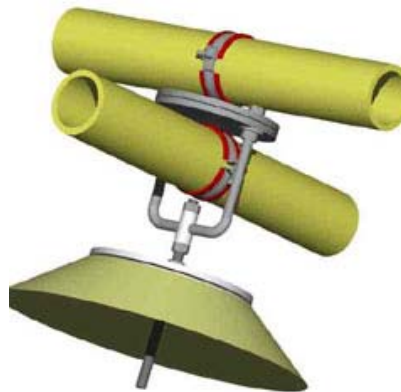




**ETSAB**

**ETSAV**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA - ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA -  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DEL VALLE - DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES  
ARQUITECTÓNICAS 1

**DISEÑO DE ESTRUCTURA TRANSFORMABLE POR DEFORMACIÓN DE UNA  
MALLA PLANA EN SU APLICACIÓN A UN REFUGIO DE RÁPIDO MONTAJE**

Tutor: Dr. José Ignacio Llorens  
Co-tutor: Dr. Ramón Sastre Sastre

Autor: Arq. Nelson Rodríguez

BCN Diciembre 2005

# CAPÍTULO 1

---

## ESTADO DEL CONOCIMIENTO



ETSAB



# CAPÍTULO 1

---

## ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### **Resumen al capítulo:**

En este capítulo se describe las estructuras de rápido montaje y móviles, los fundamentos técnicos de las mallas espaciales por deformación y su aproximación a las estructuras móviles. Se incluye también, aspectos metodológicos de la investigación y un estudio inicial que abarcó actividades experimentales y descriptivas para determinar la viabilidad del método de generación de la forma a través curvas de flexión. Es parte de este capítulo una evaluación preliminar del método constructivo a través de un estudio comparativo entre una malla de borde abierto y de borde cerrado

### **Contenido:**

- 1.1.-Arquitectura ligera y movilidad. Reseña de casos
- 1.2.-Construcciones eficientes, las mallas deformadas
- 1.3.-Fundamentos técnicos de las mallas deformadas y su aproximación a las estructuras transformables
- 1.4.-Clasificación de las estructuras móviles y su relación con las mallas pre-flectadas
- 1.5.- Ámbito general de la Investigación
- 1.6.-Estudios iniciales, ensayos previos y análisis comparativo de prototipos experimentales
- 1.7.-Estudio comparativo entre una malla de borde abierto y malla de borde cerrado. Geometría y características constructivas

Introducción al capítulo

## La insoportable levedad de ser “light”

Las estructuras compuestas por elementos traccionados y comprimidos son estructuras altamente eficientes por el gasto mínimo de material que requieren y las luces que logran cubrir. A lo largo de la historia, el hombre se ha servido de la fuerza de gravedad para conseguir la estabilidad. En las bóvedas y cúpulas de la antigüedad, construidas en piedras y ladrillo, elementos constructivos que trabajan a predominantemente a compresión, era muy desfavorable la relación entre el peso propio y la resistencia, es decir, para asegurar la resistencia de la estructura era necesaria la construcción de muros de grandes espesores lo que producía inevitablemente que el peso propio era superior al de las cargas externas (nieve o viento) que la estructura debía resistir.

Con la aparición de materiales eficientes, ligeros y de altas resistencias fue posible ir reduciendo los espesores de estas construcciones hasta llegar a nuestros días que el peso propio de una cúpula es incluso menor al peso del aire que envuelven, tal es el caso de la cubierta “The Eden Project” en Inglaterra, diseñada por el arquitecto Nicholas Grimshaw, cúpula formada por almohadones neumáticos de lámina plástica de poco espesor, con aire comprimido internamente y estructura de marcos de aluminio.

Este salto en el mundo de las estructuras fue posible cuando se comenzó a pensar en materiales cuyo peso propio y rigidez son casi despreciables, pero trabajadas bajo una lógica estructural que los hace poco deformables aun estando solicitadas por cargas externas. Esta aparente contradicción se resuelve con el empleo de dos conceptos básicos, el primero es la introducción de una fuerza inicial al material, es decir pre-traccionarlos o pre-comprimirlos, o como en el caso de esta investigación pre-flectarlos, de tal forma que cuando actúa la carga externa sobre el material lo que se produce es una disminución de la tracción o de la compresión inicial. El segundo concepto es el uso de superficies sinclásticas, definidas como estructuras que tienen doble curvatura en un mismo sentido, generándose formas abovedadas, y las superficies anticlásticas, que son superficies de doble curvatura pero de sentidos opuestos generando paraboloides o conoides. Si además, a estas estructuras le pedimos que sean capaces de replegarse, moverse y erigirse en otro lugar, la complejidad aumenta considerablemente.

El objetivo de este capítulo es centrar y ubicar el tema de la investigación en su contexto. Por ello, se presenta una descripción de las diferentes líneas de innovaciones que han permitido llegar a este estado del conocimiento actual sobre el tema

Los principales antecedentes se inician por los cobijos de las tribus nómadas que utilizan conceptos de deformación de los componentes estructurales como método constructivo para introducir fuerzas iniciales que les permitan alcanzar un mayor grado de rigidez a las cubiertas. En este sentido, presentamos las cubiertas “Churuatas” de los indígenas del Amazonas venezolano, la Yurta del Asia Central y el Tuareg del África encontrando ciertas características arquitectónicas comunes, aun estando construidas en diferentes continentes y en diferentes culturas.

También presentamos un breve recorrido por ciertos momentos históricos importantes en el desarrollo de la arquitectura ligera y mallas espaciales, estructuras transformables y de rápido montaje. Comenzando con las innovaciones en el área de las mallas móviles, con la invención del sistema de unión tipo tijera que permitió el salto a la movilidad estructural. Aunque se organizó de manera cronológica no es objetivo de este trabajo realizar un

### CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

estudio histórico, dado que la historia, como ciencia social, tiene sus propias técnicas y herramientas de estudio.

Este capítulo continúa con la definición de las mallas deformadas con estudios de prototipos experimentales realizados en el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart bajo la dirección del arquitecto Frei Otto. En su mayoría, estos prototipos fueron construidos en las décadas de los 60-70. Se describen estos ensayos experimentales haciendo énfasis en el método que desarrollaron para obtener la forma final y su resolución constructiva, con la finalidad de determinar las características. Intentaremos aportar una definición mas precisa de las mallas deformadas y su aproximación a las estructuras transformables.

Se expone igualmente, los fundamentos metodológicos de la investigación, la cual esta compuesta por el planteamiento del problema que se detectó en las etapas iniciales de la investigación referidas específicamente a los métodos de búsqueda de las formas, se presenta también los objetivos a alcanzar en la investigación y la metodología empleada para lograrlos, que incluye actividades tanto bibliográficas-descriptivas como experimentales. Es de destacar, que esta investigación tiene una orientación eminentemente tecnológica en el campo del desarrollo de la construcción experimental de las estructuras de rápido montaje. Partimos de preguntas directrices que encontraran respuestas, si las tienen, a lo largo del trabajo.

En este capítulo se demuestra que las mallas deformadas pueden ubicarse dentro del campo de las estructuras transformables dado que precisan de mecanismos en las uniones para materializarse y pueden retornar a su estado inicial. En este sentido, hemos elaborado, una clasificación o más bien una ordenación sistemática de los tipos de estructuras transformables, haciendo una propuesta que incluye, dentro de esta categoría, las mallas deformadas. Esta clasificación no debe considerarse como definitiva, sino como base de partida, con posibilidad de ser alterada o modificada.

Finalmente, expondremos un resumen de los estudios previos y análisis comparativos de prototipos con el objetivo de demostrar la viabilidad de la propuesta y experimentar con diferentes materiales con modelos a escala, con la finalidad de seleccionar el material que otorga más prestaciones. Para ello, se realizó una comparación entre el prototipo a escala real construido con el método de las curvas de flexión y otro prototipo generado con el modelo suspendido, comparándose aspectos tales como los constructivos y sus reacciones, una vez que las mallas están completamente deformadas. Igualmente se presentan los dos tipos básicas de mallas deformadas, que son las cúpulas con bordes abiertos y con bordes cerrados, para determinar sus ventajas y desventajas.

Para la realización de este capítulo fue necesaria la revisión bibliográfica existente, específicamente en las publicaciones de congresos de los últimos 10 años, en especial los de la "International Association For Shell And Spatial Structures International Symposium" y de la colección de textos "IL" del Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart. También fue necesaria la realización de entrevistas con especialistas y profesionales que han intervenido en la construcción de los prototipos experimentales. Para sintetizar esta información se presentan tablas resumen con carácter descriptivo con comentarios de los resultados y hallazgos

## Antecedentes y fundamentos técnicos

### 1.1. Arquitectura ligera y movilidad. Reseña de casos

Vivir en movimiento es una necesidad desde tiempos inmemoriales y tan antigua como la humanidad misma. El desarrollo de estilos de vida nómadas, móviles y polifuncionales trasciende fronteras, culturas e idiomas. El deseo o necesidad de vivir con flexibilidad y movilidad ha llevado a desarrollar soluciones constructivas que prefieren la utilización de materiales ligeros, deformables, transformables y plegables que satisfacen las exigencias de movilidad y cambio de función. Materiales asociados a los conceptos de plegar, enrollar, estirar, apilar, almacenar, rotar o deslizar. Así aparecen las alfombras como elemento de división entre espacios o como articulación entre el terreno y el espacio interior, tejidos y mallas en las cubiertas de fibra natural o artificial, divisiones con láminas de papel que pueden deslizarse casi sin roce. Materiales susceptibles de ser traccionados con un orden de ligereza en el aprovechamiento de las formas geométricas y los intercambios energéticos, materiales con alta resistencia a compresión-tracción y con alta rigidez (poca deformabilidad o alto módulo de elasticidad). Encontrados directamente en la naturaleza como la madera, el bambú, las fibras naturales o proveniente de la industria como los compuestos de madera, aceros y plásticos.

El desplazamiento se presenta como un fenómeno en todas las culturas independientemente de su grado desarrollo tecnológico, económico o social. La mayoría de los pueblos y tribus nómadas se movilizan por la caza, el pastoreo y cosecha, este modo de vida ha consolidado en el tiempo la necesidad de disponer de viviendas que pudieran transportarse de un sitio a otro. Esta característica de movimiento constituye un aspecto integrado a la identidad de estos pueblos, por ejemplo para los Kirguiz, (Kirguizistán ex-república soviética de Asia Central) quienes poseen una gran tradición nómada, la palabra nómada procede de “*kochmon*”, que significa literalmente “persona en movimiento” <sup>(1)</sup>.

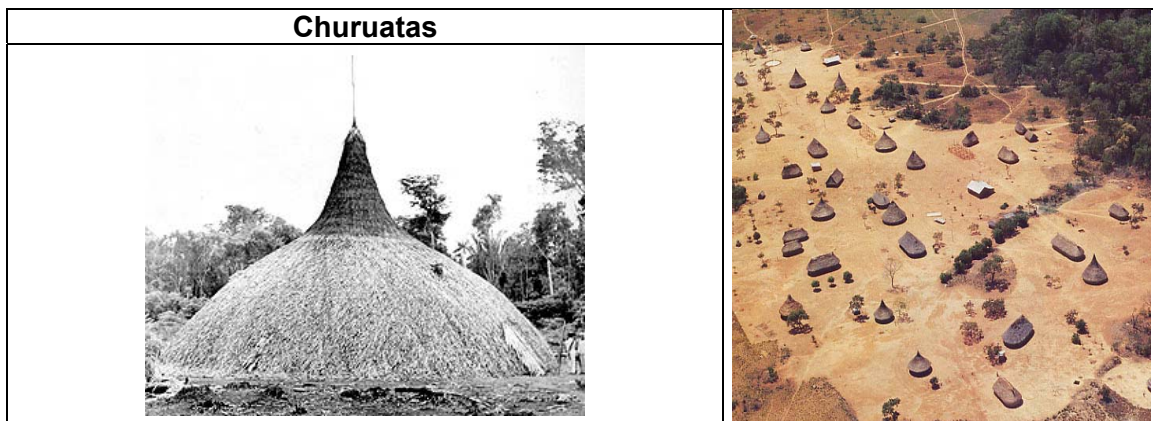
El pasado del futuro: Lo primitivo significa primero

Los refugios de las tribus nómadas, dada su versatilidad, expresan con extraordinaria precisión la condición de movimiento y flexibilidad. Estos refugios o cobijos los podemos definir desde el punto de vista constructivo, como un habitáculo cuya cubierta puede montarse o desmontarse de una estructura de soporte que a su vez también es desmontable, pudiendo transportar todo el conjunto. Estas tribus y etnias han desarrollado su cultura constructiva predominantemente alrededor de la tensión, su mecánica estructural dominante es bajo sistemas traccionados que recurren a las membranas, en su mayoría, realizadas con tejidos de fibras naturales. Existen muchos ejemplos de arquitectura nómada traccionada como las tiendas y chozas de los indígenas del continente americano, jaimas de las tribus nómadas árabes y africanas y la yurta de los pueblos nómadas del Asia Central.

En las etnias del Amazonas de Suramérica, territorio que comparten Brasil, Colombia, Bolivia, Perú y Venezuela se encuentran numerosos habitantes nómadas cuyos periodos migratorios varían de acuerdo con la etnia. La velocidad migratoria marca la complejidad o sencillez de la vivienda. Este nomadismo no desarrolla sistemas constructivos móviles a diferencia de los nomadismos del desierto donde los materiales son escasos,. Aquí lo que se transporta y se hace portátil es “la idea de la casa”, su técnica constructiva, forma arquitectónica, orientación, implantación sobre el terreno cercano a los lechos de los ríos y su organización interna. A ningún indígena del Amazonas se le ocurriría transportar por la densa selva materiales de un lado a otro, cuando con seguridad en el siguiente sitio

encontrará abundantes materiales necesarios para la construcción. A medida que la velocidad migratoria es más lenta la vivienda se vuelve más compleja tanto en organización social como en técnica constructiva, en este sentido podemos mencionar las denominadas “**Churuatas**” que son un tipo de vivienda colectiva de gran belleza formal perteneciente a las etnias Piaroa, Yekuanas, Panare, Pemones, entre otras. Su ubicación se encuentra asociada al transporte fluvial y a la localización de tierras fértiles para la siembra de los llamados “conucos”. Como son viviendas más consolidadas, llegan a formar conjuntos de varias Churuatas. El nomadismo se da entre los diferentes miembros de las comunidades.

La Churuata varia de acuerdo a cada etnia pero todas son de planta circular manteniendo siempre su carácter colectivo. Aquí se describe brevemente la Churuata Piaróa dado que tiene características constructivas que aportan una referencia para el estudio de componentes estructurales pre-flectados. Además destaca por la geometría anticlástica de la cubierta. La planta es circular de 17 mts. de diámetro por 12 mts. de altura totalmente libre de tabiquería demarcando el espacio de cada familia con las hamacas y los fogones. En el centro del círculo se construye una armadura soportante en forma de cruz realizada en palos de madera. Este esqueleto sustentante define el punto alto del cobijo, además sirve para colgar las hamacas (tejido para dormir y descansar). En el perímetro del círculo se siembran horcones flectados en forma de meridianos radiales que van a unirse en el punto alto central del esqueleto. Estos horcones se amarran entre sí con un tejido vegetal denominados “Bejucos” en forma de paralelos. A la altura del hombre se colocan unos contrafuertes formados por palos de madera que estabilizan la estructura junto a la forma anticlástica de la cubierta a los esfuerzos horizontales del viento que puede alcanzar unos máximos entre 20 a 30 m/s. Sobre este entramado de malla radial se coloca un cerramiento de tejido muy delgado de hoja de palma o paja cuya puntada del tejido se realiza de tal forma que no pueda entrar el agua pero si el aire, consiguiéndose un espacio confortable internamente. La única abertura del cobijo hacia el exterior es el acceso, que suele ser de reducidas dimensiones. La forma anticlástica tipo “S” de la gran cubierta y los objetos tejidos como cestas, hamacas e instrumentos de uso cotidiano para la caza o preparación de alimentos de estas culturas, son sin duda, desde el punto de vista etnológico, unos de los legados culturales de estos pueblos.





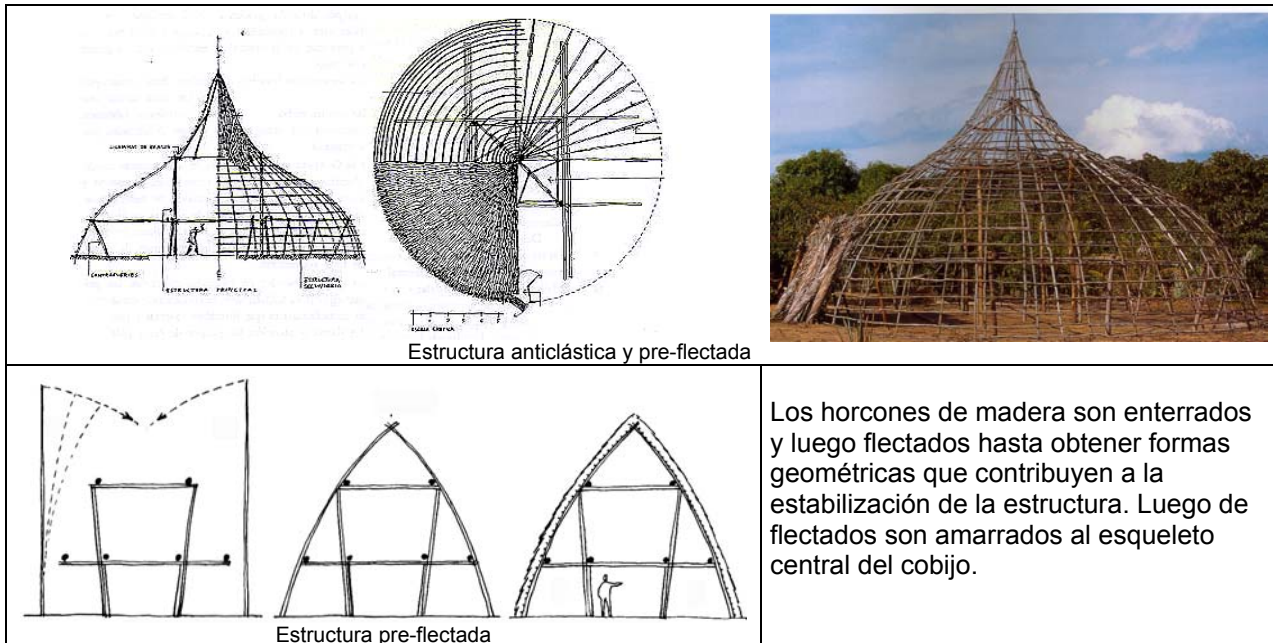


Figura N° I-1: Vivienda indígena de la selva amazónica venezolana

Fuente: La casa venezolana

En el campo de la rapidez de montaje los cobijos nómadas de las culturas ubicadas en desiertos, praderas y explanadas constituyen una importante referencia de diseño e inventiva en función de su capacidad transportable y portátil de poco peso. En este sentido hay que hacer mención a la “Yurta” que constituye, sin duda, uno de los más interesantes y elaborados ejemplos de arquitectura de rápido montaje. La Yurta está ampliamente reseñada en la bibliografía. Sin embargo, lo más destacable de este refugio, a efectos de este trabajo, es su enrejado plegable plano que luego es curvado generando una planta circular.

Está formado por listones de madera de 4 a 6 cm de sección que al ser desplegados conforman un cerramiento vertical circular de 4 a 6 metros de diámetro. El nudo que hace posible este desplegado es formado por un hilo grueso y flexible de piel de camello que conecta las barras pasantes. La cubierta es un cono truncado formada por barras de madera dispuestas en forma radial unidas en el perímetro inferior con el cerramiento plegable por ataduras, y en la parte alta se encuentran con un anillo rígido similar a una rueda de bicicleta que, a su vez, sirve de respiradero e iluminación del espacio interior. Sobre este esqueleto soportante se colocan esterillas, lonas y fieltros que varían de acuerdo al clima. En invierno se colocan tres capas y en verano se deja medio metro sin cubrir en la parte inferior del enrejado para aumentar la respiración. Estos cerramientos se atan con cuerdas que mantienen unida la piel a la estructura y le otorgan continuidad estructural, aunque en este caso, el cerramiento no contribuye a la rigidización de la estructura y sólo cumple su misión de filtro ambiental.

Todo el conjunto de estructura y cerramiento es transportado por dos camellos cuya capacidad de carga es aproximadamente 700 Kg., el tiempo de montaje es de media hora para el desplegado de la estructura.



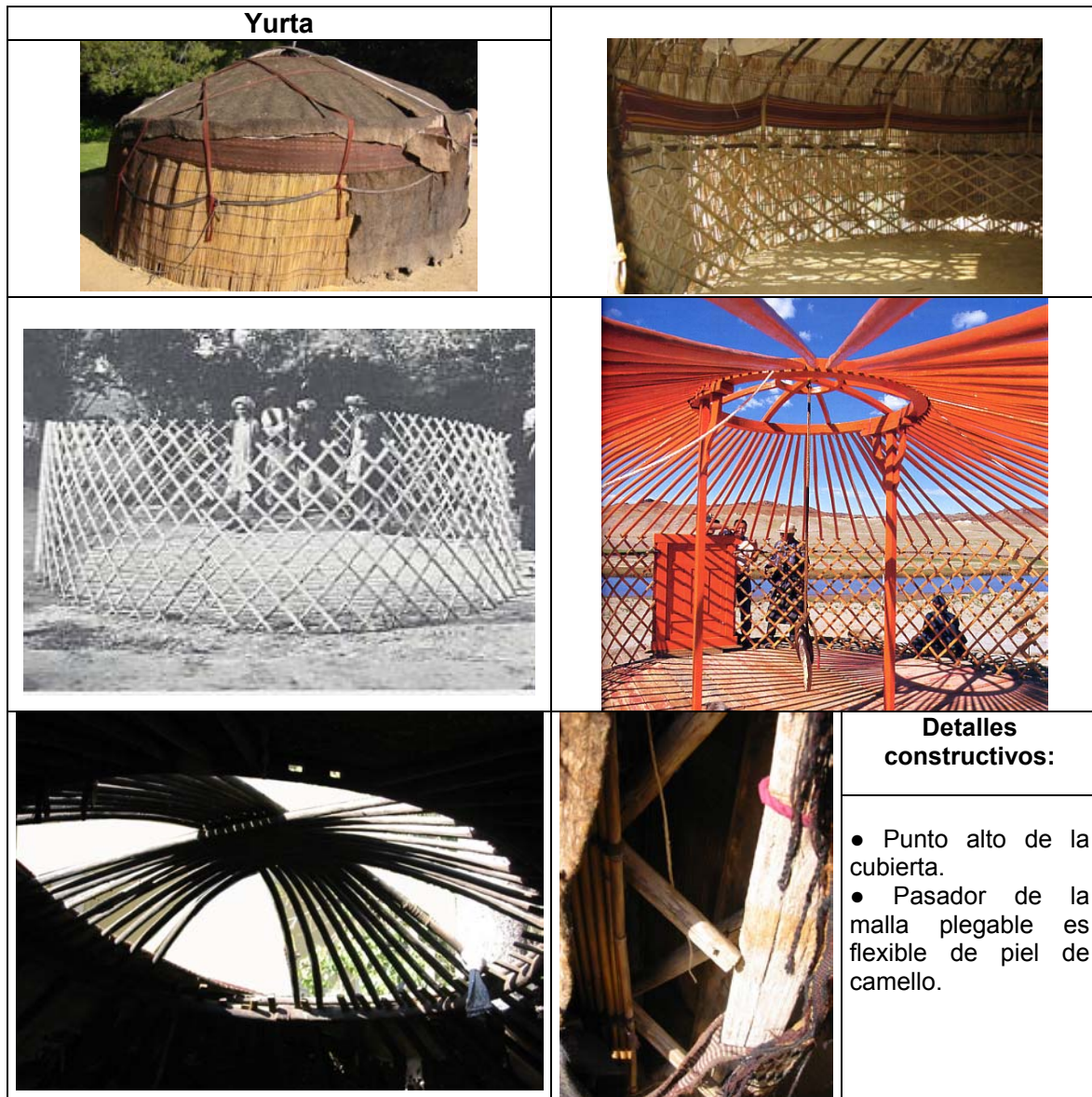


Figura N° I- 2: Vivienda efímera y transformable de Mongolia, Asia Central, denominada Yurta.

Fuente: Altair. Mongolia

Es de hacer notar que estos cobijos, a pesar de estar ubicados en continentes distintos y pertenecer a distintas culturas, mantienen características similares desde un punto de vista arquitectónico entre las cuales podemos mencionar:

1. Tejados con inclinaciones para permitir el escurrimiento de las aguas de lluvia con rapidez.
2. La cubierta está perimetralmente apoyada con lo que se logra proteger a la morada de animales y de los factores ambientales como la lluvia, el sol y las ventiscas.
3. El tejido es una piel que ventila el espacio interior.
4. La forma geométrica contribuye a la estabilización de la estructura.
5. Todas son de planta circular con organizaciones internas que responden a requerimientos funcionales como el fogón.

Más cercano al sistema estructural objeto de este trabajo es el cobijo de las tribus nómadas **Tuareg**. Están ubicadas en el África septentrional en el desierto del Sahara con más de 8.000 kilómetros cuadrados, un espacio incluye las fronteras de Marruecos, Argelia, Libia, Nigeria y Sudán. Estos cobijos están menos documentados por la bibliografía especializada, son tiendas de “Bóveda”, extremadamente móviles y ligeras que se construyen a partir arcos formados por palos de madera flectados, anclados en el terreno y unidos o atados cerca de la clave del arco. Esto es debido a las dimensiones de las ramas de los árboles del desierto. Los arcos son de diferentes tamaños creciendo hacia el centro y decreciendo hacia la periferia del cobijo alcanzando una cubierta con una luz entre los 8 a los 10 metros. Sobre estos arcos pre-flectados se colocan otras barras de menor sección formando un entramado en ambos sentidos tipo malla ortogonal muy ligera, sobre la cual se extiende unas lonas de pelo de cabra y esterillas para su cubrición resultando combinación de formas anticlástica y sinclástica que contribuyen a su estabilización estructural y otorgan una extraordinaria belleza formal. El proceso constructivo es realizado por las mujeres.

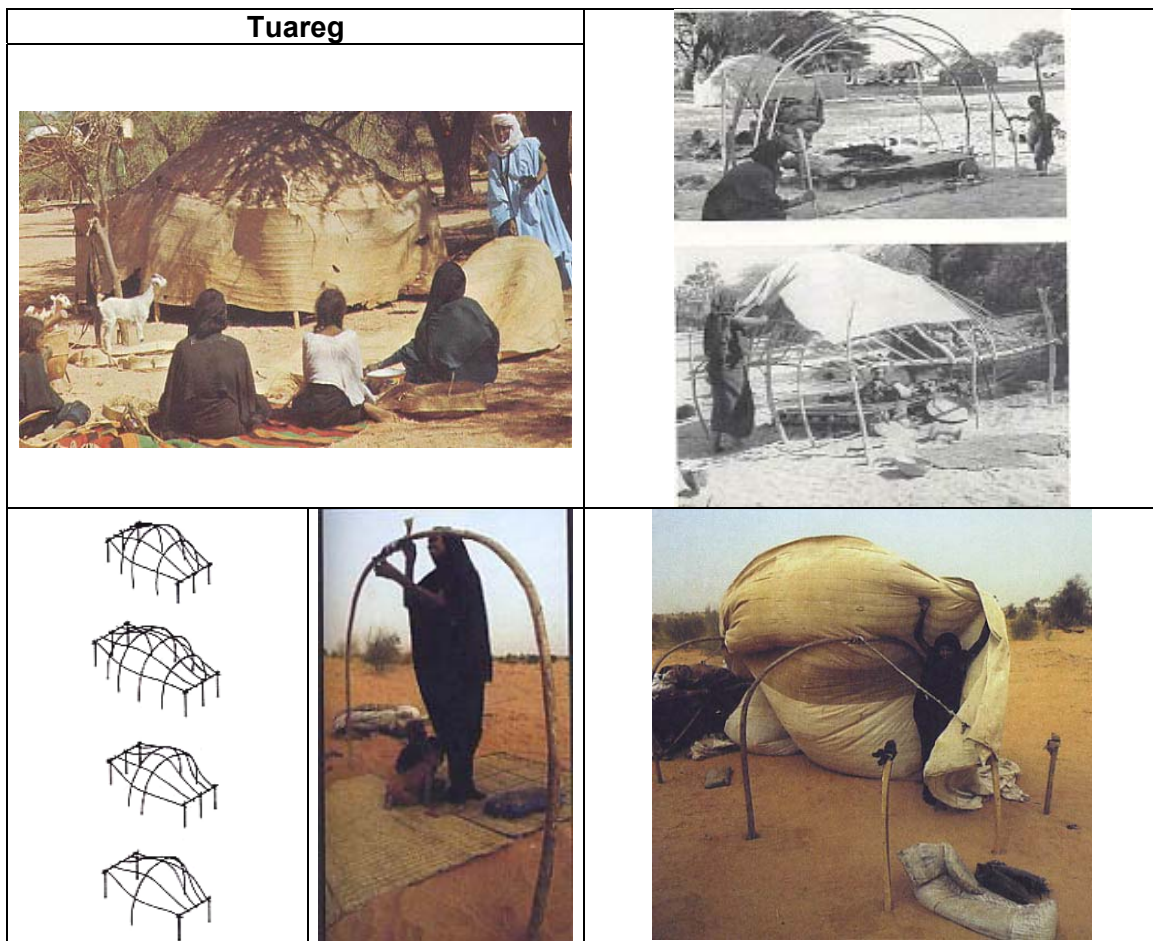


Figura Nº I- 3: Vivienda efímera de los Tuareg. África, desierto de Sahara.

Fuente: Shelter in Africa

### Ser “light”, el salto a la movilidad estructural:

La búsqueda de la ligereza siempre ha tenido una importancia para los arquitectos e ingenieros de todas las épocas. Sin embargo, en la bibliografía resulta difíciles de encontrar antecedentes de modos de vida móviles y flexibles. En las culturas occidentales la excepción es el circo. La historia del circo se remonta a la época de los hipódromos de la

#### CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Grecia antigua, cuando para conmemorar el regreso de los guerreros, el pueblo se reunía alrededor de un espectáculo donde se presentaban diversos espectáculos circenses. El circo llega hasta nuestros días como un exponente emblemático de la arquitectura ligera y móvil. (ver figura I-5)

“Construir es mover pesos” y mientras menos pesos movamos construiremos más rápido y seremos más eficientes en el consumo de energía durante el proceso de construcción. Esta premisa se expresa claramente en el campo de las estructuras móviles y portátiles. La bibliografía hace referencia como primera patente a la identificada con el N° 7755 de origen británico de 1944, presentada por Barde Salden Watkins y registrada con el título *“Improvements in supports for tents, marquees, temporary bridges and other portable structure”*. La invención consistió en una bóveda de cañón largo compuesta por una sucesión de arcos rebajados; plegable y formada por barras articuladas, por nudos pasantes tipo tijera unidos por unas barras continuas (no plegables), ubicadas en la cumbre de la bóveda y en los laterales para su estabilización y rigidización, así como también unas barras rigidizadoras de compresión que trancan los arcos ubicadas en cada nudo que impiden que los arcos regresen a su posición inicial. La plegabilidad de esta propuesta se realiza por arcos individuales.

El propio Fuller en 1953 construye en la Universidad de Washington un prototipo experimental desplegable llamado *Flying Seedpot*, el cual consistía en una serie de trípodes conectados entre sí por nudos articulados, en su posición cerrada en un pequeño paquete y que al desplegarse forma una bóveda de base cuadrada

A partir de los años 50-60 la arquitectura ligera de mallas espaciales móviles tomó dos caminos claramente definidos aunque relacionados entre sí: uno siguió el desarrollo de sistemas estructurales de mallas reticuladas plegables iniciadas por Fuller y el otro seducido por las propiedades de la catenaria y los sistemas estructurales de mallas espaciales y membranas tensadas, este campo inexplorado en la arquitectura hasta que en 1958 Frei Otto realiza su tesis doctoral *“Das Hängende Dach”* (Cubiertas Colgantes) inaugurando un nuevo campo de conocimiento que tiene sus bases técnicas en la teoría de los cables de acero y los puentes colgantes. Además de Otto podemos destacar los trabajos de los arquitectos e ingenieros como Tomas Herzog, Renzo Piano, Richard Rogers, Edmund Happold, Máximo Majowieki, Horst Berger y Kasuo Ishii. Quienes han contribuido al desarrollo de las formas anticlásticas y estructuras tensadas con la construcción de diversas cubiertas utilizando la membrana como cerramiento y estructura.

En 1961 el arquitecto español Emilio Pérez Piñero (1935-1972) diseñó una estructura de rápido montaje basada en una bóveda reticular que se despliega sin necesidad de ser armada ni precisar de andamiajes siendo prefabricada totalmente en taller. Esta innovación consistió en diseñar un sistema de nudos pasantes en el que los nudos de los extremos y los del medio son atravesados por las barras haciéndolos pivotantes, naciendo un nuevo y amplio campo de investigación de las estructuras transformables reticulares.

En 1965 el arquitecto Piñero patenta bajo el N° 3.185.164 estas bóvedas reticulares con el nombre *“Three dimensional reticular structure”*. Están fundamentalmente constituidas por un conjunto articulado de barras rígidas, capaces de plegarse hasta un apretado haz y susceptible de extenderse adoptando la forma curva deseada. El paquete inicial se expande, crece y se levanta soportando las tensiones internas de la propia estructura durante este proceso. Estas estructuras precisan de mecanismos para el desplegado pudiendo realizarse desde el propio camión de transporte, siempre y cuando éste cuente con plataforma o una torre que sea capaz de elevar la clave hasta su posición definitiva.

También puede realizarse el despliegue desde el suelo, valiéndose de ruedas y elementos auxiliares de elevación (andamios o grúas). (Ver figura I-5)

En 1966 Frei Otto diseña la cubierta para el Open Theater in Bad Hersfeld para un área de 1315 m<sup>2</sup>. Esta cubierta retráctil consiste en el diseño de un sistema móvil de cables y poleas que permite desplegar una membrana textil desde una posición compacta hasta su completo despliegue y tensado, todo soportado por un mástil central en cuyo extremo superior se aloja la cubierta cuando está totalmente plegada. Para el diseño del proceso de despliegue de esta cubierta Otto utilizó el método de catenaria colgante representada en una malla de cadenas.

En 1967 Albert Moore patenta un sistema de cúpula llamado "*Preassembled structural framework*" la invención consiste en una bóveda triangulada, de doble curvatura con un tipo de nudo formado por un aro al cual llegan todas las barras. En 1974 Theodore Zeigler basado en el trabajo de Piñero diseña su propia estructura patentada en 1977 con el N° (U.S. 4.026.313), la innovación de Zeigler consiste en que es una estructura autoportante en su forma desplegada y no requiere de elementos adicionales como cables o barras rigidizadoras para bloquear el mecanismo. La característica principal es que las barras son radiales a partir de un punto interno central con nudos tipo tijera. La estructura es autoportante debido esencialmente a que tiene un plano en común cuando la estructura está desplegada puede ser conectada en sus nodos finales con otros módulos vecinos, resultando una bóveda de doble curvatura triangulada. Las barras son tan ligeras (aluminio) que pueden considerarse carentes de peso y las fuerzas exteriores actúan solo en los nudos. En 1980 el arquitecto español Santiago Calatrava realiza su tesis doctoral titulada "*Zur Faltbarkeit Von Fachwerken*", (sobre la plegabilidad de los entramados), en la cual realiza un estudio geométrico de las estructuras construidas con entramados plegables a partir de módulos romboidales, poliédricos, cúbicos y esféricos. (Ver figura I-5)

En 1987 Carlos Hernández y Zalewsky desarrollan la tesis "*Deployable Structure*" (Estructuras transformables) en el Massachusetts Institute of Technology-MIT y posteriormente en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDEC con la construcción del prototipo ESTRAN1, estos estudios consolidan las estructuras transformables como un sistema estructural viable, ya que resuelven problemas constructivos, de montaje, proceso de despliegue así como también de estabilidad estructural, resistencia al desgaste, diseño de nudos, accesorios de rigidización y cubierta. El prototipo ESTRAN1 es una retícula espacial transformable proyectada sobre un cilindro produciendo una bóveda de cañón largo que cubre una área de 112 m<sup>2</sup> (8x14 m) con una altura de 7 m y un peso de 800 Kg. para un total de 7 kg/m<sup>2</sup>, está formado por tres arcos paralelos plegables unidos por nudos tipo tijera. A su vez estos arcos están unidos por otros elementos tipo tijera dispuestos radialmente generados por el eje de rotación del cilindro siendo plegable en los dos sentidos. Más adelante en 1992 Hernández y Zalewsky vuelven a marcar referencia el mundo de las estructuras transformables con el diseño de la estructura del Pabellón de Venezuela para la Expo-Sevilla 92, allí la innovación consistió en el diseño del nudo tipo bisagra que permitió fabricar en Venezuela la estructura transformable más grande hasta ahora construida, transportarla a España y erigirla en 24 horas.

Indiscutiblemente la innovación que permitió el desarrollo de las estructuras transformables articuladas, fue el invento del sistema de tijeras tanto rectas como curvas que dio origen a una gran cantidad de tipos de cúpulas. La desventaja de este sistema es que durante el proceso de montaje las barras son sometidas a grandes esfuerzos de corte y flexión que pueden llegar al colapso de la estructura.



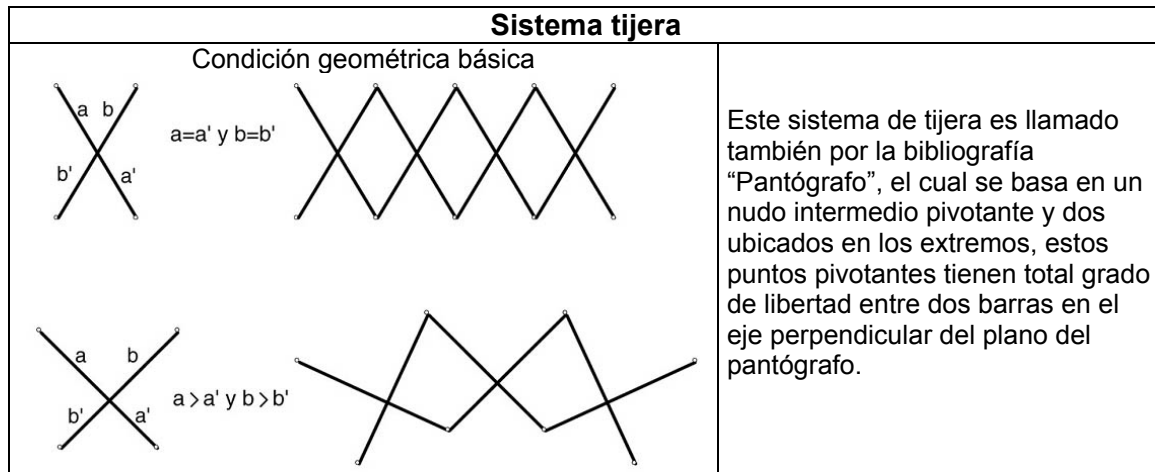


Figura N° I-4: Sistema de unión tipo tijera

Fuente: Elaboración propia

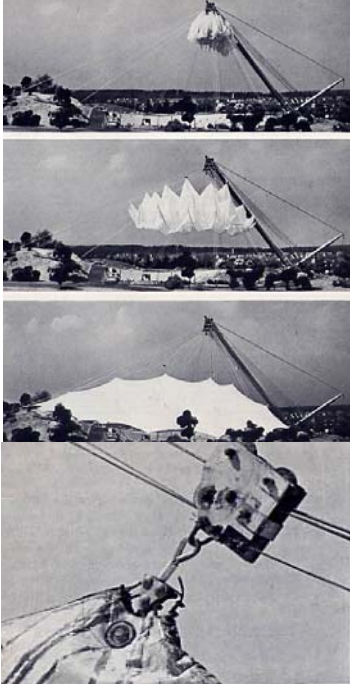
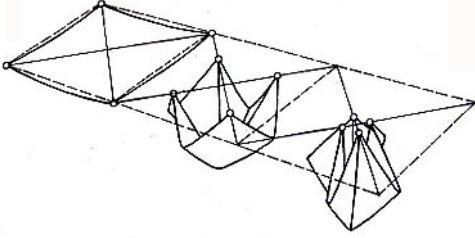
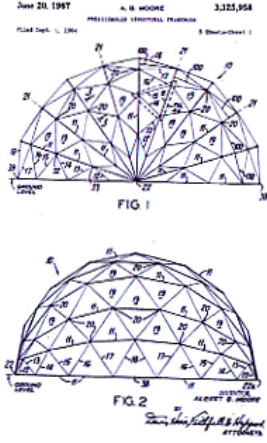
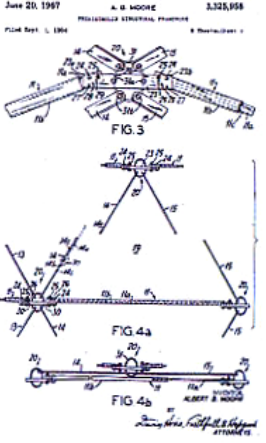
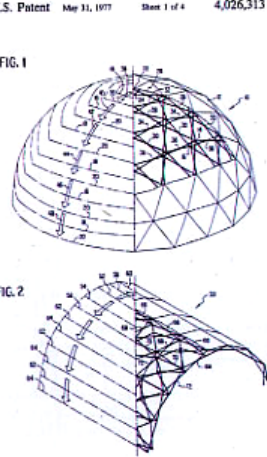
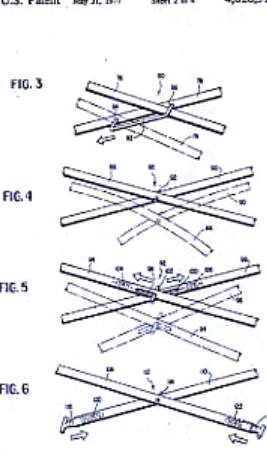
Son destacables también los trabajos realizados por los arquitectos españoles Félix Escrig quien patenta en 1984 *"El sistema modular para la construcción de estructuras espaciales desplegadas de barras"* y en 1994 patenta *"Cubierta modular desplegable"* además de una importante producción bibliográfica de textos abarcando los temas tanto textiles como transformables. El arquitecto Luis Sánchez Cuenca con la propuesta geométrica logra que las barras pasen de su estado cerrado a su estado desplegado, sin que se produzcan tensiones internas. Su invención radica en el diseño del nudo que mantiene su posición vertical durante todo el proceso y no radial a la circunferencia del arco como sucede en otras estructuras. Juan Pérez Valcárcel con el trabajo sobre el cálculo matricial de estructuras desplegadas de barras, Ramón Sastre que realiza en 1981 su tesis doctoral sobre *"Diseño y cálculo de estructuras de barras articuladas con grandes deformaciones"* haciendo aportaciones en el desarrollo del software para el cálculo de la arquitectura textil. En 1986 el arq. José Ignacio Llorens presenta su tesis sobre *"Anclajes pasivos de estructuras traccionadas"* haciendo aportaciones acerca de métodos de cálculo de anclajes pasivos y su clasificación. Mas recientemente en el 2001, el arquitecto Emilio Martín Gutiérrez presenta en la Universidad de A Coruña su tesis doctoral *"Estructura desplegable con módulo de haces y base cuadrangular"*. Donde elaboró un sofisticado sistema de cálculo matricial de barras, siendo el principal aporte el desarrollo de aplicaciones informáticas que simulan el comportamiento y estado de las barras de la estructura durante el proceso de desplegado.

La línea de construcción de grandes estructuras móviles una de las más recientes referencias en el pabellón de Venezuela en Expo-Hannover 2000 con la construcción de la cubierta móvil y traslúcida proyectada por los arquitectos Fruto Vivas, José Ignacio Llorens, Hubertus Pöpinghaus y Charo García en colaboración con Frei Otto y la empresa buro Happold (UK). La cubierta simbólicamente análoga a una flor de 38 m de diámetro y 18 m de altura estaba construida alrededor de un mástil central en celosía, con una cubierta formada por 16 pétalos de membrana textil accionados mediante cilindros hidráulicos que permitían su apertura o cierre adaptando las condiciones internas del pabellón al clima del entorno medido mediante un sensor. Lo destacable e innovador de esta cubierta es el hecho de haber logrado trasladar dispositivos y mecanismos de otras industrias como la aeronáutica hacia la arquitectura. En la siguiente tabla resumen se expone esta línea de innovaciones.

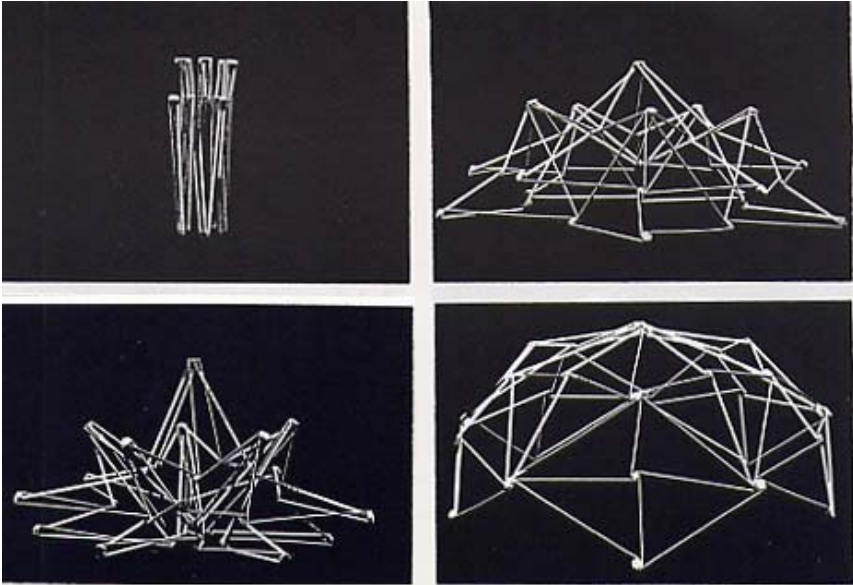
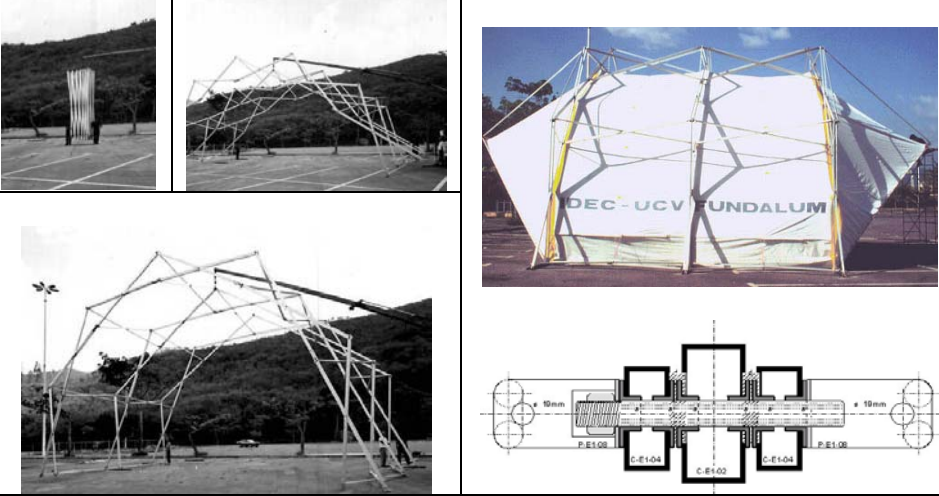

<p><b>Barde Salden Watkins (1944)</b></p>	
<p><b>Buckminster Fuller (1953)</b></p>	
<p><b>Emilio Pérez Piñero (1961)</b></p>	

**CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO**



<p><b>Frei Otto (1965)</b></p>		 <p>principio básico del movimiento</p>
<p><b>Albert Moore (1967)</b></p>		<p>Fig. 1.55</p> 
<p><b>Teodoro Zeigler (1977)</b></p>		

**CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

<p><b>Santiago Calatrava (1980)</b></p>		
<p>Innovación: Entramados plegables con módulos romboides, poliedros, cubos y esféricos.</p>	<p><b>C. Hernández W. Zalezwky (1987-1992)</b></p> <p>ESTRAN 1</p> <p>Innovación: Desarrollo de nudo tipo tijera y la bóveda de cañón largo</p> 	
<p><b>C. Hernández W. Zalezwky (1987-1992)</b></p>	<p>Pabellón de Venezuela Expo-Sevilla 92</p> <p>Innovación Desarrollo del nudo tipo bisagra. Resolución de problemas constructivos, de montaje, y cerramientos rígidos.</p> 	

**CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO**


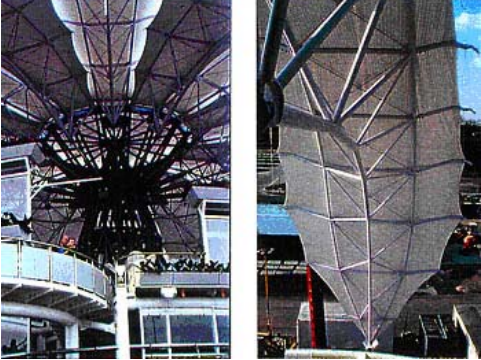

<b>Fruto Vivas, Frei Otto, J. Llorens (1965)</b>		
Pabellón de Venezuela Expo- Hannover 2000		
Innovación: Mecanismo hidráulico que permite regular la abertura o cierre de la estructura de acuerdo a las condiciones climáticas		

Figura N° I-5: Trayectoria de las innovaciones tecnológicas en las estructuras ligeras de estructuras transformables  
Fuente: Varias marcadas con los numerales 12, 17 y 35 de textos, 1 de tesis doctorales y 14 de artículos en la bibliografía general. Elaboración propia

Otro aspecto importante que hay que destacar como antecedente para efectos de las estructuras de malla por deformación, es la línea de invenciones que presenta el estudio de la catenaria y en su aplicación a la construcción de arcos y bóvedas. En este trabajo sólo se hará una breve mención. En el 1690 Jacob Bernoulli se propuso la tarea de encontrar la ecuación de la catenaria que fue finalmente resuelta años después por su hermano Johann y por Leibnitz y Huygens. Philippe de la Hire (1640-1718) y Parent (1666-1716) fueron los primeros físicos en investigar las condiciones de equilibrio de las bóvedas como un problema de estática que requiere análisis matemático. Observaron el comportamiento individual del arco asumiendo que el rozamiento era cero en las juntas.

Posteriormente Poleni describió el principio del diagrama de fuerzas. Llegó a la explicación de las “líneas verdaderas” como catenaria invertida, determinando la correcta sección de los arcos y cúpulas. Estableció experimentalmente la forma asumida por una cadena bajo cargas no uniformes con pesos proporcionales a segmentos individuales de la bóveda. Sostuvo que las leves desviaciones del eje del arco son insignificantes y enfatizó que el eje de presión permanece, en cada punto, dentro del corte en sección del arco. Alrededor del 1750, Frezier rectificó la teoría del diseño de la bóveda de cañón basada en la inversión de la catenaria

El uso más evidente de la inversión de la catenaria para encarnar los principios de la línea de empuje en las estructuras se encuentra en los trabajos de Antonio Gaudí (1852-1926). Gaudí investigó formas estructurales libres de momentos y fuerzas en equilibrio. Su interés fue estimulado por los aspectos formales de tales estructuras, es decir que pudiera visualmente seguir el flujo de las fuerzas en la estructura. Diseñó experimentos con modelos suspendidos hechos por alambres e hilos. Encontró la parábola para aproximarse más estrechamente a la línea de empuje.



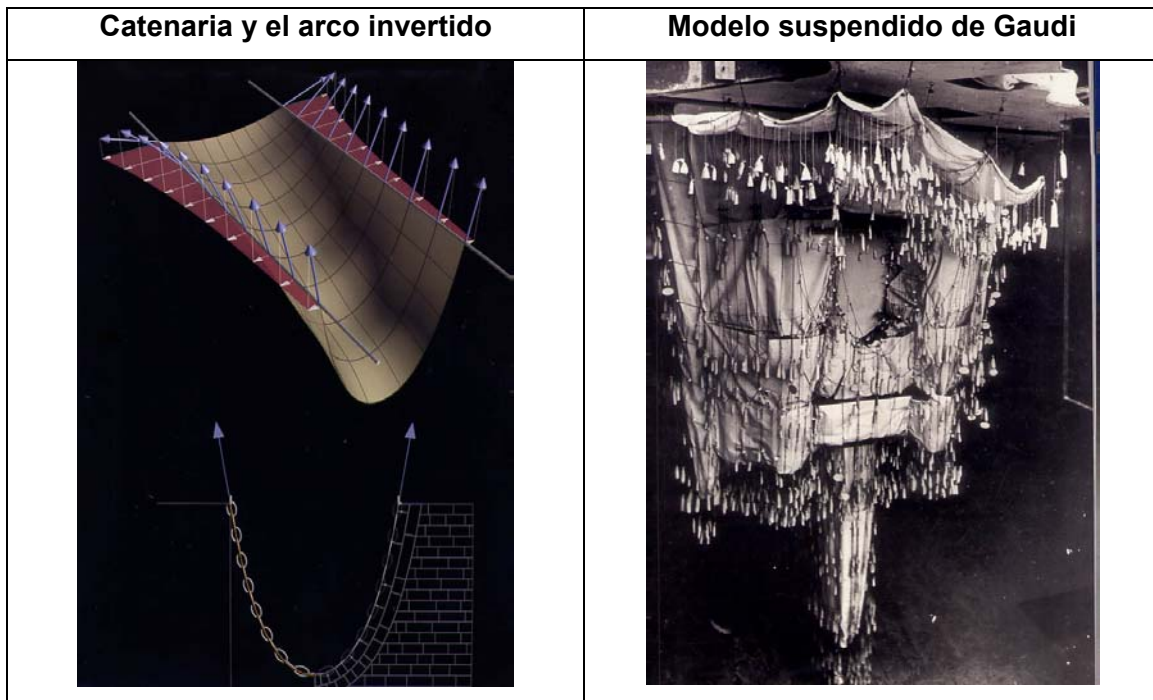


Figura N° I-6: Aplicaciones constructivas de la catenaria en la construcción

Fuente: Gaudí. La búsqueda de la forma

### El último nómada, el refugio

El estilo de vida nómada actual coexiste con el sedentarismo de las grandes ciudades y puede asociarse a la forma de vida de aquellos trabajadores itinerantes y del comercio ambulante que necesitan vivienda en sus desplazamientos o hacen de los medios de transporte su vivienda, camioneros y marinos son un buen ejemplo. Hoy día existe una gran variedad de nomadismo. Así como para los refugiados de guerra es una obligación, para los trabajadores itinerantes es un factor de vida circunstancial impulsado por el comercio global. Podemos citar también aquellos trabajadores ambulantes excluidos de las relaciones laborales formales de la sociedad contemporánea por diversas razones (nacionalidad, raza, religión, color de piel, nivel de educación, entre otras) llamados “buhoneros”, “comercio informal” o “los de la calle”. Pero para los peregrinos, turistas, gitanos, beduinos e indígenas del Amazonas es una elección de vida que les da identidad.

No hay que pasar por alto que las innovaciones tecnológicas actuales, los cambios culturales y las olas migratorias han desencadenado una fuerte tendencia hacia la movilización y flexibilización del modo de vida. Con frecuencia suceden mudanzas apoyadas por los sofisticados medios de transporte y comunicación de la vida contemporánea, con lo que la vida adquiere un carácter cada vez más móvil, breve y efímero. Este fenómeno está generando, sin duda, nuevas soluciones constructivas donde la búsqueda de la ligereza sigue teniendo gran importancia. Una de estas soluciones ha sido el refugio y su actual proliferación arquitectónica es evidente.

La palabra refugio significa “asilo, acogida o amparo” y la acepción de amparo significa “proteger”, por lo que la función básica de todo refugio es la de proteger. En el libro **“Casas Refugios”** de Gustavo Gili Galfetti, se aporta una definición del refugio:

*“La casa-refugio se ha descrito como la arquitectura más humana precisamente por esta condición de protección del cuerpo, es arquitectura que ofrece espacios íntimos, recogidos y protectores” (...) “Debido a las reducidas dimensiones de la casa-refugio, las distintas*

*funciones que deben ubicarse se superponen. Numerosas son las soluciones en las que el interior se resuelve desde una aproximación similar a la cabina de un barco o el interior de un remolque”<sup>(2)</sup>*

De esta definición se puede mencionar que el refugio está caracterizado por un programa mínimo necesario. Simbólicamente es un volver a la cabaña primitiva. No hay que olvidar que en la antigüedad muchas ciudades fueron primero un campamento de tiendas. EL refugio es una pieza de arquitectura cercana al cuerpo, donde la persona se ve enfrentada a condiciones de luminosidad, transparencia y flexibilidad inusuales, así como también un comportamiento distinto de los materiales, esta última característica lo confiere condiciones ideales para la experimentación espacial y técnica.

En términos generales, un refugio puede ser usado en aquellos casos que requieran edificaciones en lugares de alto riesgo, con costo elevado de mano de obra o escasez de la misma, ambientes hostiles o donde la velocidad de construcción es prioritaria sobre las otras variables incluyendo la económica.

Con frecuencia se usa en situaciones de emergencia, sin embargo, hay que hacer notar que la utilización de refugios prefabricados en los casos de emergencia destinados a vivienda provisional de los afectados, está muy criticada por las organizaciones internacionales como “Médicos Sin fronteras” o “ACNUR”. En su experiencia se ha determinado que en para uso prolongado muchos de los alojamientos prefabricados facilitados por instituciones o empresas a los afectados han tenido poco éxito y una tasa de ocupación muy baja, resultando impopulares dado el rechazo cultural a los mismos.

Unas de las razones del rechazo cultural a este tipo de refugios, a nuestro entender, es que el usuario está acostumbrado a un tipo de relación más cercana a materiales constructivos densos, opacos, corpóreos y pesados, y dentro de un refugio experimenta sensaciones distintas enfrentándose a condiciones excepcionales de luminosidad, transparencia, flexibilidad y ligereza, también se enfrenta a geometrías inusuales. Otra razón para el rechazo de los refugios por parte del afectado es, que para él es más importante en la etapa de post-desastre la tenencia de la tierra, la seguridad de ésta, su proximidad al lugar de trabajo y el acceso a los servicios que el refugio en sí mismo

Según estudios realizados por los organismos internacionales y publicados en la pagina web de “ACNUR”, en referencia a la tienda, ésta es considerada la forma de alojamiento más eficaz. La utilización de tiendas de textiles y materiales ligeros en las emergencias se diferencia de los asentamientos improvisados, en su escasa probabilidad de que se conviertan en asentamientos permanentes porque llevan incorporada su caducidad. Sin embargo, las tiendas no resultan apropiadas cuando se trata de almacenar bienes recuperados y con frecuencia son demasiado pequeñas para las necesidades de las familias afectadas. Normalmente este tipo de alojamiento temporal es almacenado por el ejército y puede suministrarse rápidamente a los afectados para las primeras etapas de la emergencia, lo que constituye una gran ventaja.

Según “Médicos Sin Fronteras”, la entrega de cualquier artefacto de una cultura a otra puede representar, involuntariamente una imposición de los valores culturales de quien produce el artefacto y éste es el principal motivo del poco éxito de estos planes.

Los organismos internacionales de emergencia apuntan a considerar el refugio de emergencia no como un producto de diseño y fabricación sino más bien para gestionar y planificar la movilización de los recursos locales. Estos organismos, convencidos que los

problemas que plantean las emergencias no son de tipo tecnológico exclusivamente sino de políticas de desarrollo del propio país o comunidad afectada, intentan una nueva meta de fomentar que los países propensos a desastres naturales creen su propio estado de preparación, especialmente, en un marco de reducción de riesgos.

Sin embargo, hay situaciones en que la emergencia obliga a utilizar refugios prefabricados. Tal es el caso del desalojo que se hizo en el conjunto residencial Nueva Tacagua (Venezuela) en el año 2000, a un grupo de familias cuyas viviendas sufrieron asentamientos diferenciales del terreno lo que obligo a las autoridades demoler el conjunto habitacional.



Figura N° 1-7: Aplicaciones de refugios

Fuente: El Nacional. Caracas 2000

Existen también casos donde los refugios de tiendas se presentan como una solución. Tal es el caso de los campos de refugiados. Aquí la realidad impone una orientación distinta, debido a que los refugiados no tienen más opción que estos campos, la cual tiende a tener un periodo de vida más prolongado. Aunque la tienda resulta poco apropiada es la solución más rápida y más extendida. Existen campos de refugiados como los de Kosovo, Macedonia, Albania, Sudán y Saharui que han utilizado la tienda como solución, cabe destacar que en muchos casos cuando es aceptada la solución de alojamiento en tiendas es por que existe un componente cultural que así lo permite como es el caso de los Saharuis.





**Campo de refugiados en Irak**



Montaje del campo de refugiados situado a 60 kilómetros de la frontera entre Irak y Jordania construido en marzo del 2003 y donado por ACNUR. Se puede destacar lo precario de estos refugios para ser donados por un organismo internacional.

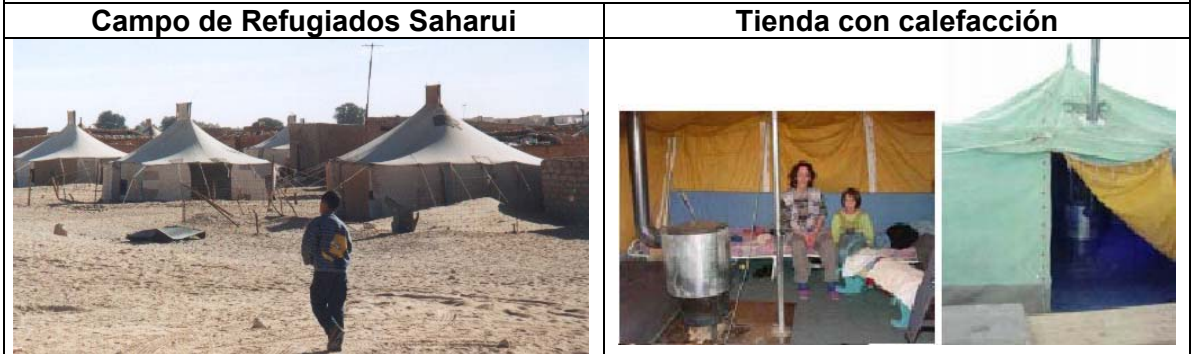


Figura N° I-8: Aplicaciones de refugios Fuente: el País. Madrid 2003

Recientemente en Venezuela, las invasiones de terrenos de propiedad del estado se ha implementado además del tradicional “rancho” (fabela) de cartón o de latas, un nuevo tipo de invasión, de acuerdo a las informaciones aparecidas en la prensa local, las cuales se realizan con tiendas textiles. Este recurso también se ha utilizado últimamente para auxilio y socorro durante la emergencia, como el deslave ocurrido en 1999 en el Edo. Vargas.



Figura N° I-9: Aplicaciones de refugios Fuente: El Universal. Caracas 1999

Como una experiencia sin precedente se puede calificar la intervención que hizo el artista americano Michael Rakowitz, en abril de 1997, al diseñar el “**ParaSITE**”. La idea está basada en la apropiación de la energía que se escapa hacia el exterior por los conductos de aire y ventilación que están integradas a la arquitectura urbana de forma casi desapercibida para crear un hábitat inflable, al mismo tiempo que proporciona calefacción. El objetivo del artista no fue resolver el problema de vivienda sino visualizar de forma explícita el miserable estado de la sociedad a través de revelar el número de “homeless” (sin hogar) y el nivel de discriminación. El concepto es que los “homeless” (sin hogar) tengan un refugio sobre todo en la época de invierno. Para el primer prototipo de los “paraSITE”, Rakowitz utilizó bolsas de residuos. “Los habitáculos toman forma y temperatura al conectar la doble membrana inflable a las ventilaciones de los edificios”.



Figura N° I-10: Aplicaciones de refugios

Fuente: [www.michaelrakowitz.com](http://www.michaelrakowitz.com)

En el caso de los refugios temporales para puntos de control en montañas, puestos móviles de primeros auxilios o para destinarlos a espacios turísticos, es usual el uso de tiendas prefabricadas donde lo importante es poder regular los aspectos del medio ambiente a través de mecanismos que permitan abrir el refugio para ventilarlo o cerrarlo. En este caso, de una tienda en los Pirineos franceses es estructura de aluminio y tela colocada sobre la estructura y anclada al terreno con fachadas laterales que contienen los accesos y dispositivos de ventilación, Hay que destacar que los elementos de ventilación se resuelven normalmente con bordes redondeados cuando el material de fachada es textil debido a que la tela suele desgarrarse en los bordes angulares.

Con respecto a su uso en actividades turísticas, se puede mencionar este refugio ubicado en parques públicos de la ciudad de Róterdam, para celebración de reuniones, está formado por tubos inflados estructurales dispuestos en forma radial y entre los tubos una membrana textil. El acceso se realiza enrollando uno de los paños de tela de la fachada





Figura N° I-11: Aplicaciones de refugios

Fuente: Elaboración propia. Todas las fotos fueron tomadas por el autor

Otro campo de aplicación lo constituyen las ciudades temporales de peregrinos como el caso de las tiendas temporales de La Meca, donde miles de personas se congregan durante 5 meses, para lo cual es necesario el montaje de 10.000 tiendas. En este caso la prefabricación repetitiva de un módulo de rápido montaje se presenta como la solución más idónea, además, porque la cultura árabe así lo permite.

## Peregrinación de la Meca. Países árabes

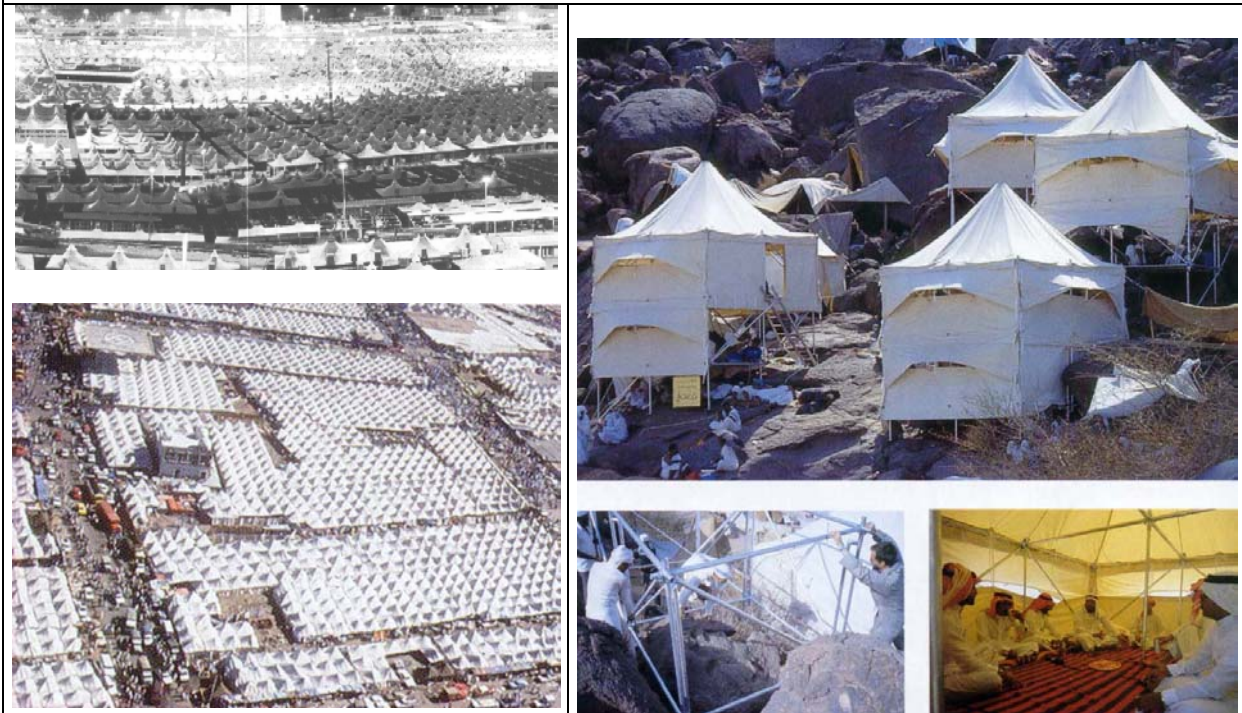


Figura N° I-12: Aplicaciones de refugios

Fuente: Technet

Con esta panorámica se intenta demostrar que el campo de aplicaciones y usos de los refugios es muy amplio que trasciende las fronteras de los países, idiomas, religiones, ideologías y desarrollo tecnológico, todo lo cual, justifica su estudio.

Por otra parte, en la industria se producen cada vez más cubiertas y refugios de rápido montaje, como objetos de producción seriada que exploran diferentes vías y métodos para alcanzar la máxima velocidad de montaje y el mínimo de esfuerzos.

Una de las características de estos refugios es la ligereza de sus materiales y la menor cantidad de piezas posibles en sus uniones, existiendo refugios desde los armables hasta los transformables, plegables o convertibles. Todas estas estrategias constructivas pueden ser accionadas por fuerzas mecánicas, de presión, por fluido de aire o simplemente manuales. Los refugios de nueva generación pueden considerarse como excelentes ejemplos de arquitectura ligera de rápido montaje. A continuación se presentan dos tablas exploratorias. La primera es referida a los diferentes tipos de refugios encontrados en el mercado que intentan responder a esta necesidad creciente de movilidad y nomadismo, y en la segunda tabla se muestran ejemplos de diseños particulares de oficinas de arquitectura e ingeniería que han desarrollado prototipos innovadores en este campo. Para efectos de limitar la exploración, sólo se mencionan refugios que usan la membrana textil como material básico de construcción y en lo posible, con barras pre-flectadas como estructura de soporte bien sean fijas o móviles.



## Refugios Comerciales

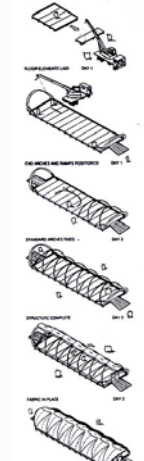

Tipo de Refugio	Descripción	Tipo de montaje	Proceso de montaje
<p><b>Tienda con barras plásticas</b></p> 	<p>La tienda es el mínimo refugio, su uso es extendido. Se compone por una estructura de soporte en barra plástica, con fibra de vidrio de 9.5 mm de diámetro. Esta barra se curva y forma un arco que se une a la membrana textil a través de bolsillos y ganchos. En la parte inferior la barra se engancha a unas lengüetas conectadas al piso de la tienda que cierra la estructura. El peso es entre 4 a 8 Kg</p>	<p>Armado</p>	 
<p><b>Tienda Inflada</b></p> 	<p>Este producto de la empresa Autoflug (Alemania), de 16 y 24 m<sup>2</sup>, está desarrollado para aplicaciones médicas. La Estructura de tubos de aire comprimido y tela de con tirantes estabilizadores. Tiene piso de membrana.</p>	<p>Tubos Inflados</p> 	
<p><b>Tienda transformable de tubos de aluminio</b></p>  	<p>Refugio de tecnología transformable de 30 m<sup>2</sup> y 109 Kg. Comercializada por la empresa Disc-Bed. Es una estructura de aluminio y una cubierta colgada de poliéster, en conoide con accesos en forma de triángulos. La estructura es un trípode desplegable unido a un nudo central. Permite combinarse y crecer con la adición de varios módulos. Cuenta con piso técnico y accesorios para adaptar el módulo a diferentes usos.</p>	<p>Despliegue Central</p> 	<p>Paquete para transportar</p>  

<p><b>Tienda Yurta</b></p> 	<p>Es un refugio comercializado por la empresa Shelter Systems compuesto por una estructura de tubos de plástico P.V.C. flectados y encajados en los nudos. La membrana textil está colgada de la estructura a través de unos clips.</p>	<p><b>Armado de barra con nudos</b></p> 	
<p><b>Combinaciones</b></p>		<p>La innovación de este sistema es el desarrollo de la unión entre el nudo de las barras con la membrana. Es un sistema de aros plásticos que presiona la membrana y no la perfora</p>	
		<p><b>Armado Barra pre-flectada continua</b></p>	

Figura Nº I-13: Refugios comerciales

Fuente: Elaboración propia

### Refugios, prototipos experimentales y proyectos especiales

Proyecto	Descripción	Tipo de montaje	Proceso de montaje
<p>The Museum of the Moving Image Hospitality Pavilion. Future System.UK.1983</p>	<p>Este refugio desarrollado para un museo consta de una plataforma y de arcos prefabricados de poliéster con fibra de vidrio extrusionados apoyados unos con otros y sobre estos una membrana textil translúcida. Todo el conjunto forma una bóveda de cañón largo.</p>	<p><b>Armado</b></p> 	







<p>Mobile building system for exhibition-Tensoforma Arq. Stefano Bertino y Arq. Jürger Henicke Italia-Alemania. 1987</p>	<p>Este módulo estructural, diseñado para que pueda conectarse con varios módulos y crecer, está compuesto por cuatro arcos perimetrales en forma de celosía triangular y una membrana textil tensada entre ellos. El módulo es de 10x10 m de base cuadrada con esquinas recortadas.</p>	<p>Armado</p> 	
<p>Mobile Investigation Camp, Canada. 1993</p>	<p>Es un refugio diseñado para múltiples situaciones para hacer investigaciones de campo. Está compuesto por una plataforma de madera o plywood la cual se le siembran unas guías donde encajan los tubos de plástico pre-flectados, sobre éstos se coloca una membrana textil.</p>	<p>Armado por flexión de barra</p>	
<p>Emergency Family shelter system Cambridge University. UK. 2001</p>	<p>Este refugio desarrollado para la emergencia consiste en preflexar unas barras de polipropileno que se unen en unos anclajes previamente instalados en el terreno. Los arcos se arriostan con unas cuerdas en forma de triángulos. Sobre estas barras en arco se coloca una membrana textil que tiene unas solapas en la parte inferior para ponerles peso encima. Para las entradas se cuelgan unas laterales de tela verticales. Pesa 40 Kg. y cubre un área de 12m<sup>2</sup></p>	<p>Armado con barras pre-flectadas en una dirección</p>	

Figura N° I-14: Refugios experimentales

Fuente: Elaboración propia

En virtud de que uno de los principales antecedentes de esta investigación lo constituye la tradicional tienda o carpa, presentamos una explicación mas detallada de las características de este refugio que nos aporta información para el desarrollo del trabajo.

El profesor Frei Otto, en sus tesis doctoral “Cubiertas Colgantes” aporta una definición de la tienda: “es el más antiguo soporte de la cultura transmitida conscientemente de generación en generación”. Desde nuestra óptica constituye un tipo primario de la vivienda humana para protegerse de la lluvia, el viento y el calor, dejando penetrar, en cantidad suficiente, la luz y el aire fresco para su ventilación, tal y como lo hemos explicado al principio de este capítulo.

La tienda o la carpa es un tipo estructural extraordinariamente ligero, móvil, portátil y ayuda a la propagación de la vida humana sin estar supeditada a ningún lugar ni a climas determinados. La podemos encontrar en todos los lugares y latitudes, de un polo a otro de la tierra siendo utilizada para varios fines (vivienda, exposiciones, hangares, fiestas sociales, actos públicos, quioscos, emergencias y turismo, entre otras). Cada vez que la humanidad, en cada una de sus etapas, incluyendo la contemporánea, se encuentra en

situaciones críticas o límites por aspectos políticos, sociales, culturales, militares o simplemente de supervivencia, acude siempre a la tienda.



Con el nombre de tienda designamos una construcción totalmente en seco, ligera y transportable que consiste en una membrana apoyada o colgada de una estructura sustentante. Aquí haremos referencia a aquella tienda que se destina al refugio de personas, con un mínimo de material y una técnica perfecta de alta artesanía, que hoy la industria a tecnificado y serializado.

### Principales características de la tienda iglú

Para describir este proceso tomaremos como muestra una tienda de campaña básica que puede ser transportada por una persona.

<b>Datos Técnicos</b>
<p>Estructura de soporte: Barra plástica reforzada con fibra de vidrio (PRFV),            Diámetro: 9.5 mm (es la más común)            Membrana: Poliéster            Longitud de la barra. 6m ensamblada            Peso total: 4-8 kg. (depende de los accesorios)            Altura: 1.65 m            Capacidad max.: 3 personas            Dimensiones: 2.60 x 2.60            Accesorio: Anclajes metálicos, sobrecubierta y alero</p>

Tabla N° I-1. Datos técnicos de las tiendas

<b>Descripción técnica del Proceso de montaje</b>	
<p>1.- Se extiende la lona sobre el piso</p>	<p>2.- Se despliegan los tubos plásticos. Estos tubos de vienen de 6 mts de longitud cortados en pequeños trozos de 60 cm unidas por un hilo elástico que viaja en el interior del tubo. Cada trozo de tubo tiene un terminal de aluminio donde penetra el otro extremo y le da continuidad estructural</p>
<div style="display: flex; align-items: center;">  <p>Paquete de tela inicial enrollada</p> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;">  <p>Tela estirada</p> </div>	

3.- Se introducen los tubos en los bolsillos de la tela o en los ganchos dispuestos en forma de cruz



4.- Se introducen los terminales de la barra que son en aluminio, en unos agujeros ubicados en unas cintas salientes unidas al piso textil



5.- Se erecta, introduciendo la pre-flexión a los tubos y levantando la tela.



6.- Los arcos cruzados pre-flectados y la tela con respiradero superior en el punto alto a través de una malla perforada.



7.- Detalle de unión de la membrana textil con las barras a través de ganchos



8.- Se clavan en el suelo las estacas metálicas para anclarla.



9.- Se le colocan los accesorios, como la sobrecubierta y el alero que van sobre las barras y unidos a éstas.



10.- Demostración de la ligereza de la tienda. Se puede observar en la gráfica el piso que arriestra toda la estructura que cierra el conjunto.








Las tiendas son utilizadas en la actualidad como refugios para turistas en zonas naturales (playa, montaña, parques, etc) Este mercado creciente ha generado una gran variedad de formas de tiendas en tamaños, para albergar desde 1 hasta ocho (8) personas. Los accesorios dependen del lugar donde se vaya a ubicar. Pero todas tiene en común que son con barras pre-flectadas unidireccionales y membrana textil

Figura N° I-15: La tienda

Fuente: Elaboración propia. Todas las fotos fueron tomadas por el autor

### Formas en que se pueden encontrar las tiendas o carpas en el mercado

<p>Dobles barras pre-flectadas individuales, membrana unida a las barras por bolsillo y acceso triangular con vértice redondeado</p> 	<p>Doble barra cruzada con doble intersección, membrana unida a las barras por bolsillo. Ventanas de membrana perforada</p> 	<p>Doble barra cruzada con intersección en el punto alto. Membrana unida a las barras por ganchos</p> 
---	---	---

### FORMAS SIMPLES


 <p>Cinco (5) barras, dos cruzadas y tres individuales. Membrana unida a las barras por bolsillo. Acceso con alero</p>	 <p>Cuatro (4) barras, dos cruzadas y dos individuales para formar el acceso y un segundo compartimiento. Membrana unida a las barras por bolsillo</p>	<h3>FORMAS COMPUESTAS</h3>	 <p>Tres (3) barras cruzadas y una individual para producir el acceso, membrana unida a las barras por bolsillo, tiene alero</p>	 <p>4 barras, dos cruzadas y dos individuales Membrana unida por bolsillo y acceso definido por las barras centrales. Tiene 2 compartimento separados por una textil</p>
---	---	----------------------------	--	---

Figura N° I-15: Formas comerciales de la tienda

Fuente: <http://catalog.bazarjuvenil.com>

## CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO



De este estudio además de conocer el proceso de montaje de la tienda moderna, podemos sacar algunas conclusiones estructurales parciales que aportan ideas para el desarrollo de esta investigación:

- 1.- Todas las tiendas están compuestas por los siguiente elementos:
  - 1.1.- Membrana para el cerramiento de cubierta
  - 1.2.- Membrana para el piso (de otro material mas resistente) conectado al cerramiento
  - 1.3.- Sobrecubierta que le otorga impermeabilidad
  - 1.4.- Alero en la zona de acceso de protección
- 2.- Los accesos están hechos con cremalleras teniendo dos capas de telas, la primera opaca de protección y la segunda de malla perforada para dejar entrar el aire
- 3.- Los respiraderos se localizan en el punto alto de la membrana de cubierta y está definido por una malla perforada
- 4.- Las barras actúan en una sola dirección y sólo encuentran estabilización cuando están conectadas a la membrana de cubierta
- 5.- El piso funciona como un arriostre de toda la estructura, ya que de él depende que las barras no colapsen

**Características estructurales de las tiendas o carpas:**

Cálculo para una tienda de 3 personas con unas dimensiones de 2.60x2.60m

Diámetro exterior	9.5 mm
Diámetro interior	4mm
Espesor	2.75 mm
Longitud total de barra	600 cm
Longitud de barra plegada	60 cm
Luz a cubrir	360 cm (diagonal)
Flecha ( $\Delta_{max}$ )	170cm
Mod. de elasticidad (PRFV)	23.000 Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla N° I-2. Datos técnicos de la barra

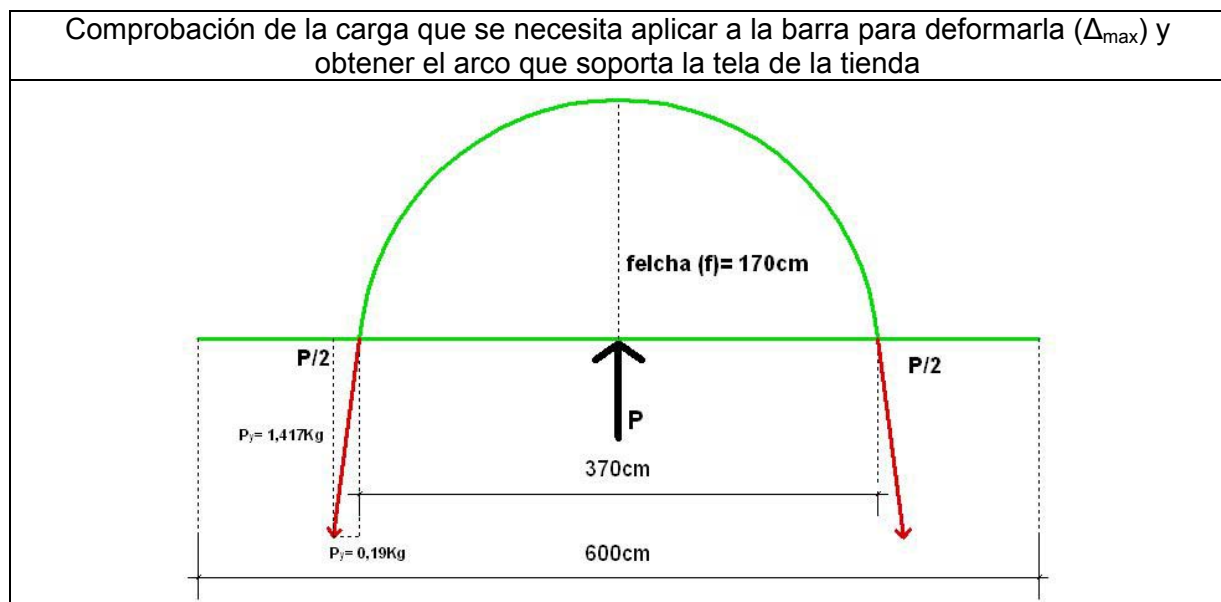


Figura N° I-17: Comportamiento de la barra de la tienda

Cálculo de la Inercia de la Barra

$$I = \frac{\pi}{64} \times (D^4 - d^4)$$

$$I = 0,0775 \text{cm}^4$$

Cálculo de la carga (P) para doblar la barras hasta alcanzar una flecha de 170cm y una luz de 360cm

$$P = \frac{f \times 48 \times E \times I}{L^3}$$

Donde:

f: Flecha

E: Modulo de elasticidad del PRFV

I: Inercia de la barra

L: Longitud o Luz a cubrir

Sustituyendo:

$$P = 1,43 \text{Kg}$$

Considerando que la barra esta articulada en sus extremos la reacción en cada punto final de la barra es igual a:  $R = P/2$

Sustituyendo tenemos una carga en cada punto de **0,715Kg**

Como se observa en el gráfico la carga vertical necesaria a ser aplicada en cada extremo de la barra es de  $P_y = 0,715 \text{Kg}$  siendo la componente  $P_x = 0,19 \text{ Kg}$

Con esta carga podemos calcular la flexión máxima ( $M_{\text{max}}$ ) que se genera a través de la ecuación:

$$M_{\text{max}} = \frac{P \times L^2}{8}$$

Sustituyendo tenemos una flexión máxima de:

$$M_{\text{max}} = 2,3166 \text{ Kg-m}$$

Evidentemente aplicar una fuerza vertical de 1,417 Kg en cada punto de la barra no supone de mayor esfuerzo, por lo que es posible lograr deformar la barra con simple tracción humana. . Esto es debido a la reducida área transversal de la barra en función de su longitud. Sin embargo, aunque el momento de flexión es muy bajo es suficiente para otorgarle cierta rigidez a la tienda. Sobre el refugio volveremos a referirnos en el capítulo N° 3 de este trabajo, sobre las aplicaciones.

De igual manera como se explicó la pre-flexión en las barras en una sola dirección, ahora se explicará la pre-flexión en barras en dos direcciones que conforman mallas de superficies sinclásticas. Para ello se presenta unos cuadros resumen que sintetizan los hallazgos más importantes.



## 1.2. Construcciones eficientes, las mallas deformadas: reseña de casos.

Los trabajos directamente vinculados al sistema estructural referido en esta investigación de mallas deformables corresponden a los prototipos desarrollados por el Instituto de Estructuras ligeras IL de la Universidad de Stuttgart durante las décadas de los 60-70. Aunque cabe destacar que las investigaciones realizadas por los profesores Frei Otto, Jürgen Henniscke y los demás miembros del equipo del IL no contemplaban la posibilidad de reutilización de la malla, ni su capacidad portátil. Por tanto, los prototipos que presentamos no están ubicados en el campo de las edificaciones móviles, pero como el proceso de montaje de estos prototipos precisaron de mecanismos para alcanzar la forma concluimos que la base teórica de cálculo, construcción y montaje desarrollada es aplicable para esta investigación. Estas estructuras pueden ser redefinidas como estructuras transformables si son vistas como método constructivo. La principal innovación de estos estudios y prototipos consistió en desarrollar un método de búsqueda de la forma, a través de los modelos colgantes basados en el cálculo de la catenaria.

En total de este tipo de estructuras sólo se construyeron 4 prototipos experimentales, tres cubiertas destinadas a edificios públicos y una privada.

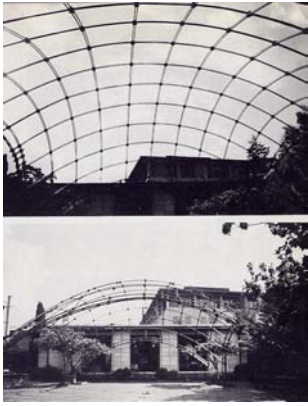



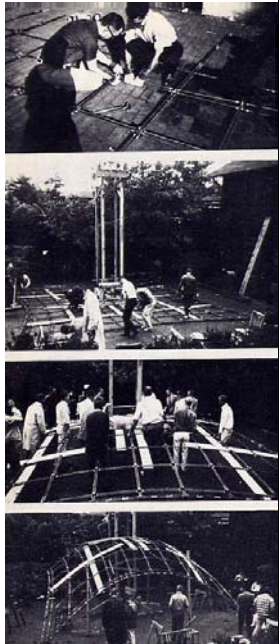
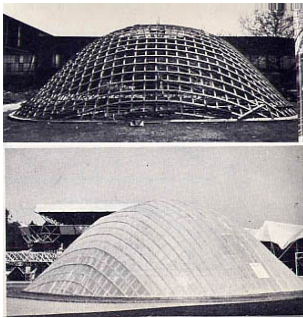
Proyecto	Descripción	Tipo de montaje	Proceso de montaje
<p data-bbox="225 913 533 1003"><b>Prototipo experimental. Cúpula de malla rígida de Berkeley. USA. 1962</b></p> 	<p data-bbox="545 882 813 1021">Es una cúpula de malla reticular de base cuadrada, cubre un área de 52 m<sup>2</sup> con una luz de 7,80 m.</p> <p data-bbox="545 1025 813 1312">Está compuesta por un par de barras de acero en ambas direcciones, con nodos en los cruces de las barras. Forma una cúpula de cuatros arcos perimetrales y borde abierto.</p> <p data-bbox="545 1317 813 1420">La búsqueda de la forma se realizó por el método del modelo colgante.</p>  	<p data-bbox="826 882 1085 1312">Pre-flexión de las barras y nudos pasantes articulados. Los arcos perimetrales están reforzados con varias barras dispuestas en forma paralelas al arco. El método de montaje consistió en izar la malla por el centro desde el suelo hasta conseguir la forma.</p> 	

Figura N° I-18: Aplicaciones de las mallas deformadas, Prototipo Experimental

Fuente: IL-10

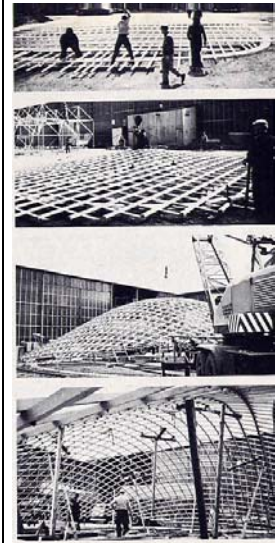
**Cúpula de malla rígida para Pabellón de exhibiciones Essen. 1962**



Esta cúpula de planta circular y de apoyo por el perímetro cubre un área de 198 m<sup>2</sup> con un diámetro de 16,82 m. Las barras están perforadas para permitir el paso del nudo de tornillo con sistema de tuerca y arandela de presión. Está formada por barras de listones de madera laminada cubierta con una membrana textil sobre la malla.

Para buscar la forma se utilizó el método de suspensión. Además, fue necesario hacer un patronaje de cada uno de los listones para determinar su longitud.

El sistema de montaje es por la flexión de las barras colocando la malla sobre el suelo y levantándola por su centro. El borde es apoyado perimetralmente y el acceso se produjo por un corte en la malla reforzado por unas vigas.



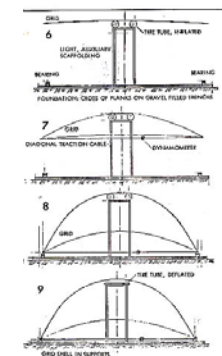
**Prototipo Experimental IL Universidad de Stuttgart. 1973**  
Arq. Jürger Henricke  
Ing. Lothar Gründig



Es una cúpula de base cuadrada apoyada sobre cuatro puntos y arcos perimetrales de borde. Cubre un área de 37,5 m<sup>2</sup> con una luz de 6,68 y una altura de 2,68 m. Está formada por barras de listones de madera de 1,5 cm de ancho. La búsqueda de la forma fue con el sistema de modelos colgado.



El método de montaje consistió en elevar la malla sobre un andamio auxiliar y flexar las barras hacia abajo. Sobre el andamio se colocaban unos tubos inflados para luego del proceso de erección desinflarlo y poder quitar el andamio con relativa facilidad.



En el interior de la malla los listones eran sencillos y en los bordes se refuerza con varios listones ubicados en forma paralela.

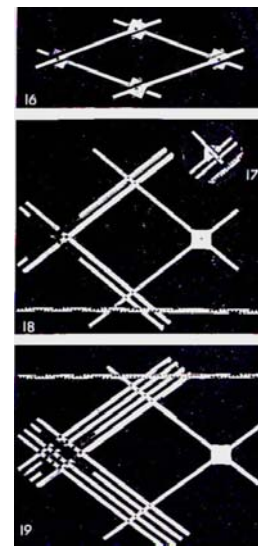


Figura N° I-19: Aplicaciones de las mallas deformadas, Prototipo Experimental

Fuente: ILEK

En 1972 El Instituto de Estructuras Ligeras marca una importante referencia cuando diseña y construye la cubierta de malla rígida para el Multi-hall (Pabellón) de Mannheim, población del sur de Alemania cerca de Stuttgart. Esta cubierta viene a materializar todas las experiencias y conocimientos generados en los ensayos anteriores. En este capítulo se describirá brevemente.

Proyecto	Descripción	Tipo de montaje	Proceso de montaje
<p><b>Cubierta de malla para Multi-Hall. Mannheim. Alemania. 1972.</b></p> <p>Arq. Frei Otto Ing. Edmund Happold Ove Arup IL Team</p>    	<p>Es una malla reticular de base cuadrada de doble capa en ambos sentidos combinando formas anticlásticas y sinclásticas. Cubre un área de 7.400 m<sup>2</sup>, para alcanzar una luz máxima de 60 m y una altura máxima de 20 m.</p> <p>Está formada por listones de madera de pino de 50x50 mm perforadas para producir el nudo con un tornillo y arandela de presión. Cuenta con varios tipos de borde. Todo el conjunto está rigidizado por una red de cables de 6 mm. La cubierta es un textil de poliéster 30% traslúcido unido a los bordes con laminas galvanizadas.</p> <p>El proceso de obtención de la forma fue por el método del modelo suspendido.</p> 	<p>El proceso de montaje se realizó por partes poniendo la malla encima del piso y luego levantándola con la ayuda de unos andamios, de donde fue deformada hasta alcanzar la forma final. La rigidización de la estructura fue a través de la membrana y por unos cables que viajan por la superficie conformando una red.</p>  	    

Figura N° I-20: Aplicaciones de las mallas deformadas a la cubierta de malla para Multi-Hall (Pabellón). Mannheim

Fuente: IL-13



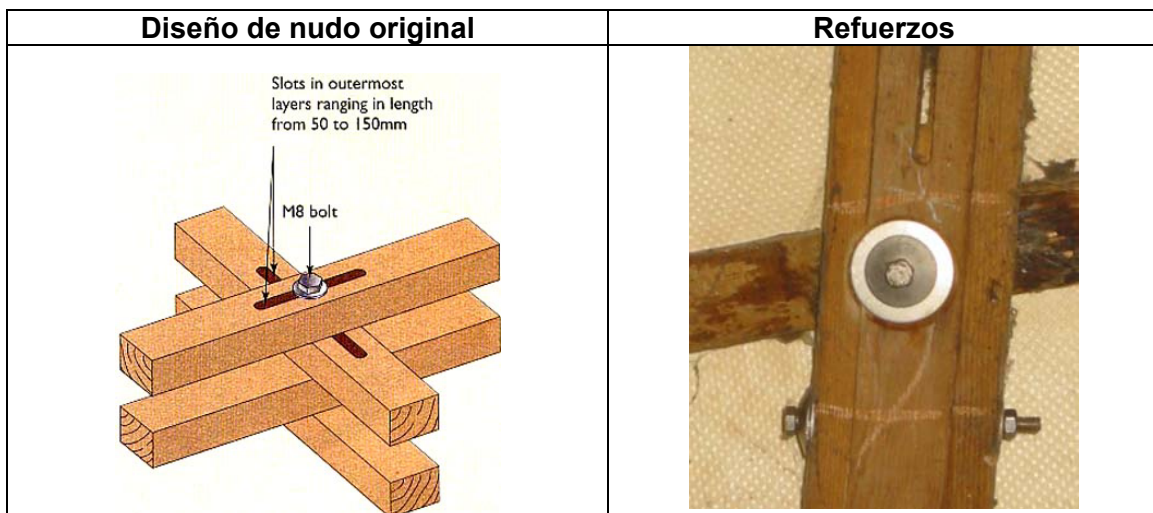
Tipos de bordes experimentados en la cubierta			
Bordes flexibles soportados por cables tensados.	Borde por viga atirantada	Borde rígido anclado a una viga.	Borde en arco de madera laminada.
			

Figura N° I-21: Aplicaciones de las mallas deformadas a la cubierta de malla para Multi-Hall (Pabellón). Mannheim  
Fuente: IL-13

El desarrollo de esta tecnología de mallas deformadas queda detenido después de la construcción de la cubierta de Mannheim. Quizá debido a la cantidad de nudos que partieron durante el montaje, ya que la barra está perforada para permitir el paso del tornillo debilitando esta zona de la barra y al ser flectada agota el material sucediendo la rotura. Sin embargo, el comportamiento tipo malla y las características del material hicieron relativamente fácil su reparación.

El diseño del nudo consistió perforar los listones con una apertura ovalada para absorber las diferencias que se presentaban durante el proceso de erección. Existe una fricción entre las barras que se debe a la fijación que hay entre las barras. Esta fijación debe actuar como mecanismo durante el proceso de montaje y como fijación cuando es estructura. Se logró en esta cubierta colocando un nudo con tornillo y arandela de presión. Por cada nudo debe haber dos arandelas de presión a cada lado.

Esta arandela de presión debe estar separada de la barra por otra arandela plana para que el reparto de la carga sea más uniforme, previniendo aplastamientos locales en las barras.



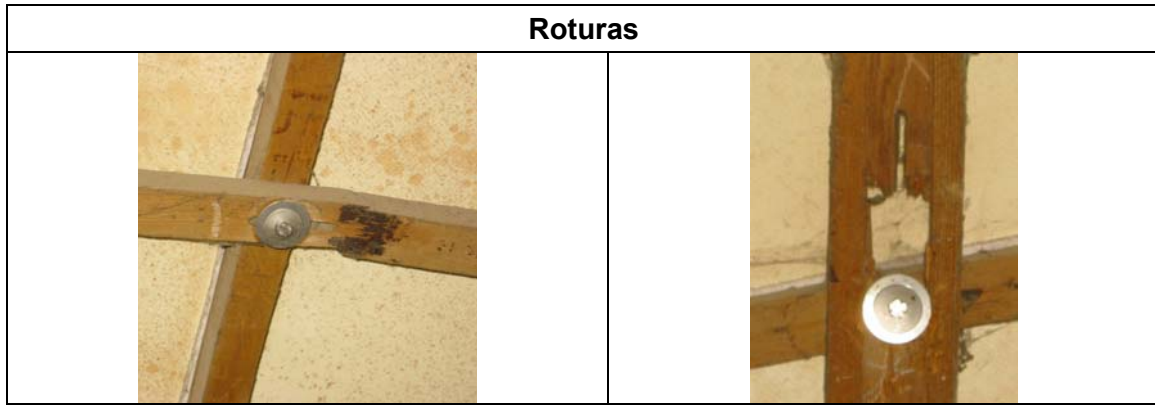


Figura N° I-22. Nudos cubierta Mannheim

Fuente: Elaboración propia

En 1983 se realiza un primer intento del equipo del IL por introducir sus métodos constructivos no convencionales a un campo tan tradicional como la vivienda. La estructura se realizó con una malla ortogonal de barras de madera curvándolas hasta alcanzar la curvatura deseada conformando unos cascarones de gran altura con un perímetro circular el cual se apoyan.

Sobre la retícula de la malla deformada curvada se colocó un cerramiento de tablillas de madera dejando la parte inferior de la cúpula para los elementos de ventilación. Otro nivel experimental que abarcó este ensayo constructivo fue el de intentar buscar confort climático basándose en técnicas pasivas y aislamiento térmico utilizando la vegetación. Esto se realizó a través de colocar sobre las cúpulas plantas trepadoras (enredaderas) para protegerlas del enfriamiento debido a la acción del viento o del sobrecalentamiento por la incidencia de los rayos solares.

Este es el proyecto IL menos documentado en la bibliografía, para su reseña en este trabajo fue necesario una entrevista con el profesor Jürgen. A continuación se presenta una tabla que ilustra el proyecto de aplicación de la tecnología de las mallas deformadas.


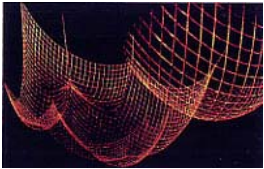
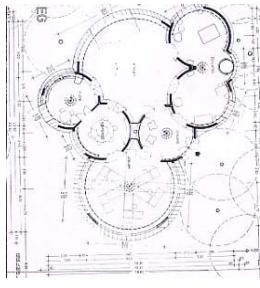
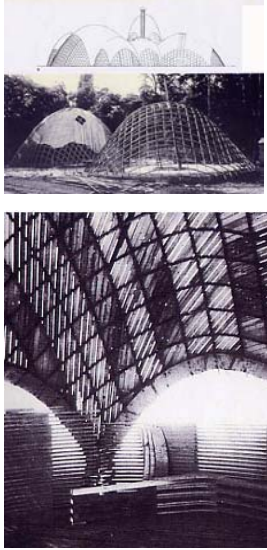
<b>Proyecto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tipo de montaje</b>	<b>Proceso de montaje</b>
<p><b>Vivienda Unifamiliar</b> Equipo IL (1983)</p>  	<p>La vivienda consta de 8 cúpulas interceptadas de diferentes radios: la cúpula central y seis cúpulas menores, organizadas alrededor de la primera. Las cúpulas cubren un área de 160 m<sup>2</sup>. Según el Prof. Jürgen esta vivienda ha sufrido muchas transformaciones desde su construcción sin afectar el cascarón. El proceso de diseño fue el de la catenaria invertida y el modelo suspendido.</p>	<p>El proceso de montaje se realizó por partes poniendo la malla en el piso, luego levantándola con la ayuda de unos andamios desde donde fue deformada hasta alcanzar la forma final.</p> 	

Figura N° I-23: Aplicaciones de las mallas deformadas en Vivienda Unifamiliar

Fuente: ILEK



Es hasta los años 2000 y 2003 cuando la empresa de ingeniería Buro Happold construye el Pabellón de Japón para la Expo-Hannover-2000, diseñado por el arquitecto Shigeru Ban en colaboración con Frei Otto, el cual consistía en una malla reticular cuyas barras estaban dispuestas en diagonal con respecto a los bordes del rectángulo que las contenía. Lograba de esta manera alargar la longitud de las barras y disminuir la tensión de flexión en las mismas. La malla estaba perimetralmente apoyada sobre los bordes largos del rectángulo y apoyada sobre los arcos en los extremos cortos donde suceden los accesos, las barras estaban formadas por tubos de cartón y nudos amarrados con cintas. La malla fue deformada hasta alcanzar la forma parecida a la mitad de un reloj de arena de tres crestas. Esta cubierta no la describiremos en este trabajo, ya que a que por la normativa alemana, fue reforzada con vigas de madera y arcos de cables debido a que el cartón es un material frágil, cambiando de esta forma todo el funcionamiento de la malla.

En el año 2002, Buro Happold bajo la dirección de los ingenieros Richard Harris, Oliver Kelly y Michael Dickson construye una malla similar al pabellón de Shigeru Ban, pero sin las incidencias legales y normativas del pabellón de exposiciones de Japón. La malla se construyó para albergar un museo siendo la estructura de doble curvatura de rejillas comprimidas por cuatro capas formado por listones de madera y nudos por presión. La malla es plana al inicio y luego es deformada formando una estructura tridimensional. Para el diseño de esta malla y su proceso de montaje se utilizaron herramientas informáticas donde se pudo simular su comportamiento. Se determinó que la máxima deformación de toda la estructura era de 49 mm. El desarrollo de este software fue bajo el método de la relajación dinámica. El desarrollo de este software junto al diseño del nudo a presión constituye las principales innovaciones de este trabajo.

A pesar de utilizar las herramientas más sofisticadas para el cálculo y diseño de la malla durante el proceso de montaje, de los 10.000 nudos fracturaron 145 ubicados cerca de los arcos de acceso. Así lo manifestaron los diseñadores en entrevista con el autor donde, además, expresaron que el éxito del montaje de la malla se debió en gran medida al sistema de andamio utilizado perteneciente a la empresa Peri System. Aunque se puede comentar que por la cantidad de andamios utilizados, el control de todo el proceso de deformación de la malla puntal por puntal se hace muy lento y costoso.

La cubierta es para un taller de trabajo de doble curvatura realizada con listones de 50 x 30 mm en cuatro capas (dos en una dirección y dos en la otra). Estas formas de mitad de un reloj de arena tienen una longitud de 48 metros por 16 metros de luz en el punto más ancho y de 11 metros en el punto menos ancho. La altura interna varía entre 7 a 10 metros. La separación entre los listones es de 500 mm en áreas de alta carga incrementándose a 1000 mm en ciertas partes de la malla. El peso total de la malla de madera con las diagonales de refuerzo es de 6 toneladas ( $7.5 \text{ kg/m}^2$ ). El revestimiento se hizo con unas láminas planas onduladas que incrementan el peso hasta 20 toneladas. Sobre este punto sería conveniente comentar el hecho que de en este edificio el esqueleto sustentante pesa menos que el cerramiento no estructural, el cual pesa 3 veces más que la estructura.

También se puede destacar que el aspecto visual la malla causa impresión al espectador debido, por una parte, a la experiencia inusual de su forma y por otra, a su construcción tridimensional liberada del pórtico.

A continuación se presenta una tabla resumen con la descripción de la cubierta:



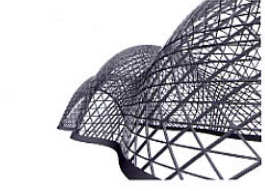







Proyecto	Descripción	Tipo de montaje	Proceso de montaje
<p><b>Gridshell of the Downland Museum. U.K. 2002</b></p>    	<p>Las barras son listones empalmados de madera de roble, dispuestos en diagonal para aumentar su longitud y hacerlos más flexibles. El nudo es de planchas metálicas a presión unidos por barras roscadas por las esquinas. Luego de deformada la estructura es rigidizada con unos listones horizontales a todo lo largo de la malla que trancan los rombos de la malla.</p> <p>El método para conseguir la forma fue por modelo físico flectando las barras y calculada por el método de la relajación dinámica.</p>  	<p>El proceso de montaje de inicio es colocando la malla plana en su parte más alta, a la altura de las crestas y con ayuda de andamios y puntales se fue deformando de arriba hacia abajo, controlando los diferentes esfuerzos dependiendo de la ubicación del puntal, hasta lograr obtener la forma final y unir los listones del perímetro con los bordes rígidos laterales.</p>  	   

Figura N° I-24: Aplicaciones de las mallas deformadas al Gridshell del Downland Museum.

Fuente: Civil engineering. 02-2003

### 1.3. Fundamentos técnicos de las mallas por deformación y su aproximación a las estructuras transformables:

#### Definición malla espacial deformada

Frei Otto (1974) en el libro IL-10 define a las estructuras de mallas por deformación como:

*“Es una red formada por barras y nudos curvados en el espacio. Las barras originalmente forman una rejilla plana con distancia constante entre los nudos.”<sup>(3)</sup>*

Esta definición sólo abarca la configuración geométrica y es el ingeniero Edmund Happold (1976) en el artículo **“Calculation of the Shell”** publicado en el IL-13 Multihalle Mannheim, quien amplía la definición aportada por Otto e introduce las características del comportamiento de la malla cuando es mecanismo. En este sentido, afirma:

#### CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

*“Una malla de celosía es una superficie de doble curvatura formada por una red de barras de madera unidas por tornillos, espaciadas uniformemente en las dos direcciones. Cuando la malla es plana la celosía es un mecanismo (...) La malla está formada por elementos rígidos con fricción entre las uniones, cuando una barra se mueve paralela a la otra causa en el cuadrado de la malla un comportamiento como un paralelogramo. Este movimiento causa cambios en la longitud de la diagonal entre los nudos del cuadrado original deformando la malla y conformando la doble curvatura (...) los grandes movimientos de la malla y los cambios en los ángulos entre las barras, indican que la forma global que se ha obtenido puede ser fácilmente alterada por cualquier fuerza que actué sobre ella. Para evitar estas variaciones es necesario introducir la diagonal rigidizando el rombo resultante.”<sup>(4)</sup>*

El grupo de ingenieros de la Buro Happold en la revista **“Building Research & Information”** (2003) publican en el artículo titulado **“Design and Construction of the Downland Gridshell”** una definición de las mallas deformadas por flexión más elaborada al referirse al comportamiento de la malla como estructura:

*“La malla, una vez deformada, es una estructura tridimensional que resiste las cargas externas a través de su forma abovedada (...) Estos bóvedas pueden ser caras curvas en el mismo sentido (sinclástica) o curvas en sentidos opuestos (anticlástica. Por su doble curvatura son estructuralmente eficientes resistiendo la acción de los esfuerzos combinados de tensión-compresión. Por esta razón las barras tienen poca sección.”<sup>(4)</sup>*

Basándonos en las anteriores citas de los expertos que han trabajado en este campo, se puede elaborar nuestra propia definición teórica de las mallas. Para efecto de este trabajo, son todas aquellas formas constituidas por mallas originalmente plana de barras continuas pre-flectadas dispuestas en damero y unidas por nudos articulados. La superficie resultante, después de un proceso de transformación, permite soportar cargas mayores a su peso propio, para diseñarlas precisan de un proceso de búsqueda de la forma y para montarlas necesitan de mecanismos en las uniones que permitan el cambio de forma, accionado, todo el sistema, por una fuerza externa que introduce flexión a los componentes.

En este sentido, se hace necesario estudiar los procesos de búsqueda de la forma, desarrollados hasta ahora para diseñar estas estructuras, ya que, como se ha afirmado en la definición que se ababa de elaborar, se necesita encontrar las coordenadas de la forma para poderla calcularla y materializarla.

### **Métodos de diseño y obtención de la forma:**

Según Chris Williams, profesor del Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil de la Universidad de Bath. La obtención de la forma (form finding) para mallas deformadas, es el proceso de establecer una geometría estructural para soportar una carga. En este sentido, otro de los aportes de Otto fue desarrollar un método para obtener la forma (form finding) a través del método de la forma suspendida, estudiado con más de 150 modelos con diferentes tipos de malla, llegando a conclusiones sobre los empujes de las mallas. El profesor Otto define el proceso de obtención de la forma como:

*“...Es un proceso donde la estructura es planificada y desarrollada. En cada fase, la forma de la estructura es tangible y visible. Un proceso de obtención de la forma (form finding) es un proceso interactivo optimizado. Cada fase provee una inicial forma que se convierte en la base para la siguiente fase. El criterio para este proceso de optimización es determinado por la relación entre la forma, la construcción y la función de la estructura. (...) La forma de la red*

cuando está extendida sobre un plano es cuadrada. Las líneas de la red son inicialmente rectas y forman una rejilla ortogonal.

El patronaje de la red colgante es el desarrollo plano y ortogonal de la forma curva. Éste contiene la longitud de toda la red de líneas. (...) la forma suspendida es la forma de la curvatura de la red. Para la realización de la construcción de la forma suspendida es la inversión de ésta, obteniendo la cáscara. Estas formas suspendidas invertidas son predominantemente sinclásticas”<sup>(6)</sup>

A lo que el profesor Otto se refiere en esta definición lo podemos resumir en que todo lo que sucede en la tracción sucede en la compresión, por lo que el método desarrollado por el equipo del “IL” para encontrar las formas fue una versión del método ideado por Gaudi de los modelos colgantes, que ya se ha comentado en este capítulo.

Los modelos suspendidos parten de la catenaria que se define como la curva que describe una cadena suspendida por sus extremos. Esta cadena toma por si misma una forma curva, bajo la acción de cargas constantes, por lo tanto, la ecuación de equilibrio de la catenaria se puede definir como lo indica la siguiente tabla:

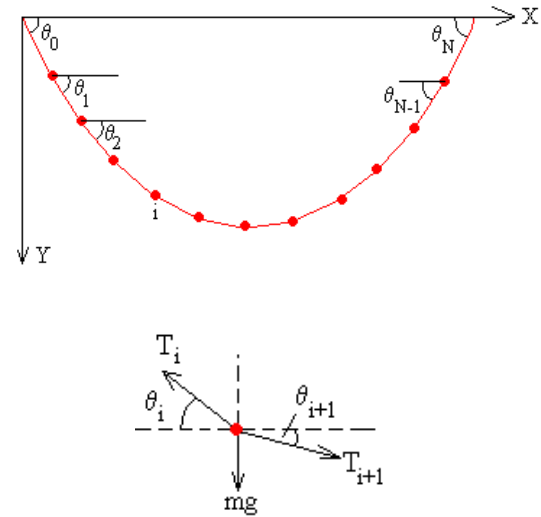
Catenaria descrita por una cadena	Ecuación de equilibrio
	<p>Cada punto estará, por tanto, sometido a tres fuerzas: su propio peso, la fuerza que ejerce el hilo a su izquierda y a su derecha.</p> <p>La condición de equilibrio para cada punto <math>i</math> de masa <math>m</math> se expresa:</p> $T_i \cos \alpha_i = T_{i+1} \cos \alpha_{i+1}$ $T_i \sin \alpha_i - T_{i+1} \sin \alpha_{i+1} = mg$

Figura N° 1-25. Ecuación de equilibrio de la catenaria

Fuente: Elaboración propia

Como hipótesis de partida se puede decir que la carga es proporcional al peso propio de la cadena, por lo que la línea de presiones toma la forma de una catenaria (línea de los cosenos hiperbólicos), Y de la cual se infiere que la cadena, bajo una carga, se deforma aumentando su curvatura en el punto en que esta carga actúa. La curvatura de la cadena, entonces, variará según la posición e intensidad de la carga que actúe sobre ella.

Uno de los modelos más elaborado por el equipo del “IL” fue el modelo suspendido para la cubierta de Mannheim. En este modelo a escala 1:500, la forma final resulta de una malla suspendida formada por pequeñas barras y nudos conformando una cadena de eslabones articulados, de igual medida y peso, conectados entre sí. Este modelo simula una malla de de madera que resiste tensiones de compresión, pero en la malla suspendida, ocurren tensiones de tracción solamente. Las formas suspendidas resultan soportadas bajo cargas



mueratas (peso propio) libre de momentos. Para invertir y encontrar las coordenadas del modelo se realizó un proceso de fotogrametría.

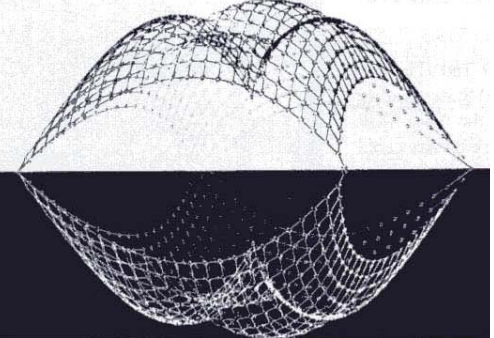
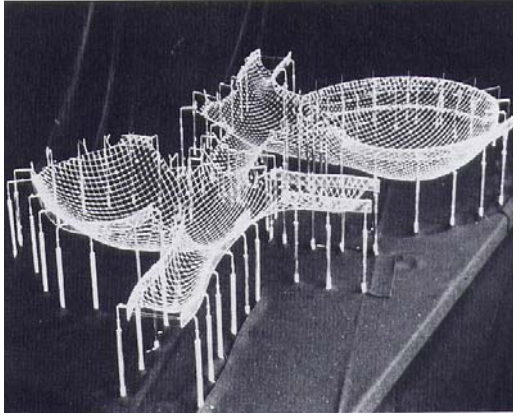
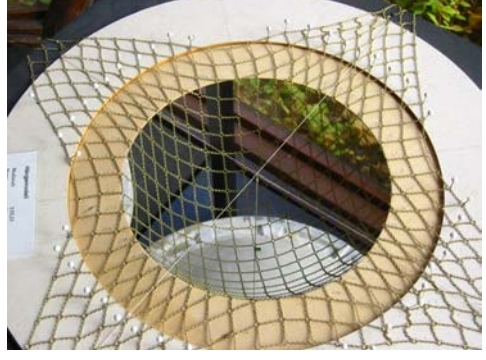

<p><b>Concepto del modelo colgante</b> Cúpula de bordes abiertos</p>	<p><b>Modelo colgante de Mannheim</b> Bordes combinados</p>
 <p data-bbox="247 772 774 795">Todo lo que sucede en tracción sucede en compresión</p>	
<p><b>Modelo colgante</b> Cúpula de borde cerrado</p>	
	

Figura N° I-26. Modelos colgantes por catenaria

Fuente: ILEK

Otto concluye que toda malla suspendida tiene las siguientes características básicas:

1. La forma es propia y única. Propia porque una red asume formas espacialmente curvas independientemente de manipulación externa y es única porque una red puede asumir sólo una singular forma especial.
2. Configura un único equilibrio, porque un estado de equilibrio existe entre las fuerzas de tensión en la red suspendida y la carga que actúa sobre la red es el peso propio.
3. La forma es definida por su patronaje, es decir la longitud de la cadena. Cualquier cambio en sus elementos formativos (barras) por influencias de cargas externas inevitablemente produce una nueva forma.

En el proceso de obtención de la forma para la cubierta de Mannheim Ewald Bubner (1976) en su artículo **“The form finding of the grid shell of Mannheim”** publicado en el IL-13 afirma lo siguiente:

*“En la malla suspendida ocurren tensiones de tracción solamente. Las formas suspendidas resultan mallas soportadas bajo carga muerta (peso propio) libre de momento y, atirantadas.”. <sup>(7)</sup>*

En otro artículo titulado **“Calculation of the Shell”**, ya citado anteriormente, el ingeniero Edmund Happold (1976), colaborador en el cálculo estructural de la cubierta de Mannheim, afirma:

*“Los modelos colgantes son modelos funiculares que sólo contemplan peso propio y no resultan de las cargas de flexión. En la práctica la malla es sometida a cargas más grandes que el peso. Las deformaciones producidas por los cargas externas cambian la forma de la malla original funicular. Las fuerzas directas desde las cargas del funicular producen momento de flexión, el cual incrementa los momentos ”. <sup>(8)</sup>*

las observaciones realizadas por Bubner y Happold, son para este trabajo particularmente importantes, ya que ubican el problema en las desavenencias que puede existir entre el método del modelo colgante para obtener la forma y el método para construirlas. En otro artículo titulado **“An example of the static-analytical computation for a suspended model” IL-10** publicado años antes por el profesor Lothar Gründig (1974) aclara con mayor nitidez este problema de los esfuerzos iniciales de la malla y además plantea la incidencia que tendrán los aspectos constructivos dentro del mismo:

*“Los momento de torsión y flexión debidos a la rigidez de las barras de la malla, con seguridad no puede ser despreciado... además de determinar los esfuerzos, también hay que considerar otros factores que pueden influir en la forma tales como: los aspectos constructivos de los nudos, tipoy material de cubierta y de las barras, método de montaje, entre otros. Teóricamente, la forma obtenida al deformar la barra está muy cerca de la catenaria obtenida en el modelo colgante, debido a la poca sección de las barras, pero nunca será igual a la forma obtenida en el modelo colgante ded o que son curvas de flexión, por lo que, la forma colgante, no podrá ser utilizada para el análisis estructural de los esfuerzos <sup>(7)</sup>*

Esto demuestra, por lo menos en teoría, que la inversión práctica de la forma obtenida con el modelo funicular no es posible con estructura de elementos rígidos, ya que mientras en el modelo funicular los hilos flexibles (cadenas) se curvan formando una catenaria, los listones de la cúpula real se deforman según curvas de flexión. La rigidez propia de los listones, inicialmente planos, da una gran resistencia a la estructura cupular. Con lo cual, no siempre todo lo que sucede en la tracción sucede en la compresión.

La estrategia para poder homologar el modelo suspendido a la obra construida, montada por preflexión de las barras, fueron:

- 1.- Colocar la red de barras en diagonal para alcanzar una mayor longitud
- 2.- Disminuir la sección transversal de la barra haciendo el damero mas unido y disminuyendo la preflexión inicial, ya que esta flexión es directamente proporcional a la sección.

Es en este último punto donde este trabajo intenta hacer aportaciones. Demostrar, que la flexión inicial introducida en las barras puede ser utilizada como estrategia para otorgar rigidez global a la estructura. Es por ello, que este trabajo tendrá que vérselas, en los capítulos siguientes, con el comportamiento estructural de la malla para verificar que esta flexión inicial no somete a la estructura a roturas, colapsos, ni a zonas plásticas en el material.

Recientemente los ingenieros Richard Harris, Oliver Kelly and Stephen Johnson de Buro Happold publicaron un artículo en la revista Building Research & Information (2003) titulado “**Design and construction of the Downland gridshell**”. Definen un camino a seguir explorando. Es el de la coherencia entre el procedimiento de para encontrar la forma y el método de erección o montaje de la estructura, en este sentido afirman:

*”Hay una relación directa entre el modelo de búsqueda de la forma y la construcción de la malla, así que la exactitud del modelo es muy importante. Las estructuras funiculares son apropiadas donde la carga dominante es su propio peso. Esto es en el caso de largos arcos (Mannheim) o pesadas estructuras (Sagrada Familia). Para la malla de Downland, el peso propio de la malla fue muy reducido. Las cargas fueron dominadas por el viento y el peso de las barras en su forma planas (listones). Por ello, la forma no funicular fue seleccionada. La inversión de las curvaturas de los valles significó que la malla debe ser manipulada dentro de una forma en la cual los elementos han de ser inducidos a compartir fuerzas y momentos de flexión. De esta manera, no fue posible generar la forma desde el modelo colgante.”*<sup>(9)</sup>

Estas consideraciones, derivadas de estudios y experiencias prácticas, intentan relacionar el proceso de búsqueda de la forma con los esfuerzos iniciales de la deformación de la malla, las propiedades del material, el proceso de montaje y los detalles constructivos. Sin embargo, no está planteada explícitamente la idea de la pre-flexión, como aspecto a considerar. Estos estudios indican claramente que es viable realizar para ciertos tipos de bóvedas y cúpulas un proceso de búsqueda la forma a través del método de curvas de flexión.

Considerar los momentos de flexión que suceden en la barra durante el proceso de deformación, significa que la forma dependerá de las propiedades de la sección y longitud de la barra, y de la carga externa aplicada para lograr la deformación e introducir la pre-flexión. En su estado más simple el momento máximo de flexión en una barra articulada en sus extremos, se puede calcular por la expresión:

$$M_{\max} = \frac{q L^2}{8}$$

Donde **M** es el momento máximo de flexión, **q** es la carga uniformemente repartida incluyendo el peso propio y **L** es la longitud de la barra.

En este sentido, si la barra es empotrada la ecuación es:

$$M_{\max} = \frac{q L^2}{12}$$

Si comparamos la ecuación de la barra articulada y la barra empotrada se observa que la sollicitación disminuye un 33% sobre todo teniendo en cuenta la simetría de la sección de la barra.

Como hemos mencionado anteriormente, una cúpula calculada con modelo de suspensión, es posible su construcción dado que la sección de la barra es muy pequeña que la diferencia entre la catenaria invertida y la curva de flexión es despreciable, desde el punto de vista geométrico, más no así desde el punto de vista estructural.

En la actualidad, los trabajos de búsqueda de la forma se realizan con modelos numéricos. Los nuevos métodos de búsqueda de la forma se realizan con modelos informáticos, para lo

cual se ha desarrollado teorías matemáticas de estructura de mallas. Estos nuevos conocimientos han permitido el desarrollo de métodos complejos para la realización de la búsqueda de la forma, estos métodos son: El método de la densidad de fuerza y el método de la relajación dinámica, con ambos métodos se pueden calcular tanto las membranas a tracción como los cascarones a compresión. El método de la relajación dinámica no tiene en cuenta manipulaciones de la matriz, como si lo hace el método de la densidad de fuerza para solucionar el sistema de ecuaciones no lineales en equilibrio. El origen del método de la relajación dinámica se debe a Sir Richard Southwell, quien desarrolló un método de relajación para la solución de ecuaciones diferenciales.

En este trabajo se utilizará el método de la densidad de fuerzas, ya que es el utilizado para generar el modelo por computadora. El método de la densidad de fuerzas fue desarrollado para el estudio de las estructuras del Estadio Olímpico de Munich. El método usa un sistema lineal de ecuaciones para modelar el equilibrio estático de una red de cables pretensados bajo una proporción prescrita fuerza/longitud. Puede ser usado para generar la forma inicial de membranas. Requiere sólo las coordenadas de los puntos de los bordes y especificar los valores de las densidades de las fuerzas a partir de los cuales se encuentran las coordenadas interiores de la malla. Este método, propuesto por Linkwitz, cuenta con una ingeniosa estrategia que transforma un sistema de ecuaciones no lineales en un sistema de ecuaciones lineales. Debido a la medida de la matriz para su solución requiere de métodos interactivos. Sobre este aspecto volveremos a referirnos en el capítulo N° 2 (ver anexo N° 2. Método de la densidad de la fuerza)

#### 1.4. Clasificación de las estructuras móviles y su relación con las mallas pre-flectadas

Los trabajos del profesor Otto aportan clasificaciones tanto de las estructuras móviles como de las mallas por deformación, estas clasificaciones nunca se cruzaron. Primero las estructuras móviles, Otto en su libro **“Convertible Roofs”** (IL-1972), las clasifica de acuerdo con su sistema de construcción:

1. Cubiertas móviles de membranas con estructuras de soporte fijo.
2. Cubiertas móviles de membranas con estructuras de soporte móviles.
3. Cubiertas móviles con cerramientos y estructuras rígidas.


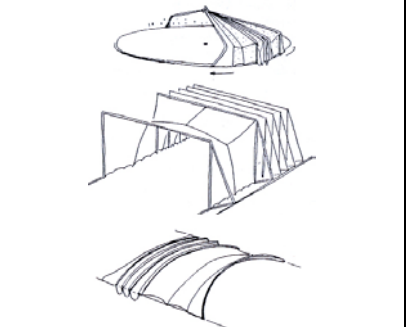
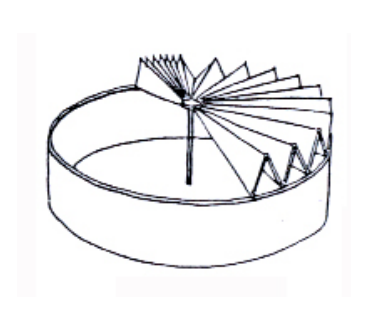
Membrana móvil con soporte fijo	Membrana móvil con soporte móvil	Estructuras rígidas móvil
		

Figura N° I-27. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: II-5

Dos años más tarde en el libro **“Grid Shell”** (IL-1974) realiza una clasificación de las mallas por deformación, de acuerdo con las condiciones de borde y de las características del interior de la malla.



1. Mallas cerradas con borde rígido. La malla es una línea suspendida a lo largo del borde rígido, puede asumir diversas forma. Éstas se pueden extender en un plano o en una superficie curvada. Pueden formar bordes rectos de un polígono o ser curvas como círculos u óvalos.
2. Mallas cerradas con borde flexible. Su desarrollo es ortogonal y compuesto por rectángulos. Están suspendidas desde sus las esquinas. El borde de las líneas de la red es flexible en forma de arcos, catenarias, parábolas, etc.
3. Mallas con borde flexible y crestas abiertas. Las crestas son abiertas einterrumpen las curvaturas de la forma global de la malla. Todas las líneas de la malla que cruzan la cresta tienen un doblaje en el punto de cruce. en su interior siempre tiene un borde flexible.

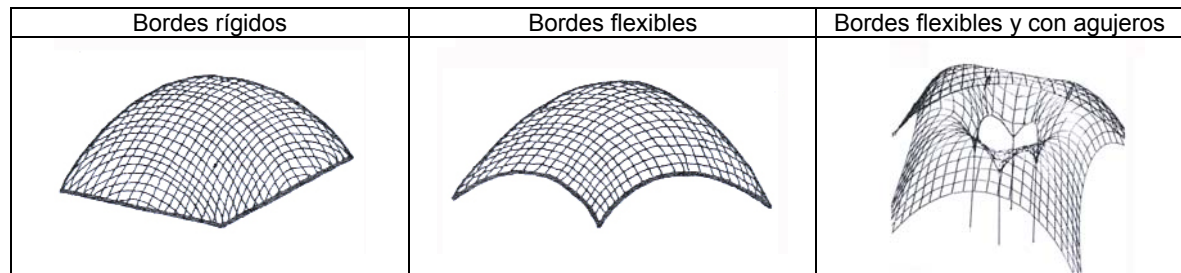


Figura N° I-28. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: IL-10

Aunque el profesor Otto desarrolló toda esta teoría de las mallas deformadas no alcanzó a construir todos los tipos de malla que encontró con su método. Están aun por definir sus requerimientos estructurales y constructivos.

En la bibliografía sobre las estructuras de rápido montaje encontramos dos clasificaciones de las estructuras móviles. Una es la realizada por el arquitecto Félix Escrig de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, en el artículo **“General Survey of Deployable in Architecture”** Escrig las clasifica de la siguiente manera:

1. Estructuras plegables textiles: son estructuras capaces de desplegarse rápidamente a través de un sistema de poleas, cables y mástiles.
2. Cubiertas en tensegrity: Siguen la tradición de las estructuras de Fuller y aunque no son desplegables, son de rápido montaje a través de un sistema tridimensional, de cables a tracción y mástiles a compresión.
3. Estructuras retractables: Son estructuras normalmente rígidas cuyos componentes se trasladan para cerrarse o abrirse a través de un sistema telescópico cilíndrico o esféricos.
4. Estructuras desplegables: Son estructuras con un movimiento tipo acordeón.
5. Estructuras de sombrilla: Son estructuras que se abren o se cierran a través de unos brazos extensibles o plegable y un mástil central.
6. Estructuras móviles: Son estructuras que se mueven completamente y tienen similitudes con los músculos y huesos de animales y de humanos.
7. Estructuras transformables: Son estructuras diseñadas a través del sistema de tijeras con nodos pasantes y terminales.

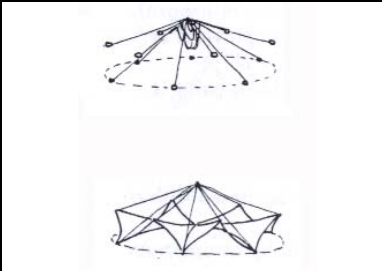
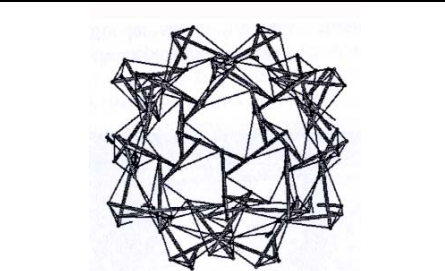
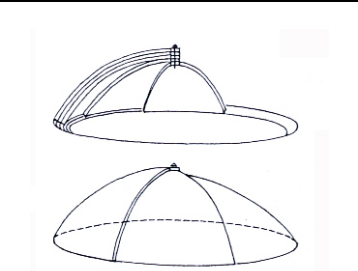
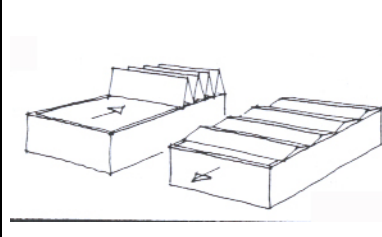
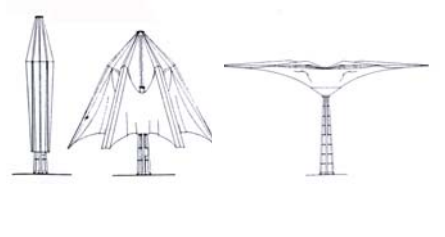
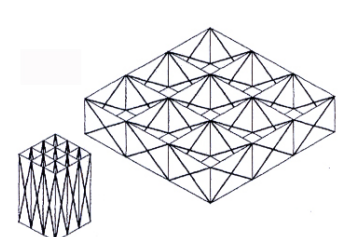
Plegables textiles	Tensegrity	Retractable
		
Plegables	Sombrilla	Transformables
		

Figura N° I-29. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: IL-5

La otra clasificación es elaborada por el ingeniero Charis Gantes (2001) en el libro: **“Deployable Structures: Analysis and Design”** Clasifica las estructuras de rápido montaje, desplegables y transformables en:

1. Estructuras de barras rígidas conectadas entre sí por el sistema tipo tijera.
2. Estructuras transformables de paneles rígidos que se transforman con sistema tipo acordeón.
3. Estructuras desplegables a través de cables y membranas textiles.
4. Estructuras transformables neumáticas. La transformabilidad es a través de la presión de aire en ductos arqueados hechos en membranas textiles.
5. Estructuras transformables por tensegrity. Combinan elementos rígidos a compresión con cables a tracción.
6. Estructuras retráctiles. Cubiertas realizadas para estadios deportivos cuyos componentes se abren y se cierran.

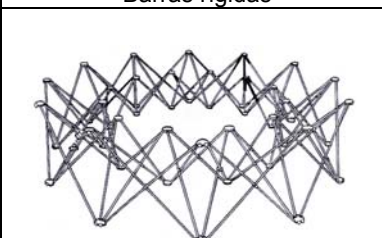
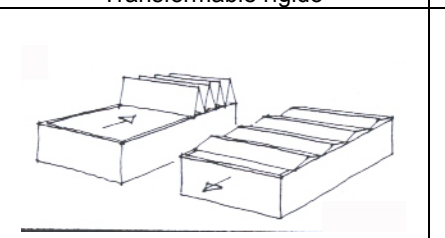
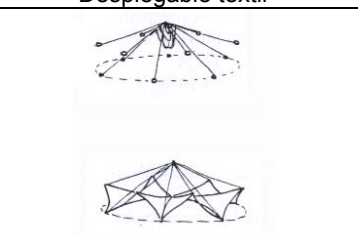
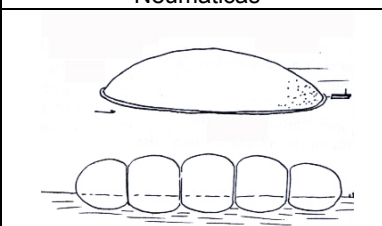
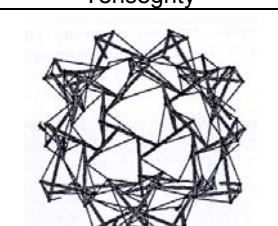
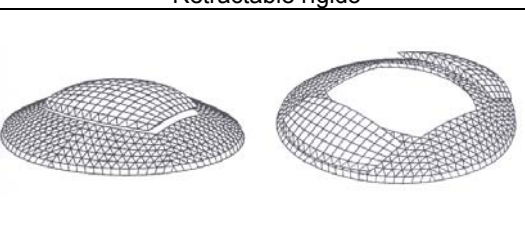
Barras rígidas	Transformable rígido	Desplegable textil
		
Neumáticas	Tensegrity	Retractable rígido
		

Figura N° I-30. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: Deployable Structure: analysis and Design

## CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Como se puede observar, no se incluye en ninguna de las clasificaciones existentes las estructuras pre-flectadas como una estructura transformable, desde nuestro punto de vista es debido a que el nacimiento de las estructuras pre-flectadas obedece más a una estrategia de construcción que a una tipología estructural, por lo que a efectos de este trabajo se aporta la siguiente clasificación de las estructuras transformables agrupadas en tres sub-grupos:

**1. Estructuras de barras articuladas** son las más estudiadas hasta ahora. Pueden ser de diferentes tipos:

Tijera, paraguas y reticulares planas o curvas. Éstas últimas se pueden definir como formas rígidas absolutamente independientes, Están constituidas por un conjunto de barras rígidas terminadas con nudos articulados, adoptando una forma final curva. Existen diversos tipos de estructuras reticulares entre las que podemos destacar: cúpulas cilíndricas trianguladas, geodésicas o esféricas.

TIPOLOGIA ESTRUCTURAL	CLASIFICACION	TIPO DE MOVIMIENTO	GRAFICO
Transformabilidad P o r P l e g a d u r a s A r t i c u l a d a s	Tipo Paraguas	Articulado Central	
	Reticulas Planas	Tipo Tijera Paralelo	
	Reticulas Curvas	Tipo Tejera curva	
			<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Esféricas</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Geodésicas</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Romboides</p> </div> </div>

Figura N° I-31. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: Elaboración propia

## 2. Estructuras por el movimiento de una superficie:

Pueden subdividirse en membranas y estructuras de superficie rígida. Dentro de éstas se pueden encontrar:

2.1 Estructuras abisagradas: este tipo de estructura se despliega como un acordeón, puede estar construida por barras o por planos rígidos unidos por una conexión flexible a lo largo de sus bordes y permite el cambio de forma.

2.2 Estructuras telescópicas: son estructuras de sección rectangular o circular que pueden entrar unas dentro de otras formando de esta manera un paquete compacto.

2.3 Estructuras retráctiles: Son estructuras rígidas construidas en partes que pueden superponerse una sobre otras por traslación o movimientos giratorios.

TIPOLOGIA ESTRUCTURAL	CLASIFICACION	TIPO DE MOVIMIENTO	DIRECCION DEL MOVIMIENTO			
			Paralelo	Central	Circular	Periferico
Transformabilidad por movimiento de una Superficie	Estructuras de Superficies en Membranas	Recogimiento				
		Enrollamiento				
		Desplazamiento				
	Estructuras de Superficies Rígidas	Rotación				
		Acordeón				
		Telescópico				

Figura N° I-32. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: Elaboración propia

Hasta este punto sólo se ha mencionado las estructuras transformables existentes, como una aportación de este trabajo, se incluirá dentro de la clasificación de las estructuras transformables las estructuras de mallas deformadas por flexión.

### 3. Estructuras pre-flectadas:

Son estructuras compuestas por barras rígidas continuas en forma de malla ortogonal que por efecto de una fuerza son capaces de flectar, deformando la malla cuadrada a rombos, cuyas diagonales coincide con las direcciones de las diagonales del cuadrado, generando formas abovedadas. Si se deforman las mallas de modo que la diagonal mayor de las mallas rómbicas resultantes sea normal a las diagonales del cuadrado primitivo se obtendrá una forma anticlástica.

		Arcos	Bóvedas
Transformabilidad por Deformación Tensional	Deformación de un Elemento Rígido		
	Deformación de una Malla Tridimensional		

Figura N° I-33. Clasificación de las estructuras transformables

Fuente: Elaboración propia

En la clasificación se propone dos líneas, la primera cuando la pre-flexión se realiza sobre un elemento en una sola dirección, como el caso de las carpas o tiendas de campaña que



presentamos anteriormente ( ver principales características de la tienda iglú. p 30), o cuando se pre-flecta una malla en dos direcciones, como los casos referenciados del “IL”.

Toda estructura transformable precisa de mecanismos en las uniones para realizar el proceso de pliegue, despliegue, abertura, cerrado o deformado. En la siguiente tabla se intenta resumir los tipos de nudos encontrados en la bibliografía, independientemente de las condiciones de las barras.


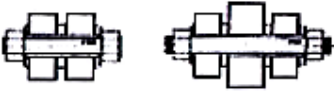


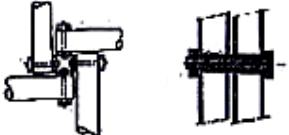
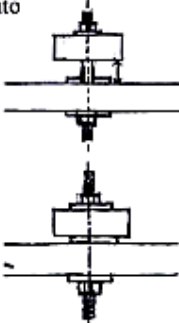
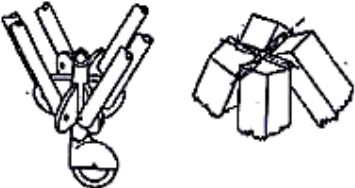
TIPO DE NODO	GRAFICO	CONDICIONES
<b>Por Rotación de la Barra</b>		Pueden llegar a el Nodo varias barras 
<b>Abisagrado</b>		
<b>Atornillado o por pasador</b>		Las holguras son necesarias para el movimiento 
<b>Por Rodamiento</b>		

Figura N° I-34 Clasificación de los nudos de las estructuras transformables

Fuente: Elaboración propia

Los dos primeros, nudos por rotación y abisagrado, son soluciones simples pueden estar ubicados en el centro de la barra o en sus extremos. Los dos últimos casos, nudo pasador y por rodamiento, son más complejos. Además de rotar la barra, cambia de posición toda la estructura. En estos tipos de nudo las holguras son un requerimiento importante para permitir el paso de la barra por sus diferentes etapas. Sobre este aspecto profundizaremos en el capítulo N° 3, referido específicamente a los nudos de mallas pre-flectadas.

La siguiente tabla resume la clasificación propuesta de las estructuras transformables relacionándola los tipos de movimiento, las formas geométricas, los mecanismos de transformabilidad y materiales con que pueden ser construidas. Se comentará sólo lo referente a las mallas deformadas, dado que servirá de base para la continuación de la investigación. Como resultado, se puede decir que el damero constituidos por barras continuas y nudos articulados, generan formas geométricas sinclásticas y anticlásticas dependiendo de la fuerza externa que actúa sobre la malla, pudiéndose construir con los materiales con capacidad para ser flectado tales como, listones de madera, perfiles de acero o de aluminio, los plásticos reforzados con fibras de vidrio, bambú y cartón.

Tipos de Transformabilidad	Descripción	Formas Geométricas	Mecanismo de Movimiento	Materiales					
				Madera	Acero y aluminio	Plásticos	Membranas	Bambú	Cartón
<b>Plegaduras de barras articuladas</b>	Formadas por barras rígidas, nudos, cables rigidizadores, elementos de cubierta y accesorios de sujeción y anclaje	Planas Dobles curvaturas Sinclásticas Cilindros Geodésicas	Se origina por acción de una fuerza manual, eléctrica o mecánica a través de poleas, tornillos sin fin, pasadores.						
				Listones de sección cuadrada rectangular circular.	Perfiles extruados o conformados en frío de sección cuadrada rectangular circular.	Perfiles por Pultrusión de sección cuadrada rectangular circular.	Como elemento de cubierta		Barras huecas de cartón realizados con varias capas de cartón encoladas
<b>Movimiento de superficies</b>	Estas superficies pueden ser rígidas o flexibles. Las rígidas son autoportantes. Las flexibles precisan de estructuras de soporte	Pueden generar formas tipo acordeón o cajas rectangulares telescópicas planas o cupulares. Las flexibles pueden generar formas anticlásticas	Normalmente cuenta con una estructura fija por donde corre la superficie. El movimiento tiene que ser coordinado.						
				Marcos de listones, tableros de compuestos, aglomerados	Láminas de acero galvanizado de aluminio	Laminas de fibra de vidrio moldeado	Telas sintéticas a base de hilo de nylon, poliéster o de fibra de vidrio, mallas reticulares de alambre, de cables o material flexible	Esterillas fabricadas desplegando las varas de bambú	
<b>Barras Pre-Flectadas</b>	Formadas por barras pasantes y continuas, articuladas con nudos, cable de estabilización, elementos de cubierta y anclajes.	Genera forma cupulares sinclásticas, bóvedas o curvaturas anticlásticas.	El movimiento se origina por acción de una fuerza externa y se realiza por la ayuda de andamios, puntales, grúas, poleas o aparatos de fuerza para lograr la deformación.						
				Listones de madera unidos o de madera laminadas.	Barras macizas o huecas redondas o cuadradas de acero o aluminio.	Barras macizas o huecas redondas o cuadrados de poliéster, fibra de vidrio o carbono.	Como elemento de cubierta y arrioste de la estructura	Varas de bambú	Barras huecas de cartón

Tabla N° I-3: Clasificación de los nudos de las estructuras transformables

Esta parte del capítulo ha servido para centrar el tema y ubicarlo en el contexto temático. El siguiente paso para continuar esta investigación fue la realización de unos ensayos previos, a través de modelos a escala, que permitieron evaluar el resultado y poder seleccionar con mayor precisión, el espaciado del damero de la malla, el patrón de las barras, tipo de nudo, forma geométrica y el material.

## 1.5 Ámbito general de la investigación

### CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

## Planteamiento del problema

La investigación está referida a las posibilidades que desde el punto de vista constructivo poseen los materiales susceptibles a ser flectados y su aproximación al problema estructural enfocado directamente hacia el diseño de cubiertas donde la optimización del factor tiempo y rapidez de construcción son importantes. Por tanto, la investigación se ubica en el campo del diseño constructivo y su desarrollo técnico en el área de las estructuras de rápido montaje, lo cual incluye estudiar los procesos de producción, los conceptos de crecimiento, transformación, ampliación, flexibilidad y reutilización, términos que los podemos englobar en el concepto de adaptabilidad constructiva de un edificio. Lo cual está referido a los aspectos relacionados con el potencial del edificio de responder activamente a diferentes necesidades del usuario y requerimientos constructivos. Esta forma de ver el hecho construido se traduce en construcciones ligeras. En este sentido, las estructuras de rápido montaje pueden ser un ejemplo de adaptación constructiva.

Una cubierta ligera es fácil de transportar, desplazar y puede ser flexible. Por tanto, el problema planteado está enfocado hacia la resolución constructiva de un sistema que relaciona forma, estructura, materiales, proceso constructivo, montaje y su aplicación de uso, la cual pueda favorecer el desarrollo de refugios o cobijos permitiendo, si es posible, su combinación urbana. La forma de la cubierta deberá contemplar su producción con geometrías estables y en equilibrio, cuyas uniones permitan el montaje y el desmontaje de una construcción que precise de menos material.

La viabilidad constructiva de realizar la cubierta bajo métodos y técnicas alternas, implica unos esfuerzos adicionales al nivel de diseño y de producción que pueden incidir en los costos de fabricación. Es parte del problema de esta investigación la viabilidad técnica de obtener formas cupulares por curvas de flexión, la búsqueda de la forma y el cerramiento de la cubierta con membrana textil colaborante en la estabilidad estructural del módulo en su rigidización, así como también las formas de apoyo y su combinación con otros módulos.

La investigación parte de un conjunto de preguntas directrices que intenta responder a lo largo del trabajo

**¿Puede deformarse una malla dispuesta en damero previamente plana formada por barras continuas unidas por nudos articulados, preflexando sus componentes para obtener una cubierta transformable estable y en equilibrio, arriostrada con una membrana textil pretensada y cuyo comportamiento en conjunto no comprometa el límite elástico, si lo tiene, de los materiales y sus resistencias admisibles?**

Esta pregunta directriz se puede complementar con las siguientes preguntas específicas:

¿Qué condición geométrica debe cumplir la malla plana para transformarse y llegar a ser una estructura cubierta?

¿Qué método de montaje se debe emplear para introducir el pre-flectado, sin que se presenten roturas, deformaciones no deseadas ni desequilibrios?

¿Qué condición deben cumplir los nudos para permitir la transformación geométrica y resistir la flexión?

¿Cuál debe ser la relación entre las fechas de los arcos y las luces a cubrir?

¿Cuál debe ser la relación entre el peso global de la cubierta y el área?

La membrana que arriostra, ¿Deberá estar apoyada sobre la malla o colgada?

¿Cómo deberían ser los anclajes?

¿Qué exigencias deben cumplirse para que la malla pueda volver a su estado inicial plano, ser plegada nuevamente, y transportada a otro lugar?

## Objetivo General

Diseñar un sistema de cubierta aplicando los principios técnicos de las estructuras de rápido montaje, con método constructivo de malla la deformada por preflexión de las barras para generar un espacio habitable.

### Objetivos Específicos

- Profundizar en el estudio y desarrollo de los sistemas de rápido montaje como método constructivo basado en barras continuas, nudos articulados y cerramiento textil.
- Desarrollar un sistema estructural basado en componentes estructurales de poco peso, fácil ensamblaje, pocos elementos y procesos productivos racionalizados cuya fabricación pueda ser llevada a cabo en taller para luego erigir la cubierta en sitio. Desarrollar una cubierta cuya tecnología permita la adaptabilidad del espacio habitable, transformabilidad y la reutilización de los componentes.

### Metodología de la investigación

La investigación tuvo una orientación técnica apoyada en actividades experimentales y documental, para lo cual se estructuró en dos fases:

Fase conceptual inicial

Abarcó un estudio bibliográfico y de estudio de casos. Los temas abordados fueron los referentes a la arquitectura ligera, la flexibilidad, adaptabilidad y transformabilidad orientadas al diseño de refugios.

Las estructuras de rápido montaje y los sistemas de tensión orientados al estudio de la taxonomía y clasificación de la tipología, geometría, generación de la forma, y los fundamentos técnicos y constructivos.

Contenido del estudio bibliográfico

Marco teórico en que se fundamenta la investigación, en cuanto a: Método de búsqueda de la forma, geometría, descripción de los componentes constructivos (materiales, detalles, uniones, dimensiones y condiciones de apoyo). Proceso de montaje. Los resultados de esta fase fueron expuestos en la primera parte de este capítulo

Fase de desarrollo experimental.

Esta fase se realizó siguiendo la estructura definida por H. Berger (1996) para abordar un proyecto de diseño estructural. Abarca tres etapas: el diseño conceptual, donde se contemplan las variables del contexto temático y la generación de alternativas de carácter exploratorio para su evaluación y selección. La segunda etapa está referida a la elaboración de modelos de simulación computarizada para determinar el comportamiento y prevenir aspectos colaterales no deseados como las deformaciones y colapsos. La tercera etapa esta definida por la realización del diseño de componentes y detalles constructivos, haciendo especial énfasis en los nudos. En esta etapa se determinará la forma estructural y el dimensionamiento del módulo. Sobre este esquema de Berger habría que comentar que las tres etapas fueron interdependientes por lo que los resultados se afectaban entre sí unos a otros, estableciéndose un camino interactivo de ida y vuelta entre las etapas, teniendo en muchos casos que revisar resultados de etapas anteriores para avanzar.



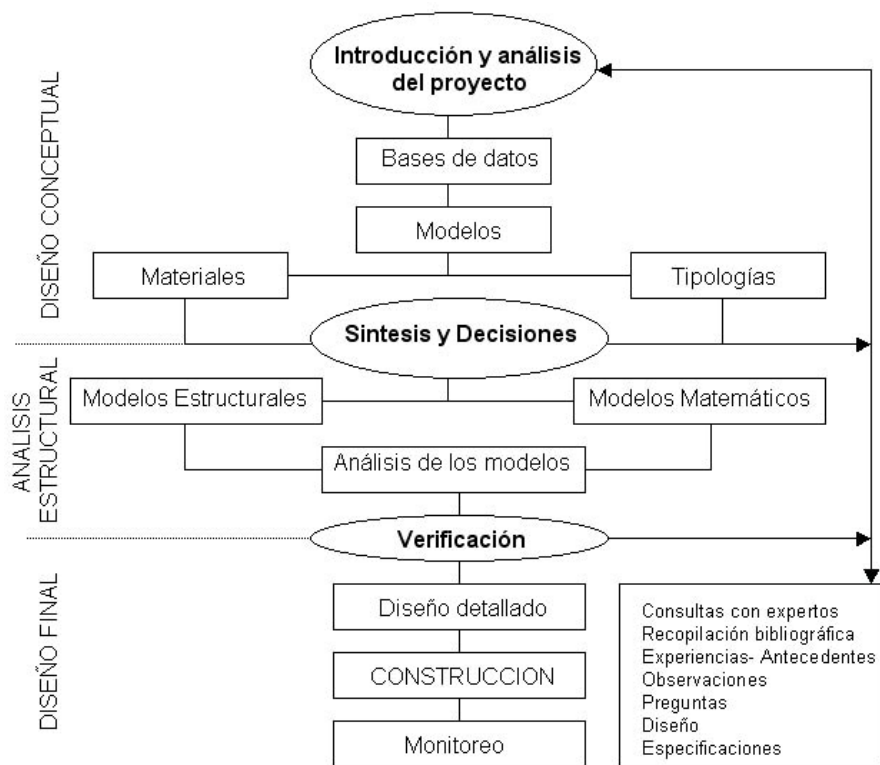


Figura Nº I-35 Esquema conceptual. H. Berger

Fuente: Light structures structures

Todas estas actividades serán expresadas de manera predominantemente gráfica debido a la naturaleza del lenguaje arquitectónico (fotografías, gráficos y dibujos). Para la aplicación como edificación se simulará utilizando programa de computación. En esta fase será necesario organizar y procesar la información recopilada a través de tablas, cuadros resumen y árboles morfológicos.

En la introducción de cada capítulo se hablará sobre la metodología utilizada en forma más particular señalando los objetivos específicos del capítulo, las preguntas directrices que se intentan responder, la perspectiva metodológica, los recursos y herramientas.

### 1.6. Estudios iniciales, ensayos previos y análisis comparativo de prototipos experimentales

Estos ensayos preliminares tuvieron los siguientes objetivos:

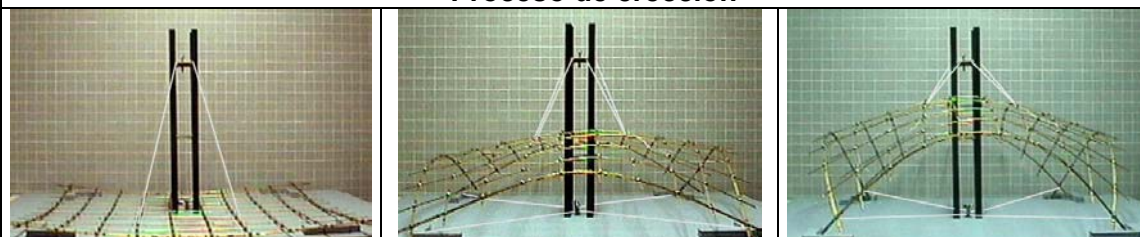
1. Demostrar la viabilidad de estudiar la preflexión de las barras rígidas como método constructivo para la generación de la forma.
2. Estudiar la generación de la forma con diferentes materiales.
3. Estudiar el método de erección de la cubierta y sus implicaciones constructivas.
4. Resolver problemas constructivos y de estabilidad estructural.
5. Demostrar la capacidad transformable de la malla por deformación.

Se realizaron tres modelos a escala 1:10 con materiales diferentes (barras macizas de acero, listones de madera contra-chapada y barras huecas de poliéster). Se construyó un primer prototipo a escala natural que sintetizó estos estudios. Es de destacar que estos modelos se realizaron en el marco de Maestría en Desarrollo Tecnológico de la Construcción del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (FAU-UCV) y financiados por el CDCH-UCV. Seguidamente se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

## Modelo de barras de acero

Tipo de material	Longitud de barra	Espacio entre barras	Tipo de nodo	Holgura
Barras de acero $\Phi 3$ mm.	1 m.	Barras dobles cada 10 cm.	Tornillo pasante con arandelas.	Desplazamiento restringido en los nudos y grados de libertad por presión del tornillo.

### Proceso de erección



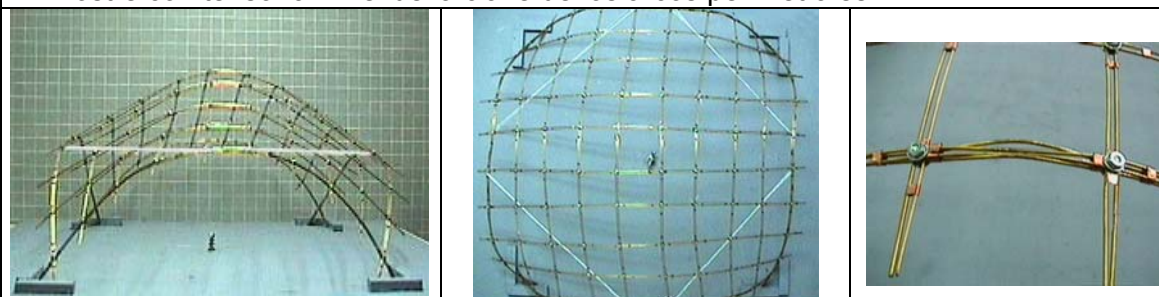
### Resultados

#### Comportamiento de la malla

- En el centro de la malla se mantiene la ortogonal y comienza a variar el ángulo hacia el perímetro tomando forma de rombo hacia las esquinas.

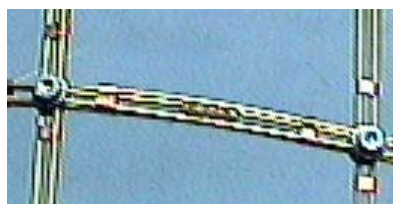
#### Comportamiento de los arcos

- Los arcos están definidos por 4 barras.
- El empuje lateral causado por los componentes de la malla hace que los arcos tomen una curva de flexión hacia fuera.
- Como son 4 barras formando los arcos perimetrales estos tienden a unirse entre los nudos si no hay separadores.
- Arriostre con tensor al nivel de la clave de los arcos perimetrales.



#### Características del nudo:

Nudo con tornillo pasante, doble arandela y tuerca con tope para evitar que las barras se abran durante el proceso de deformación. Este nudo permite la rotación de la barra y para evitar su desplazamiento se colocaron bloqueadores.



Cuadro N° I-1: Resultados del modelo de barra de acero

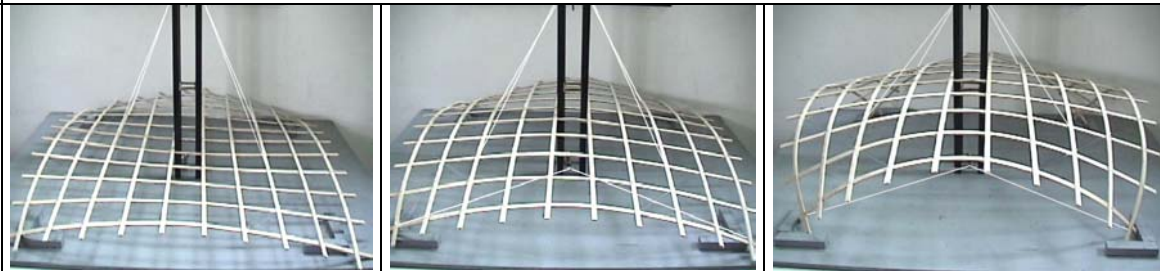
## Modelo de barras de listones de madera

Tipo de material	Longitud de barra	Espacio entre barras	Tipo de nodo	Holgura
			Pasador	Restricción de

### CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Tiras de maderas ancho: 10 mm e: 2 mm	1 m	10 cm	Con refuerzo en los arcos y sin refuerzos en la malla.	desplazamiento y libertad de rotación.
---------------------------------------	-----	-------	--	--

**Proceso de erección**



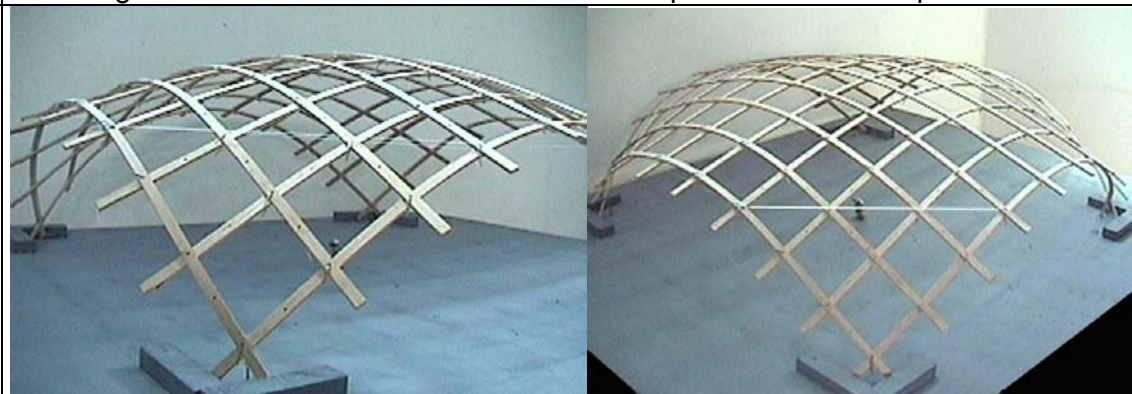
**Resultados**

**Comportamiento de los arcos**

- Los arcos están definidos por un listón sencillo.
- Los empujes horizontales de la malla hacen que los arcos generen una curva de flexión hacia fuera.

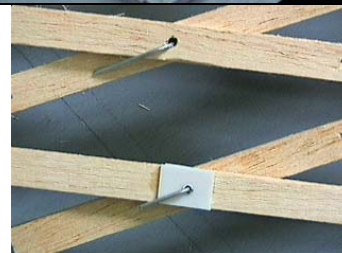
**Comportamiento de la malla**

- Los listones madera se deforman de manera uniforme.
- Para rigidizar la malla se colocó un cable tensor que atravesaba las pechinas.



**Características del nudo**

El nudo es un pasador que atraviesa la tira de madera. Se refuerza la zona del nudo con una lámina plástica en el arco para evitar la rotura.



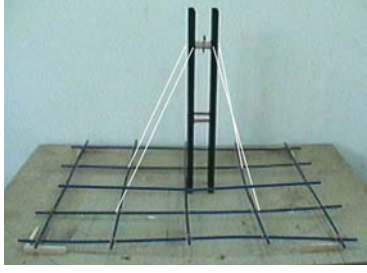

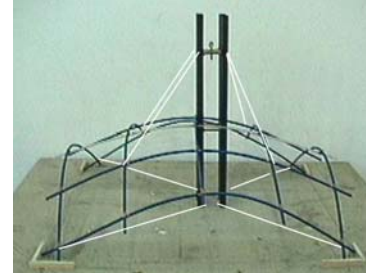
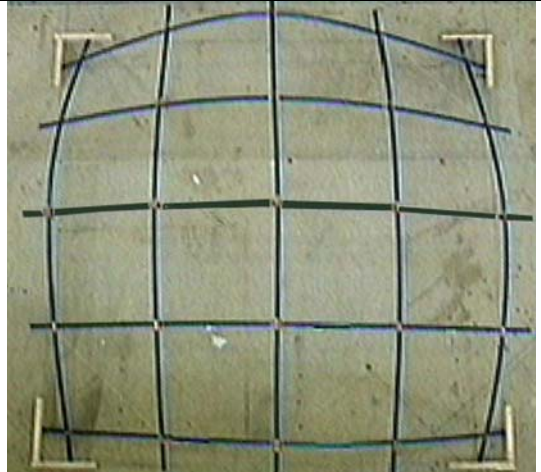


Cuadro N° I-2: Resultados del modelo de barra de madera

**Modelo de barras de perfiles huecos de poliéster con fibra de vidrio**

Tipo de material	Longitud de barra	Espacio entre barras	Tipo de nudo	Holgura
Tubos de fibra de vidrio D: 5 mm	1 m	10 cm	Pasador con refuerzo.	Restricción de desplazamiento y libertad de giro.

**CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

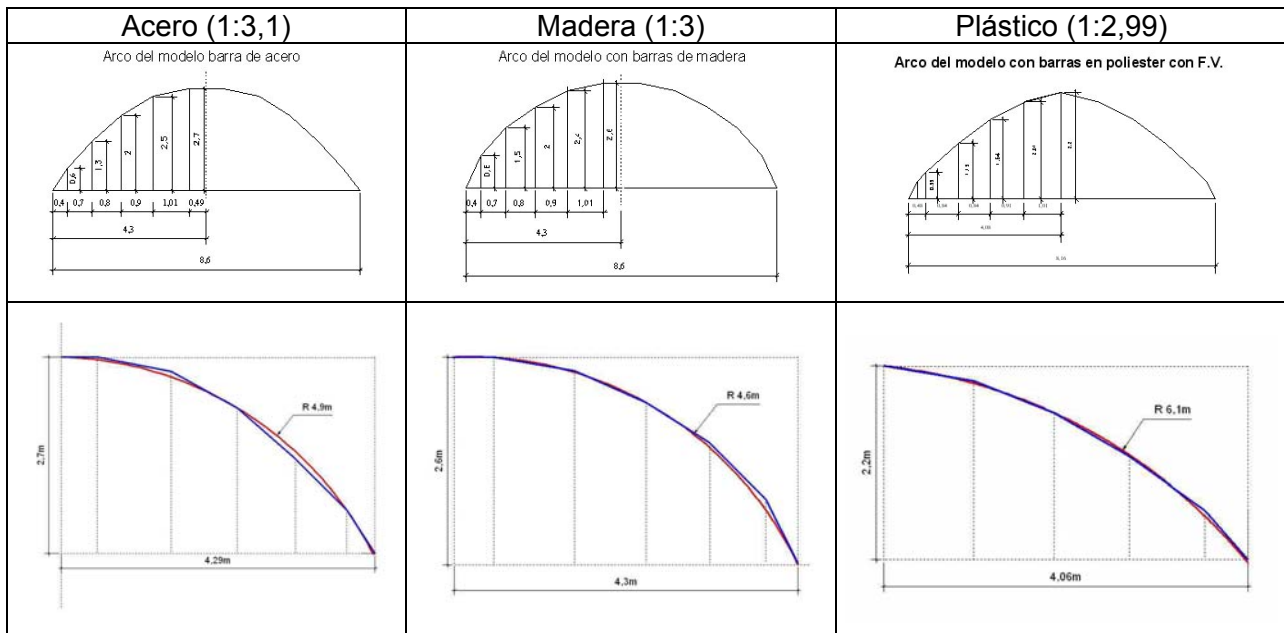


<b>Proceso de erección</b>	
	
	
<b>Resultados</b>	
<p><b>Comportamiento de los arcos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los empujes horizontales de la malla hacen que los arcos tiendan a abrirse con una curva de flexión hacia fuera.</li> <li>- Si la fuerza que actúa sobre el arco no es uniforme en su magnitud tiende a deformarlo.</li> </ul>	
<p><b>Comportamiento de la malla</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Al ser el material un perfil que tiene mayor inercia, hay mayor resistencia a la deformación y se gana en rigidez global de la malla.</li> </ul>	
	
<p><b>Característica del nudo</b></p> <p>El nudo es un pasador que atraviesa los tubos de fibra de vidrio y se refuerza en los puntos cercanos al perímetro ubicados en la clave del arco.</p>	

Cuadro N° I-3: Resultados modelo en barra de plástico

Como conclusión de este estudio inicial se compararon los resultados de la deformada de los arcos perimetrales obteniendo que la relación flecha/luz de todos los modelos obedecían a una proporción de 1:3. También se puede observar que el modelo construido en madera obtuvo una curva de flexión más regular. A nivel del proceso de erección las barras de plástico poliéster con fibra de vidrio fueron las que mejor se comportaron y su relación luz/peso es la más favorable, por el contrario el modelo de barras de acero presenta como desventaja su peso.





Cuadro N° 1-4: Resultados comparativos de arcos

Para estudiar más estos resultados geométricos se compararon los arcos obtenidos con un arco de circunferencia. Bien sabemos que estos arcos no responden a ecuaciones regulares, ya que son curvas de flexión, pero pueden orientar a la hora de seleccionar el material. La línea marcada en rojo es el radio de circunferencia y en azul el arco obtenido por flexión.

De las tres comparaciones se observa como el arco que más presenta desavenencias es el de barra maciza de acero. En ese mismo orden el arco de madera presenta desavenencias hacia la parte del extremo inferior y el arco de perfil plástico es el que presenta menos diferencia presentándose éstas hacia el final del arco

### 1.7. Estudio comparativo entre una malla de borde abierto y una malla de borde cerrado. Geometrías y características constructivas

Dentro de las formas sinclásticas existen dos tipos de mallas por deformación: la malla de bordes abiertos y la de bordes cerrados. A continuación se presenta un análisis comparativo entre ellas con el objetivo de determinar sus ventajas y desventajas.

Para la cúpula sinclástica de bordes abiertos seleccionamos la experiencia del autor en la construcción de un modelo experimental a escala natural, construido en la planta experimental el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC-FAU-UCV). Para la cúpula sinclástica de bordes cerrados seleccionamos un prototipo experimental construido en la Escuela de Arquitectura del Vallés (ETSAV-UPC) por el profesor José Montero de la Universidad Autónoma de México. Los parámetros de comparación serán los siguientes:

- a- Método de obtención de la forma
- b- Método de erección y montaje.
- c- Dimensionamiento de la malla inicial y final.
- d- Reacciones (peso propio).

e- Características constructivas: (Nudos, barras y anclajes)

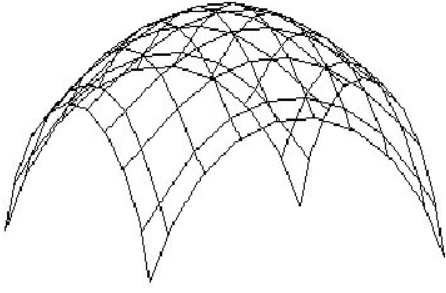
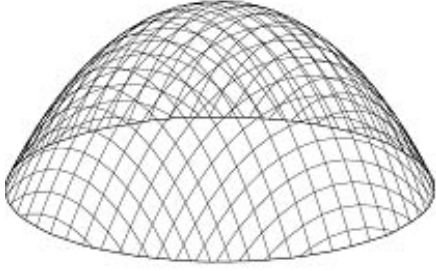

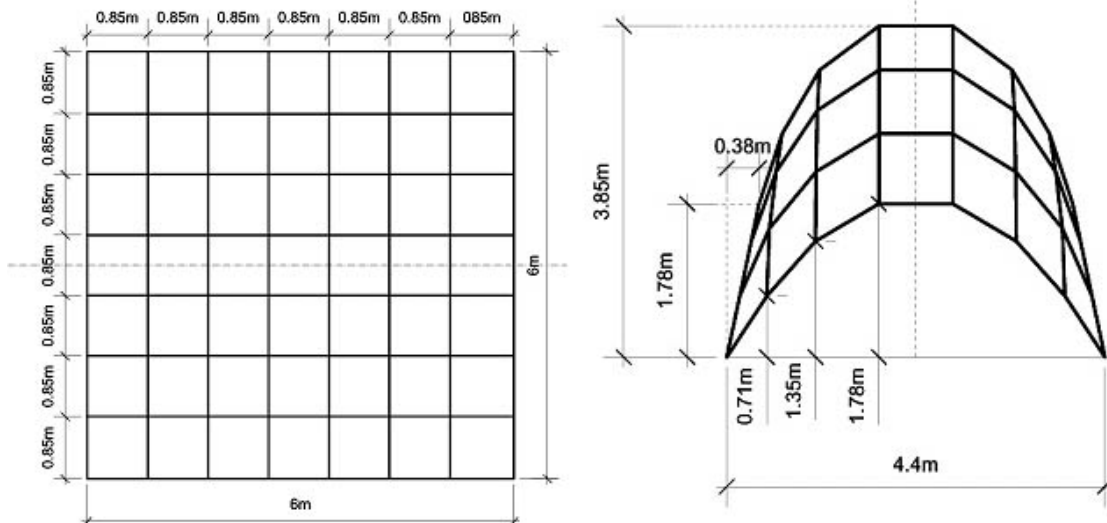
Cúpula de borde abierto	Cúpula de borde cerrado
	
<p>Descripción: Superficie sinclástica con cuatro arcos perimetrales, apoyada en cuatro puntos. Conformada por una malla ortogonal, compuesta por barras de acero macizo de 3/8", de igual longitud (6 m).</p>	<p>Descripción: Superficie sinclástica perimetralmente apoyada, conformada por una malla ortogonal, compuesta por barras de perfil hueco de acero de 1/2" con dimensiones diferentes siguiendo un patrón.</p>

Figura N° I-36. Cúpula de borde abierta y de borde cerrado

### Cúpula de Borde Abierto

Obtención de la forma	
	<p>La búsqueda de la forma fue por el método de curvas de flexión, que consiste en pre-flectar las barras hasta conseguir una forma geométrica habitable.</p>
<p>Se construyó una malla con barras de 6 metros de longitud, con separaciones de 0.85 metros entre nudos obteniendo una cúpula de 4.4 x 4.4 m y 3,85 de altura. La ventaja que ofrece la malla con esta configuración geométrica es que todos los componentes de barras tienen igual longitud.</p>	

### Dimensionamiento inicial y final



La simulación por computadora consistió en construir una malla de hilos plana, someterla a una presión en los nudos con signo positivo aumentando gradualmente esta carga hasta que produjese la deformación de la malla. Esta simulación es incompleta para nuestro estudio, ya que para generar la forma no toma en cuenta las propiedades del material, sin embargo, podemos hacer un estudio de los ángulos de los rombos, razón por la cual la realizamos con daderos de 85 cm

Cuadro N° I-5: Resultado de la obtención de la forma de la cúpula abierta

### Método de erección y montaje

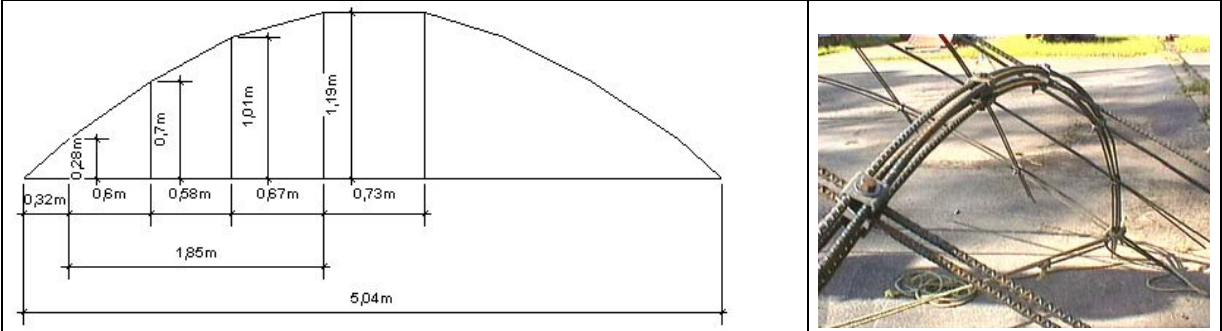




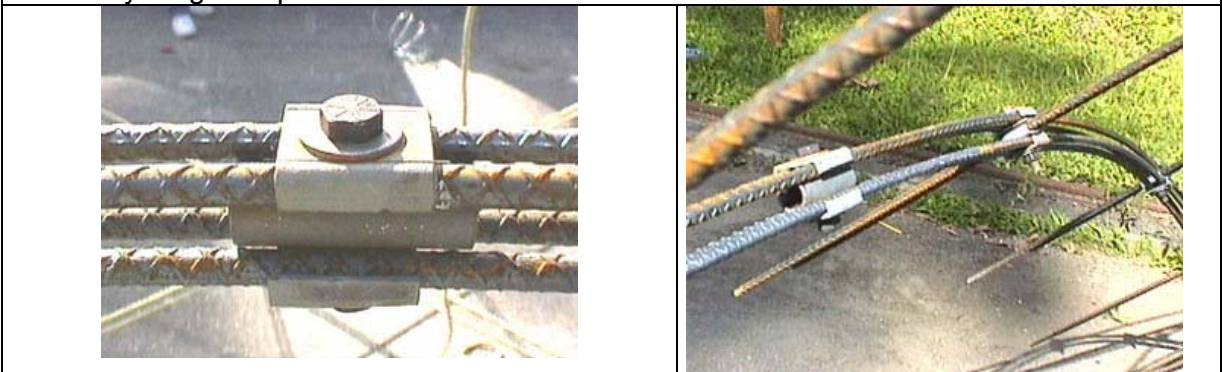
En el prototipo se levantó la malla plana desde el suelo con una grúa hasta alcanzar su posición final, logrando que el proceso de erección fuera homogéneo repartiendo las cargas uniformemente en todas las barras e introduciendo la pre-flexión, comprobándose que los nodos funcionaron correctamente al permitir el giro de las barras.

El proceso de izado de la malla duró 5 min. Luego, el bloqueo de los nudos tardó 30 min., con un total de cuatro operarios.

Como la barra es maciza de 3/8 para lograr estabilizar la malla fue necesario introducirle un cable continuo al nivel de las claves de los arcos

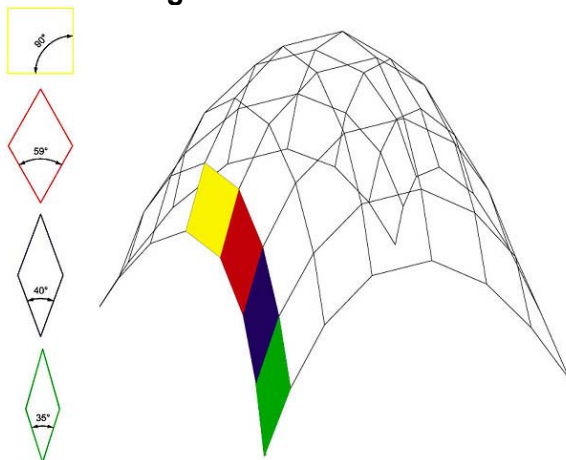


Se obtuvo un arco cuya relación flecha/luz es de 1:2,4 lo que indica que faltó continuar el proceso de erección hasta alcanzar la relación 1:3. Esto se debió a que el arco de borde tiene mayor rigidez que la malla.



Para evitar que las barras del arco se separasen o se unieran se colocaron separadores entre los nudos, éstos separadores contaban con una abrazadera y un sistema de presión por tornillo y tuerca que durante el proceso de erección están "flojos" facilitando de esta manera la deformación de la malla.

### Condiciones geométricas



Para que la malla se deforme y logre alcanzar la forma, es necesario que los nudos permitan la rotación de la barra transformando la malla ortogonal inicial en rombos con ángulos más agudos a la medida que se acercan a las cuatro esquinas, alcanzando un valor mínimo de 35°. Por lo tanto, el diseño de los nudos es más complejo

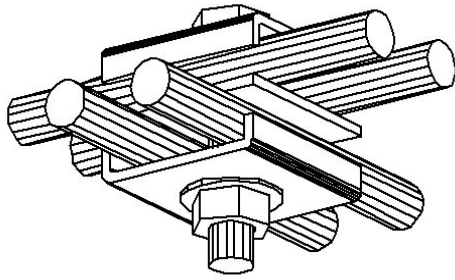
Cuadro N° I-6: Resultado de la erección y montaje de la cúpula abierta

## CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

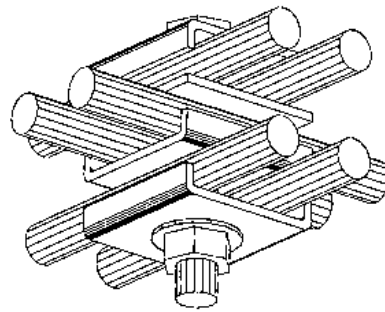


## Nudos y barras de la cúpula de borde abierto

Nudo de la malla



Nudo del arco



Son nudos complejos porque, además, de sostener las barras e impedir su desplazamiento deben permitir el giro de las mismas.

El prototipo se realizó con barras maciza razón por la cual, fue necesario desarrollar un nudo que las abrazara, el cual esta formado por una pletina doblada en forma de "U" con un agujero en el centro para permitir el paso del tornillo de presión.

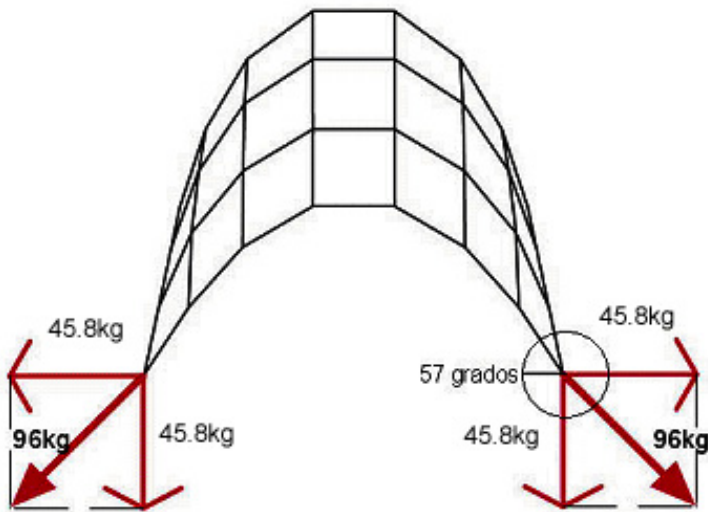
### Anclaje



Para la cúpula de borde abierto el anclaje al suelo se realiza a través de los terminales de los arcos produciendo un apoyo. Este apoyo puede ser superficial aplicándole pesos o atirantado. Esté último se puede realizar atirantando las diagonales de la cúpula o desarrollando un detalle para anclar la cúpula al suelo mediante ganchos o bases metálicas soldadas o apernadas.

Cuadro N° I-7: Resultado de los nudos y anclajes de la cúpula abierta

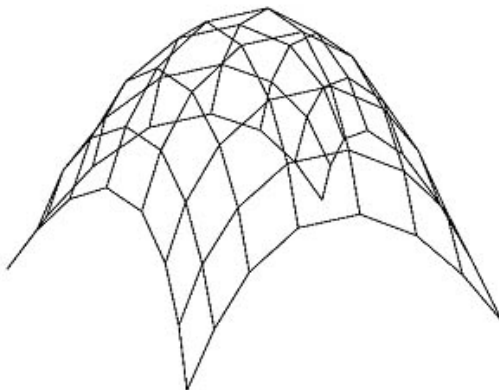
### Reacciones por propio peso



Tipo de Barra	acero macizo
Diámetro	3/8"
Longitud	6 m
Cantidad de barras	40
Peso de la barra/m.l.	0.556 Kg/ml
Peso de la barra	3.33Kg/ml
Peso de la malla	133,4 kg
Peso del nodo	1kg
Peso total nodos	50kg
Peso Total	183,44kg
Área cubierta	19,36 m <sup>2</sup>
Peso/m <sup>2</sup>	9.47kg/m <sup>2</sup>

En este caso, las reacciones se concentran en los cuatro puntos de apoyo. Otro aspecto importante es el peso total de la estructura (160kg) lo que hace que su maniobrabilidad y transporte sea dificultoso

### Acceso



El acceso queda conformado una vez erectada la cubierta a través de los cuatro arcos perimetrales

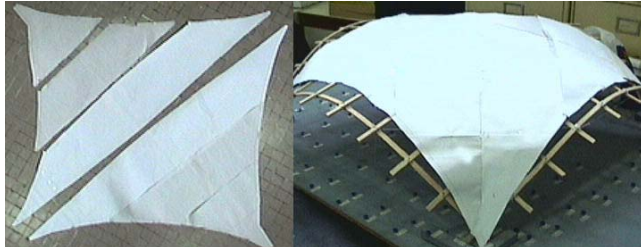
Cuadro N° I-8: Resultado de las reacciones y acceso cúpula abierta

Este estudio no incluyó los cerramientos. Sin embargo, se puede proponer alternativas como los cerramientos con membranas y rígidos, de las que habría que estudiar su viabilidad y evaluar su condición de colaborante estructural en la rigidización global de la malla.

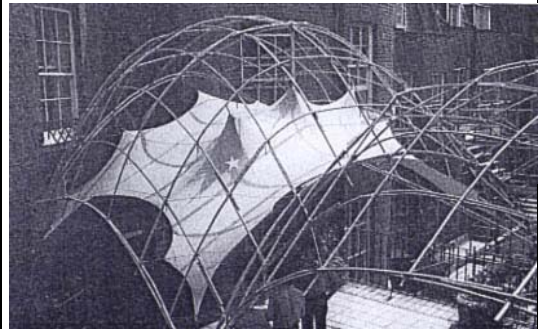
## Alternativas de cerramientos

### Cerramientos con membranas

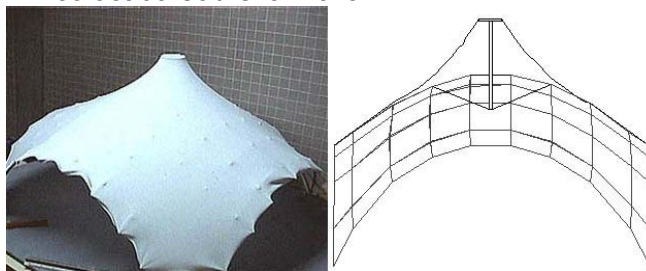
Membrana textil siguiendo la forma de la malla



Membrana textil con formas anticlásticas colocada dentro de la malla



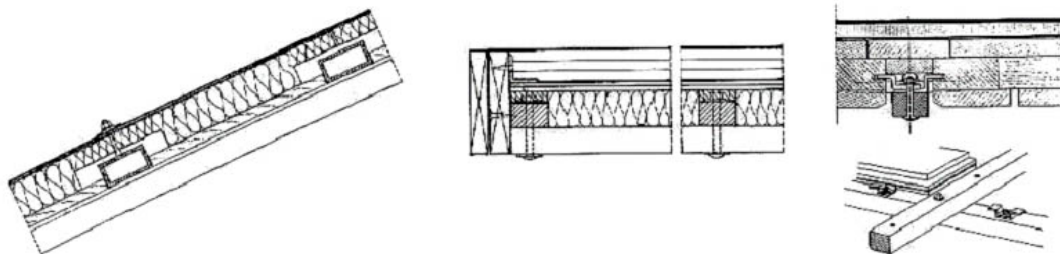
Membrana textil con formas anticlásticas colocada sobre la malla



También se pueden estudiar cerramientos tales como almohadones inflados

### Cerramientos rígidos

Colocando paneles rígidos sobre los marcos de la malla (madera, lámina metálica, fibra de vidrio) solapados o curvados de acuerdo a la curvatura de la cúpula de malla.



La selección de estas alternativas de cerramiento dependerá de la aplicación y del uso interior del espacio. Si se trata de una cúpula para un uso efímero, itinerante y transportable los más adecuados son los cerramientos ligeros como las membranas o láminas. Tienen la ventaja de cubrir toda la superficie sin necesidad de despieces complicados. Para edificaciones más estables tales como viviendas u otras que requieran mayor control de los factores ambientales, sería preferible optar por cerramientos como el ferro-cemento o paneles más elaborados, como el tipo sándwich, vidrio o madera machihembrada, entre otros. Teniendo en cuenta que los ángulos de la malla varían en cada rombo de la red, los paneles tendrán que adaptarse a esta condición y en consecuencia pueden elevar los costos de fabricación.

Cuadro N° 1-9: Resultado del cerramiento

## CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

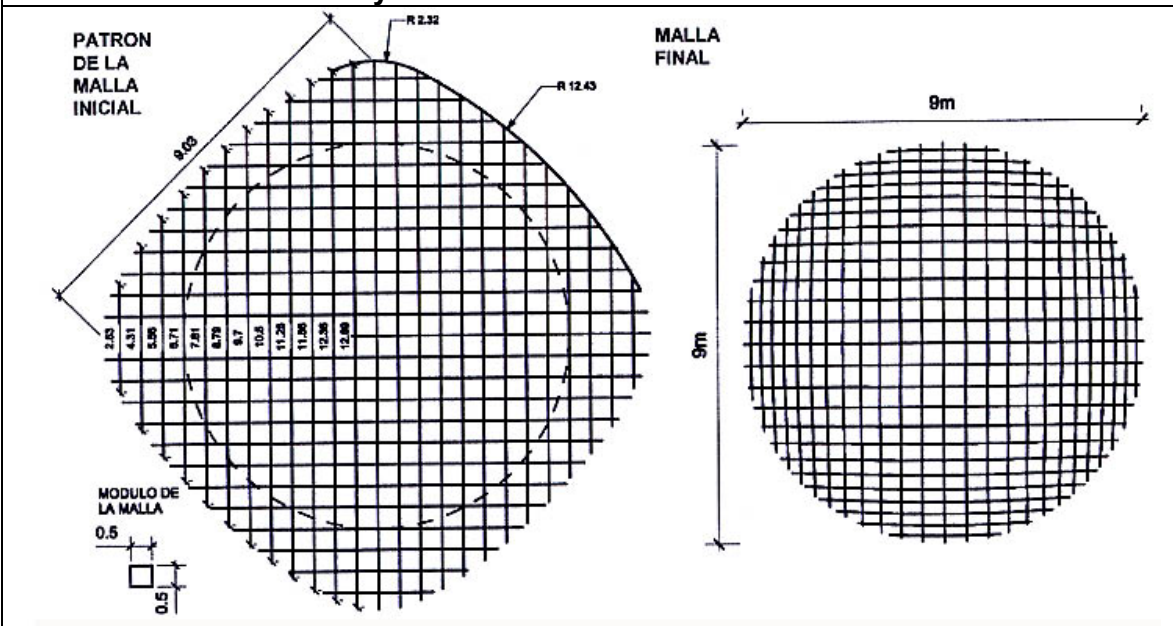


## Cúpula de Borde Cerrado



Modelo con cadena colgante que posteriormente se trasladó a un modelo de barra rígida de madera.  
La diferencia entre la curva de flexión y la catenaria es despreciable dada la poca sección de la barra de madera.

### Dimensionamiento inicial y final



La retícula estaba conformada por una malla ortogonal con separaciones entre nudos de 0.50 metros para generar una cúpula de 9 metros de diámetro.  
Para lograr que la malla deforme correctamente y alcance la geometría deseada de planta circular, es necesario realizar un trabajo previo de patronaje de las barras cuyo conjunto debe tener un perfil curvo de diferentes radios de curvaturas resultando que cada barra del cuarto de la circunferencia tiene una medida distinta.

Cuadro N° I-10: Resultado de la obtención de la forma de la cúpula cerrada



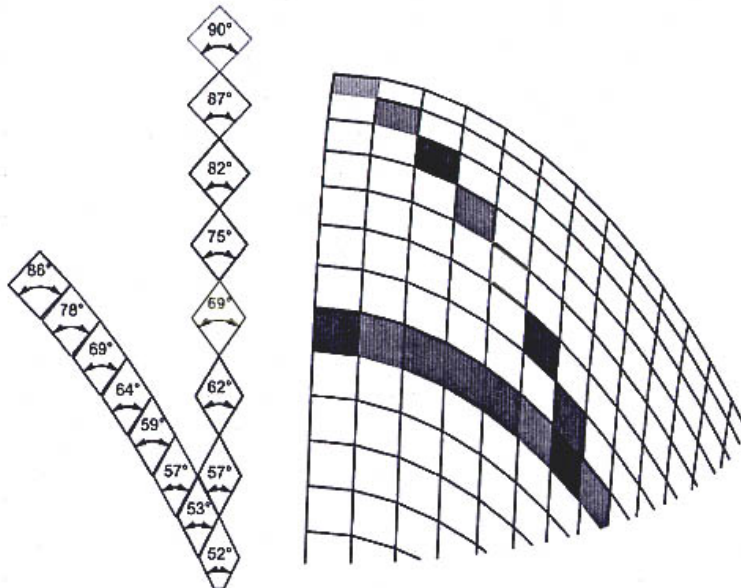
## Método de erección y montaje



La malla se colocó a 90 centímetros del piso para facilitar su erección que se izo con la ayuda de una grúa. Para realizar este proceso se requiere, por un parte, que el borde final este preparado con anterioridad y, por otra, la participación de muchos operarios que ayuden a colocar la malla en su posición.

El proceso de izado dura 5 min., y el de anclaje un promedio unos 15 min para un total aproximado de 20 a 30 min., Al encontrarse perimetralmente apoyada no es necesario bloquear los nudos.

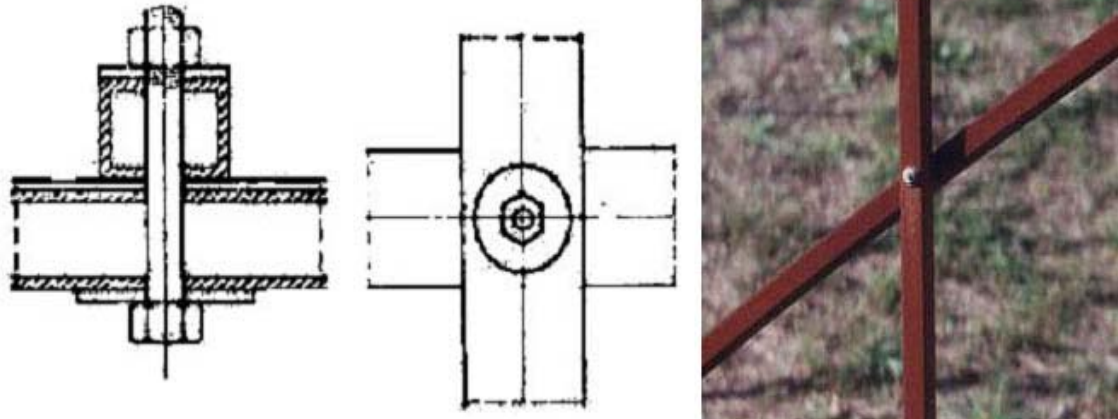
## Condiciones de la malla



La rotación de las barras es más gradual cuando su rango oscila entre los 90 a 50 grados, lo que significa que los nudos pueden ser muy sencillos.

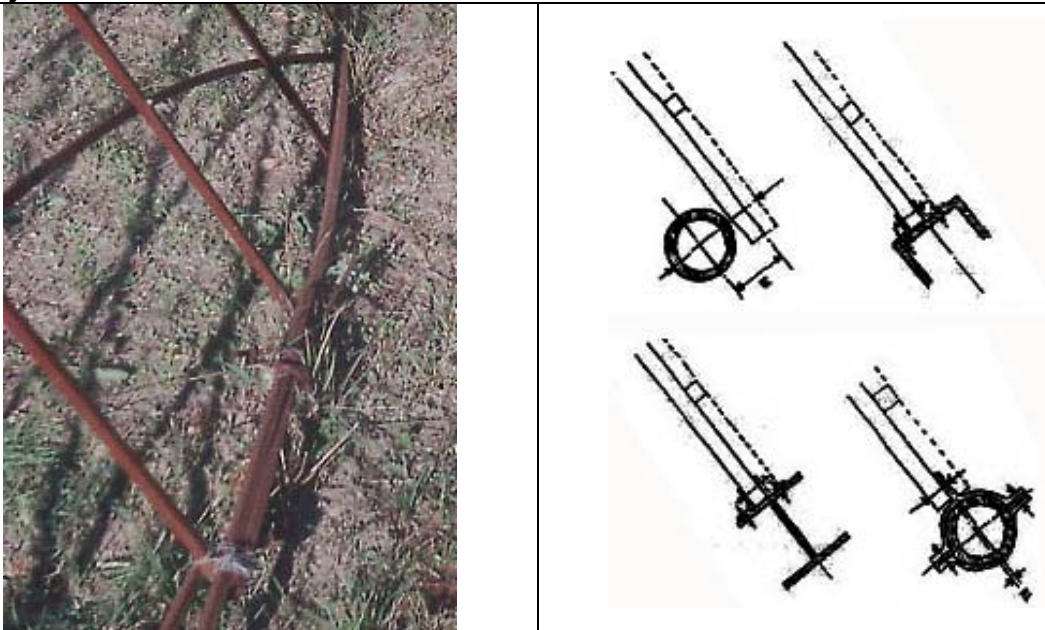
Cuadro N° I-11: Resultado de la erección y montaje de la cúpula cerrada

### Nodos y barras de la cúpula de borde cerrado



En este caso se resolvió con un tornillo pasante que atraviesa la barra y permite el giro restringiendo el desplazamiento. La ventaja de esta configuración geométrica es la simplicidad que se puede alcanzar en el nudo.

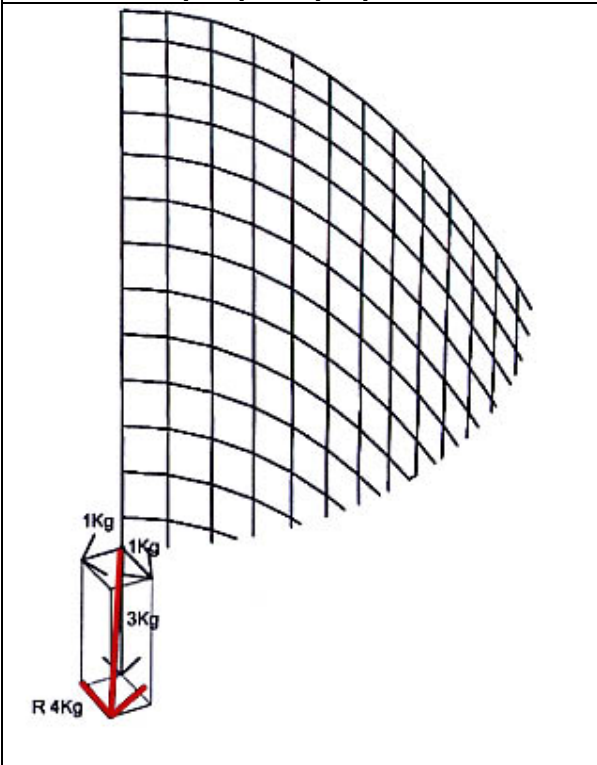
### Anclaje



Para la cúpula de borde cerrado las barras se cortan y se unen al perímetro preparado y colocado sobre el terreno. Este perímetro debe estar anclado al terreno.

Cuadro N° I-12: Resultado de los nudos y anclajes de la cúpula cerrada

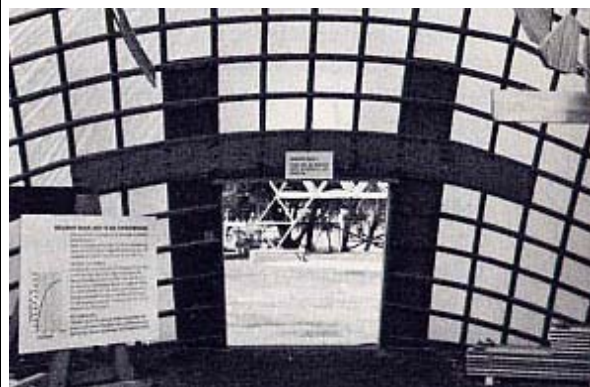
## Reacciones por peso propio



Al estar repartida la carga a todo lo largo del perímetro los detalles constructivos se simplifican.

Tipo de Barra	Tubular cuadrado
Diámetro	1/2"
Longitud	variable
Cantidad de barras	52
Peso de la barra	variable
Peso de la malla	195,8 kg
Peso del nodo	0.01kg
Peso total nodos	5kg
Peso Total	2005,8kg
Área cubierta	63,6 m <sup>2</sup>
Peso/m <sup>2</sup>	31,53

## Acceso



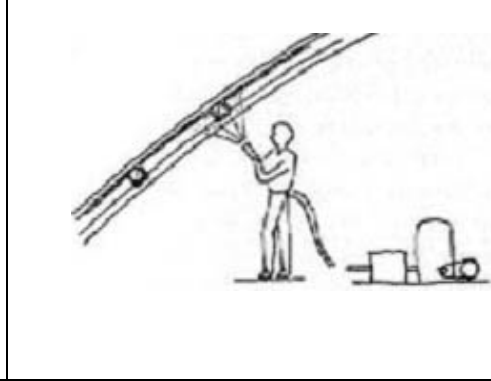
Para generar el acceso hay que realizar operaciones post proceso de erección y abrir un agujero en la malla desde el nivel del piso. Esta abertura tendrá que ser reforzada con una estructura suplementaria que absorba los esfuerzos de este sector de la malla. Otra manera, para no debilitar la malla, es abrir un acceso subterráneo o apoyar la cubierta sobre una estructura. En todo caso, siempre habrá que realizar obras extras al montaje.

Cuadro N° I-13: Resultado reacciones y acceso cúpula cerrada



## Cerramientos rígidos

- Colocando sobre la red una malla de alambre y proyectarle ferro-cemento



Cuadro N° I-14: Resultado del cerramiento

## Comparativa del estudio geométrico-constructivo

Como conclusión de este estudio comparativo se destaca lo siguiente:

### Borde Abierto



- La malla es de barras de igual longitud y ortogonal, lo cual significa que se puede prescindir del modelo para la búsqueda de la forma.
- Precisa de rigidización adicional como cables, cerramientos, etc.
- Mayor complejidad en el diseño de los detalles constructivos.
- Concentración de esfuerzos en los arcos y en las esquinas.
- Requiere sólo 4 operarios para su montaje, lo cual simplifica el proceso de erección.
- El anclaje puede ser superficial o atirantando entre sí las diagonales de los arcos

### Borde Cerrado



- La malla es ortogonal y con barras de diferentes longitudes siguiendo un patrón, lo que hace necesario la utilización de un modelo para el cálculo de las longitudes de las barras.
- Al estar apoyada en el perímetro no precisa de rigidización.
- Detalles constructivos simples.
- Reparte los esfuerzos de manera homogénea en todo el perímetro.
- Requiere de 6 a 8 operarios para el proceso de montaje, lo cual hace compleja la coordinación de todo el personal
- Requiere la construcción previa de un perímetro para anclar los terminales de las barras.



- La conformación geométrica de los arcos perimetrales resuelve el acceso.
- Para permitir el acceso se requiere de una estructura independiente que, al cortar la malla, absorba los nuevos esfuerzos.

Tabla N° I-4: Comparativa entre la cúpula abierta y cerrada

Luego de realizar estos ensayos y modelos experimentales podemos determinar las siguientes exigencias que toda malla pre-flectada obtenida bajo el método de las líneas de flexión deberá cumplir para su diseño y construcción:

Los nudos deberán estar diseñados para cumplir las siguientes exigencias:

- 1.1 Permitir el paso de la barra y su transformación de la posición plana a la posición deformada, otorgando suficientes grados de libertad en los ángulos, sin que las barras se suelten ni que se produzcan desplazamientos entre ellas, comportándose como un mecanismo.
- 1.2 Minimizar el roce durante el proceso de deformación para evitar el desgaste excesivo de los componentes y piezas o la fluidez necesaria en el movimiento.
- 1.3 Permitir su rigidización para su comportamiento como estructura.
- 1.4 Permitir la sujeción y colocación del cerramiento.
- 1.5 Durante el montaje los nudos de las bases deberán ser articulados para que no se produzcan momentos de flexión en los extremos de las barras de los arcos.

Durante el proceso de elevación de la malla, las barras en flexión se deforman entre los puntos de levantamiento y los nudos que no están apoyados. Cuando los nudos están flojos, la malla está en la condición de carga de colapso, siendo es igual a su propio peso. Sólo después de haber bloqueado nudos e impedir los movimientos de rotación y fijar las barras a los bordes pasa a ser una forma estructuralmente estable.

Las grandes deformaciones en las barras y sus respectivos giros así como los movimientos de los nudos, suceden durante el proceso de erección donde las barras son sometidas a curvatura. Si estos giros y movimientos son impedidos por alguna razón constructiva o por fricción entre las piezas, pueden ocurrir tensiones excesivas sobre la barra que pueden causar el colapso de algunos miembros estructurales de la malla. Es por esto, que los nudos, durante el proceso de erección, tienen que girar libremente y sujetar correctamente la barra, dado que ésta se encuentra en un estado muy inestable y susceptible, ante cualquier fuerza externa, por ejemplo una ráfaga de viento. Si esto ocurre, puede generar un proceso de erección desbalanceado o desigual apareciendo tensiones muy peligrosas que pueden causar daños a los componentes de malla.

Es importante iniciar el proceso de bloqueo de los nudos desde el centro hacia el perímetro de la cubierta. De esta manera se van distribuyendo hacia los extremos los errores o pequeñas diferencias de dimensionamiento o de holguras.

Para el diseño de este tipo de estructura, se pueden mencionar los siguientes pasos derivados de las experiencias anteriores:

- 3.1 Determinación de la forma de la cubierta con el método de la suspensión, curvas de flexión o por herramientas informáticas, es recomendable que se realicen tanto los modelos físicos como por computadora para establecer las diferencias y verificar si son despreciables o por el contrario son significativas y aplicar los correctivos.

- 3.2 En formas irregulares habrá que estudiar la incidencia del viento sobre la superficie por lo que se hará necesario un ensayo de túnel de viento.
- 3.3 El proceso de erección y montaje tiene que estar completamente estudiado, tanto sus pasos secuenciales como los esfuerzos que se producen durante el mismo. De esta manera se evitan roturas de los miembros de la malla. Lo ideal es que el estudio incluya tanto modelos físicos como informáticos.
- 3.4 Elección del material y la sección de la barra tomando en cuenta sus propiedades mecánicas de resistencia. En el caso de usar un material nuevo es necesario realizar las pruebas de límite elástico, compresión, tracción, torsión y flexión
- 3.5 Determinar el radio de curvatura mínimo de la barra seleccionada para su manejo de acuerdo con los radios de curvatura de la forma global de la cubierta.
- 3.6 Estudio de los esfuerzos iniciales para la deformación de la malla tomando en cuenta que las barras estarán pre-flectadas, sin descuidar los esfuerzos de corte, torsión y axial.
- 3.7 Diseño de los nudos para que permitan la rotación de la barra y restrinjan su desplazamiento.
- 3.8 Diseño de las condiciones de borde y anclaje de la malla.
- 3.9 Diseño del cerramiento y sus anclajes a la malla.
- 4.10 Dependiendo del material y el uso de la edificación será necesario el estudio de protección contra el fuego.

En este capítulo pudimos definir y clasificar las mallas deformadas como una estructura pre-flectada transformable, se comprobó la viabilidad técnica de la propuesta con los ensayos previos, de los cuales se obtuvieron lineamientos para el diseño y construcción de estas mallas.

Para concluir este capítulo se seleccionó la cúpula de borde abierto construida en plástico para continuar la investigación, dado que simplifica el proceso de búsqueda de la forma al tener un solo patrón de barra y no requiere obras extras al terminar su proceso de montaje.

Con respecto al material, el plástico reforzado con fibra de vidrio, otorga prestaciones dada su alta resistencia sobre todo a la flexión, que es el esfuerzo principal en este tipo de mallas, y la relación peso / área cubierta, por lo que es conveniente para una estructura ligera portátil transformable.

De los aspectos negativos de la cúpula de bordes abiertos podemos mencionar la mayor complejidad en el nudo, ya que se le exige además de sujetar la barra, permitir la rotación de la barra y resistir la pre-flexión. En este caso, como se propone el plástico como material para continuar la investigación, no se podrá perforar, ya que es un material frágil. También se puede mencionar la complejidad en los anclajes porque las tensiones están concentradas en cuatro u ocho puntos, lo cual plantea retos interesantes que superar.

En el siguiente capítulo profundizaremos en el estudio de las mallas pre-flectadas con el análisis estático, tanto de la forma, como de las deformaciones por cargas externas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS AL FINAL DEL CAPITULO

- [1] Bunn Stephanie, 2002. "Viviendas autóctonas flexibles y móviles", en Living in Motion. Diseño y arquitectura para una forma de vida flexible. Vitra Desing Museum. Zurich, pag. 133-171.
- [2] Gili, Gustau, 2002, Casas-Refugio , Editorial Gustavo Gil, Barcelona, pag. 10-56.
- [3] Otto Frei, 1974. "Grid Shells" IL-10. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, pag. 10-20.
- [4] Happold Edmund, 1976. "Calculation of the Shell", en IL-13 Multihalle Mannheim. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, pag. 60-98.
- [5] Richard Harris, Oliver Kelly - Buro Happold, 2003. "The structural engineering of the Downlan
- [6] Williams Chris, 2000. "The definition of curved geometry for widespan structures", en Widespan Roof Structures. Spo Press. University of Bath, UK. pag. 41-49.
- [7] Bubner, Ewald, 1976. "The form-finding of the grid shell of Mannheim", Op cit [4],. pag. 33-40.
- [8] Happold Edmund, "Calculation of the Shell". Op cit [3], pag. 38

## INDICE DE FIGURAS

- Figura Nº I-1: Vivienda indígena de la selva amazónica venezolana
- Figura Nº I-2: Vivienda efímera y transformable de Mongolia, Asia Central, denominada Yurta
- Figura Nº I-3: Vivienda efímera de los Tuareg. África, desierto del Sahara.
- Figura Nº I-4: Sistema de unión tipo tijera
- Figura Nº I-5: Trayectoria de las innovaciones técnicas de las estructuras ligeras y de las estructuras transformables
- Figura Nº I-6: Aplicaciones constructivas de la catenaria en la construcción
- Figura Nº I-7: Aplicaciones de refugios de montaje rápido
- Figura Nº I-8: Aplicaciones de refugios de montaje rápido
- Figura Nº I-9: Aplicaciones de refugios de montaje rápido
- Figura Nº I-10: Aplicaciones de refugios de montaje rápido
- Figura Nº I-11: Aplicaciones de refugios de montaje rápido
- Figura Nº I-12: Aplicaciones de refugios de montaje rápido
- Figura Nº I-13: Refugios comerciales
- Figura Nº I-14: Refugios experimentales
- Figura Nº I-15: La tienda
- Figura Nº I-16: Formas comerciales de la tienda
- Figura Nº I-17: Comportamiento de la barra de la tienda
- Figura Nº I-18: Aplicaciones de las mallas deformadas Prototipo Experimental
- Figura Nº I-19: Aplicaciones de las mallas deformadas Prototipo Experimental
- Figura Nº I-20: Aplicaciones de las mallas deformadas en la cubierta de malla para Multi-Hall. (pabellón) Mannheim
- Figura Nº I-21: Aplicaciones de las mallas deformadas a la cubierta de malla para Multi-Hall. (pabellón) Mannheim
- Figura Nº I-22: Nudos cubierta Mannheim
- Figura Nº I-23: Aplicaciones de las mallas deformadas a Vivienda Unifamiliar
- Tabla Nº I-24: Aplicaciones de las mallas deformadas al "Gridshell of the Downland Museum".
- Figura Nº I-25: Ecuación de equilibrio de la catenaria
- Figura Nº I-26: Modelos colgantes por catenaria
- Figura Nº I-27: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-28: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-29: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-30: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-31: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-32: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-33: Clasificación de las estructuras transformables
- Figura Nº I-34: Clasificación de los nudos de las estructuras transformables
- Figura Nº I-35: Esquema conceptual del desarrollo de la investigación propuesto por H. Berger

## CAPITULO 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Figura N° I-36: Cúpula de borde abierto y de borde cerrado

### **INCIDE DE CUADROS**

Cuadro N° I-1: Resultados del modelo de barra de acero  
Cuadro N° I-2: Resultados del modelo de barra de madera  
Cuadro N° I-3: Resultados del modelo de barra de plástico  
Cuadro N° I-4: Resultados comparativos de arcos  
Cuadro N° I-5: Resultados de la obtención de la forma de la cúpula abierta  
Cuadro N° I-6: Resultado erección y montaje cúpula abierta  
Cuadro N° I-7: Resultado de los nudos y anclajes de la cúpula abierta  
Cuadro N° I-8: Resultado de las reacciones y acceso de la cúpula abierta  
Cuadro N° I-9: Resultado del cerramiento  
Cuadro N° I-10: Resultado de la obtención de la forma de la cúpula cerrada  
Cuadro N° I-11: Resultado de la erección y montaje de la cúpula cerrada  
Cuadro N° I-12: Resultado de los nudos y anclajes de la cúpula cerrada  
Cuadro N° I-13: Resultado de las reacciones y acceso de la cúpula cerrada  
Cuadro N° I-14: Resultado del cerramiento

### **INCIDE DE TABLAS**

Tabla N° I-1. Datos técnicos de las tiendas  
Tabla N° I-2. Datos técnicos de la barra  
Tabla N° I-3: Clasificación de los nudos de las estructuras transformables  
Tabla N° I-4: Comparativa entre la cúpula abierta y cerrada