco que se forma con la relinga, la flecha (B), es un 10% de la distancia de la base (A)

Accesorios y uniones - Los accesorios complementarios y de uniones son parte del diseño que pueden aportar calidad y vistosidad a la cubierta. Es importante no olvidarlos y darles importancia en los pasos finales del proceso de diseño.



128 Guardacabos



129 Tensor grillete-grillete.

CONCLUSIONES

El presente de la arquitectura nos ofrece cualquier cantidad de soluciones y alternativas estructurales, se convierten en cómplices que nos permiten vivir grandes obras arquitectónicas alrededor del mundo. La idea ingenieril de unir acero al concreto, tracción con compresión, es un hito y un respirar para nuestra creatividad como diseñadores.

Mi experiencia en la carrera de arquitectura se formó de marcos rígidos y estructuras con resistencia a la compresión. Materias de historia despertaron mi curiosidad en el contexto histórico y sus aspiraciones que tenían en cada época para construir y resolver sus inquietudes. Sin embargo, considero que a los arquitectos mexicanos actualmente nos falta atrevimiento, cuando aceptamos un proyecto; al momento de desarrollar un concepto y teorizar elementos como el contexto, la temporalidad, texturas, volumetría o la propia estructura. Nuestra formación en la carrera en más de una ocasión nos encamina a una arquitectura monótona desde su proyección, y personalmente encontré hasta materias de selección, herramientas de diseño alternas para nuestra actualidad, que me permitirían aspirar a plasmar la identidad y valores de nuestra época, al igual que lo ha hecho la arquitectura histórica que dejó huella y tanto estudiamos y admiramos.

Al pasar del tiempo continuamos desafiando a dios, transformamos nuestro hábitat, levantamos construcciones que parecen obra de la naturaleza porque no desentonan de su sitio, o incluso modificamos a placer toda materia prima del entorno. Nuestros primeros pasos, arquitectura desmontable y efímera posible gracias a herramientas productivas y toscas, y la riqueza de actividades posibles narran la introducción de cubiertas ligeras y arquitectura textil, presente casi desde el inicio del hombre hasta el fin de nuestro tiempo muy posiblemente.

Soy firme defensor del empirismo, el punto de partida al conocimiento, ¿Qué se estudia si no se ha observado e involucrado con nada? no existe tal escenario. Es aquí cuando conocemos a la ciencia y la filosofía, qué satisfactorio resulta entender, resolver, explicar y predecir. Como arquitectos pesan igual en la balanza ambas ramas del conocimiento para diseñar, esto quedó plasmado en lo extenso del documento, con énfasis en las matemáticas y la geometría para el caso de interés. Subrayo la metodología empírica e itinerante de los maestros Bucky Fuller, Antoni Gaudí y Frei Otto.

No existe arquitectura ni razón que niegue la jerarquía de la maqueta en la etapa de diseño. No hay manera de juzgar una superficie alabeada si no se interactúa con ella, tanto digital como físicamente. Afortunadamente, las tensoestructuras en mayor porcentaje son de escala pequeña o mediana y son honestas, no se oculta nada, habitarlas y resguardarnos en ellas es interpretar el rol de “escala humana” dentro de la maqueta 1:1.

Estas cubiertas poseen vínculo propio entre estructura y forma. Se trata de estructuras caóticas y cambiantes, pero en equilibrio perpetuo. Para diseñarlas

satisfactoriamente se requiere entender los principios y conceptos que definen su comportamiento. Las membranas textiles son un conjunto disperso de elementos sometidos a compresión, interactuando con elementos sometidos a tracción, semejante a los sistema tensegrity y nuestra anatomía musculo-esquelético.

Condicionantes arquitectónicas y climáticas conciben la primera imagen de la cubierta. Normas estructurales y geométricas van justificando y dando equilibrio a la forma propuesta. En principio la geometría aplicada en las cubiertas velarias a tracción, es tanto unidireccional por el flujo de fuerzas a resolver en los cables y postes, como bidireccional en la superficie textil. La articulación entre los elementos permite el trabajo de las partes unidireccionales. Estas afirmaciones escribieron puntos importantes en el último subcapítulo llamado “Los Fundamentos”.

Este tipo de cubiertas tienen las cualidades de ser reversibles y sustentables, esto último por ocupar el mínimo del material que es donde las fuerzas actúan. Estéticamente la geometría con aristas y materiales petreos transmite solidez y fuerza, mientras que la geometría con curvatura y de materiales lisos se percibe moderna y ligera. Así, las velarias son ideales para contrastar en el contexto histórico y urbano, para espacios exteriores o incluso interiores. Pueden satisfacer proyectos de gran escala, lo que las convierte en una opción para prácticamente cualquier tipo de espacio y edificio, conservando sus ventajas antes mencionadas.

Para construir una tensoestructura se requiere de más conocimiento que el que aquí se presenta. Ciertamente dominio de herramientas digitales para el proceso de diseño y patronaje de las piezas, o una vez concebida la solución, poder concluir las etapas que le continúan hasta finalizar la obra. Sin embargo, proyectar una cubierta de este tipo puede resultar en un ejercicio didáctico muy valioso para aterrizar conceptos, vocabulario y una metodología prolífica para los estudiantes de arquitectura, y que nos obliga a romper la rigidez práctica y funcional de espacios ortogonales.

México es un país competitivo en la construcción de cubiertas velarias, tiene presencia en proyectos modelo, concursos y como impulsores de esta tecnología. La labor de las universidades, la facultad de arquitectura en la UNAM y el laboratorio de estructuras ha sido esencial. El compromiso consiste en conocer y transmitir las ventajas y limitantes de estas cubiertas, su potencial y su presencia en los espacios, pero sobre todo superar lo hasta ahora conseguido.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

Arq. Santomauro, R. (2008). *Tensoestructuras desde Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Ed. Mastergraf.

Prof. Marroquín, A. (2012). *Tensoestructuras, guía básica de diseño*. Lima - Perú: Libro digital (save as wwf).

Arq. Ontiveros, M. (2008). *Diversas escalas en cubiertas velarías*. Ciudad de México: Programa de especializaciones en arquitectura y urbanismo, FA Arq. UNAM.

Arq. Roldán, V. (2009). *Consideraciones Bioclimáticas aplicadas al diseño de velarías*. Ciudad de México: Programa de maestría y doctorado en arquitectura, UNAM.

Blanco, P. (2010). *Pretensado de columnas Tensegrity para el incremento de rigidez axial*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Proyecto final de Master.

Glaeser, L. (2017). *The work of Frei Otto. Estados Unidos de América*. New York, USA. The Museum Of Modern Art.

Ing. Cañeta, M. (2016). *Método de Aproximación catenaria para la obtención de densidades de fuerza en estructuras tensadas y antifuniculares*. Granada, España: Universidad de Granada, Tesis doctorales.

Simancas, K. C. (2003). *La vivienda desde tiempos remotos hasta nuestros días en el mediterráneo*. En Reacondicionamiento Bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo (pp. 51-54). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña - Tesis Doctoral.

Rudofsky, B. (1976). *Arquitectura sin arquitectos*. Argentina: Editorial Universitaria de Buenos Aires

Dr. Arq. Tomlow, J. (2002). *La evolución de la innovación estructural de Gaudí*. En Conceptos básicos de diseño y conservación de monumentos (pp. 48-57). Stuttgart: Universidad de Ciencias Aplicadas de Stuttgart

Huerta, S. (2003). *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí*. En Miscelánea (pp. 133-159). Barcelona: E.T.S. Arquitectura UPM.

Kiyosaki, R. (2015). *Segunda Oportunidad*. México: Penguin Random House Grupo Editorial, S.A. de C.V.

Artículos y Sitios Web

Ing. Gómez, V. (2008). *Tensegridad, Estructuras de Compresión Flotante*. Habidite Projects. (2020, mayo 4)

Marzo, A. (2018, mayo 4). Estadio Wanda Metropolitano. Caso de estudio cubierta del estadio. *Ingeniería Civil*, 189, pp. 5-12.

Pino, F. (2016). Doblando la malla hasta hacer una concha. En *Centro Multiusos en Mannheim. Frei Otto* (pp. 106-113). España: rita_05.

Azagra, D. & Bernabeu, A. (2012, Marzo 12). *La estructura de las formas libres*. Informes de la Construcción, Vol. 64, pp. 133-142.

Lucas, C. (2017). *Instrumentos paramétricos en arquitectura y moda: cuestión de escala*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, España: E.T.S. Arquitectura UPM.

Dr. Oliva, G. (2015, marzo 12). Frei Otto a través de los ojos de J. Gerardo Oliva. *Repentina FA*, quinta época, pp. 28-37.

Dr. Oliva, G. (2001). Cubierta tipo en el Palacio de Minería. *Bitácora arquitectura*, no. 5, pp. 52-55.

Jacobo, G. (2005). *Arquitectura, Diseño Estructural y Estética*. República de Argentina: Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del Nordeste.

Máxima, J. (31 mayo 2019). *Paleolítico*. Para: Características.co. Consultado: 09 marzo 2020 Sitio web: <https://www.caracteristicas.co/paleolitico/>.

Anónimo. (julio, 2011). *Tipos de esfuerzo físicos*. abril 22, 2020, de Revista digital para profesionales Sitio web: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8567.pdf>

Jiménez, A. (15 de Octubre 2006). *La curva catenaria*. xataka ciencia Sitio web: <https://www.xatakaciencia.com/matematicas/la-curva-catenaria>

Anónimo. (2015). *La Catenaria en Arquitectura*. UPM.es Sitio Web <http://www2.camino.upm.es/Departamentos/matematicas/Fdistancia/PIE/Chip%20geom%C3%A9trico/Catenaria.pdf>

Goberna, Q. (5 mayo 2019). *Abrimos hilo: puente, estructuras*. Marzo 2020, de Threadder Sitio web: <https://threadder.app/thread/1124931340053430272>

Kawaguchi, K., Ohya, S. & Vormus, S. (2011). *Long-Term Monitoring of White Rhino, Building with Tensegrity Skeletons*. mayo 12, 2020, de TensiNet Sitio web: https://www.tensinet.com/project_files/4679/white-rhino-building-with-tensegrity-skeletons.pdf

Ibáñez, R. (6 abril 2016). *Catenarias en las artes plásticas*. Marzo 2020, de Cuaderno de Cultura Científica
Sitio web: <https://culturacientifica.com/2016/04/06/catenarias-las-artes-plasticas/>.

Villasana, C. & Gómez, R. (28 de Febrero 2018). *El lago que había en la Unidad Habitacional Iztacalco*. El Universal
Sitio Web: <https://www.eluniversal.com.mx/colaboracion/mochilazo-en-el-tiempo/nacion/sociedad/el-lago-que-habia-en-la-unidad-habitacional>

Perú, Ministerio de cultura. (Año desconocido). *El puente Q' eswachaca*. Marzo 2020, de Qhapaq Nam Peru
Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=qptglcQebLg&t=11s&ab_channel=Qhapaq%C3%91anPer%C3%BA.

Muller, D & Hyman, J. [Veritasium en español]. (2019 Noviembre 24). *¿Por qué el Bacalao salvó a los Vikingos?*. [Video].
Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=UZc2vLNjpvM&t=268s&ab_channel=Veritasiumenespa%C3%B1ol

Boullosa, N. (Junio 20, 2019). *Diseño paramétrico: reivindicación de sus pioneros artesanales*. Junio 5, 2021, de faircompanies
Sitio web: <https://faircompanies.com/articulos/disenio-parametrico-reivindicacion-de-sus-pioneros-artesanales/>

Alías, L. (2002). *El significado geométrico de la curvatura: superficies de curvatura media constante*. octubre 16, 2020, de Fundación Séneca
Sitio web: <https://fseneca.es/web/el-significado-geometrico-de-la-curvatura-superficies-de-curvatura-media-constante>

Sáenz, E. (Septiembre 6, 2018). *¿Cuánto de curvatura está una curva?*. enero 20, 2021, de Derivando
Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=t4a1ga6GaYo&ab_channel=Derivando

Anónimo. (2014). *Características del Cable de Acero*. abril 5, 2022, de Servicables S.A. de C.V. Sitio web: <https://www.servicables.com.mx/?sec=caracteristicas-cable-de-acero>



ANEXO

EXPERIMENTOS PROPIOS

Este anexo debía estar presente en la tesis como muestra y ejemplo de la aplicación de algunas de las conclusiones y valores aprendidos en el documento como son; la maqueta y/o modelos, el método iterativo, empirismo, equilibrio estático y principalmente la experimentación.

Los modelos en las siguientes páginas se presentan en orden cronológico como se elaboraron, iniciando con un tanteo de cubierta membrana textil, y terminando con una segunda cubierta con claros avances tanto en el diseño de la forma como en la representación de uniones y accesorios.

Por último reiteró la invitación a los arquitectos a intentar procedimientos nuevos en su metodología de diseño y a ocupar distintas herramientas. En especial a los entusiastas de formas poco exploradas en la construcción pero con respeto al medio ambiente, cuando la relación entre estructura y forma pueden ocuparse como sinónimos al describir un proyecto. Para ello logramos comprender la estática de sistemas y geometrías complejas por medio de la experimentación con modelos a escala que podemos transformar y cambiar sus parámetros a placer.



MAQUETA TEXTIL 1

La primera maqueta la realicé de tela, a partir de algunos bocetos puse manos a la obra; el objetivo fue evitar la forma de paraboloides ya muy conocida, para encontrar dificultades con la forma y el material flexible. Por ejemplo, previamente imaginé que podría tener problemas y obtener arrugas, esto provocaría ir tensionando más de lo imaginado vértice por vértice de la cubierta y quizás diagnosticar un mal planteamiento del corte de la tela.



Se corta la tela con pestaña en todos sus lados para poder coserla en sus bordes, y guardando hilo en la costura.



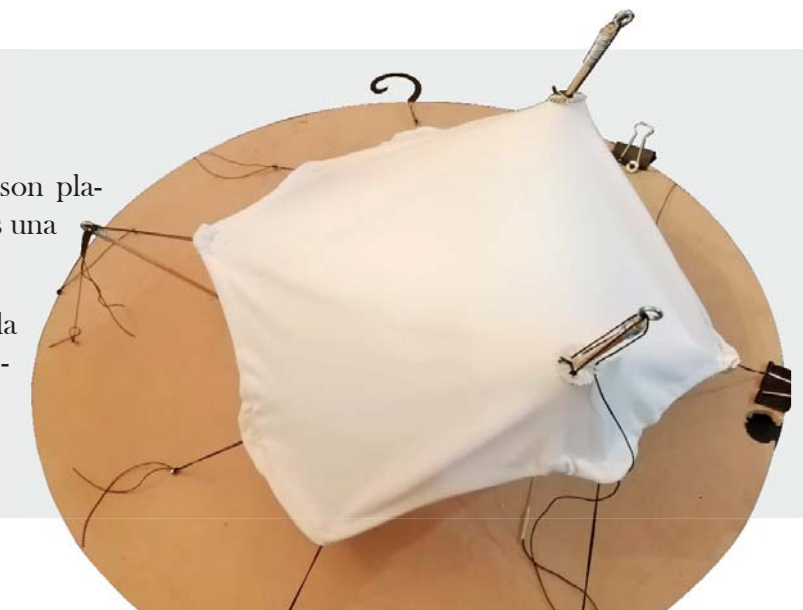
Coloqué armellas en los extremos de los postes y los reforce con el alambre

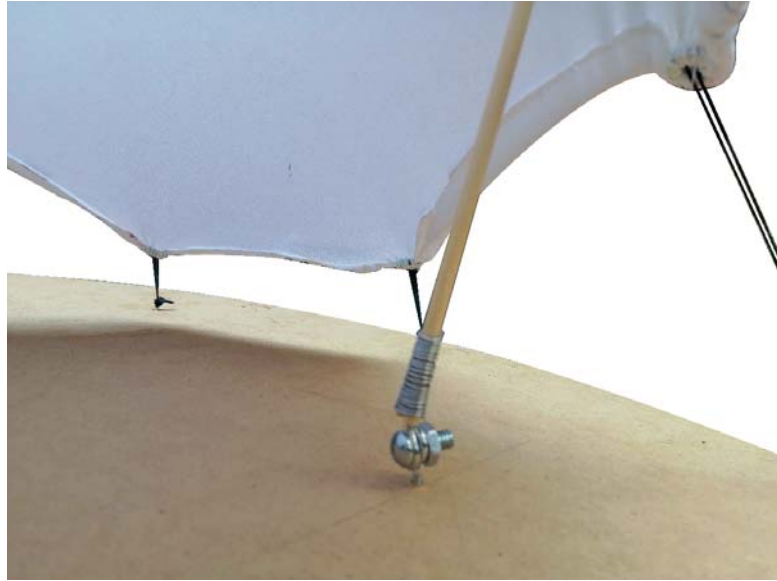
MATERIALES:

- Tela tipo Nylon
- Armellas, tuercas y rondanas
- Alambre
- Hilo
- Palitos de madera
- Clavos y tornillos
- Herramienta gral; martillo, pinzas, tijeras, etc.

La altura de los postes y las dimensiones de la tela son planeados desde los bocetos, como cualquier proyecto ¡es una maqueta de estudio!

La ubicación de los postes se proyectan de acuerdo a la inclinación que tendrán y sus alturas, y deberán favorecer las pendientes en las curvaturas.

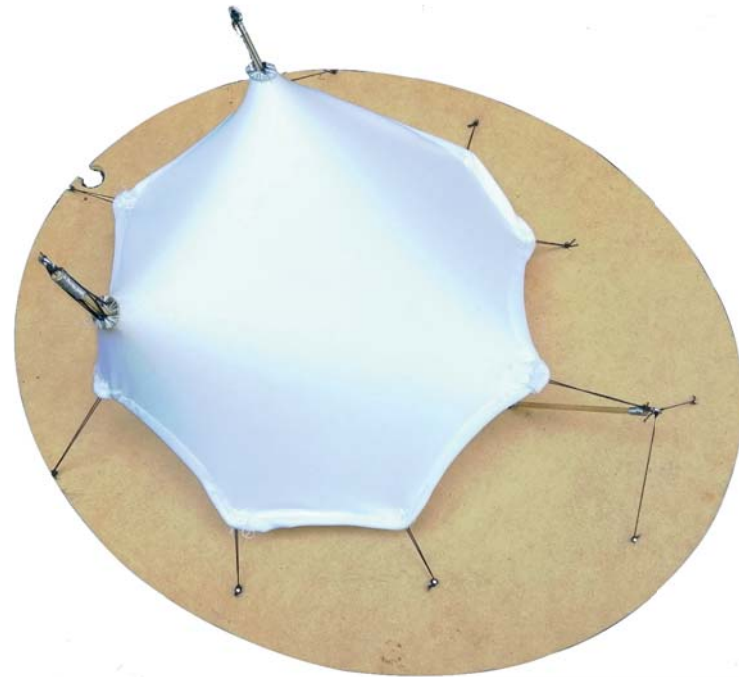




Tracé la ubicación de los postes y con el clavo se hace la guía para que entre la armella, esta servirá para simular el libre apoyo como se muestra en la imagen.

Para que la tela resista el esfuerzo del hilo, reforcé las esquinas de la cubierta con una rondana al interior del dobladillo.

El hilo que sale de los vértices debe quedar largo, para poder ir tensando poco a poco cada punto de manera uniforme y evitar las arrugas o inclinaciones de postes erróneas.



Los puntos más altos se diseñaron con un poste atravesando su respectiva rondana, la cual quedaría colgando al poste con hilos, y así poder elevar la cubierta.

Cuando no encontramos arrugas, verificamos la inclinación de los postes y la tracción del hilo, procedemos a los nudos permanentes y posteriormente cortar el sobrante.



Vista lateral; muy similar a las intenciones de diseño, con el inconveniente de que las uniones elevadas, entre la rondana y la tela, no soportaron el esfuerzo para quedar más cerca al extremo del poste. Ver explicación en las observaciones.

Observaciones

Inicié con la intención de una cubierta con dos puntos elevados en su interior, bocetos en vistas laterales y frontales permitieron proyectar perspectivas; sin embargo descuidé el diseño de una vista aérea o en planta, que debe considerarse en varios proyectos de estas cubiertas.

El mayor imprevisto lo encontré en sujetar la cubierta con rondanas en sus puntos elevados, las costuras que unían la rondana con la tela fueron insuficientes, no soportaron la tracción que provocaban los hilos hacia abajo contra los postes elevados. Por lo que es importante recordar que las uniones y accesorios son parte importante del sistema estructural.



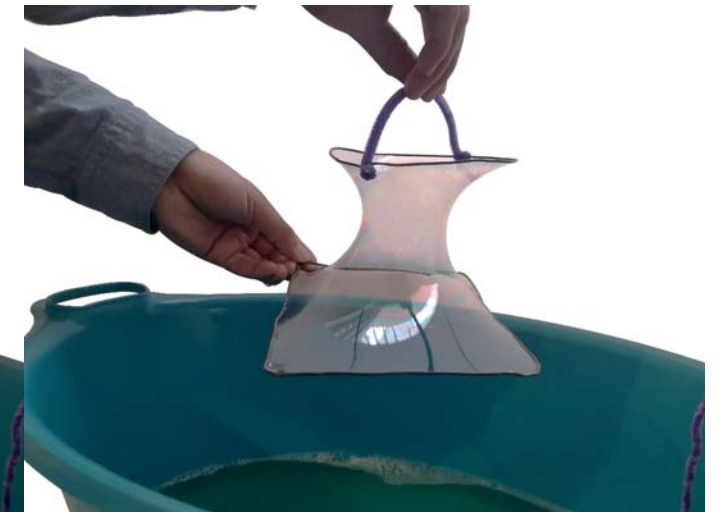
Superficie a partir de un borde tipo cuadrado, donde dos de sus lados tienen forma de "S" y con sentido opuesto.



Borde del tipo paraboloide con forma de silla de montar.



Superficie mínima de la transición entre 2 curvas; rectángulo y elipse.



Aumentando pocos milímetros la altura, la superficie (curvatura) se transforma radicalmente.

BURBUJAS DE JABÓN

Teniendo la experiencia de la maqueta anterior, era momento de comenzar con las bases y perfeccionar la maqueta tipo conoide. Primero elaboré curvas alabeadas que modelaran superficies mínimas de interés. Estas curvas fabricadas con alambre también servirían para generar superficies de transición entre dos curvas.

MATERIALES:

- Glicerina
- Jabón líquido
- Agua
- Alambre y limpia-pipas
- Pinzas y Tina



Variante de rectángulo-círculo con limpia-pipas.

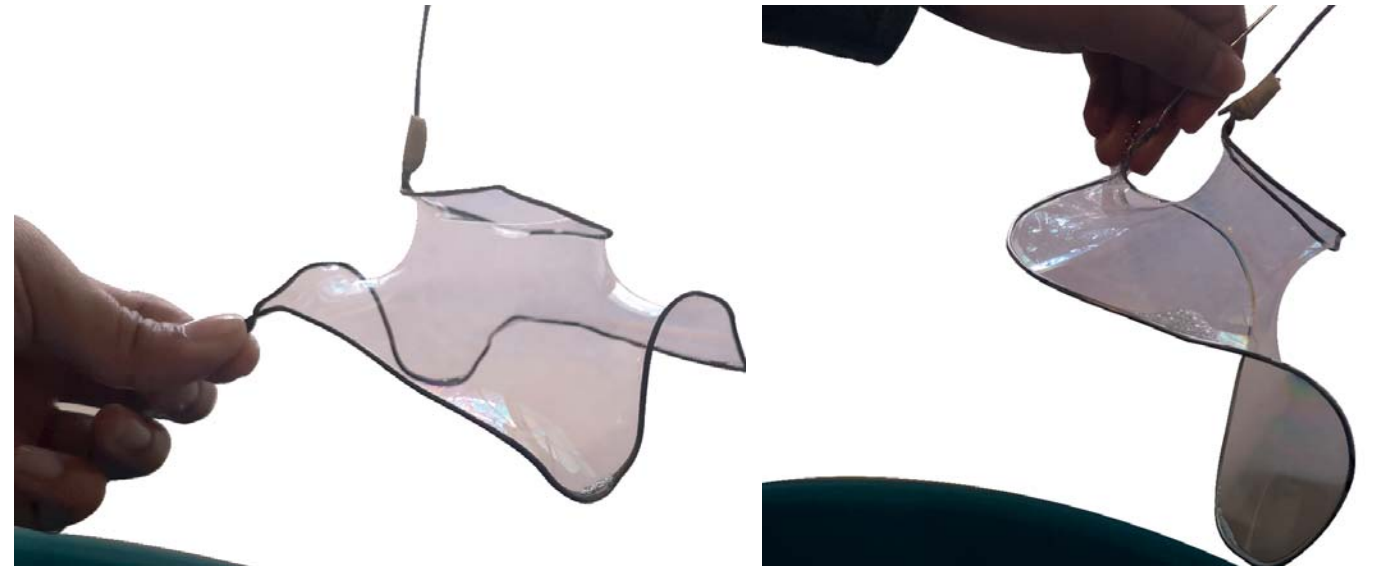


Doble conoide con diferente signo.

Momento posterior con mayor altura en ambos conoides



Conoide que puede ejemplificar un borde libre, al estar delimitado por un hilo colgando y no un alambre rígido.



Conoide formado de un cuadrado normal en punta y otro cuadrado de base y alabeado con forma de "S" en dos de sus lados. Conoide formado de un paraboloide con un cuadrado.

Probé con una forma abierta, un limpia-pipas con seis patas tipo araña. Observé que la burbuja necesita su borde definido, por lo que coloque hilo colgando de pierna en pierna en el limpia-pipas morado, y así la burbuja volvió a encontrar su forma.



Observaciones

Recomendación para maquetas, probé con limpia-pipas para mejor la adherencia con el jabón, sin embargo no encontré inconveniente con el alambre, incluso fue más cómodo debido a que el primero se mojaba y goteaba.

Las cubiertas que diseñamos no son estrictamente la superficie mínima, sino idealmente, aunque en ocasiones otros factores como la forma, la pendiente contra aguas pluviales o su construcción, dificultan el rigor de este concepto. Esto me lo recordó la exagerada curvatura que ocupa un conoide de manera inversa con que se cambia apenas pocos milímetros la separación entre las dos curvas generadoras.



Malla suspendida intercalando el tamaño de postes entre elevados y otros de menor altura.



Vista lateral de la malla colgando. En la izquierda se ocuparon los postes intercalando su tamaño, en la derecha se colocan de mayor a menor.

MALLA

Con hilo de polímero tejí una malla con forma rectangular. Su propósito era observar la doble curvatura al suspender en catenaria la malla; y continuar con el estudio de la tipología de conoide. Para esto ocupé postes similares a los de la maqueta textil, que permiten articular el sistema y con terminación de gancho en sus extremos superiores para sujetar el tejido.

La bóveda invertida, al ser una malla pequeña, pudo apreciarse con mayor claridad cuando los postes se ubicaron de mayor a menor, esto definió la organización de los palitos para el siguiente paso. Ocupe dos nodos del tejido para simular una de las burbujas de jabón anteriores, un punto elevado y otro bajo directamente al suelo.





Vista lateral con la forma conoide.



Vista lateral opuesta. La corta dimensión de la malla sugirió eliminar un poste cercano al punto bajo, rompiendo la simetría y dando otro diseño.



Perspectiva. La tensión en la malla provoca una inclinación opuesta a la deseada en algunos postes.



Observaciones

Al ser de un polímero y estar previamente trenzado el hilo, lo que le aporta resistencia como en el puente Qeswachaka, este material no era tensable en la escala del modelo. Esto provocó un mayor esfuerzo en postes que lo reflejaron con una inclinación opuesta al sistema adecuado, es decir, que no tensaban la malla, únicamente la sujetaban.

La deformación de los rombos en la malla muestra gráficamente el trabajo de la membrana textil, los rombos más deformados y alargados se encuentran en lugares con mayor tracción, los rombos más cuadrados en zonas con menor tracción.



Vista Aerea tipo planta o de pajaró.

MATERIALES:

- Tela tipo Nylon y lona
- Alambre
- Hilo
- Palitos de madera
- Clavos y tornillos
- Base de madera
- Armellas, tuercas y rondanas
- Herramienta gral; martillo, pinzas, tijeras, etc.



Vista lateral derecha.

MAQUETA FINAL

Modelo de muestra que resulta de estudiar profesionales del tema y su obra, aplicar un proceso de diseño inspirado al de ellos, y de aterrizar todo lo conceptual en algo construible. Con la forma conoide busqué implementar los conceptos de tensegrity, Frei Otto y Antoni Gaudí guiaron maquetas de burbujas de jabón y catenarias, así como la referencia a cada autor aquí citado.

Es un diseño conoide del tipo exento y abierto, para un parque o área recreativa.

Todos los modelos de este sub capítulo forman parte del proceso de diseño. Algunos planteamientos iniciales para esta maqueta son; -escala (1:50) -doble conoide de signos opuestos -considerar y definir caída de agua pluvial -imitar uniones y accesorios de una cubierta real -porcentaje área cubierta y área ocupada de estructura.



Perspectiva frontal derecha.



Perspectiva frontal izquierda.



Perspectiva frontal izquierda.

Con la “maqueta textil 1” pude experimentar complicaciones en el armado del sistema estructural, también observé deficiencias en uniones y la elaboración de la costura.

Reflexione y me aventure sobre el conoide y las superficies de transición entre curvas con las burbujas de jabón.

La malla textil debía trabajar la forma, pero me brindó información valiosa sobre el trabajo de los postes y su montaje.



Detalle conoide elevado, accesorio recreado con abrazadera.



Realicé bocetos previos, definí medidas y alturas, y dibujé el trazo de la tela, para este punto si el material es flexible debe considerarse su capacidad de tensión y pestañas para los bordes, ya sean libres o fijos.

Cada borde contiene un hilo tensor, definiendo así dos hilos o cables por vértice. Con lona reforcé los vértices, ya que es un punto crítico en el esfuerzo de la estructura y permiten simular los accesorios a medida y que protegen una cubierta.

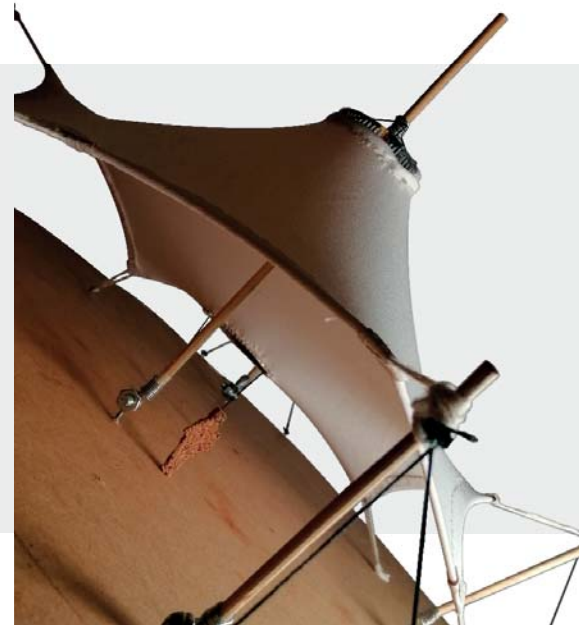
La articulación y los postes se repitió con tornillos, armellas, tuercas, cable de refuerzo y clavos para cables de apoyo.



Perspectiva sur



Detalle de accesorio de unión y refuerzo con lona



Observaciones

Las modificaciones en la costura del borde y el accesorio de esquinas con lona, permitieron tensionar la cubierta sin que se viera comprometida.

La planeación en las uniones y accesorios, experimentación dirigida a las intenciones previas de diseño y definir elementos de habitabilidad, lograron una superficie semi-simétrica con curvaturas pronunciadas y un resultado en general satisfactorio.

La unión entre dos abrazaderas para cada conoide con hilo, pudo quedar más limpia.

