

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA



ESTRUCTURAS LIGERAS

“METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO
CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

ERNESTO NORIEGA ESTRADA

MMVII



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTRUCTURAS LIGERAS
“METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO
CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA PRESENTA:

ERNESTO NORIEGA ESTRADA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

MMVII

DIRECTOR DE TESIS

DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS

SINODALES

MTRO. FRANCISCO REYNA GÓMEZ

MTRO. JAN VAN ROSMALEN JANSEN

DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

MTRO. JUAN GUILLERMO GERDINGH LANDÍN

AGRADECIMIENTOS

Gracias por la oportunidad de encontrar un nuevo camino en la travesía por esta vida tan hermosa, por las personas que amo y las que me aman.

A mi hija Alexa Sabina Noriega que me dio la felicidad más grande que pude experimentar al ser padre, y por todos aquellos momentos que pasamos juntos y por lo que nos tuvimos que privar.

A la Arq. Mónica Adriana Martínez por todo su apoyo incondicional, cariño puesto en el trabajo y arduas jornadas, el logro obtenido también es tuyo, gracias por existir y mantenerte siempre a mi lado.

A mis padres Ignacio Noriega R. y María Concepción Estrada M., quienes me cobijaron y se preocuparon por mí en todo momento, gracias por su ejemplo y el amor que me tienen. A mis hermanas Evangelina y Rosa que siempre preguntaron por mí.

A todos mis sobrinos que con un ¿cómo te fue hoy tío? ó ¿cómo te ha ido tío Erne? Me motivan a platicar sobre mis avances y con reciprocidad a ayudarlos en lo que puedo.

A mi tutor el Dr. Oliva y mis sinodales Mtro. Reyna, Mtro. Rosmalen, Dr. Agustín Hernández, y Mtro. Gerdingh, quienes me dedicaron parte de su tiempo, extraordinarias enseñanzas y sabios consejos que sirvieron de guía para este documento.

Con un especial recuerdo al Arq. Francisco Montero López., a mis maestros Jorge Rangel Dávalos, Horacio Olmedo Canchola y Ernesto Ocampo Ruíz, que en los talleres de investigación sirvieron como un excelente apoyo para la formación del trabajo.

A mis compañeros de maestría: Olivia, Pablo, Erick, Claudia, Emanuel, Adolfo y Toño, con quienes compartí momento gratos durante el período que duro nuestra estancia en la Universidad, gracias por su amistad.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

ÍNDICE

	PÁG.		PÁG.
INTRODUCCIÓN		V. ESTRUCTURAS ESPACIALES	
I. MARCO TEÓRICO		Principios	38
Antecedentes de la investigación	10	Aplicaciones	39
Planteamiento del problema	11	Trazo geométrico	42
Objeto de estudio	11	• Espacial base cuadrada	
Objetivos	12	• Espacial base triangular	
II. COMPROMISOS DEL MARCO DE INVESTIGACIÓN		Modelos de estudio	48
Epistémico	13	Maquetas estructurales experimentales	49
Ontológico	14	VI. CÚPULA SEMIESFÉRICA	
Pragmático	15	Principios	54
Procedimental	16	Aplicaciones	55
Innovación u originalidad	17	Trazo geométrico	58
Clasificación de las estructuras	18	Desarrollo de plantilla	60
Hipótesis	19	Modelos de estudio	61
III. ANTECEDENTES HISTÓRICOS		Maquetas estructurales experimentales	63
El objetivo histórico	21	VII. SUPERFICIES SINCLÁSTICAS	
El origen de las primeras moradas	21	Principios	70
Primeras formas	22	Aplicaciones	71
La evolución de la forma	26	Trazo geométrico	72
Estructuras en el mundo moderno	27	Desarrollo de plantilla	76
Félix Candela en México	30	Corte en plantilla	78
IV. ESTRUCTURAS LIGERAS EN MÉXICO		Modelos de estudio	79
Estructuras anticatenarias	32	Maquetas estructurales experimentales	83
Modelos catenarios	32		
Modelos de madera y aluminio	33		
Jaulas del Zoológico de Chapultepec	35		
Cubierta de Lobby	36		

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

	PÁG.
VIII. SUPERFICIES ANTICLÁSTICAS	
Principios	88
Aplicaciones	90
Trazo geométrico	92
Desarrollo de plantilla	95
Corte	97
Modelos de estudio	99
Maquetas estructurales experimentales	102
IX. SUPERFICIES TORALES	
Principios	111
Aplicaciones	112
Trazo geométrico	114
Desarrollo de plantilla	117
Corte	118
Modelos de estudio	119
Maquetas estructurales experimentales	121
X. ESTRUCTURAS GEODÉSICAS	
Principios	127
Aplicaciones	128
1er. trazo geométrico	132
Desarrollo de plantilla del 1er. trazo	140
2do. Trazo geométrico	141
Desarrollo de plantilla del 2do. trazo	151
Modelos de estudio	152
Maquetas estructurales experimentales	154
CONCLUSIONES	
GLOSARIO DE TÉRMINOS	
REFERENCIAS	

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

INTRODUCCIÓN

La capacidad de producción que tiene una sociedad determina su propio desarrollo, así como lo que produce y la manera en que lo hace. Las investigaciones sobre los procesos de producción y diferentes métodos para obtener bienes pueden depender del nivel económico de un país y de la inversión en la generación de conocimiento. La tecnología es conocimiento aplicado derivado de la ciencia que trata de explicar los fenómenos, tal es el caso, de la ciencia de los materiales como la nanotecnología que permite aplicaciones en la arquitectura.

Con relación a los sistemas estructurales y constructivos, estos avances marcan un cambio entre los sistemas tradicionales, como por ejemplo los sistemas de marcos rígidos que requieren de costosas cimentaciones, columnas y trabes robustas de concreto armado, con peso considerable y tiempos de ejecución prolongados comparados con sistemas de estructuras ligeras que se oponen a estos procesos. En nuestro país, se han desarrollado interesantes investigaciones y ejemplos sobre cascarones de concreto, velarias y espaciales, entre otras; que demuestran las enormes ventajas de estas estructuras. Con este motivo se pretende desarrollar una metodología para el diseño de estructuras ligeras, con base en el trazo geométrico de estructuras y superficies como las espaciales, media esfera, sinclástica, anticlástica, toral y geodésica.

Previo a esto, se desarrolla el marco teórico destacando en la hipótesis cinco aspectos importantes que no dependen de su comprobación, sino de estar sujetas a revisión y expuestas a la refutación. Estos aspectos son el tiempo, costo, sistema constructivo, transportes y materiales, para continuar con antecedentes y ejemplos reales.

La Metodología que plantea la tesis sistematiza una serie de pasos que ayudan a comprender la estructura por diseñar. A manera de introducción se comenta el surgimiento y los principios básicos estructurales, subsecuentemente se presentan imágenes de obras arquitectónicas que ilustran las posibilidades y aplicaciones con la finalidad de motivar a continuar con el diseño. A través del trazo geométrico se explica paso por paso como obtener la superficie y los patrones o medidas necesarias para construir un modelo. Éste tiene la finalidad de corroborar medidas y observar su comportamiento a empujes o cargas, además inicia con el planteamiento de materiales y procedimientos constructivos. Se concluye con la ejecución de la maqueta experimental que evalúa los aspectos que dieron origen a las hipótesis.

Comprender que las técnicas se pueden aprovechar para dar solución a la propia problemática en nuestro país; es decir, que se pueden emplear materiales y procedimientos que son comunes o posibles en nuestro país. Por ejemplo, cortar placas de acero y unir las con soldadura para conformar diferentes nodos y poder así construir geodésicas o espaciales con la disposición de recursos a nuestro alcance y mayor trabajo en el campo de la arquitectura que considere las mejores condiciones de solución. Cumplir con los objetivos mantiene vivo el reto de continuar con el trabajo, pero mejor aún sería el que fuera de utilidad para los interesados en este tema.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

I.- MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El avance tecnológico a finales del siglo XX, da como resultado la construcción de estructuras ligeras con los mismos principios que rigen en el universo. La tracción gravitacional o la morfología de seres vivos inspiran a formas estructurales innovadoras.

Así uno de los grandes logros de la arquitectura e ingeniería son las estructuras livianas como algunos autores las nombran, donde la técnica facilita el desarrollo de modelos ligeros y estables.

A la fecha se han desarrollado infinidad de sistemas estructurales como los sistemas MERO^R en Alemania, TOVER en China o ADRIANN'S DE MÉXICO, aunque en nuestro país se ha adquirido el conocimiento de esa tecnología, es evidente la necesidad de utilizarlo pero adecuado a nuestra realidad con materiales económicos y durables.

En el laboratorio de cubiertas ligeras de la Universidad Autónoma Metropolitana, mi amigo y maestro, el arquitecto Francisco Montero López, q.e.p.d. comenzó con ensayos que empleaban el ferrocemento como material principal para superficies plegables, y después otras más con superficies regladas.

Actualmente se han hecho varios modelos estructurales que responden al trazo geométrico de diferentes estructuras *plegadas y, espaciales, así como de revolución, sinclásticas y anticlásticas*; por mencionar algunas. A partir de la construcción de estos modelos me di cuenta de la importancia de la FORMA como parte importante para la resistencia de una estructura sin dejar que sólo el material tome los esfuerzos como tradicionalmente se hace.

Así se ha iniciado el estudio de estructuras ligeras y las formas que éstas producen al trabajar con tracción o compresión, como las neumáticas que trabajan a tracción o las redes de cables y velarias que también lo hacen a tracción con la conjunción de elementos portantes como mástiles o arcos que trabajan a compresión y las reticulares anticatenarias, que lo hacen a compresión (aunque en su cimentación intervengan elementos que trabajan con diferentes esfuerzos).

Se construyeron también modelos cuyo diseño estaba pensado para usarse con redes de cables o velarias, sin embargo, se terminó empleando mortero de cemento-arena en la cubierta, para dar a conocer un sistema ya utilizado desde hace mucho tiempo y posteriormente otros sistemas “más actuales”.

Con estos últimos se pudo apreciar cómo una estructura traccionada y sumamente delgada de un centímetro de espesor aproximadamente, se convertía después del fraguado en una superficie con esfuerzos a compresión, con lo que cambiaba radicalmente su forma de trabajo, sin que existiera en ningún momento esfuerzo cortante.

Posteriormente, en la impartición de asignaturas dentro de la carrera de arquitectura de la UAM-A, se inició con el Diseño de Sistemas Estructurales aplicados a las estructuras ligeras. El sistema de enseñanza consistía en mostrar ejemplos de construcciones hechas en diferentes parte del mundo para después pasar al diseño a través del dibujo hecho con instrumentos tradicionales (escuadras, compás y regla “T”) y concluir con propuestas constructivas. De esta manera se inicia este documento que intenta mejorar el proceso incluyendo la explicación detallada del trazo con geometría de algunas estructuras, con la asistencia de programas como Autocad para obtener modelos y maquetas experimentales que rebasan ampliamente el conocimiento teórico.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la antigüedad los materiales empleados en la construcción eran sumamente pesados, y por lo tanto la cimentación también lo era, además de ser costosas y con tiempos prolongados para concluir la obra. La tecnología aplicada a la arquitectura, permitió reducir el peso en la construcción con diferentes sistemas de cimentación. Sin embargo, no deja de ser un problema el utilizar materiales pétreos debido al volumen, acarreo, acomodo y las restricciones para cubrir grandes claros. En ocasiones resulta necesario emplear maquinaria pesada para el acomodo de elementos de gran tamaño justificado solo por la modulación y repetición para que sea flexible y no incremente el costo de por sí excesivo debido al volumen de construcción. Algunos sistemas tradicionales requieren del uso de cimbras para el acomodo y soporte del material mientras se soporta por sí mismo. Esto requiere de tiempo y costo adicional en el proceso constructivo además del empleo de transporte para el acarreo una vez iniciado y terminado el trabajo. En las estructuras ligeras se ha encontrado un camino para dar solución a estos problemas donde los materiales empleados son de menor peso, y los materiales se distribuyen de manera sistemática para que adquiera la capacidad de resistir, además de utilizar una cimentación mínima que en algunos casos como las velarias o redes de cables utilizan anclajes y cables evitando que la acción del viento las pueda levantar, presentando menos problemas en caso de sismo.

La cubierta es una de las partes más importantes en la construcción, pues si bien intervienen muchos elementos, ésta es la que en esencia protege de las inclemencias del tiempo.

En los últimos años, debido a la crisis económica en nuestro país, la tendencia general es la de bajar costos. Por lo tanto, en la construcción es imperante el uso racional de los materiales que se emplean para cualquier obra.

Las estructuras ligeras utilizan el mínimo de material, el mínimo de mano de obra y se levantan en menos tiempo, aunado a las ventajas que tiene para cubrir grandes claros, la inexistencia de cimbras para soportarse y poco espacio para ser transportadas. En este documento también se podrán entender como estructuras mínimas por lo antes dicho.

OBJETO DE ESTUDIO

Para definir el objeto de estudio es necesario explicar algunas ideas de carácter general en el campo de las estructuras, como es el orden de la materia que da existencia y soporte a la forma, toda forma material sea biótica o abiótica se soporta gracias a su estructura ya que sin ésta ninguna forma se podría sustentar, de tal manera que se puede afirmar que sin estructura no hay forma.

En la arquitectura, la forma, función y estructura nunca se podrán separar, ya que en la concepción y diseño de un edificio intervienen indistintamente estos tres factores. Se razona simultáneamente que cumpla con las necesidades para las cuales se solicitó con garantías de seguridad, y esto implica resistencia a los factores naturales y el peso que debe soportar debido a las diferentes cargas. Algunas estructuras tienen formas cúbicas, semiesféricas o cilíndricas y éstas representan solo una opción dentro de los volúmenes y composiciones que se pueden generar. Uno es consecuencia de los otros dos, de tal manera que la estructura es la parte de la construcción de formas y espacios, sobre tres vertientes principales:

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

1. La estructura puede quedar dentro de la forma expuesta.
2. La estructura fuera de la forma.
3. Puede expresarse por sí misma y ser forma estructural al mismo tiempo

Las estructuras que generan formas curvas y superficies a través de barras, con sistemas especiales son de interés por las ventajas que se han enunciado con anterioridad.

El objeto de estudio para esta investigación son las estructuras con la construcción de modelos y maquetas experimentales. Se diseñan, planean y ejecutan estructuras que son el resultado del método aquí propuesto. Ofrecen grandes claros y ligereza con las consecuentes ventajas del uso de materiales y rapidez de ejecución.

OBJETIVOS

- a) Dar a conocer la utilidad y ventajas de las estructuras ligeras, con ejemplos de obras realizadas en diferentes partes del mundo para la comprensión del avance tecnológico en este campo.
- b) Proponer una metodología paso a paso en el diseño y fabricación de maquetas de estudio que ayude a evaluar la viabilidad de materiales y procedimientos constructivos.
- c) La comprensión y diseño de Estructuras Ligeras a través del dibujo y modelos experimentales para analizar su comportamiento y la forma más adecuada de las Estructuras.
- d) Que sea de utilidad como material didáctico para profesores y alumnos de la carrera de arquitectura en la enseñanza de las Estructuras Ligeras desde los principios básicos hasta su ejecución y un mejor estudio de las mismas.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”**II.- COMPROMISOS DEL MARCO DE INVESTIGACIÓN**

Todo trabajo de investigación se debe sustentar en teorías generadas bajo un marco entendible y con una línea clara a seguir, es decir, los razonamientos personales no dependerán de su corroboración, sino de estar sujetos a revisión de manera permanente.

Lo más importante en el marco de investigación es el procedimiento, porque de éste depende la veracidad del trabajo y la búsqueda de nuevos procesos para comparar los resultados.

La presente investigación se apoya en el método científico planteado por Kuhn, el cual propone compromisos o supuestos básicos de un marco de investigación de carácter Epistémico; (selección y discriminación del conocimiento existente y útil sobre y para el tema de estudio). Lo que se propone como solución al problema para calificarlo como conocimiento. Ontológico; (definición del objeto de estudio) Procesos conocidos en la investigación. Pragmático; (ejemplos y argumentos que fundamentan la utilidad o valor de la investigación) El interés por construir determinadas teorías y lo que se espera, es decir, que problemas debe resolver y a qué campo de fenómenos se pretende aplicar. Procedimental (definición de marco de referencia ideológico, procedimientos y metodologías a utilizar) La implementación de técnicas experimentales y herramientas que se consideran adecuadas o confiables). Finalmente en este procedimiento, se incluye el de innovación u originalidad; (la búsqueda y definición de la aportación personal) que en el marco teórico se describen a detalle. Ineludible y forzoso el uso de diferentes metodologías como el método histórico, científico, etnográfico y sociológico para este caso.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

El método de investigación que se propone para el conocimiento de las estructuras, consiste en formularse interrogantes sobre el campo, con base en la teoría ya existente, tratando de hallar soluciones a los problemas planteados. El método se basa en la recopilación de datos, su ordenamiento y su posterior análisis.

EPISTÉMICO

La inquietud y la necesidad que siempre tuvo el hombre por buscar nuevas y mejores condiciones de vida, le ha permitido adquirir conocimiento a través de la historia. Cubrir los satisfactores primarios de comida, vestido y morada, nos permite variedad y calidad en los alimentos, ropa para el desarrollo de actividades y viviendas más eficientes y confortables. En este campo, la experiencia que ha tenido el hombre al construir sus viviendas, permitió el desarrollo de técnicas y materiales acordes con su entorno.

En principio, lo primordial era la protección a factores naturales, con objetos que utilizaban materiales sin diseño previamente concebido, pues esto quedaba en segundo término. Con el paso del tiempo se fueron perfeccionando las edificaciones y se establecieron de manera permanente conformando así las grandes ciudades. Desde los grandes rascacielos que conocemos hasta las viviendas de autoconstrucción se construyen con materiales comerciales y estructuras tradicionales a costos muy elevados, con tecnologías “nuevas” que llevan al confort a sus usuarios. Pero también el hombre busca otros caminos en la arquitectura que le den solución a problemas de cimentación, ahorro energético, menor costo y optimización de materiales.

Probablemente sea entendible hoy por hoy, que el conocimiento y avance tecnológico de estructuras, no sea tan fácilmente difundido porque esto implica costo-

beneficio para los países que desarrollan la investigación y potencial económico a la industria y obviamente al país que la promueve. Sin embargo, el conocimiento razonado que los estudiosos del tema han adquirido a través del tiempo y su experiencia, se debería difundir con apuntes, libros ó conferencias, pues de no ser así, se corre el riesgo de perder toda la información tras la desaparición del personaje.

Las enormes aportaciones del arquitecto Frei Otto son el punto medular que rige a este trabajo, puesto que las teorías y procedimientos utilizados por él, siguen vigentes y dan lugar a otras novedosas investigaciones. No menos importantes las aportaciones de Buckminster Fuller con la “geometría de la naturaleza” que dio origen a sistemas de cúpulas y otras estructuras ligeras como el Tensegrity. Otra base que sustenta este documento, son los conocimientos vertidos en libros por grandes maestros como Heino Engel, J. Margarit, Makowski y Francis D. K. Ching por mencionar algunos.

En nuestro país, reconocidos profesores como José Mirafuentes q.e.p.d., Juan Gerardo Oliva y Francisco Montero q.e.p.d. han aportado a este campo con escritos, conferencias e invitaciones a especialistas como Jaime Sánchez y Jürgen Hennicke. Ellos incluyeron en sus cursos, modelos de yeso o licra para explicar otra alternativa de diseño que aquí considero como conocimiento útil para desarrollar los propios.

Hasta el momento, no se conoce sobre algún método para el diseño de estructuras ligeras y lo más cercano son algunos programas computacionales para el dibujo pero no para explicar algún procedimiento de diseño. Lo que se propone aquí como metodología es la utilización de herramientas que tenemos a la mano, tal es el caso del dibujo tradicional o con programas CAD y la utilización de la geometría descriptiva para obtener vistas en planta y

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

alzado con el desarrollo o despiece de las partes que conformaran la superficie. La obtención de modelos y después maquetas de estudio es de vital importancia para estudiar y analizar la solución apropiada y acorde con el dibujo realizado.

ONTOLÓGICO

Es menester aclarar las definiciones y conceptos básicos para una mejor comprensión de lo que aquí se esta tratando. Generalmente cuando se habla de estructuras, se entiende de manera tradicional como el soporte o armazón que mantiene estable a un elemento. Entendido de otra forma, es la distribución de varios elementos que conforman un todo.

Por otro lado, el término ligero, se comprende como “algo de poco peso” pero esto, desde mi punto de vista es subjetivo, porque depende de la capacidad individual o mecánica para soportar o levantar algo. Por supuesto que en el campo de la arquitectura, tiene que ver con el uso de los materiales y su relación con el peso volumétrico para determinar el peso total de una construcción. Obviamente también dependerá de la relación que existe entre el total de metros cuadrados cubiertos con respecto al valor total en kilogramos de dicha construcción.

Sin embargo, considero que lo ligero (desde el punto de vista arquitectónico) tiene que ver con el sistema constructivo que se emplee, porque una edificación hecha con basaltos (piedra braza) con un peso de 2.6 t/m^3 ⁽¹⁾ y otra con concreto reforzado de 2.4 t/m^3 ⁽²⁾ de peso, esta última es más ligera. Por lo tanto, ligero se deberá entender como “el peso propio de los materiales

dispuestos en formas resistentes con el fin de usar el menor material posible”. Sin embargo, un espacio cubierto con sistema de cascarón de concreto o ferrocemento, el peso total se reduciría probablemente hasta un 50% tomando en cuenta que los espesores son de 3 cm ó 4 cm y que es importante la forma como principio estructural para obtener resistencia. Parece ser que este es el parte aguas entre las estructuras hechas con marcos rígidos y las ligeras, donde la forma tiene función.

Una vez tratando el significado y lo que se podría entender como estructura y lo que se comprende como ligero, es conveniente unificar la definición de estructuras ligeras. En lo sucesivo y a lo largo de todo el documento, se deberá mantener el mismo orden de ideas para no generar confusión al momento de leer los conceptos.

Para este caso en específico se deberá entender que: “Las estructuras ligeras son la distribución y orden de material, acomodado con rapidez, donde la materia ordenada con método tiene la capacidad de soportar las cargas y la acción de los agentes exteriores sin peligro de cambiar o caer”.

Por otro lado, la metodología que sugiero es con base en la experiencia docente que he tenido. Los resultados han demostrado la efectividad de la metodología, ahora se presenta como un tema de tesis en el que el autor no estará presente para aclarar dudas al momento de leer el documento. Por lo tanto, se interpretará la metodología como la serie de acciones para lograr los objetivos de la tesis; primero se da por entendido lo que es una estructura ligera para después explicar de manera general los principios básicos. Se concibe aquí que el diseño es: “un proceso creativo mediante el cual se definen las características de un sistema de manera que cumpla en forma óptima con sus objetivos”. El objetivo de un sistema estructural es resistir las fuerzas a las que va a estar

¹ Arnal Simón A. y Betancourt Suárez M. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Ed. Trillas. Capítulo IV. Páginas 213, 214.

² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

sometido, sin colapso o mal comportamiento. Las soluciones estructurales estarán sujetas a las restricciones que surgen de la interacción con otros aspectos del proyecto y a las limitaciones generales de costo y tiempo de ejecución.

Conviene resaltar el aspecto creativo. La bondad del proyecto depende esencialmente del acierto que se haya tenido en imaginar un sistema estructural que resulte el más idóneo para absorber los efectos de las acciones exteriores a las que va a estar sujeto.

Posteriormente se muestran imágenes de obras existentes para dar una idea de las posibilidades arquitectónicas y los alcances de este tipo de estructuras. Seguidamente se explica detalladamente el dibujo a través de la geometría descriptiva. Ésta es la parte medular del documento y la aportación, ya que cualquier estudiante o persona que tenga algunos conocimientos previos puede realizar el dibujo, con todo y patronajes.

Luego se procede a la hechura del modelo, interpretado como: “La representación a escala pequeña construido generalmente con papel con la finalidad de mostrar y verificar el trazo geométrico así como el aspecto de la superficie o estructura”. Siguiendo a esto, se procede con las propuestas de diseño y materiales, evaluando también el costo, transporte y factibilidad constructiva. En esta etapa de la metodología, se observan otras posibilidades con modelos hechos de licra, yeso, jabón, tela metálica, tul con clavos o tiras de madera o plástico para obtener datos que puedan ser medibles y sirva de apoyo al diseño y ejecución de la maqueta experimental. Se alcanzará que la maqueta es: “Un modelo a escala de la estructura o superficie, construido con detalle y precisión para estudio y sobre el que se juzgan las etapas anteriores”. Es recomendable realizar un registro de todo lo que se haga

a manera de bitácora para evaluar, prevenir y corregir posibles errores.

PRAGMÁTICO

La arquitectura de fines del siglo XX hace alarde de “nuevas” formas con ángulos rectos y geometría regular con el empleo de materiales novedosos. Se aceptaron formas no ortogonales como redes con cubiertas delgadas y superficies curvas. Para lograr estas formas, fue necesario emplear materiales que nunca antes se habían utilizado como elementos estructurales, tal es el caso de tubos de cartón, polímeros, tejidos, madera reciclada e incluso vidrio. Un claro ejemplo de esto son las estructuras de membrana, que ofrecen una infinita variedad de formas para cubrir grandes superficies a costo bajo con el empleo mínimo de material textil, postes de acero y anclajes de concreto armado.

Existen principios fundamentales que se basan en la naturaleza como son los esqueletos, formas de vida animal o algunas especies vegetales que inspiran formas arquitectónicas. Todo esto da lugar a la biónica aplicada a la arquitectura y a algunas estructuras. Tal vez no muchos estén de acuerdo con que las estructuras ligeras se sustenten en estos principios pero hay mucho que aprender sobre la manera en que la naturaleza crea formas y modos de vida en la tierra.

Un ejemplo claro de estos principios utilizados en arquitectura es el ingeniero-arquitecto Santiago Calatrava, quien dice que para él existen dos principios fundamentales que se encuentran en la naturaleza, uno es el uso óptimo de los materiales y el otro es la capacidad que tienen los seres vivos para cambiar de forma, crecer y moverse. Quizá el análisis que se ha hecho de un cascarón de huevo al tratar de romperlo por su eje longitudinal dio origen a los cascarones de concreto

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

donde un material con un espesor delgado puede soportar su propio peso y le confiere resistencia, gracias a su forma. De aquí se derivaron muchas más y otras que han surgido gracias al estudio hecho por el ingenio del arquitecto Félix Candela.

Se puede observar en la planta embotelladora Bacardí y Compañía donde se construyeron paraboloides equiláteros (paraguas de una columna)³, la Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa y el Mercado de Coyoacán. En todas ellas, se empleo el concreto armado como material de la época que vino a revolucionar la arquitectura a principios del siglo XX.

Otro principio aplicado al campo de la arquitectura es la curva catenaria entendida como: “La forma adoptada por un cable uniforme y flexible que esta suspendido libremente en dos puntos que no están en la vertical”⁴. Esto lo aplicó Gaudí I Cornet Antoni en el Templo expiatorio de la Sagrada Familia desde 1884 en España. Sin lugar a duda, el pabellón de Alemania en la exposición de Montreal en 1967, un ejemplo de asimetría pintoresca, el Estadio y los Polideportivos de Munich de 1972 y el Cascarón nervado de madera, restaurante y sala de usos múltiples en Mannheim en 1975; estas son algunas muestras de utilidad y el valor en este campo de investigación, desarrollados por el Arquitecto alemán Frei Otto. Él vislumbró la relación entre la arquitectura y la estructura natural u orgánica, ya que ensayó y definió con maquetas el comportamiento y formas complejas con avances significativos. También desarrolló un tipo de techumbre plegadiza con geometría variable. Para 1972 se centra en la investigación de estructuras biológicas,

cascarones nervados y demás temas. Se puede decir que fué un experimentador y promotor de estructuras ligeras. Ahora bien, la utilidad y valor de esta investigación reside en presentar metodologías de diseño de estructuras con modelos físicos, en ella se incluye detalladamente como obtener el trazo y la plantilla de seis superficies diferentes; se recomienda tener conocimientos previos de geometría descriptiva aunque el proceso que aquí describe es muy claro.

Se pretende que sea de utilidad y de valor para profesionales interesados en este campo, pero principalmente para alumnos de arquitectura y profesores. Que sirva como una guía de diseño y solución a cubiertas con las conocidas ventajas que ello implica. Se espera que con la ayuda de este documento, se pueda concebir, dibujar, analizar y construir maquetas de estudio y al mismo tiempo se puedan observar las bondades y beneficios.

PROCEDIMENTAL

De manera sistemática se determinan diez puntos que comprenden el método y que incluyen técnicas y herramientas confiables para este proceso.

Primero.- Se definen y determinan los tipos de estructuras que se analizaran en este trabajo, es decir; cuales estructuras son consideradas en el documento.

Segundo.- ¿de donde surgen?. Es necesario conocer una breve historia de las primeras cubiertas y comprender la importancia que tuvieron en ese momento para entender mejor el presente y la evolución tecnológica que han tenido.

Tercero.- ¿cómo estudiarlas?, donde se explican los principios básicos del trabajo estructural, con criterios generales y un lenguaje sencillo, amable y de interés para quien lea el documento. También, explica las partes que

³ D. K. Ching Francis. “Diccionario Visual de Arquitectura”. Ed. Gustavo Gili, S.A. de C. V./México. 3ra. Edición, 2000.

⁴ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

componen a una determinada superficie o estructura para iniciar con un lenguaje básico.

Cuarto.- Con ejemplos se pretende interesar y motivar al lector para que inicie el diseño. Con esto también se logra demostrar que ya existen estructuras con sistemas innovadores y con alta tecnología, esto significa, desde mi punto de vista, que se puedan desarrollar en México, utilizando la tecnología disponible y adecuando las soluciones a nuestro entorno natural y social.

Quinto.- El trazo con geometría descriptiva es la base para el diseño de estas superficies (para este caso específico), la finalidad es obtener medidas de longitud de barras o superficies que se pueden escalar según el tamaño que se desee. Se puede hacer con instrumentos de dibujo o con la ayuda de medios digitales.

Sexto.- Una vez obtenido el trazo con su respectiva plantilla, se procede al recorte y unión de gajos para verificar la forma y corrección de trazo si es necesario.

Séptimo.- Las respuestas a cuando y donde, se dan en este punto; aquí se inician las propuestas de diseño de nodos, barras o planos según los materiales a emplear. Se debe pensar en la solución de cada intersección, los puntos de apoyo, el lugar donde se planea colocar la estructura y la manera conveniente del montaje.

Octavo.- Es importante conceptualizar y dibujar la idea, pero la asimilación de esto, es la hechura de una maqueta que simule o sirva como acercamiento de la propuesta definitiva. En ocasiones no resulta lo que se piensa así que es necesario replantear la idea y corregir los errores. La selección del material a emplear dependerá del costo, factibilidad para el sistema así como de las características y propiedades mecánicas. No necesariamente deben ser materiales comerciales, también se debe buscar la opción de materiales alternativos.

Noveno.- Con la ejecución del modelo estructural experimental se observa la facilidad o complejidad para obtener cada una de las partes que conformaron el todo o puede ser tan sencillo como se piense y tan elaborado que incremente el tiempo y energía necesaria para la solución final.

Décimo.- En esta última etapa se debe hacer una evaluación sobre las decisiones tomadas y la eliminación de materiales secciones y sistemas para no repetir los mismos defectos. Obviamente las bondades y ventajas son perfeccionables para mejorar cada vez más en el sistema. Yo creo que el resultado final es un éxito en el estudio y trabajo hecho, porque permite el avance al no repetir lo que ya se ha experimentado. Por otro lado vislumbra otras posibilidades y soluciones más acertadas.

INNOVACIÓN U ORIGINALIDAD

Por lo regular, todas las fuentes consultadas, describen las características y generan algunos datos de los sistemas empleados. Exaltan el grado de avance tecnológico y el arquitecto que las concibió así como el impulso comercial, gubernamental o científico logrado con la realización del proyecto. Pero nunca se dan datos precisos del procedimiento para la obtención de materiales o sistemas. Esto es entendible por los derechos de patente y el valor económico que representa. Difícilmente se podrán encontrar planos o datos precisos de la solución dada a una estructura. Así que la aportación de este trabajo es la propuesta metodológica con una explicación detallada de cómo obtener las plantillas. También incluye experiencias adquiridas en laboratorios con descripciones y análisis precisos de modelos que pueden funcionar como inicio al desarrollo de proyectos. Las soluciones dependerán de los requerimientos y las necesidades del cliente, así como

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

una correcta elección del presupuesto asignado. No es nuevo el uso de materiales orgánicos y reciclados en la construcción, de tal manera que si le agregamos la mínima utilización para bajar aún más el costo, podrá ser de fácil acceso para personas de pocos recursos económicos. Otra aportación es la descripción de maquetas experimentales al especificar ventajas de tiempo, costo, sistema constructivo, transporte y materiales. De esta manera se plantean al menos cinco ventajas para construcciones en caso de siniestro o para edificaciones definitivas de bajos recursos. Finalmente aquí se muestra un método en la enseñanza de la arquitectura y en específico de las estructuras ligeras. No existe documento alguno que desarrolle alguna propuesta metodológica para este tema o que explique el diseño a través de modelos físicos.

CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

Parece ser que no hay una clasificación precisa sobre este campo científico, debido a lo extenso y a las diferencias de entendimiento de las estructuras hacen imposible una clasificación exacta. Sin embargo, los esfuerzos por tratar de ordenar en esta disciplina no han desmerecido el trabajo del arquitecto Javier Senosiain que en su libro Bio Arquitectura, realiza una clasificación sobre cuatro estructuras ligeras (redes de cables, neumáticas, cascarones y geodésicas) que sirven de apoyo en lo sucesivo a este trabajo.

En el caso específico de las estructuras ligeras, se toma como base la clasificación hecha por Heino Engel:⁵

1. FORMA ACTIVA
 - 1.1. Estructuras de cables
 - 1.2. Estructuras velarias
 - 1.3. Estructuras neumáticas
 - 1.4. Colgantes
2. VECTOR ACTIVO
 - 2.1. Estructuras de árbol
 - 2.2. Geodésicas
 - 2.3. Cerchas
 - 2.4. Mallas espaciales
 - 2.5. Anticatenaria
 - 2.6. Estructuras de tijera
 - 2.7. Vigas de carga y apoyo
3. SUPERFICIE ACTIVA
 - 3.1. Estructuras de lámina
 - 3.2. Estructuras de láminas plegadas
 - 3.3. Cascarones
 - 3.4. Estructuras de membranas
 - 3.5. Membranas de curvatura simple
 - 3.6. Membrana en cúpula
 - 3.7. Membrana en silla de montar
4. HÍBRIDOS
 - 4.1. Topológicas
 - 4.2. Tensigrity
 - 4.3. Transformables

⁵ Sistemas de Estructuras, Engel, Heino Ed. Gustavo Gilli, S. A. 1° Edición-3° tirada 20003.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Es necesario definir con conceptos y términos especializados algunas ideas básicas que sustentan el presente trabajo. Primero se definen las literales.

P= Peso. Valor de la gravedad para un cuerpo determinado, es decir, la fuerza con que la tierra atrae a un material específico.

CM= Cantidad de Materia

L= Ligereza. Para éste caso se entiende como un cuerpo o material de poco peso y que se puede utilizar con rapidez.

Ligero. Rápido y de escaso peso.

T= Tiempo. Se comprende como la duración en período para la ejecución de una estructura.

M= Material. Sustancia básica de que se componen los objetos simples utilizados en la construcción con propiedades de masa y, por consiguiente, peso e inercia, además de las propiedades de elasticidad, compresibilidad, dureza etc.

C= Costo. Valor en dinero y en esfuerzo para la ejecución de una estructura.

HIPÓTESIS

Con la investigación se demostrarán las ventajas que tienen las estructuras ligeras por el uso mínimo de recursos. Para no generar confusión sobre las hipótesis aquí enunciadas se tomo la decisión de expresarlas de la manera más clara y sencilla posible (sin olvidar que todas se refieren a las estructuras ligeras) de la siguiente manera:

- 1) “El peso de los materiales en relación con la menor cantidad posible de los mismos significa ligereza en la estructura”.⁶
- 2) La forma lógica en que se acomodan los elementos que constituyen una estructura, pueden aprovechar el máximo de espacio cubierto con la menor cantidad de material utilizado.
- 3) “Mínimo tiempo y pocos materiales da como resultante rapidez de ejecución”.⁷
- 4) “Cuando interactúan el suficiente número de elementos de peso mínimo, se puede construir con menos energía en corto tiempo”.⁸
- 5) “La manera en que se disponen las partes que dan como resultado una estructura, confieren forma y por ende resistencia y estabilidad”.⁹

⁶ Idem.

⁷ Idem.

⁸ Idem.

⁹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Ahora bien, los criterios para el desarrollo de las presentes hipótesis, sugieren límites de peso y cantidad de materiales a utilizar y la ubicación de los elementos que intervienen en la estructura para su rápida ejecución. Para fines de comprobación, se presentan modelos no mayores a los cinco metros, en la mayoría de los casos y para el mayor de ellos con un claro de veinteocho metros aproximadamente.

Lo relevante en esta hipótesis se centra en el proceso metodológico que conduce al resultado final y que se ponen a disposición para ser aceptadas o refutadas según los resultados obtenidos. Conviene aclarar que no son hipótesis conducidas sino deducidas y que probablemente encuentren alguna línea interesante para ser abordada en trabajos subsecuentes.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

III.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

EL OBJETIVO HISTÓRICO

Uno de los objetivos de la historia es tratar de reconstruir el pasado del hombre en todos los aspectos para comprender mejor la situación actual en la que vive. Los documentos históricos utilizados en este trabajo son formas de expresión usadas por las clases sociales que ostentaban el poder de la época, es decir, que las fuentes de consulta por lo regular son hechas por la clase social alta pues no podemos olvidar que desde siempre existen diversas formas de dominio de algunos hombres sobre otros.

Ciudades, palacios, murallas o arcos parecen haber surgido de la nada. Y no llevar consigo un antecedente humano, ¿Quién construyó todo esto en el pasado?. La verdad es que los textos antiguos solo nos dicen los nombres de reyes y personajes que gobernaron, pero nunca nos dicen sobre los miles de esclavos y obreros sin los que nunca hubiera sido posible realizar estas construcciones. ¿Por qué? La respuesta se encuentra en la sociedad antigua, pues estas se fundamentaban en la esclavitud.

De tal manera que el objetivo es someter a una crítica objetiva estos datos para integrarlo en el marco de la investigación con una visión completa y científica posible. No se pretende obtener un documento histórico, sino una visión general del origen y moradas del hombre que ayuden a un avance ordenado de este trabajo. Probablemente la profundidad en este capítulo no sea extensa pero la información presentada es suficiente para cumplir con el objetivo y dar pauta a los subsecuentes temas.

EL ORIGEN DE LAS PRIMERAS MORADAS

La aparición del hombre sobre la faz de la tierra se remonta a más de un millón de años atrás, físicamente su aspecto era muy similar al de un mono. Podía correr pero aún lo hacía sobre cuatro extremidades, sin embargo ya podía construir utensilios y servirse de ellos, se alimentaba de frutos, raíces y bayas. Los restos más antiguos se han encontrado en Olduvai (Tangancia, África), en Java y en Pekín, así como en Alemania y en Hungría. Numerosos objetos de piedra y huesos así como hallazgos en cavernas, grutas y restos de cabañas son la muestra de su existencia.

Imagen 1 Dibujos de animales del período magdaleniense situado en las cuevas de Marsoulas y Le Portal (Francia).¹⁰



Esto significa que las primeras moradas de los hombres fueron las cuevas. Muy probablemente debido al escaso desarrollo que tenían sólo se valieron de lo que la naturaleza les ofrecía para poder resguardarse. La evolución de especies dio origen a animales de mayor tamaño como el mamut, rinoceronte, buey salvaje, oso y cabra montés. En la región de Le Moustier en Francia se encontraron restos

¹⁰ Agostino Franco, Ozoese Collodo Silvana, Seneca Federico, Letterio Briguglio. “Historia Universal, El Mundo Antiguo”. Ed. Grialbo. Página 13.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

de las primeras chozas en forma ovalada de aproximadamente ocho y quince metros de longitud. Quizá hechas con ramas, cueros y huesos de animales que cazaban. Este es el comienzo del hombre evolucionado que construye sus moradas en primavera o al comenzar el verano y que sale a cazar para posteriormente regresar a su vivienda pensada y fabricada por él mismo.

Esto significa un cambio y adaptación a una nueva forma de vida, inicia una nueva agrupación y organización que genera aldeas de forma circular con chozas más elaboradas. Empieza a domesticar animales y a trabajar la tierra así como el uso de cerámica en su vida cotidiana. Las condiciones naturales adversas y la búsqueda de mejores condiciones de vida lo obligaron a emigrar y perfeccionar sus viviendas.

PRIMERAS FORMAS

Las tiendas confeccionadas con materiales naturales más primitivas se remontan a cuarenta mil años en Ucrania, en las cuales se emplearon restos de animales como ya se ha mencionado. Se confeccionaron de manera rudimentaria para dar cobijo a las inclemencias del tiempo y al peligro del exterior. Eran tiendas que se confeccionaban de manera rápida para desmontarse y transportarse con facilidad; representaron la arquitectura de la cultura nómada con características de ligereza, movilidad y la estrecha relación entre su función y el contexto cultural.

La arquitectura nómada debido a su continuo montaje y desmontaje requirió de sistemas sencillos así como formas geométricas simples (circulares o cuadradas) que facilitaron su manipulación.

Imagen 2
Morada en el Congo, construida con ramas de árbol dobladas y cubiertas con hojas.¹¹



El empleo de ramas de árbol fué un recurso disponible en el paisaje, la habilidad del hombre le permitió entretejer y disponer el material para conformar su vivienda. La selección de materiales flexibles y con características que permitieron dar rigidez fué fundamental ya que de esto dependió la forma y sistema utilizado. De esta manera el empleo de corteza natural para fabricar nudos, para unir ramas y sujetar las hojas que cubrieron la estructura fué indispensable.

Otro ejemplo de esta arquitectura es la desarrollada en la región ártica con el iglú, que es una vivienda provisional en la cultura esquimal. Su forma es de cúpula semiesférica fabricada con témpanos de hielo dispuestos de manera traslapada que permite el resguardo ante las fuertes ráfagas de viento.

¹¹ Bahamón, Alejandro. “Arquitectura Textil Transformar el Espacio”. Ed. Instituto Monsa de Ediciones, S. A. Página 9

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Las construcciones de piedra más antiguas datan de hace seis mil años, sin embargo, le anteceden construcciones de barro localizadas en el Oeste Africano.



Imagen 3 Vivienda esquimal hecha con bloques de hielo de 1 mx0.20 mx0.50 m.¹²

La utilización de materiales con buen comportamiento térmico, da lugar a cúpulas con pequeñas protuberancias que evitan erosiones en la superficie y que son la muestra del uso de materiales del lugar.

Realmente poco se conoce sobre las formas arquitectónicas más antiguas. Todo se supone debido a la alineación de agujeros encontrados en bastas extensiones que al parecer se utilizaron para hincar palos y sujetar sus techumbres. Se podrían imaginar esas construcciones con tan solo echar una mirada a las edificaciones actuales con rasgos similares a las de los antepasados. Tal es el caso de la estructura en Niamey,

¹² Behling Sophia y Stefan. “Sol Power”. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. Barcelona 2002. Página 47.

en la cual se puede apreciar la colocación de troncos en hilera al exterior de lo que es propiamente la habitación. No se observa una exactitud para la separación de los troncos ni una calidad en la selección de los materiales más rectos.

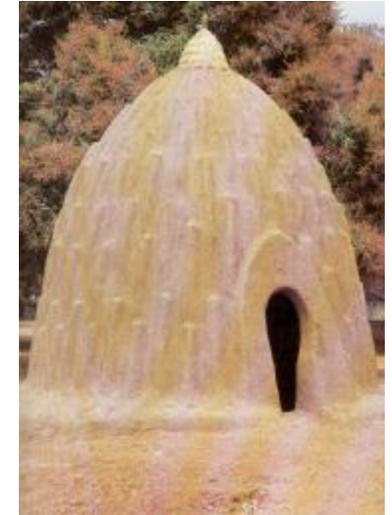


Imagen 4
Probablemente las construcciones de barro fueron las primeras moradas fabricadas por el hombre, ya que disponían de este material de manera abundante.¹³

La libertad de espacio interior logrado al suprimir la existencia de elementos verticales, le da un gran sentido de aprovechamiento espacial. Por otro lado, la habilidad para sujetar la cubierta a cada tronco sin la presencia de cables tensores requiere del conocimiento y experiencia de los materiales empleados. Los ejemplos de arquitectura en África se remontan a este siglo y esto se debe a la escasez de piedra en el lugar. Sin embargo, las iglesias Coptas de Lalibela, Etiopía, son la excepción al encontrarse excavadas en rocas.

¹³ Sharp, Dennis. “Diccionario Ilustrado Arquitectos y Arquitectura”. Ed. CEAC, S. A. 1ª Edición: marzo 1993. Página 171.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Imagen 5 Tienda en Niamey. Se observan mástiles externos con el objeto de dejar libre el interior de la tienda.¹⁴



Bien es cierto que los factores físico-naturales así como los sociales, culturales y económicos determinan la forma de las viviendas africanas. Los nómadas Tuareg de Kenia, Somalia y Etiopía no pueden tener casas permanentes debido a sus constantes desplazamientos en busca de nuevos pastos. Sus tiendas son de diferentes formas y tamaños con cubiertas de hierbas, telas o pieles desmontables para ser transportadas con animales de carga.

También existen nómadas que viven en cobertizos hechos de ramas y son temporales pues las hojas son las que cubren las cúpulas que duran algunos meses. Los pueblos que se dedican a la ganadería, como los Masai de Kenya, construyen sus viviendas de forma redonda con varas que doblan y entretrejen con mucho cuidado para después cubrirlas con estiércol de vaca. Con esto se evita que algunos insectos como las termitas destruyan la

estructura de ramas. Otras formas semiesféricas de paja o hierbas muy bien tejidas dan lugar a emplazamientos circulares muy bien definidos.

Imagen 6 Tiendas Tuaregs en Niger. La cubierta se extiende sobre postes de madera hincados simplemente al suelo.¹⁵



La arquitectura popular en África no es monumental pero corresponde a su clima, condiciones económicas, uso y empleo de materiales de la región con proporciones moderadas y formas agradables que simbolizan su cultura.

Imagen 7 La vivienda en Sudáfrica usa formas circulares y cúpulas hechas con hierbas y ramas.¹⁶



¹⁴ Bahamón, Alejandro. “Arquitectura Textil Transformar el Espacio”. Ed. Instituto Monsa de Ediciones, S. A. Página 17.

¹⁵ Sharp, Dennis. “Diccionario Ilustrado Arquitectos y Arquitectura”. Ed. CEAC, S. A. 1ª Edición: marzo 1993. Página 197.

¹⁶ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

El continente Asiático tiene varios ejemplos que marcan el inicio de la arquitectura sedentaria. La cultura Kazaja tiene sus orígenes en China y las migraciones mongolas. La conformación de sus viviendas se debe a los antecedentes históricos y la geografía donde se encuentra. Es un pueblo completamente nómada que está en la búsqueda constante de praderas para trasladar su ganado ovino. Su vivienda es mucho más elaborada que los de otras culturas. Las regiones donde se localizan presentan bajas temperaturas, lo que obliga a tomar medidas que den solución al problema. Forman estructuras sólidas de planta circular con madera, son alrededor de sesenta postes que se entrelazan con cuerdas de fibra textil. La cubierta es de forma cónica y presenta las mismas condiciones que los postes para los muros. Una vez armada la estructura se cubre con fieltro, materiales vegetales y tejidos de lana, con esto se logra aislar el interior de las bajas temperaturas.

El aspecto es cálido y suave aunque la base de piedra sobre la cual se desplanta parece más al de una vivienda fija.



Imagen 8 Kazajas en la cordillera del Himalaya. Casa construida con fibras vegetales y lana.¹⁷

¹⁷ Bahamón, Alejandro. “Arquitectura Textil Transformar el Espacio”. Ed. Instituto Monsa de Ediciones, S. A. Página 60

Los climas extremos presentan condiciones adversas, como en los desiertos con altas temperaturas y escasez de agua que dificultan su habitabilidad. Esto propicia que los pueblos del desierto cuenten con moradas transportables. Presentan características especiales que propician un microclima protegiendo del calor sofocante durante el día y con un aumento de temperatura para soportar el frío durante la noche. Normalmente las viviendas son de color negro con tejidos de pelo de cabra con la característica de que se pueda longar y sujetar a postes de madera atirantados a estacas hincadas al suelo. Para evitar que el tejido se rompa por la tracción producida en los postes, se coloca una pieza de madera curva.



Imagen 9 Yurta. Se encuentran en Rusia, Mongolia y Afganista. Son de planta circular con estructura retráctil de madera para poder transportarse.¹⁸

¹⁸ Behling Sophia y Stefan. “Sol Power”. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. Barcelona 2002. Página 49.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

La conquista árabe del siglo VII propició la expansión de los beduinos. Se encuentra por todo el norte de África y se consideran de ascendencia árabe. Viven en tiendas muy humildes que montan y desmontan según las estaciones del año con lluvia y sequía. La forma de la tienda es rectangular y la estructura es similar a otras, con la diferencia que las cuerdas que sujetan los postes se dirigen a piedras que funcionan como cimentación, la ubicación de las piedras y tensores es fundamental para resistir los fuertes vientos.



Imagen 10

Tienda negra en Iran. Fabricada con tejido de pelo de cabra, utilizan piezas de madera para evitar que se rompa el tejido.¹⁹

La membrana es de pelo de camello con extremos que cumplen una doble función, tienen la facilidad de enrollarse para permitir el paso de vientos moderados para regular el interior, y en caso de tormentas de arena o fuertes lluvias cerrarse completamente. El establecimiento permanente de varios pueblos, dio paso al seguimiento de grandes culturas en el mundo.

¹⁹ Behling Sophia y Stefan. “Sol Power”. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. Barcelona 2002. Página 67.

LA EVOLUCIÓN DE LA FORMA

La evolución de sistemas y formas arquitectónicas se dio una vez que el hombre encuentra un lugar con las condiciones necesarias para poder vivir. Utiliza materiales pesados como la piedra y otros materiales para edificar formas duraderas. La civilización en roma es un claro ejemplo de cambio en este sentido, al construir infinidad de arcos, así como coliseos, basílicas y edificios públicos. Heredado de Egipto y Grecia se construyen casas de planta circular con cubierta cónica. La cúpula fue una de las formas más desarrolladas por los romanos junto con el uso de materiales como las piedras porosas que dieron origen a un tipo de cementante que mezclado con cal le daba solidez y adherencia.

El panteón de Agripa tiene la forma de cúpula semiesférica y fue construido por el emperador Adriano.



Imagen 11

Cúpula Semiesférica del Panteón de Agripa.²⁰

Es el más grande domo construido en la antigüedad pues cubre un claro de cuarenta y dos punto cinco metros. Se encuentra sobre una base cilíndrica con la misma altura que el radio de la cúpula. En la base tiene un espesor de

²⁰ Senosiain, Aguilar Javier. “Bioarquitectura en busca de un espacio”. Ed. Noriega. México, 1998. Página 109.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

siete metros y en la parte superior de 60 centímetros aproximadamente. La parte superior se remata con un oculus que permite el paso de luz y en la pared interior esta recubierta con un artesanado escalonado que disminuye conforme se aproxima la parte más alta. De esta manera se hereda a la arquitectura una de las más extraordinarias obras con forma semiesférica.

ESTRUCTURAS EN EL MUNDO MODERNO

El paso del tiempo dio pauta para la creación y experimentación de otras formas con elementos ordenados y menos pesados que la piedra. No se conocen antecedentes previos de lo que probablemente fue la primera estructura espacial hecha por Graham Bell, en 1907 y aunque las primeras se pensaron para cometas, posteriormente se usaron para torres que se armaban a nivel de piso para posteriormente levantarse y colocarse en su posición final. Esto rompía las maneras tradicionales de construir.

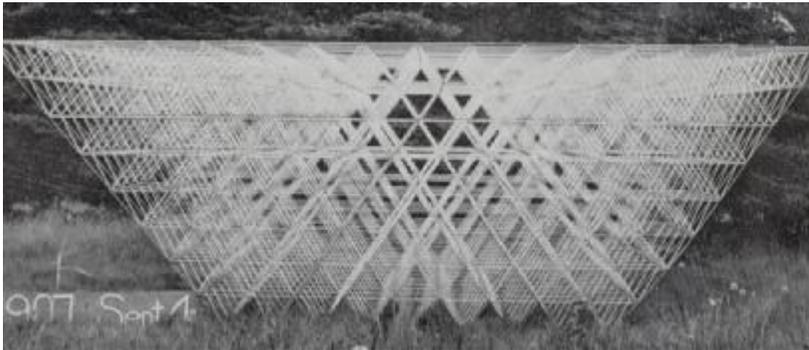


Imagen 12 Estructura Especial. Fabricada por Graham Bell en 1907.²¹

²¹ Makowsski, Z.S. "Estructuras Espaciales de Acero". Ed. Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1972. Página 36.

Desde 1942 en Alemania se usaron las estructuras espaciales desarrolladas por Mengerhausen con el sistema "MERO". Se logró cubrir espacios para diferentes usos con diversas formas que se lograban gracias al sistema. Este consistió de dos elementos básicos: nodos en forma de esfera con 18 perforaciones con rosca y barras de metal; las ventajas de dicho sistema logrados hasta ese momento fueron la ligereza, economía, ahorro de tiempo y no requería de mano de obra especializada, además que permitió la prefabricación en serie. Su expansión se logró por todo el mundo y algunas firmas transnacionales compraron licencia debido a la amplitud de posibilidades y usos que se pueden dar.

Algunos ejemplos de las primeras construcciones de doble curvatura, se remontan a los trabajos hechos por Laffaille en 1936. Utilizó grandes láminas en forma de silla de montar para cubrir claros mayores para naves industriales.

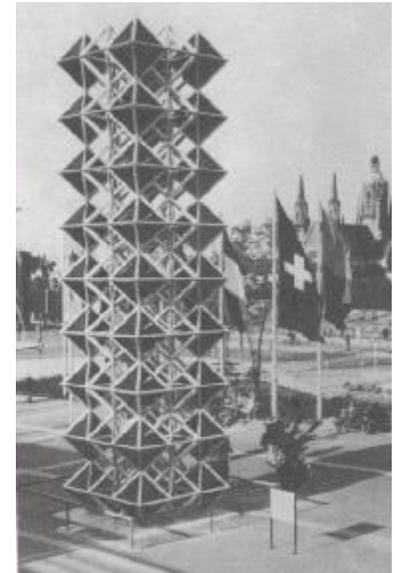


Imagen 13 Estructura construida por MERO para la exposición de Munich en 1965.²²

²² Margrit, J. Y C. "Las Mallas Espaciales en Arquitectura". Ed. Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1972. Página 33.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

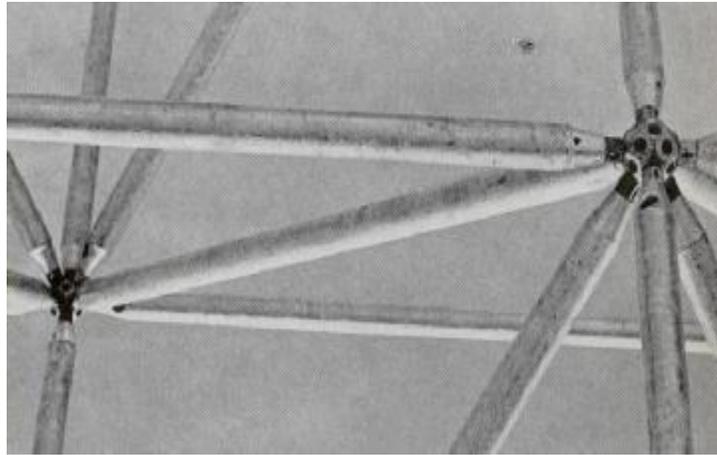


Imagen 14 Sistema de nodos y barras desarrollado por MERO. Cada nodo puede recibir 18 barras.²³

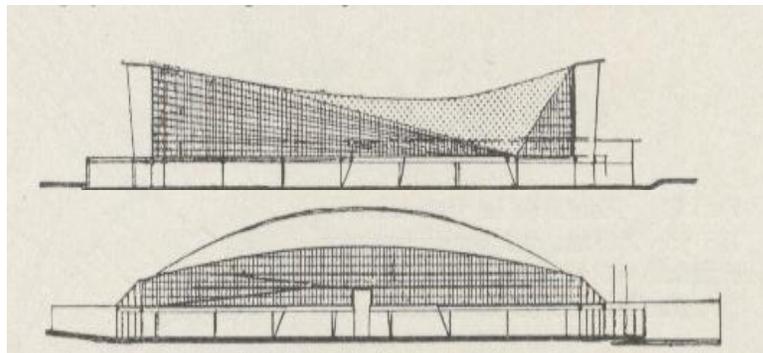


Imagen 15 Centro de las industrias mecánicas en París 1951. Cubierta colgante e su sección longitudinal y abovedada en la sección transversal.²⁴

²³ Makowski, Z.S. "Estructuras Espaciales de Acero". Ed. Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1972. Página 13.

²⁴ Otto, Frei. "Cubiertas Colgantes". Versión Española por Francisco Folguera. Editorial Labor, S. A. Barcelona 1962. Página 27.

En 1951 se publicó el proyecto del centro de las industrias mecánicas en París Francia. Se trataba de un edificio con cubierta a doble curvatura inversa. Sus dimensiones de 180x200 metros sin apoyos intermedios presentaba un reto. La curva se propuso como estructura colgante, observándose en la dirección longitudinal con curva convexa y en la transversal como bóveda, esta se debería soportar sobre pilares confiriendo rigidez al conjunto a una altura de 20 a 30 metros. Existe una gran similitud de este proyecto con la Arena de Raleigh proyectada por Matthew Nowicki en Estados Unidos de Norte América en el año de 1953.

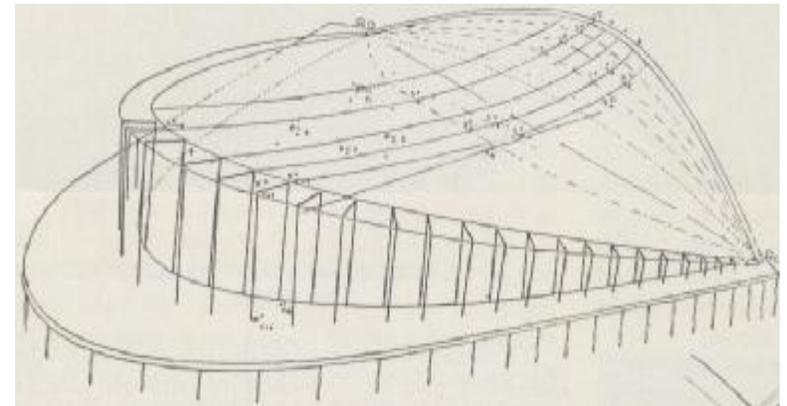


Imagen 16 Dos arcos parecido a las parábola se sitúan en planos inclinados sobre pórticos que sirven de apoyo y dan rigidez.²⁵

Esta obra consistió en la intersección de dos arcos parabólicos inclinados de 92 metros por 97 metros a una altura de 27.4 metros de concreto armado. Los arcos se apoyaron sobre columnas de corta distancia entre una y otra para recibir los entrepaños de cristal. La cubierta de dos curvas invertidas se construyó con una red de cables

²⁵ Otto, Frei. "Cubiertas Colgantes". Versión Española por Francisco Folguera. Editorial Labor, S. A. Barcelona 1962. Página 28.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

de entre 13 y 18 mm cubiertos de goma dispuestos transversalmente a la dirección de las cuerdas portantes de 19 y 32 mm. La red formó una malla de 1.83 metros por lado.

Sobre las cuerdas se colocó un material a base de tela para después montar placas onduladas de metal que recibieron un aislante térmico y otra capa de protección contra el agua.



Imagen 17 Arena de Raleigh 1953. Dos arcos parabólicos inclinados intersectados que reciben un sistema de red de cables para la cubierta.²⁶

Originalmente se pensó que el edificio funcionaría para ferias ganaderas pero también se le dio un uso de recinto de espectáculos. La bajada de agua pluviales se condujo por la doble curvatura hasta el cruce entre los dos arcos y de aquí a canalones hasta unos estanques para su uso posterior en jardinería. Se considero un sistema de calefacción así como ventanillas alternadas en los ventanales para ventilarse en verano.

La cubierta se calculó para soportar un peso promedio de 30 kg/m² y carga accidental positiva de 122 kg/m² así como una negativa de 78kg/m².

²⁶ Mirafuentes, Jose. “Estructuras con redes de cables, procedimientos de construcción” Laboratorio de Estructuras Laminadas. Centro de Investigaciones Arquitectónicas. Escuela Nacional de Arquitectura. UNAM. Página 9.

El costo por metro cuadrado en planta fue de 180 dólares, es un costo relativamente bajo tomando en cuenta el gasto corriente de los Estados Unidos de Norteamérica. Por el mismo año Bucksminister Fuller vio hecho realidad su sueño tras múltiples tropiezos. La Ford Motor Company contaba con un proyecto para oficinas y sala de exposiciones en River Rouge en Dearborn, Michigan. Gran parte del proyecto estaba considerado como una cúpula traslúcida.

La solución de Fuller fue una armadura de aluminio con placas de plástico traslúcida. La enorme diferencia era que mientras una cúpula tradicional de acero pesaría ciento sesenta toneladas, la cúpula geodésica de aluminio solo pesaría ocho y media toneladas. Obviamente la diferencia era enorme, una vez terminada en 1953 fue impresionante el efecto que la luz solar provocaba al atravesar los paneles triangulares.

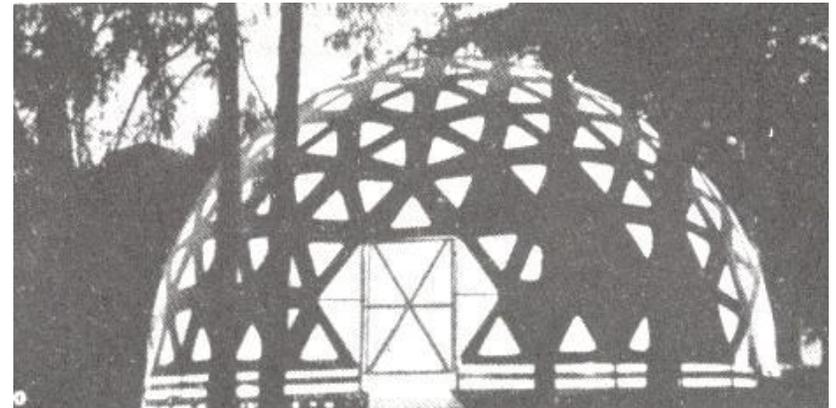


Imagen 18 Cúpula Geodésica de papel kraft y revestimiento de plástico.²⁷

²⁷ Margarit, J. Y C. “Las Mallas Espaciales en Arquitectura”. Ed. Gustavo Gili, S. A. Barcelona, 1972. Página 40.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

En 1954 se celebró la décima Exposición Internacional de Diseño en Italia, Bucksminister Fuller convenció a la Container Corporation of America para que lo apoyaran con su proyecto de cúpulas geodésicas de papel. Estas cúpulas fueron de un gran alcance ya que desde mi punto de vista cubrieron un campo muy amplio en el diseño, construcción, costo y materiales que normalmente no se usaban.

Su construcción consistió en dos cúpulas hechas de hexágonos de cartón piedra con recubrimiento exterior de plástico lo que le confiere durabilidad y rapidez en su construcción.

Los antecedentes de este proyecto se remontan a una experiencia adquirida por Fuller para la infantería de marina de los Estados Unidos de Norte América. En esa ocasión se pudieron construir un millón por año de manera sistemática, utilizando papel Kraft impregnado y revestimiento de plástico que da una gran durabilidad y buenas condiciones de aislamiento. Con esas especificaciones se pudo lograr un costo bajísimo y además se logro dotarlas de servicios para convertirlas en una vivienda de emergencia.

FÉLIX CANDELA EN MÉXICO

Resulta impresionante y de gran interés lo desarrollado en otras latitudes, pero, ¿Qué sucedió en nuestro país por esos años?. Por supuesto que la figura de Félix Candela durante su estancia en México, dejó un enorme precedente sobre el uso de formas y cascarones de concreto en un período que va de los cincuentas a los sesentas. Candela exploró el uso del paraboloides hiperbólico en muchas de sus obras y de las más reconocidas son la embotelladora Bacardí en la cual utilizó la bóveda por arista de planta cuadrada de 26 metros de lado y una altura de 10 metros al centro.

Algunas otras estructuras de paraboloides de un solo manto combinados con bordes rectos y curvos dio lugar a la Iglesia de Santa Mónica, proyectada por Fernando López Carmona. Esta obra consta de una planta en forma de abanico con diez gajos de paraboloides que cubren 30 metros de claro. Cada uno de estos se une al centro por una columna inclinada que recibe a los diez paraboloides.



Imagen 19 Embotelladora de Bacardí. Se observa intersecciones de bóvedas de arista de planta cuadrada.²⁸



Imagen 20 Iglesia de Santa Mónica. Una sección de paraboloides hiperbólicos repetidos 10 veces forma la cubierta de la Iglesia.²⁹

²⁸ Tonda Magallón, Juan Antonio. “Félix Candela”. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, D. F. 2000. Página 49.

²⁹ Tonda Magallón, Juan Antonio. “Félix Candela”. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, D. F. 2000. Página 55.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Para las olimpiadas de 1968 se proyectó y construyó el Palacio de los Deportes, esta estructura cubre claros de más de 30 metros. Se utilizó acero en forma de arcos circulares de celosía de 5 metros de peralte. Con una cubierta de cobre, dio como resultado una de las estructuras más baratas del mundo.

Para concluir con esta parte, considero conveniente mencionar una de las estructuras que a mí juicio es importante por la innovación y avance tecnológico propuesto.



Imagen 21 Proyecto presentado por Foster y Fuller donde se muestra la casa autónoma de carácter futurista.³⁰

En 1982 Foster Associates y R. Bucksminister Fuller y su mujer, presentan la casa autónoma que es una cubierta ligera altamente eficiente. Consta de dos cúpulas que se deslizan sobre una superficie hidráulica recubierta con paneles de vidrio y aluminio en partes iguales para obscurecer durante la noche e iluminar durante el día de manera similar a un ojo humano.

Retomando las palabras de Foster: “La técnica es la fuerza impulsora que conduce al diseño de nuevas formas basándose en la eficiencia y la lógica estructural”.

Creo que no sólo la técnica sino también las formas biológicas como las utilizadas por Santiago Calatrava que se rigen por estos principios y la genialidad de sus obras trascendieron a la arquitectura de fines del siglo XX.

La visión futurista de estructuras que se pueden adaptar al medio, que tengan un bajo consumo energético y que se puedan trasladar de un lado a otro en busca de mejores condiciones de vida, probablemente no esté muy lejos.

Tal vez el retorno del hombre a una vida nómada sea una opción que permita la restauración de los ecosistemas, pero, ¿Qué impacto tendría habitar ecosistemas acuáticos o habitar el espacio aéreo?. Lo que sí es un hecho es que las estructuras ligeras pueden evolucionar al grado de ser simulaciones de la máquina perfecta que es el cuerpo humano.

³⁰ Behling Sophia y Stefan. “Sol Power”. Ed. Gustavo Gili, S. A. Barcelona 2002. Página 226.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

IV.- ESTRUCTURAS LIGERAS EN MÉXICO

ESTRUCTURAS ANTICATENARIAS

Este tipo de estructuras fueron diseñadas por el Arq. Frei Otto y equipo de colaboradores en el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart en Alemania.

Estas estructuras se diseñan midiendo modelos de precisión construidos de forma catenaria mediante una red de cadenas suspendidas desde una base y con el apoyo de una mesa de medición permite obtener las coordenadas de todos los nodos de la red en el espacio.

Esta red en su posición catenaria en la que todos sus elementos trabajan a tensión permite que al invertirla utilizando otro material trabaje a compresión como ya lo mencioné anteriormente.

En el año de 1975 vino a México el profesor Jürgen Henricke colaborador principal de Otto, a ofrecer un curso sobre este tema, y como resultado se construyeron las primeras estructuras en México.

Las dos primeras se construyeron en la Universidad La Salle, una de madera y la segunda de aluminio con la colaboración de alumnos y el arquitecto Francisco Montero López.

La tercer estructura de este tipo fue el conjunto de jaulas para felinos en el zoológico del bosque de Chapultepec. Estas son estructuras de aluminio de gran tamaño basadas en el proyecto de conjunto realizado en conjunto con la delegación Miguel Hidalgo.

El diseño de estas estructuras se realizó con la colaboración de alumnos de la Universidad Autónoma Metropolitana y el arquitecto Montero.

La siguiente estructura fue la cubierta de un Lobby en un Hotel del Puerto de Veracruz usando aluminio como material principal y con un diseño especial tridimensional

con objeto de reforzar la estructura y proteger de los fuertes huracanes que se producen en la zona.

MODELOS CATENARIOS

Si se suspende una cadena y después se invierte, da momentos de curvatura que dan una geometría determinada.

Es así como se forman las redes de cadenas que generan formas como conchas de mallas de cincuenta por cincuenta centímetros con diferentes ángulos en la malla y que al final dan una estructura rígida.

Esto no es nuevo, y se pueden construir conchas de alta tecnología, hechas con acero reforzados con elementos diagonales para estabilizar y con cubierta en forma de persiana de vidrio. Se logra a través de una red de cadenas suspendidas cada una por separado y después cortadas donde se une la siguiente. Todas las construcciones catenarias se amarran en la parte baja por medio de una dala perimetral, muy importante porque toma los esfuerzos de toda la estructura en su conjunto.

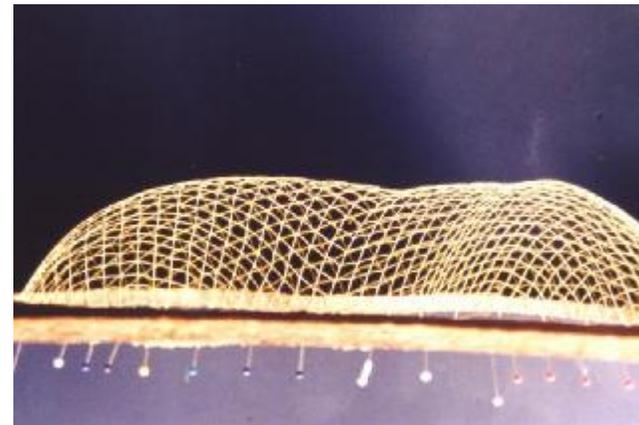


Imagen 22
Modelo con red de cadenas³¹

³¹ Arq. Ernesto Noriega Estrada.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Las mallas para realizar los modelos, se hacen con eslabones de cadena, en numeración impar, y los nodos que unen el trozo de cadena, regularmente son redondos. Puede ser una malla rectangular o hexagonal, sin embargo se utiliza la cuadrada por facilidad de medición. Las mallas cuadradas de la red, se transforman en rombos al tomar la forma de curva de la red colgante, dado que los ángulos de las mallas se alteran. El espaciamiento entre nodos de la red, se mantiene constante. Un nudo de la red es la intersección de dos líneas de cadenas.

MODELOS DE MADERA Y ALUMINIO

La primera estructura prototipo hecha en México de la que se tiene referencia es la realizada con tiras de madera en la Universidad La Salle, este prototipo sirvió como inicio para el análisis y desarrollo de estas estructuras que después permitieron la construcción de otras a nivel profesional.

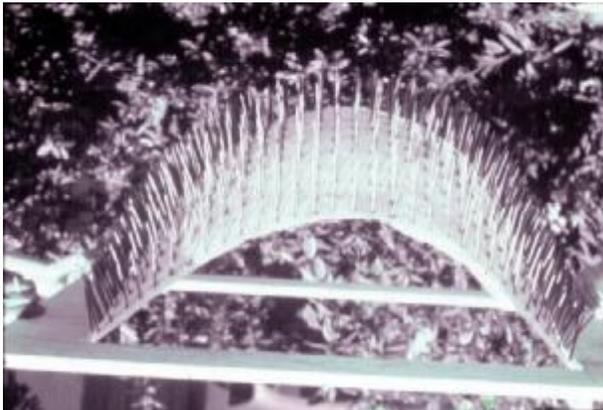


Imagen 23
Maqueta de tul con clavos y endurecida con laca.³²

Para el diseño de estructuras anticatenerias primero se realiza un modelo suspendido con tela de tul reticulada y

se colocan clavos en todos los nodos, hasta tomar la forma catenaria previo diseño. En esta posición se le aplica laca para endurecer la tela que una vez seca se invierte para obtener la maqueta y sirve como aproximación de la idea inicial. Un segundo modelo se fabricó con una red de cadenas, esta red se fabricó formando cuadros, con la característica que el nudo debe facilitar el deslizamiento del último eslabón para dar la forma natural.



Imagen 24
Modelo suspendido con red de cadenas.³³

Para observar las posibilidades y detalles de empotre, se arma un modelo con tiras de fibra de vidrio o con estireno formando una retícula plana que se corta según plantilla de las medidas tomadas de la red suspendida. Un aspecto importante con las intersecciones de la retícula es que deben permitir la libertad de ángulos entre barras puesto que cambian en cada intersección. Con la retícula terminada se monta sobre una base de madera comprimiendo la retícula para dar la forma concebida y el tamaño según la vista en planta, esto da una idea del proyecto final.

³² Arq. Francisco Montero López.

³³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

El primer modelo se hizo con tiras de madera de pino de una pulgada y media formando la retícula, estas tiras se marcaron a distancias iguales, se perforaron y atornillaron sin presionar demasiado para permitir los ángulos necesarios y la deformación requerida. Como esta construcción se hizo en la azotea, el inconveniente fue la perforación del piso para anclar el modelo, para esto se usaron dos vigas de madera tensadas por tiras también de madera y con esto lograr la compresión y anclado para adquirir la forma definitiva. Finalmente para cubrirla se utilizó lona plástica.



Imagen 25
Modelo de madera.
³⁴

Un segundo modelo se realizó utilizando como material el aluminio, en este caso para montar la estructura se usaron tubos redondos de tres pulgadas con la finalidad de solucionar uno de los problemas para desplantar las estructuras catenarias que es la inclinación con que llegan todas las puntas del final que sirven para sujetar. Una de las ventajas que tienen los perfiles redondos es que la superficie que recibe a cada barra, es siempre la misma, algo que no sucede con las secciones cuadradas o

rectangulares que además sufren la torsión al momento de flexionar.

Con el procedimiento tradicional se construyó la red pero en este caso con dobles varillas de aluminio como refuerzo y nodos formados por dos tramos de canal de aluminio que están unidos con un tornillo central sin apretar.



Imagen 26
Detalle de la unión de la estructura con la base.
³⁵

Para el montaje de la estructura sobre su base, se utilizaron mesas como andamiaje y puntales para levantar por el centro de la retícula y finalmente apretar los nodos. Para reforzar el borde de entrada se colocaron otras dos piezas de varilla a pocos centímetros de los dos varillas de borde. Con este modelo se pudieron observar las propiedades y bondades del aluminio como material para este tipo de estructuras que además de requerir poco mantenimiento comparado con la madera, es mucho más ligero que el acero, esto permitió vislumbrar la posibilidad de construir a nivel profesional con muy buenos resultados.

³⁴ Idem.

³⁵ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Imagen 27 Estructura anticatenaria de aluminio.³⁶



JAUHAS DEL ZOOLÓGICO DE CHAPULTEPEC

En colaboración con la delegación Miguel Hidalgo, el arquitecto Francisco Montero López realiza una propuesta para el zoológico de Chapultepec en la Ciudad de México, la propuesta fue la construcción de seis estructuras anticatenarias para alojar a los felinos. El proyecto se desarrolla con alumnos de la Universidad Autónoma Metropolitana quienes bajo la dirección del arquitecto Montero inician la construcción de una red de cadenas con eslabones de siete por siete y nodos redondos. Una vez cortada la base de madera se suspendió la red tomando su forma catenaria, en esta posición se realizó la medición de coordenadas que sirvieron para obtener la plantilla.

Una característica importante del proyecto fue la preparación en los puntos donde se requería dejar libre el paso de ramas.

³⁶ Idem.

Las características y ventaja ya conocidas de algunos materiales, permitieron tomar la decisión de usar perfiles tubulares de aluminio con aristas redondeadas. Se perforaron a distancias iguales para colocar tornillos con tuercas en las intersecciones de perfiles.

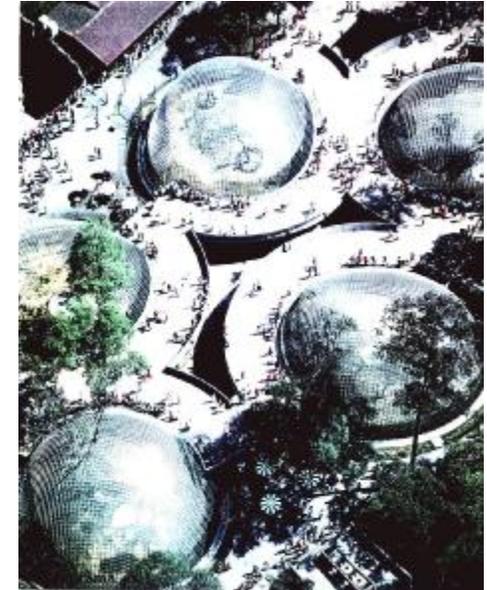


Imagen 28 Vista aérea de las jaulas.³⁷

La colocación se realizó dejando los tubos a cubierto desde un día anterior para que tuvieran la misma temperatura, por lo tanto la flexión del material iba a ser similar al momento de su colocación.

Se procedió al armado de la retícula en forma horizontal según plantilla en secciones pequeñas ya que debido al tamaño total hubiese sido imposible levantar y colocar en el lugar definitivo la estructura pues los árboles eran un problema del montaje. Una vez armada una sección se plegaba y transportaba hasta el lugar destinado donde previamente se había colado la cimentación de concreto

³⁷ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

armado en forma de anillo dejando puntas de varilla para sujetar y anclar la estructura.

Para el izamiento de cada sección se usaron perfiles tubulares en forma de tijera y para garantizar la continuidad del material se usaron como conectores dos ángulos de aluminio que se obtuvieron cortando tramos de perfil tubular a lo largo y en forma diagonal.



Imagen 29
Vista del conjunto a nivel de piso.³⁸

Después de montar una sección de plantilla se procedió a la colocación de perfil por perfil primero en un sentido y posteriormente los perpendiculares para tejer la red con el fin de librar los troncos donde fuera necesario. Finalmente se colocaron soleras del mismo material para reducir los espacios de la malla.

Sin duda alguna este es uno de los mejores ejemplos de estructuras anticatenarias desarrollados en nuestro país, sin embargo su aplicación es muy amplia y combinado con otros materiales da lugar a otros sistemas como el ferrocemento con formas catenarias.

³⁸ Idem.

CUBIERTA DE LOBBY

Esta estructura se propuso y desarrollo en un hotel del puerto de Veracruz como una alternativa de cubierta sencilla, ligera y de bajo costo en un quinto nivel: Aproximadamente a trece metros de altura, se utilizó un sistema de protección para los trabajos de montaje. Se realizaron en el lugar con cables de nylon en forma de zig-zag y sobre estos una red del mismo material para seguridad de los trabajadores, también se usaron dos puentes colgantes apoyados en dos varillas de acero cada uno con triplay marino como superficie que sirvió de andamio para la ejecución de los trabajos.

Con las preparaciones listas, se cortaron los tramos del perfil de aluminio cuadrado previamente barrenados a distancias iguales, a diferencia de procedimientos anteriores, la malla no se podía armar en un plano horizontal para después montarla de tal forma que se hizo colocando cada tramo en el lugar indicado y atornillando en el barreno correspondiente.



Imagen 30 Vista de la estructura con refuerzos diagonales.³⁹

³⁹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

En el perímetro se construyó una trabe canalón de concreto armado a la cual se sujetó en forma de gancho unas soleras que reciben cada barra al final de la estructura. Un problema se previó durante la construcción pues los fuertes vientos que periódicamente se presentan, obligaron al refuerzo de la estructura con un sistema espacial hecho con soleras de aluminio (de manera similar a la pirámide pero invertida), atornilladas en los puntos medios de los cuadros que formaron la malla en tablero de ajedrez para minimizar el costo y la cantidad de barras.

Al término de la estructura se cubrió con láminas de fibra de vidrio en forma de canales que se colocaron alternadamente en posiciones invertidas para evitar juntas frías y posibles filtraciones de agua.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

V.- ESTRUCTURAS ESPACIALES**PRINCIPIOS**

Con el desarrollo de la tecnología aplicada a los materiales utilizados en la arquitectura, hoy en día se pueden construir estructuras con grandes claros. Por lógica sabemos que las estructuras tienen orden en cada uno de sus componentes cuyo principio es la organización que da lugar al conocimiento arquitectónico. Con la observación de estructuras naturales y la química orgánica se piensa que la estructura de la naturaleza se da por formas tetraédricas, tal es el caso, de las configuraciones globulares en las diatomeas, las formas hexagonales en un panel de abejas o la compactación esférica.

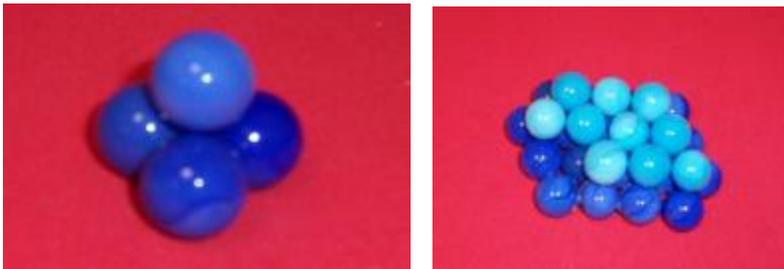


Imagen 31 Cuatro esferas que unen sus centros, forman un tetraedro. Un conglomerado de esferas cuyos centros unidos conforman una malla tridimensional.⁴⁰

Con estos precedentes de orden natural se analizan y aplican al desarrollo de estructuras llamadas espaciales. Se comprenderá que las espaciales son estructuras tridimensionales formadas por mallas con elementos lineales donde el tetraedro es la unidad básica y su resistencia se basa en la rigidez del triángulo con elementos sujetos a esfuerzos axiales de tracción y compresión. Estas fuerzas normales pueden dirigir y transmitir las cargas a través de mecanismos formados por nodos articulados y barras unidas de manera

determinada (Se da por entendido que una barra es un elemento que tiene una longitud mayor a las otras dos dimensiones) es así, que las espaciales se deben analizar como vectores que representan la magnitud y sentido de la fuerza. Por lo tanto es necesario conocer la dirección y como se pueden controlar para desarrollar conceptos estructurales acordes con los principios de composición y descomposición de vectores.

Para que la estructura se mantenga estable y de seguridad, depende del comportamiento y trabajo conjunto de las barras que lo conforman así como de la composición y ubicación del total de barras.

Existen tres elementos básicos que conforman las estructuras espaciales, que a continuación se describen:

- 1. Manto superior.**

Son todas las barras que forman una malla horizontal en la parte superior de la estructura.

- 2. Diagonales.**

Son las barras que unen el manto superior con el inferior en cada nodo de la malla.

- 3. Manto inferior.**

Son los elementos que forman una malla horizontal en la parte inferior de la estructura.



Imagen 32 Modelo de análisis de tetraedro con barras de madera y cables de hilo Nylon con carga en nodo, unión puntual.⁴¹

⁴⁰ Arquitecto Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.

⁴¹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Al explorar la infinidad de posibilidades de diseño de estas estructuras, es necesario conocer las propiedades de los poliedros, estudiar la geometría para el diseño y obtención de plantillas como parte del método que aquí se propone, además de la trigonometría, ya que es la base del concepto formal y diseño de las estructuras espaciales. Las formas básicas consideradas en este trabajo son las estructuras de base cuadrada y las triangulares, pero también existen estructuras espaciales de cañón corrido, y doble curvatura.

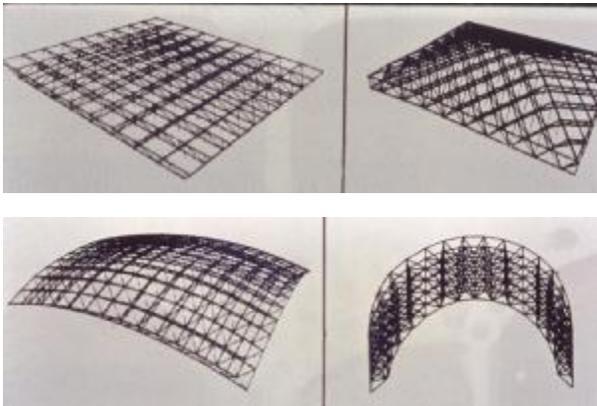


Imagen 33
Formas básicas de estructuras espaciales.⁴²

APLICACIONES

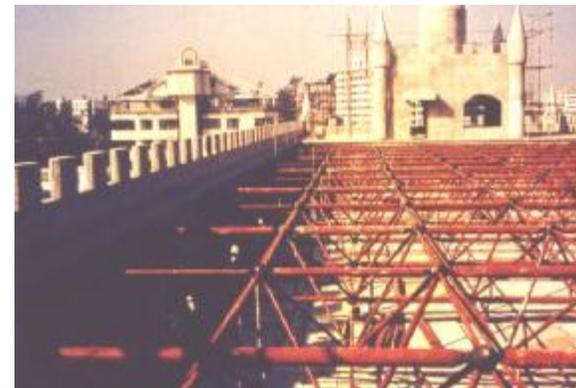


Centro del Deporte Olímpico, Atenas Gr.
Arquitecto: Weidleplan Consulting, Stuttgart.
Empresa: MERO Raumstruktur GmbH & Co. Würzburg, “El camino para el diseño distintivo”. Página 6



El Centro del Deporte Olímpico, Atenas Gr.
Arquitecto: Weidleplan Consulting, Stuttgart.
Empresa: MERO Raumstruktur GmbH & Co. Würzburg, MERO-VISION, Núm. 26, Diciembre 1990. Página 5

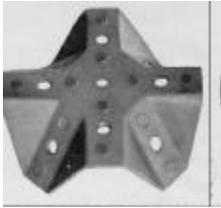
Planta Sideúrgica de la Capital de Steelwords, Planta de acondicionador de aire de Yantai. Sistemas para marcos. Empresa: Grupo Xuzhou.



Haikou Nueva compañía de energía. Sistemas para marcos. Empresa: Grupo Xuzhou.

⁴² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



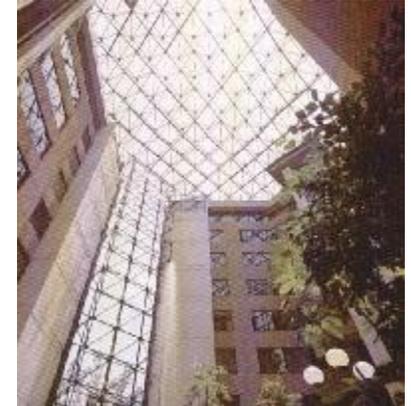
El nudo UNISTRUT está formado por una chapa plegada a la que se unen barras mediante pasadores.



Estación del Metro Chabacano, México, D. F.



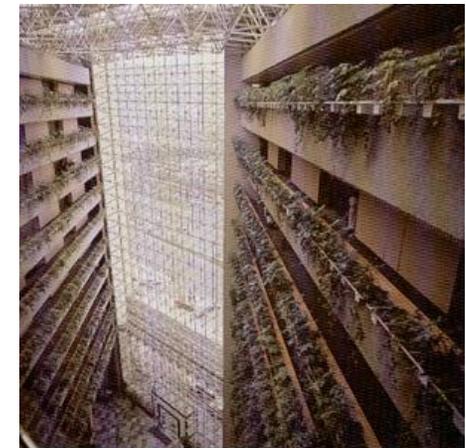
Invernadero, Castillo de Praga 1999. Arquitecta: Eva Jiricna architects
Ingeniero: Matthew Wells de Techniker. Maestros de la Estructura. Página 127



Fachada y cubierta de Condominios Pico Verapaz, México, D.F. Proyectista Meroño Arq. ADRIANN'S DE MÉXICO, S. A. DE C. V.



Pabellón de Venezuela, Expo-92 Sevilla. Arquitectos: Hernández y Erminy. Pabellón de Venezuela. Página 96



Fachada y Cubierta. Hotel ParaisoRadisson Perisur. México, Distrito Federal.

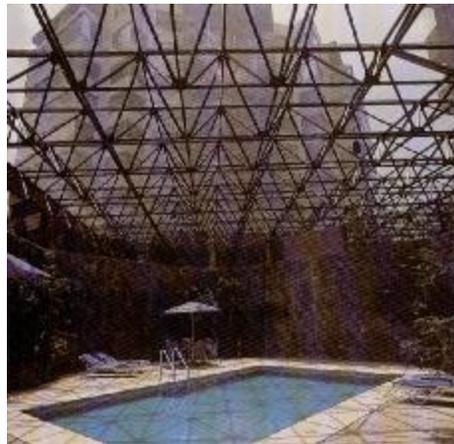
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Universum, Ciudad Universitaria. México, Distrito Federal.



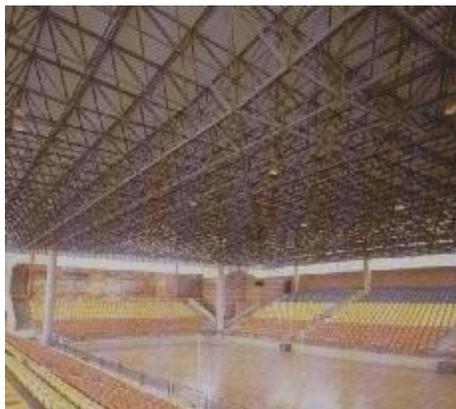
Cubierta Centro Asturiano. Mexico, Distrito Federal.



Cubierta Alberca Condominio Pico Peña Lara Mexico, Distrito Federal.



Cubierta Motor Lobby Hotel Calinda. México, Acapulco, Guerrero.



Cubierta Centro Deportivo y Cultural PEMEX. México, Minatitlán, Veracruz.



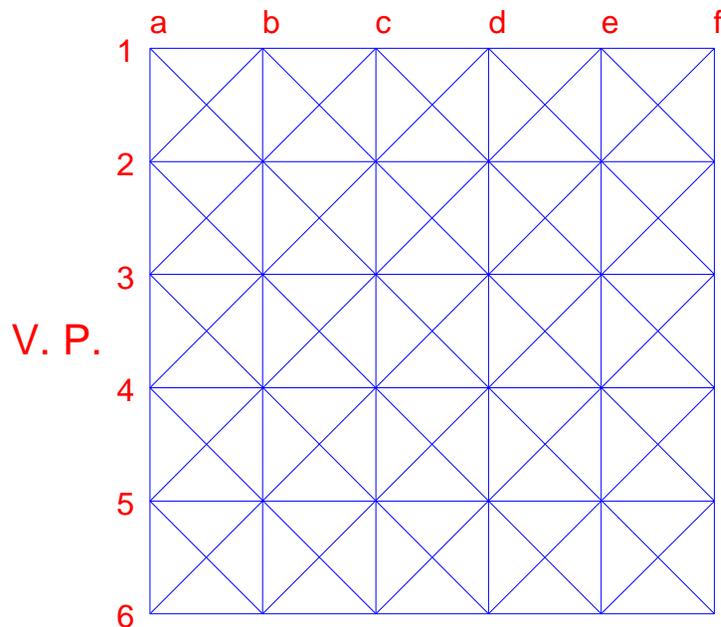
Agencia Imperio Automotriz de Veracruz. Séptima Reseña de Arquitectura Mexicana. Número 7. Página 143.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

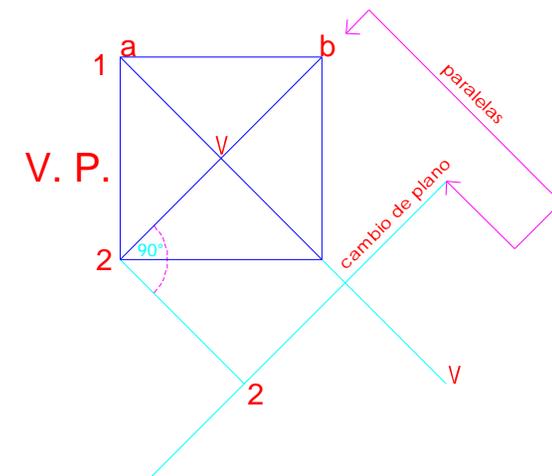
TRAZO GEOMÉTRICO

ESPACIAL DE BASE CUADRADA
TRAZO

1. En vista de planta (V. P.) se dibuja un cuadrado o rectángulo y se hace una retícula, donde el número de cuadros son los necesarios según proyecto. Esta retícula representa el manto superior de la estructura.
2. Se marca cada intersección en forma horizontal con las letras "a, b, c, d, e, f" y de manera vertical con los números "1, 2, 3, 4, 5, 6".
3. Se trazan líneas diagonales ocupando toda la retícula.



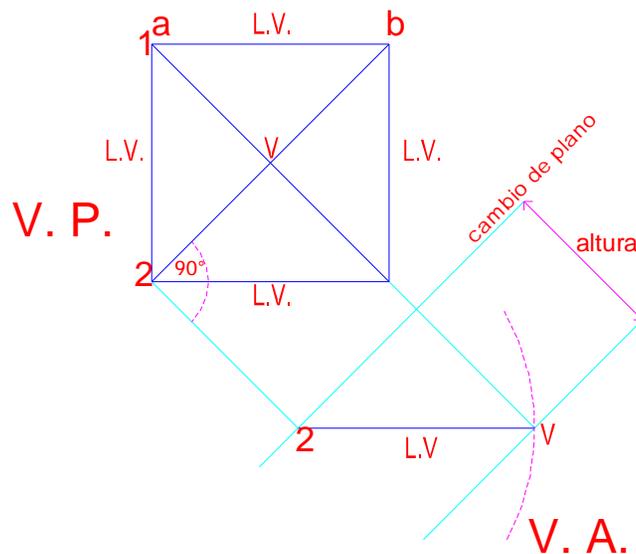
4. Para obtener la altura de la estructura se toma como ejemplo el cuadro contenido entre las rectas "a-b", "1-2" con las mismas dimensiones (esto es muy importante):
 - 4.1 Se hace un cambio de plano paralelo a la recta "v2".
 - 4.2 Perpendicularmente se proyecta el punto "2" hasta el cambio de plano.
 - 4.3 De la misma forma se proyecta el punto v, pero este tiene que cruzar el cambio de plano sin medida determinada.



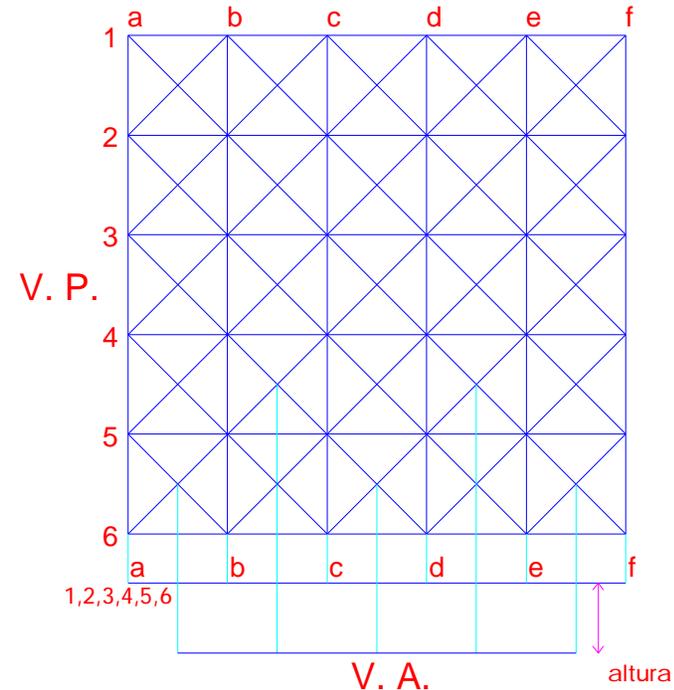
- 4.4 Se toma la medida de cualquiera de las rectas que forman el cuadrado (puede ser la recta "a-b" o la recta "1-2"), toda vez que cualquiera de las 2 rectas están en longitud verdadera.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

- 4.5 Con esta medida de recta y con apoyo en el punto “2” (en el cambio de plano) se corta la proyección del punto “v”.
- 4.6 Se marca la recta que inicia en el punto “2” hasta la intersección antes marcada (esta recta se encuentra en longitud verdadera).
- 4.7 La altura es de la intersección hasta el cambio de plano.

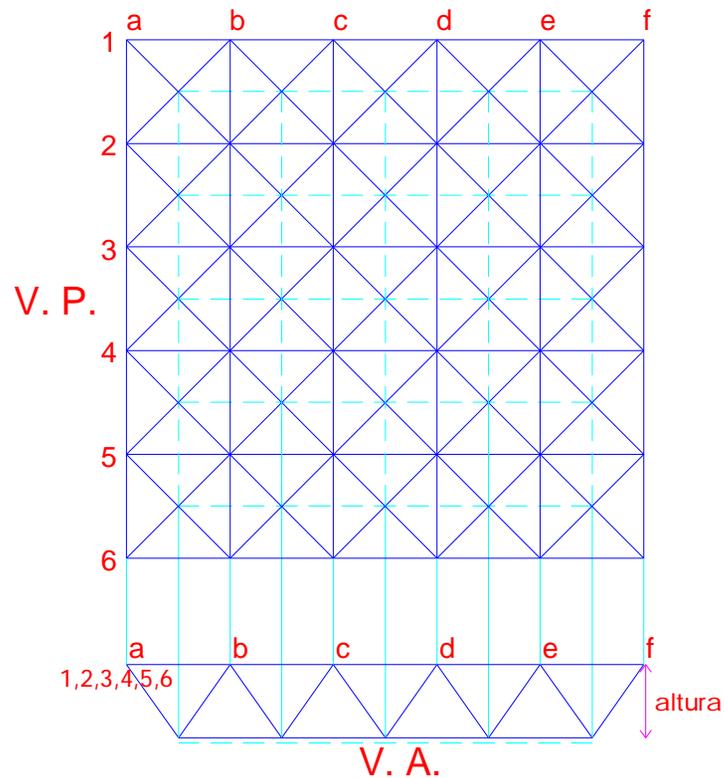


5. En vista de alzado (V. A.) se marca el manto superior representado por una línea que contiene los puntos de “a” hasta “f” y de “1” a “6”.
6. Retomando la altura del procedimiento 4 se marca con una línea de trazo horizontal (en V. A.).
7. Hasta la línea de trazo antes marcada en V. A. se proyectan todas las diagonales de vista en planta (V. P.).



8. Los puntos intersectados en vista en alzado (V. A.) se unen en forma diagonal con los puntos “a, b, c, d, e, f” y estas representan las diagonales dibujadas en V. P.
9. Para efectos de representación en V. P. el manto inferior se dibuja con línea discontinua. El manto inferior debe unir los vértices perimetrales.
10. En V. P. Se unirán el resto de las diagonales simplemente trazando líneas discontinuas horizontales y verticales. Obteniendo la misma retícula del manto superior solo que desfasada.
11. Finalmente en vista en alzado (V. A.) se unen todos los vértices de las diagonales representado por una sola línea discontinua horizontal.

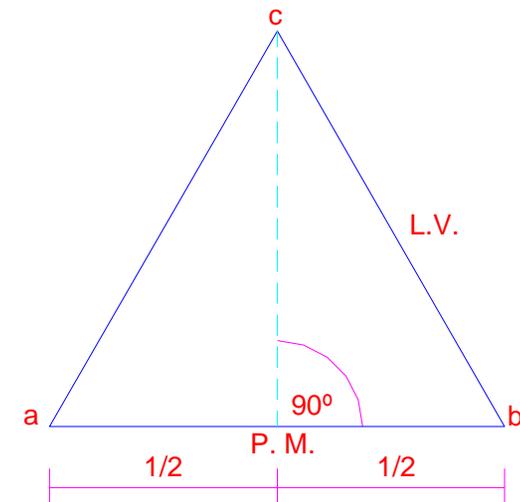
ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"



ESPACIAL DE BASE TRIANGULAR

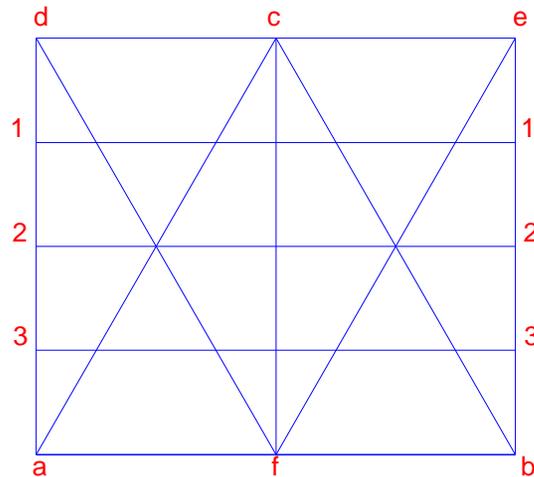
TRAZO

1. Un triángulo equilátero es la base para la estructura de base triangular, primero se traza una recta horizontal "a-b" y se obtiene el punto medio (P. M.):
 - 1.1 Se proyecta una línea vertical perpendicular a la recta "a-b" que inicia en el punto medio (P. M.) sin medida determinada.
 - 1.2 Con medida de la recta "a-b" y con apoyo en "a" se hace un giro hasta cortar la proyección del punto medio, obteniendo el punto "c".
 - 1.3 Posteriormente se une el punto "a" con "c" y el "b" con "c".

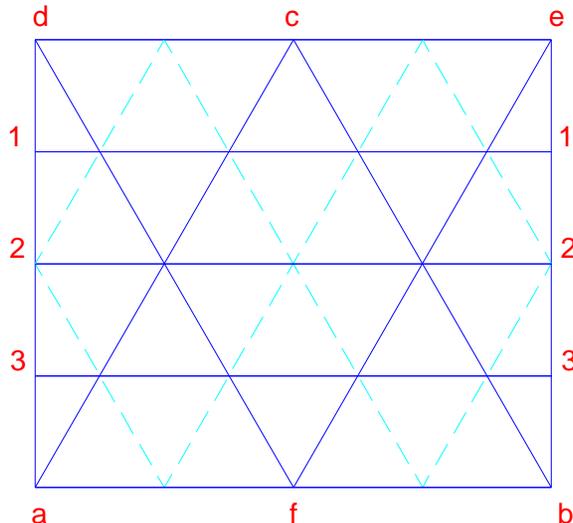


2. Se traza un triángulo invertido con las mismas dimensiones de "a, b, c" y se denominan los puntos "d, e, f".
3. Se unen los puntos "a-d", "b-e".
4. Se divide la recta "c-f" en cuatro parte iguales y se proyectan las líneas horizontales hasta las rectas "a-d" y "b-e", determinando las líneas 1, 2, 3.

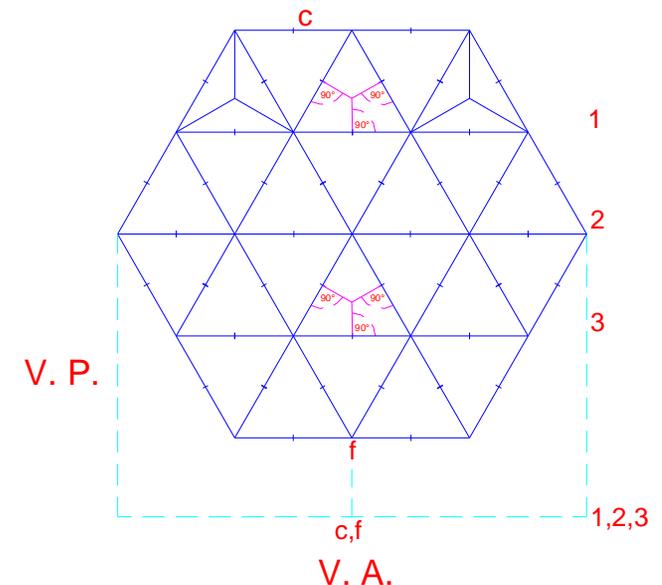
ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"



5. Sobre la recta "c-f" y la línea "2" (centro de la estructura) se forman dos triángulos uno hacia la línea "1" y otro invertido hacia la línea "3".
6. Con la prolongación de los triángulos antes formados y cuatro líneas perimetrales, se obtiene el resto de los triángulos.

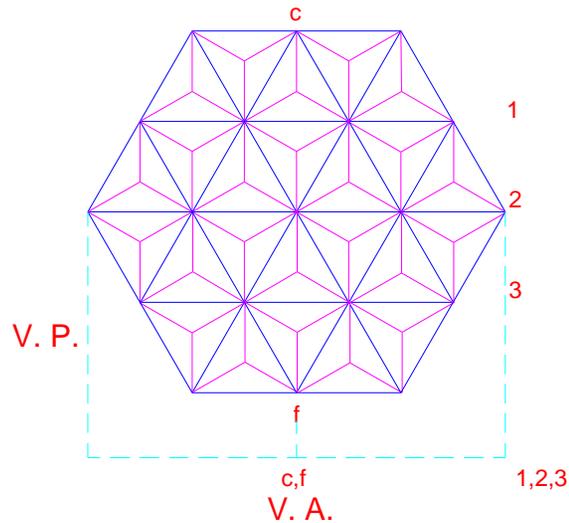


7. Por lo tanto, se obtiene un hexágono que contiene triángulos de iguales dimensiones, que representan el manto superior en V. P.
8. El manto superior en V. P. se proyecta en V. A. y se observa como una línea horizontal que contiene las líneas "1, 2, 3" y los puntos "c" y "f".
9. Para obtener la pirámide invertida de base triangular se realiza lo siguiente:
 - 9.1 Se obtiene la mitad de cada recta que conforma los triángulos.
 - 9.2 Se trazan líneas perpendiculares por cada lado de los triángulos.
 - 9.3 En la intersección de las 3 rectas perpendiculares se encuentra el centro de la pirámide y sólo basta con unir el centro a los vértices del triángulo. Estas representan las barras diagonales de la estructura.



ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

10. Se marcan todas las diagonales de cada uno de los triángulos.



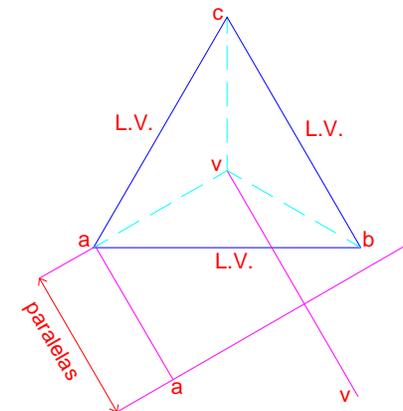
11. Para obtener la altura de la estructura se realizan los siguientes pasos:

11.1 se extrae un triángulo con las mismas dimensiones y con sus respectivas diagonales.

11.2 Para efectos de explicación a este triángulo se le denominan los puntos "a, b, c" y "v".

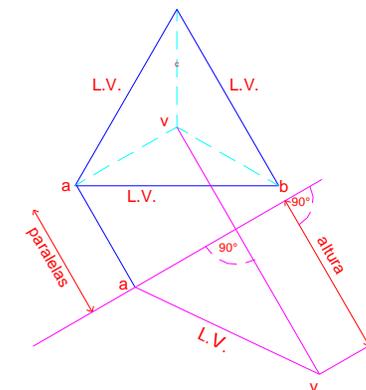
11.3 Primero se hace un cambio de plano paralelo a la recta "a-v".

11.4 Se proyecta el punto "a" hasta el cambio de plano y el punto "v" cruza el cambio de plano sin medida determinada



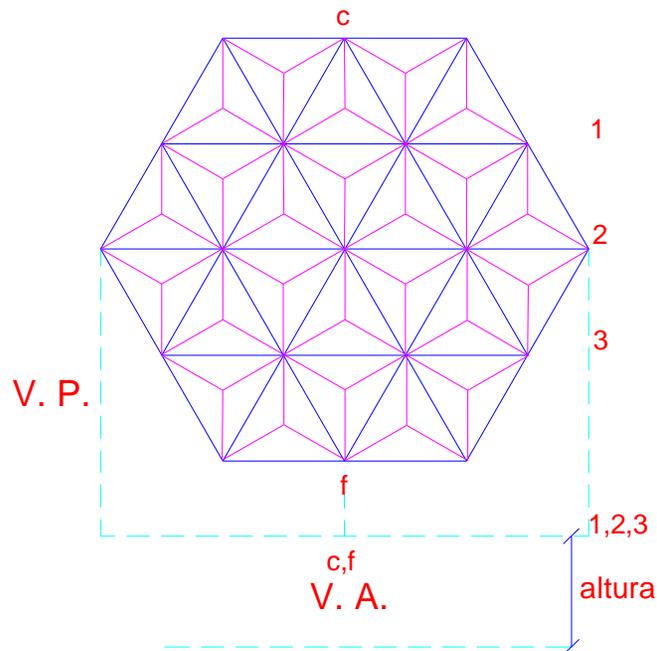
11.5 Las rectas "a-b", "b-c" y "c-a" se encuentran en longitud verdadera, se toma la medida de cualquiera de estas rectas y con apoyo en "a" se corta la proyección de "v".

11.6 Al unir la proyección del punto "v" con "a" se obtiene una recta en longitud verdadera y la altura se toma de donde corta la proyección de punto "v" con el cambio de plano de manera perpendicular.

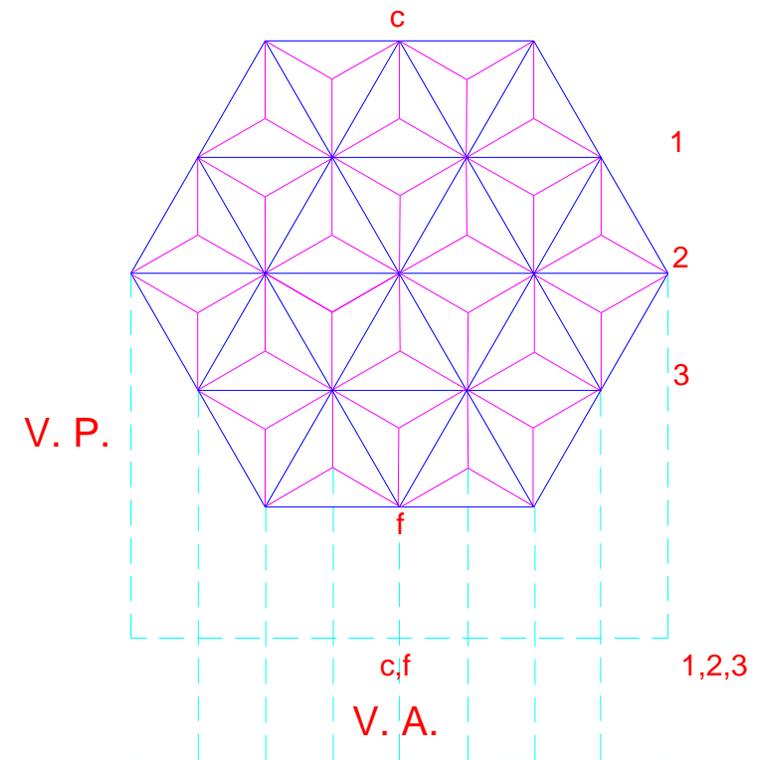


ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

12. Para dibujar la altura en vista de alzado solo basta con retomar la medida del paso 11 y dibujar una línea de trazo horizontal.

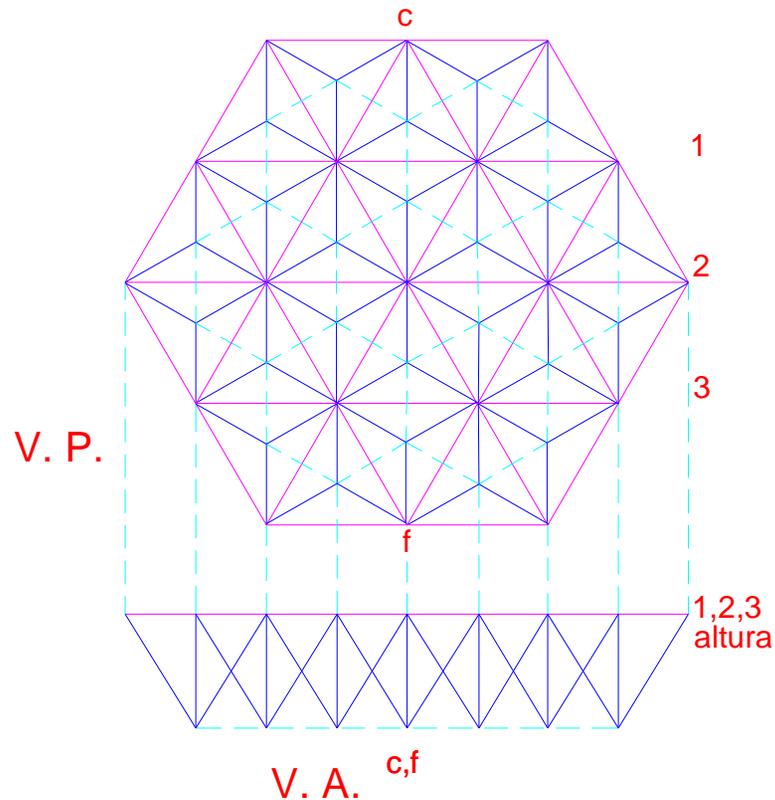


13. Se proyectan todos los vértices de las diagonales en V. P. hasta la línea de trazo que determina la altura en vista de alzado (V. A.)
14. En V. A. se trazan las diagonales que correspondan a su vista en planta (V. P.).
15. Para efecto de representación el manto inferior se dibuja con línea discontinua, observando hexágonos.



16. Al unir todos los vértices de las diagonales se forma un mosaico de hexágonos que conforman el manto inferior.
17. Finalmente en vista de alzado se dibuja con línea discontinua horizontal todo el manto inferior.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"



MODELOS DE ESTUDIO

El trazo geométrico permite obtener las longitudes reales de los elementos que conformaran el modelo estructural experimental. La finalidad de desarrollar modelos de estudio es corroborar medidas, analizar las posibilidades formales y el comportamiento estructural ante un empuje o carga determina, sin embargo, en este proceso no se pueden definir los problemas constructivos, hasta que se hagan las propuestas de ensamble y nodos de unión entre los elementos.

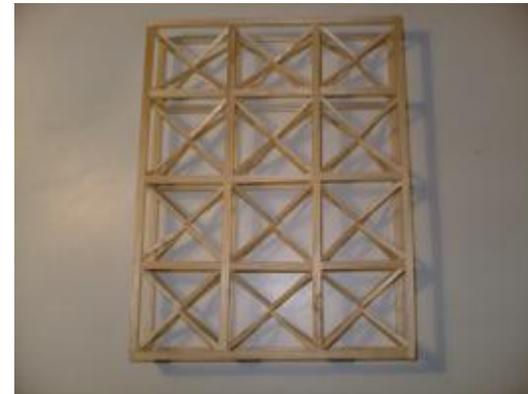


Imagen 34
Maqueta hecha con madera balsa que propone postes a compresión entre ambos mantos y diagonales unidas en el vértice.⁴³

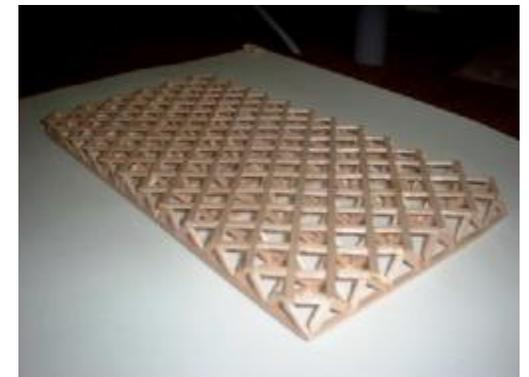


Imagen 35 Maqueta de tiras de madera con diseño en manto superior a 45° con respecto a los bordes.⁴⁴

⁴³ Idem

⁴⁴ Idem

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Los modelos no son exactos y no requieren de mayor precisión debido a la escala con que se trabaja. El material con que se realizan debe permitir facilidad en su manejo y fabricación pero se sugiere usar materiales con propiedades similares a los que se planea usar en la maqueta final. Para estos casos se puede usar como materia prima la madera por su facilidad de corte y manejo.

Otras posibilidades de uso puede ser pasta para sopa pegada con resistol blanco y pintada posteriormente con esmalte para evitar que con la humedad se hinche la pasta, una desventaja es la fragilidad del material y la imposibilidad para someterlo a algún tipo de esfuerzo, pero de alguna manera es aceptable para trabajar por su factibilidad y rapidez.

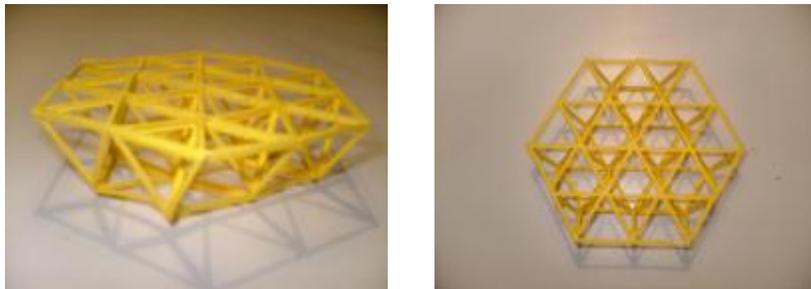


Imagen 36 Estructura espacial de base triangular hecha de plástico que simula perfiles y estudia cortes para unión entre barras.⁴⁵

Usar materiales con secciones similares a escala de las que se usaran en un modelo definitivo, permite un acercamiento a los posibles problemas por solucionar, tal es el caso de modelos fabricados con alambre galvanizado o de cobre y soldadura de pasta, en los cuales se observa un buen comportamiento y calidad,

además de prever la solución de corte y unión entre elementos que convergen en un mismo punto.

En estos diseños, se pretende una sola medida de barra ya que esto presupone acelerar el proceso de fabricación. Existe una diferencia sustancial entre la teoría y la realidad, puesto que en efecto, todas las barras pueden tener la misma longitud, pero el diseño y concepción de uniones jugará un papel importante en el tiempo de ejecución. Por ejemplo, no será lo mismo si se cortan 69 barras de la misma longitud y se efectúan 138 barrenos en sus extremos, que si se consideran las longitudes totales y solo se realizan dos cortes por barra y se efectúan 78 barrenos. Obteniendo al final dos estructuras con las mismas dimensiones y el mismo material pero con diferente procedimiento.

MAQUETAS ESTRUCTURALES EXPERIMENTALES

Convenientemente se deberá desarrollar una maqueta a escala real para observar, analizar y diseñar la solución del nodo. Este tipo de estructuras se pueden realizar con secciones tubulares de acero machucando sus extremos y atornillando cada barra, esta solución no requiere de mayor diseño y propuesta estética, con un bajo costo de fabricación, transportación y montaje. Existen estructuras desarrolladas con alta tecnología y excelente calidad a nivel mundial a un costo elevado, por este motivo y con la imperante necesidad de investigar para encontrar soluciones a proyectos de bajo costo, con técnicas disponibles y a nuestro alcance. A continuación se presentan propuestas de maquetas experimentales.

Para desarrollar propuestas, primero es necesario conceptualizar la forma y buscar soluciones a los problemas que presenta la fabricación de estructuras de este tipo. Se analizan las opciones de materiales a utilizar y las ventajas y desventajas de manejo, resistencia y

⁴⁵ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

costo. Con esta idea se desarrolló una propuesta con tubos de 3/4” de diámetro compactados y barrenados en sus extremos.



Imagen 37 Estructura Espacial de base cuadrada con perfiles de acero.⁴⁶

Con el trazo geométrico que se realizó previamente se busco la eficiencia de trabajo con una sola medida de barra y la verificación del ángulo de inclinación de las barras diagonales que en este caso fué de 55°. Un problema frecuente en el diseño de nodos es precisamente el ángulo con que llegan las barras al nodo y el ensamble entre estos para evitar el giro de barras o nodos, pues si no se considera este inconveniente al intentar armar nodos y barras al final se tendrá que hacer una cuerda inversa.



Imagen 38 Diferentes tipos de nodos que se utilizaron dependiendo la posición y la cantidad de barras.⁴⁷

Con este sistema no es necesario cuidar los ángulos del nodo o de la barra ya que la misma longitud de la barra da el ángulo correcto. Estos nodos se fabricaron con sección tubular redonda de 2” de diámetro y soleras de 1 1/2” x 1” x

⁴⁶ Idem.

⁴⁷ Idem.

1/8”. Los nodos perimetrales son de 7 soleras en el manto superior y de siete en el inferior, mientras que los intermedios son de 8 soleras y en las esquinas son de 3 soleras en el manto superior y de 6 en el inferior.



Imagen 39 Nodo intermedio con soleras de 1 1/2” x 1” x 1/8”, soldadas a sección tubular redonda de 2” de diámetro y tubos de 3/4” atornillados.⁴⁸

Podemos resumir los siguientes datos derivados del análisis de la estructura espacial de base cuadrada:

	BARRAS		NODOS	
	TIPO	CANTIDAD	TIPO	CANTIDAD
MANTO SUPERIOR	60 cm	60	3 BARRAS	4
			5 BARRAS	16
			8 BARRAS	16
MANTO INFERIOR	60 cm	40	6 BARRAS	4
			7 BARRAS	12
			8 BARRAS	9
DIAGONALES	60 cm	100		
TOTAL		200		61

Tabla 1 Cantidades y tipos de nodos y barras de acuerdo al trazo geométrico de la estructura espacial de base cuadrada.

⁴⁸ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Las soleras se barrenaron y soldaron a la sección redonda de acuerdo a la geometría para fijar los nodos con las barras, se hizo a través de tornillos y tuercas. Un aspecto importante que se consideró fue el transporte, pues cada elemento se puede manipular con facilidad gracias al tamaño y peso, además del poco espacio que ocupa el total de la estructura antes de ser armada. Este sistema trabajó sin problemas de deformación visible en un claro de tres metros.

Para el caso de la estructura de base triangular, se siguió el mismo principio, solo que en este caso el nodo tenía diferentes diseños y las barras fueron de sección cuadrada, atornilladas en un nivel plano para el manto superior e inferior y en otro nivel para las diagonales.



Imagen 40 Espacial de base triangular con perfiles cuadrados y nodos de placa de acero.⁴⁹

Como en el caso anterior, se usó perfil redondo, en este otro se pensó en perfil cuadrado de $\frac{1}{2}$ " porque las barras son rectas, por lo tanto, no presentarían efecto de torsión y además, no se estimó deformar el material en sus extremos. Para alcanzar más de tres metros de claro, se consideró 80 cm de longitud para cada barra tanto en el manto superior como en las diagonales, y en el manto inferior de 46.2 cm. Fue un total de 42 barras en el manto

superior, 72 barras en las diagonales y 30 en el manto inferior. Se identificaron 4 diferentes tipos de nodo, uno de ellos recibe 5 barras y se identificaron 6 de éstos en el manto superior y 12 en el inferior. El segundo nodo recibe 6 barras y se encuentra en el manto inferior. El tercero de ellos acepta 7 barras y se ubica en el manto superior al igual que el último que admite 12 elementos. Los datos se resumen en la siguiente tabla:

	BARRAS		NODOS	
	TIPO	CANTIDAD	TIPO	CANTIDAD
MANTO SUPERIOR	80 cm	42	7 BARRAS	6
			7 BARRAS	6
			12 BARRAS	7
MANTO INFERIOR	46.2 cm	30	5 BARRAS	12
			6 BARRAS	12
DIAGONALES	80 cm	72		
TOTAL		144		43

Tabla 2 Cantidades y tipos de nodos y barras de acuerdo al trazo geométrico de la estructura espacial de base triangular.

Estos nodos se fabricaron con placa de acero de $\frac{1}{8}$ " de forma hexagonal a la cual se soldaron placas perpendiculares del mismo espesor con la cantidad necesaria para el número de barras que fuera a recibir. Con la finalidad de tener datos sobre tipos y cantidades de nodos y barras en las dos estructuras espaciales que se desarrollaron en la investigación, se procedió al cuadro comparativo (tabla 3) según trazo geométrico. El análisis de los totales obtenidos en la tabla 3, presenta datos que conviene comparar para determinar cual de las dos estructuras tiene mejores condiciones desde el punto de vista económico. Primero se debe aclarar que la espacial de base cuadrada cubre 9.00 m^2 , mientras que

⁴⁹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

la espacial de base triangular cubre 6.65 m^2 por lo tanto, hay una diferencia de 2.35 m^2 y esto representa 26.11%. Si comparamos la cantidad de barras existe una diferencia de 56 barras, esto significa 28% más piezas en la espacial de base cuadrada.

	DESCRIPCION	POSICION	BARRAS				NODOS			
			TIPOS	CM	X PZA	CM	TIPOS	PZAS	PZA	PZAS
				LONG.	CANT.	TOTAL		X C/U	LONG.	TOTAL
9.00 m ²	ESTRUCTURA ESPACIAL DE BASE CUADRADA DE 3.00 METROS * 3.00 METROS FORMADA POR 25 PIRAMIDES INVERTIDAS Y RETÍCULAR DE 4*4 EN MANTO INFERIOR	M.S.	1	60	60	3600	3 B	4	4	16
		M.S.					5 B	6	16	96
		M.S.					8 B	9	16	144
		M.I.	1	60	40	2400	6 B	7	4	28
		M.I.					7 B	8	12	96
		M.I.					8 B	9	9	81
		D	1	60	100	6000				
TOTAL	1	60	200	12000	5	43	61	461		
6.65 m ²	ESTRUCTURA ESPACIAL DE BASE TRIANGULAR DE 3.20 METROS * 2.77 METROS FORMADA POR 24 PIRAMIDES INVERTIDAS Y 7 EXÁGONOS EN MANTO INFERIOR	M.S.	1	80	42	3360	5B	6	6	36
		M.S.					7B	8	6	48
		M.S.					12B	13	7	91
		M.I.	2	46.2	30	1386	5B	6	12	72
		M.I.					6B	7	12	84
		D					1	80	72	5760
		TOTAL	2	68.7	144	10506	4	40	43	331

Tabla 3 Cuadro comparativo entre estructuras espaciales de base cuadrada y de base triangular

En teoría, si se utiliza la misma cantidad de barras, debería de cubrir casi la misma área porque apenas existe una diferencia de 1.89% entre el área cubierta y la cantidad de barras. Por lo tanto, si 144 barras cubren 6.65 m^2 resultaría que 200 barras cubren 9.23 m^2 , esto significa una diferencia de 0.23 m^2 , sin embargo, se debe considerar la longitud de barras y tipos con un factor importante.

Otro factor similar al anterior es el de los nodos, donde se observa diferencia de 18 piezas más (29.50% más) en la espacial de base cuadrada. De la misma forma, se podría suponer que si se ocupan más nodos, tendría mas

elementos para cubrir un área mayor, puesto que la diferencia es de 3.39% entre el área cubierta y la cantidad de nodos. Si 43 nodos cubren 6.65 m^2 para este caso 61 nodos deberían cubrir 9.43 m^2 , (la diferencia es de 0.43 m^2). La columna que muestra el total de piezas por nodo, se comporta de manera similar (2.08% de diferencia), sin embargo, ese aspecto dependerá más del diseño y proceso para la fabricación del nodo para que impacte en el tiempo más que a los metros cuadrados a cubrir. El último aspecto trascendente en la tabla, son los centímetros lineales utilizados en ambas estructuras, y que al parecer son resultados importantes.

La observación de datos, demuestra diferencia de 14.94 ml (menos en la espacial de base triangular), esto es un aumento de 0.945 m^2 y 1.41 m^2 menos en la triangular. Lo cual quiere decir, que la cantidad de material no se aprovecha al máximo. Dicho de otra manera, con 120 metros de material ordenado en forma de espacial de base cuadrada se cubren 9.00 m^2 , mientras que dispuestos como espacial de base triangular se cubren solamente 7.59 m^2 . También existe una diferencia importante que es la longitud de barras, en la espacial de base cuadrada hay un solo tipo de barra con dimensiones menores a una de las dos barra que se necesitan en la espacial de base triangular, esto se traduce en mejor desempeño a esfuerzos de compresión evitando así, aumento de sección o refuerzos adicionales. Finalmente, la forma de una estructura espacial tiene estrecha relación con la función y la belleza del conjunto, así que del arquitecto dependen las soluciones a estos aspecto.

En la búsqueda de estructuras de base triangular con mejores características de nodos y barras, se desarrollo una estructura que tuviera un solo tipo de nodo y una medida de barra. También se pensó en usar un material

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

más ligero que el acero, así que se optó por usar tubos de P.V.C. de 1” de diámetro. Este material permitió un corte rápido y con menos desgaste de las herramientas que se usaron como el arco con segueta y las brocas para perforar las barras.

En el manto superior fueron necesarias 42 barras en las diagonales 36 y el manto inferior 24. Un aspecto interesante en el diseño de esta estructura fue que al momento de buscar la misma medida de barra para el manto inferior, sólo se tuvieron que unir los vértices de pirámide de manera salteada, es decir, solo la mitad (12) del total (24) de pirámides que en el caso anterior (144).

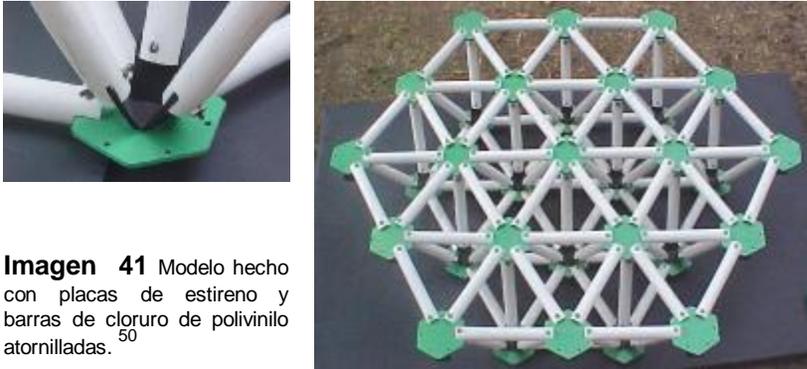


Imagen 41 Modelo hecho con placas de estireno y barras de cloruro de polivinilo atornilladas.⁵⁰

Con esto se logró una medida de barra y una disminución en la cantidad de material. Por lo tanto, también se reduce la cantidad de nodos manteniendo la misma cantidad en el manto superior de 19 piezas y reduciendo a 12 en el manto inferior (ver tabla 4). Para homologar los materiales, se consideró la posibilidad de usar acrílico en los nodos, pero el caso sugirió usar otro material como el estireno.

	BARRAS		NODOS	
	TIPO	CANTIDAD	TIPO	CANTIDAD
MANTO SUPERIOR	4b	6	1	42
	5b	3		
	6b	3		
	9b	7		
	SUBTOTAL	19	1	42
MANTO INFERIOR	6b	6	1	24
	7b	3		
	9b	3		
	SUBTOTAL	12		
DIAGONALES			1	36
TOTAL		31	3	102

Tabla 4 Resumen de nodos y barras para estructura espacial de base triangular con la misma dimensión de barra.

El nodo que más barras recibe es de nueve, y se ubica en el centro de la estructura en los dos mantos. El diseño fue a través de un exágono y una “y”. El procedimiento consistió en cortar una placa de estireno con seis lados iguales y un barreno por lado, seguidamente, se cortó otra placa del mismo material pero con tres rectángulos unidos a través de un triángulo.

Para lograr esto, se cortó de una sola pieza para después levantar los tres triángulos utilizando calor. Finalmente se hizo un barreno por cada rectángulo, y se unió a la placa exagonal con pegamento para estireno. Este nodo invertido, presenta las mismas condiciones en ambos mantos, además recibe 4, 5, 6 y 7 barras sin modificar su forma original.

⁵⁰ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

VI.- CÚPULA SEMIESFÉRICA

PRINCIPIOS

El antiguo imperio romano se caracterizó por sus importantes construcciones de piedra, utilizó elementos como bóvedas de cañón, arista y cúpulas; sin embargo, el principio que rige estos elementos es el arco, ya que demuestra su resistencias gracias a la disposición de salmer, dovelas y clave hechos con piedra o ladrillo.

En nuestro continente, el arco maya adquiere forma al disponer bloques de piedra en voladizo en ambos extremos de un vacío, los bloques sobresalen uno con respecto al anterior hasta llegar al punto medio más alto que se corona con una albardilla.



Imagen 42

Ruinas de Palenque,
Chiapas-México.⁵¹

La arquitectura en el México prehispánico y la del virreinato, principalmente, utilizó el arco de medio punto como elemento preponderante en casi todas sus construcciones. Existe el arco rampante, peraltado, de herradura, trifoliado, apuntado o conopial que se pueden admirar en la arquitectura morisca o islámica. Gracias al avance tecnológico y de materiales, éstos arcos no solo se pueden hacer con piedra, sino también con metal, madera, plástico o cartón que organizados como un

sistema da lugar a superficies de doble curvatura. Se deberá entender para este caso que un sistema es la conformación de partes para formar un todo. La cúpula es una superficie que presenta las características de doble curvatura y el mismo empuje en todas las direcciones, con curvas en un mismo sentido, de manera radial, la más sencilla es la que resulta de la esfera. Esta cúpula presenta de manera general dos componentes básicos, el primero son los “nervios” que se encuentran dispuestos radialmente y el segundo son los anillos que se determinan a diferentes alturas.

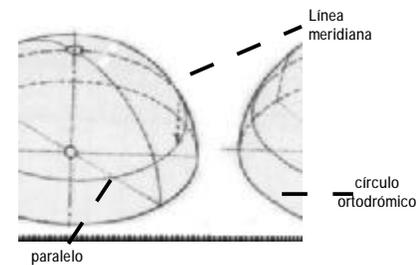


Imagen 43

Fuerzas que actúan sobre una cúpula semiesférica.⁵²

Los nervios generan una curva denominada meridiano, esta es una curva descrita por una sección vertical que corta sobre el eje de la superficie, mientras que los anillos generan una circunferencia llamada paralelo que es una sección horizontal que corta perpendicularmente el eje de la superficie.

Se comprenderá que una cúpula semiesférica tiene la forma de media esfera donde la transición de fuerzas de los paralelos a los meridianos se da entre los 45° y 60° con respecto al eje vertical, estas fuerzas pueden ser tangenciales y actúan de manera perpendicular a las fuerzas meridianas y a lo largo del paralelo.

⁵¹ Arquitecto Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.

⁵² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

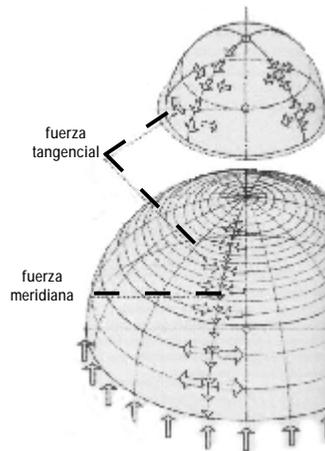


Imagen 44

Transición de fuerzas de los paralelos a los meridianos.
53

En la parte superior trabajan a compresión y en la parte inferior a tensión, estas fuerzas limitan movimientos hacia fuera de la cúpula. También se da la fuerza meridiana que actúa a lo largo de la línea llamada con el mismo nombre y se da solo con cargas verticales y siempre de compresión. La base de la cúpula recibe la fuerza meridiana y contiene los componentes hacia el exterior, también se le conoce como zuncho o cornisa y los materiales propuestos en la construcción de la cúpula van a determinar el tamaño de la sección o refuerzos para resistir los esfuerzos de flexión producidos por deformaciones elásticas.

APLICACIONES



Autohaus Fleischhauer, Bonn – D.
Internationale Glasbautechnik im Bild.
Tageslicht-Einfälle Von Eberspächer
Page 31.



Panorama Kino, in Berlin,
Arch.: Reidemeister und Glässel,
Berlin. Mero-Vision, n.º. 26,
Dezember 1990. Page 6.

Mirage Hotel, Las Vegas.
Arch.: Marnell Corrao
Associates, Las Vegas,
USA. Mero “The Way to
Distinctive Design”. Page 9.



⁵³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Galerien, Passagen, Einkaufszentren. Kurfürstengalerie, Kassel-D. Internationale Glasbautechnik im Bild. Tageslicht-Einfälle Von Eberspächer Page 32.



Galerien, Passagen, Einkaufszentren Dreispitz_Haus, Berlin-D. Internationale Glasbautechnik im Bild. Tageslicht-Einfälle Von Eberspächer Page 35.

Galerien, Passagen, Einkaufszentren. Kurfürstengalerie, Kassel-D. Internationale Glasbautechnik im Bild. Tageslicht-Einfälle Von Eberspächer. Page 33.



Cladding Systems. Standard products or individually designed. Stockholm Globe Arena, Sweden Heat-insulated aluminium sandwich panel. Arch.: Berg, Stockholm/Sweden. Mero “The Way to Distinctive Design”. Page 12.

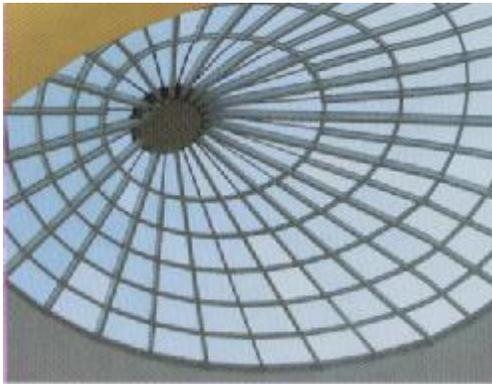


Typical Combinations Of Structure And Cladding. Integrated Approach To function and Design “Solar shading and ventilation”. Mero “The Way to Distinctive Design”. Page 15.



Centro Cultural, Shondai, Japon. Arch: Itsuko Hasegawa. Itsuko Hasegawa. Page 48.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



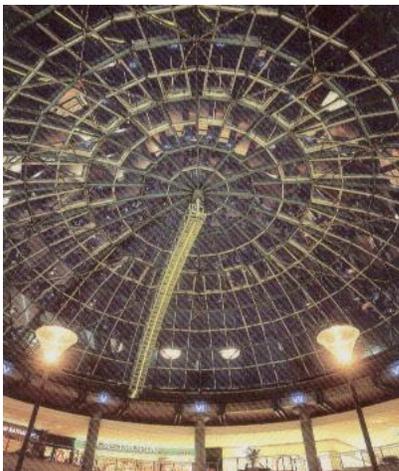
Abu Dhabi Mall (Trade Center). Consult, Abu Dhabi (UAE). Mero-Vision, Number 38, 2002/2003. Página 17.



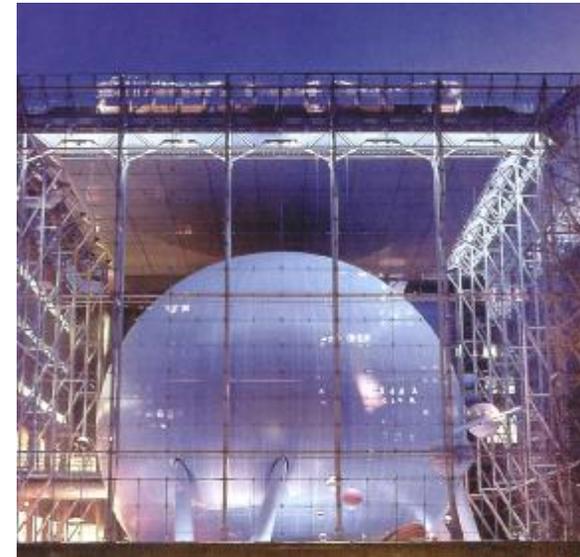
Rose Center for Earth and space, American Museum of Natural History, Nueva York, 1999. Ing. Weidlinger Associates. Arq. Polshek & Partners. Maestros de la Estructura. Page 77, 80.



Mercato Shopping Mall, Dubai (UAE) Transemirates Con-tracting, Dubai (UAE). mero-vision, Number 38, 2002-/2003. Page 17.



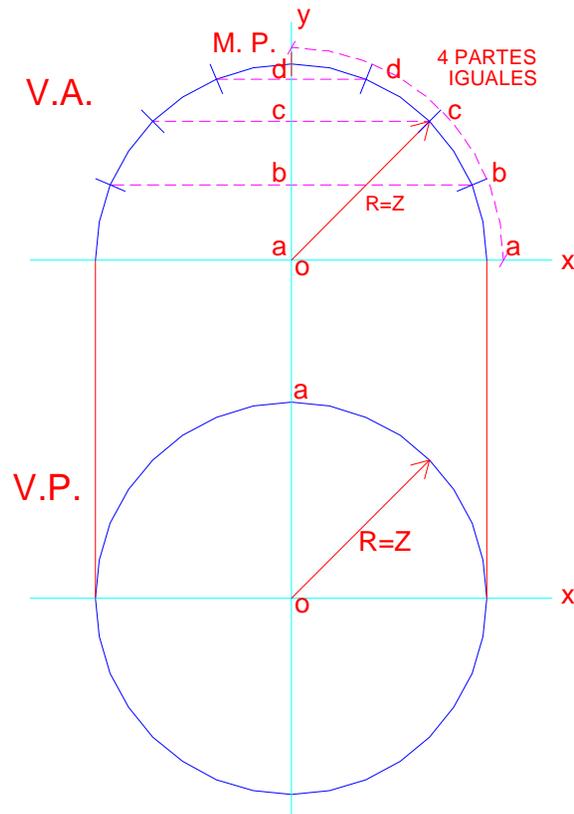
PEP, Munich, D. Arch.:KSP, Köln, D. Today's Sophisticated Developments Require Comprehensive Solutions. Mero "The Way to Distinctive Design". Page 13.



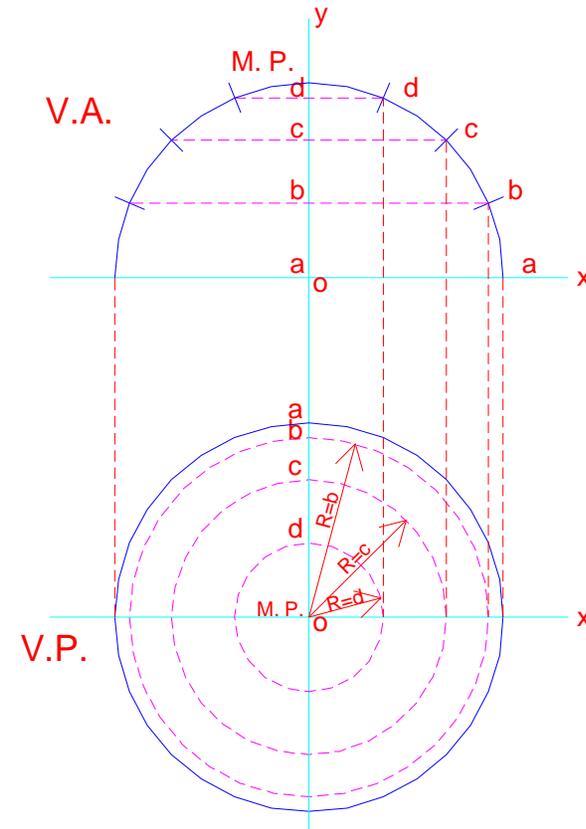
ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

TRAZO GEOMÉTRICO

1. Se proyectan los ejes "x", "y" y se dibuja un arco de medio punto (M. P.) con radio igual a "Z". Dibujo que representa la Vista en Alzado (V. A.).
2. Con la misma medida de radio "Z" se dibuja una circunferencia "a" en la parte baja del arco de medio punto (M. P.) antes trazado, esta es la Vista en Planta con la misma proyección del eje "y" y se marca otro eje "x".
3. La mitad del arco de medio punto en V. A. Se divide en cuatro (4) partes iguales y con líneas horizontales se marcan los cortes "a, b, c, d".

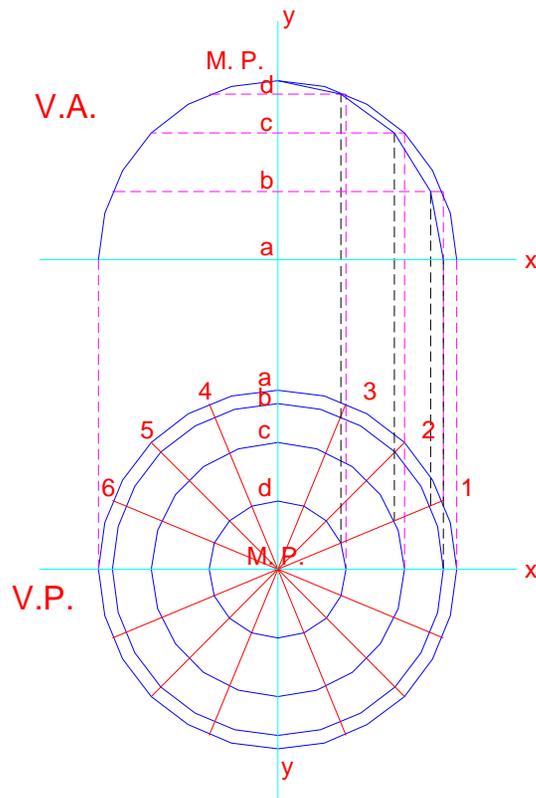


4. Donde se intersectan los cortes con el arco de Medio Punto en V. A. se proyectan hasta el eje "x" en vista de planta (V.P.).
5. Con las medidas de radio "b, c, d" (que fueron las intersecciones antes marcadas) se dibujan círculos concéntricos haciendo centro en el punto "o" (estos representan los cortes).

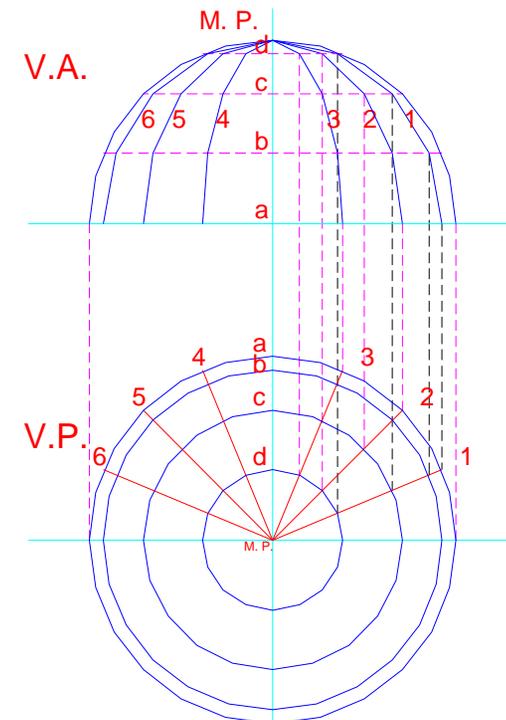


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

6. La circunferencia se divide en dieciséis partes iguales en V. P.
7. Se marca solo la mitad con números del “1 al 6” las divisiones antes hechas. Estos son los arcos que determinan la estructura en su vista de planta.



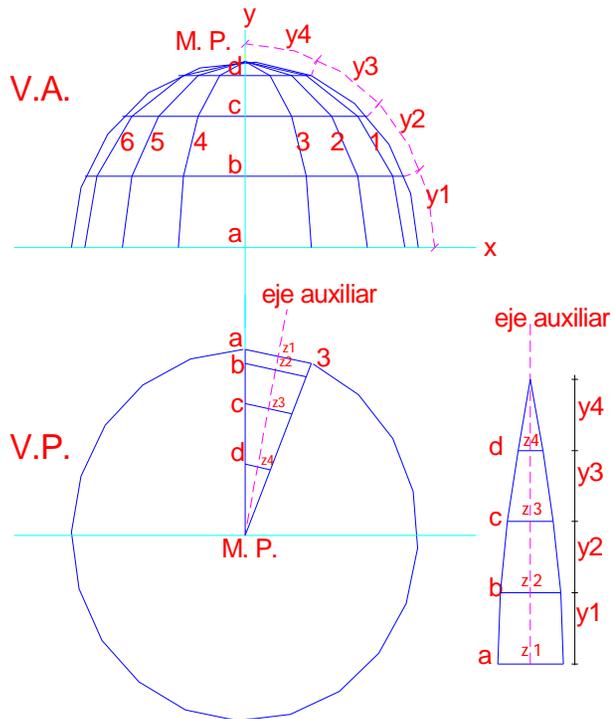
8. Para dibujar el arco 1:
 - 8.1. En V. P. se ubica la intersección “1,a” en vista de planta (arco 1 con corte “a”) y se proyecta hasta el corte “a” en vista de alzado.
 - 8.2. Nuevamente en V. P. se ubica el arco “1” con la intersección del círculo “b” y se proyecta hasta el corte “b” en V. A.
 - 8.3. Con el mismo procedimiento anterior se proyectan “c” y “d” con “1” y se unen todos los puntos.
9. Los arcos “2” y “3” en vista de alzado, se obtienen de la misma forma descrita en el punto 8
10. Se termina la vista en alzado hasta proyectar los arcos “4”, “5”, “6” como se hizo con los anteriores.



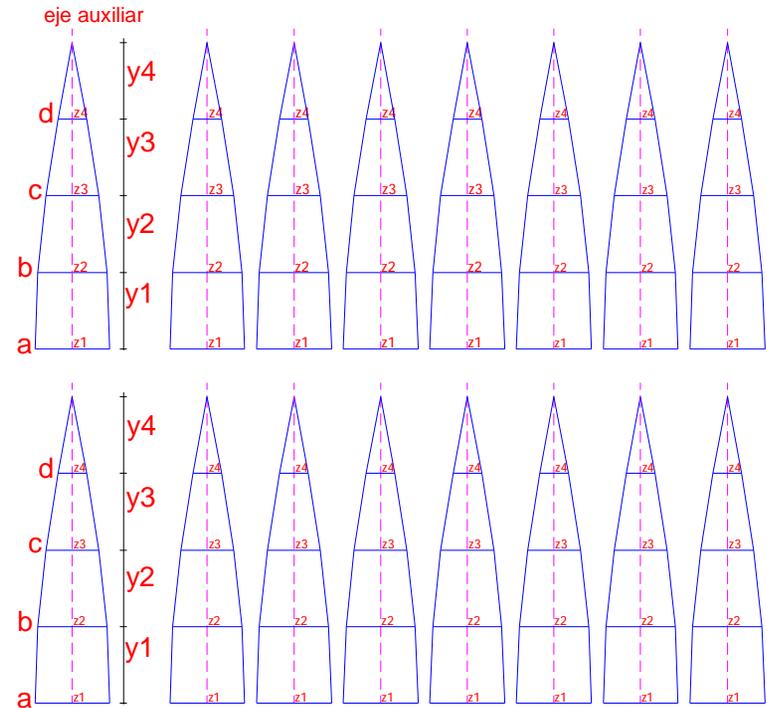
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

PLANTILLA

11. Para obtener la plantilla, se mide el perímetro del arco en vista de alzado (V. A.) directamente de los cortes “a, b, c, d, M.P.”, ó a través de la formula $P = \frac{d}{4}$ y se pasan a una línea de “eje” auxiliar vertical trazada previamente.
12. De vista en planta se traza un eje auxiliar por ejemplo entre el eje vertical “y” y el arco “3” a la mitad.
13. El ancho de plantilla, se mide en V. P. Primero en el arco “a” del eje auxiliar hacia el eje vertical “y” y del eje auxiliar hacia el arco “3”, estas medidas se pasan al eje auxiliar en el corte “a” trazado con anterioridad.
14. Sucesivamente con el arco “b, c, d” hasta el M. P.
15. Se unen los puntos obtenidos y éste es el primer gajo de la plantilla.



16. Finalmente se repite dieciséis veces la plantilla anterior, para obtener el modelo completo.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

MODELOS DE ESTUDIO

El siguiente paso de una serie sistemática de acciones que se encaminan a lograr un prototipo, es la generación de la representación a escala de lo que pudiera ser una cúpula semiesférica, en un modelo se puede observar el aspecto y construcción, y generalmente se hace a escala. Se recomienda que el trazo geométrico se haga a la escala del proyecto, con el objeto de obtener la plantilla al mismo tamaño y prever los problemas constructivos y de diseño. Se puede ampliar el tamaño en caso que el modelo sea muy pequeño y difícil de manipular y construir. Con estos pequeños modelos que en un primer intento pueden ser de papel. Es sencillo unir cada gajo para ver la forma completa y corregir en caso de error en alguna medida. Se puede utilizar papel cartoncillo o cualquier otro tipo de papel que presente cierta resistencia y facilidad de manejo y corte. Una vez hecho y corregido el primer modelo se pueden hacer combinaciones de papel y colores para jugar con la apariencia y estética del modelo, también sirve como criterio de solución a los posibles problemas de estabilidad estructural.

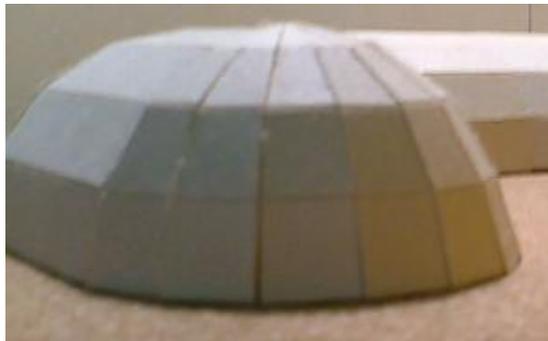


Imagen 45
Modelo de papel que presenta dificultades para la unión de gajos.⁵⁴

⁵⁴ Arquitecto Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.



Imagen 46 Modelo de cartulina americana que divide cada plano de forma diagonal combinando dos colores de manera secuencial.⁵⁵

Mica transparente o cualquier otro material plástico es de gran ayuda ya que se experimenta con un material más cercano a la realidad de lo que pudiera ser en apariencia una cúpula definitiva en un proyecto específico. Un modelo de cúpula semiesférica transparente en apariencia sin mayores problemas de unión entre gajos, se puede observar un problema común en el vértice o punto más alto de la cúpula (donde convergen todos los gajos) ya que se hace difícil la unión de las puntas de las dieciséis partes.



Imagen 47
Modelo cúpula semiesférica hecho con mica transparente que simula un invernadero.⁵⁶

⁵⁵ Idem.

⁵⁶ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

La solución a este problema puede ser un círculo al que llegue cada plano en sustitución de un vértice, en este proceso se puede analizar de manera conveniente como llegará cada plano o en su caso, cada barra que conformará la estructura, pues no se observa este problema en el trazo geométrico donde convergen dieciséis líneas en el punto que representan planos o barras. Al pensar en materiales, éstos tienen una sección que se deberá considerar en el sistema constructivo de una cúpula y dar solución a dicho vértice a través de un anillo de compresión donde puede llegar cada elemento con mayor facilidad y calidad de trabajo. Con esto no se quiere decir que no se pueda dar solución a un punto donde llegan varios elementos pero si que deberá presentar atención y cuidado. Ciertas propuestas resultan interesantes en este proceso así como las soluciones estructurales y de fuerzas tangenciales, meridianas y de estabilidad con vectores diagonales. Vista en planta la imagen 48 y vista en alzado la imagen 49 de un modelo fabricado con cartoncillo rígido simulando secciones “t” en el meridiano y diagonales entre cada plano que le confieren sencillez, funcionalidad y estética.

Imagen 48

Modelo de cartoncillo.
Vista en Planta.⁵⁷



⁵⁷ Idem.



Imagen 49 Modelo de cartoncillo. Vista en Alzado.⁵⁸

Estos son los principios y formas más simples de una cúpula semiesférica desarrollada radialmente que encierra diversas posibilidades de diseño y composición de formas básicas, la exploración, análisis y desarrollo de diferentes modelos enriquece este proceso. La composición de dos superficies de revolución con forma, función y sistema constructivo no convencionales por ser cúpulas de gran tamaño y muy ligeras.



Imagen 50

Dos cúpulas semiesféricas de lona plástica interconectadas para exposiciones temporales.⁵⁹

⁵⁸ Idem.

⁵⁹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

En la imagen 50 se proponen dos estructuras neumáticas interconectadas para un centro de exposiciones, este tipo de cúpulas se adaptan fácilmente a los principios de las neumáticas, por lo sencillo de la plantilla tipo y empotre perimetral, aunque existe la posibilidad de retomar otros sistemas como el ferrocemento y realizar cortes y composiciones diversas.

MAQUETAS ESTRUCTURALES EXPERIMENTALES

Inicialmente la creación de maquetas experimentales se hizo con la finalidad de observar la diferencia entre el proyecto, diseño, dibujo y la construcción de maquetas con las convenientes propuestas de materiales y sistemas, así como su comportamiento estructural y análisis que ayudaran a mejorar las propuestas anteriores.



Imagen 51
Maqueta de madera y
placas de acrílico.⁶⁰

El primer modelo de dos metros de diámetro se realizó con madera y placas de acrílico. Los nervios de la estructura se hicieron con barros de madera de sección

2"x1" con cortes en los extremos para dar el ángulo de acuerdo al trazo geométrico. Para unir cada barra y dar continuidad al nervio, se realizaron cortes a la madera en forma de hembra y macho, para posteriormente unir con resistol blanco y fijar con clavo de $\frac{3}{4}$ ", se construyeron dieciséis nervios de las mismas características.

Los anillos fueron hechos con madera en sección de 1" x 1" de igual manera con cortes en los entremos y el ángulo correcto, pegados y unidos con resistol y clavos. Para recibir las placas de acrílico de 3mm de espesor, se colocó un borde de madera en la parte interna de los nervios que funcionó como base y sujeción de los planos que se barrenaron y fijaron primero con silicón y finalmente con pijas y rondanas de goma y metal, sobre el anillo de compresión, se colocó otra placa de acrílico con pijas. La experimentación de esta maqueta ayudó en propuestas futuras con materiales adecuados y de sencillo transporte.

En una segunda propuesta se conceptualizó una maqueta con facilidad de manejo, transporte, y montaje. Así se ejecutó otra cúpula de las mismas características sólo que ésta se fabricó con metal y lona plástica.



Imagen 52
Cúpula de nervios
metálicos y lona
plástica.⁶¹

⁶⁰ Idem.

⁶¹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

En esta ocasión se usaron varillas de acero pulido de $\frac{1}{4}$ ” como elementos principales que resistieran los esfuerzos a través de la línea meridiana. Se pudo prever con anticipación que la resistencia sería muy baja ya que estas fuerzas son de compresión y las varillas oponen poca resistencia a esta fuerza, aún así uno de los objetivos iniciales de transportación prevaleció pues se pensó en una cubierta ligera. Las dieciséis varillas se doblaron sobre un trazo previo con las medidas que la geometría determinó, únicamente tres componentes más se emplearon para levantar la estructura, el primero de ellos fue el anillo de compresión, el segundo el anillo de tensión en el círculo ortodrómico entendido como el círculo de mayor diámetro que se puede trazar en una esfera, y el último la lona. El primero se elaboró con lámina metálica de forma circular calibre 18 al cual se soldaron soleras en forma de “u” para recibir las varillas de $\frac{1}{4}$ ”.



Imagen 53 Detalle de anillo de compresión metálico. ⁶²

El segundo componente se ejecutó con nodos metálicos en forma de “t” invertida de lámina metálica doblada y soldada que recibe secciones de varilla del mismo diámetro que los nervios y tornillos que hacen las

⁶² Idem.

funciones de seguro para contrarrestar los esfuerzos en el plano horizontal producidos en la base de la maqueta. Por último, la cubierta se confeccionó con lona plástica de color blanco, ésta se cortó de acuerdo a los patrones obtenidos en el trazo y dibujados en papel para cortar cada gajo. Se dejaron extensiones en los bordes de cada gajo con la finalidad de unir con costura y dejar una relinga que cubriera los nervios metálicos y evitara desplazamientos laterales, con esto se evitaron anillos a diferentes alturas y se redujo la cantidad de material y peso de la estructura, el resultado fue una maqueta que cumplió su cometido de manejo, transporte, montaje y ligereza. La continua exploración es importante en la investigación de estructuras ligeras, y los métodos pueden ser diferentes para cada suceso. De esta se levanto la maqueta neumática de mayor diámetro que las previas con un sistema que cubre las pretensiones de metodología en la enseñanza de las estructuras ligeras. La maqueta de tres metros de diámetro hecha con polietileno, ayudo en la maduración sobre los principios de superficies de cúpula semiesférica que anteriormente se trabajaron.



Imagen 54 Neumática de baja presión de polietileno. ⁶³

⁶³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Esta maqueta se conceptualizó como una superficie delgada y flexible que fuera capaz de soportar cargas a través del desarrollo de esfuerzos de tensión. El plan determinó una estructura neumática de baja presión que se analizará como membrana tensionada a la que se introduce aire para generar sobrepresión interior y por lo tanto estabilidad. En este caso, no necesitó de estructura soportante ya que la sobrepresión interior contrarresta las cargas que actúan sobre ella, siempre y cuando este “sellada” y anclada en todo el perímetro para evitar fugas. Con plantilla previamente trazada en un cartón, se marcó sobre el propileno dejando una pestaña de 2 centímetros de ancho a lo largo y en un solo lado del gajo.



Imagen 55 Hinchado de la estructura con aire a presión.⁶⁴

⁶⁴ Idem.

Una vez cortados y marcados los 32 gajos se unieron con cinta elástica de abajo hacia arriba, observando inconveniente de sobreposición de planos y por consiguiente pliegues en forma de bolsa en la cúspide de la cúpula.



Imagen 56 Ducto de conexión del motor a la maqueta.⁶⁵

Todo el perímetro se unió con la misma cinta directamente al piso de loseta cerámica y se usó un motor de $\frac{3}{4}$ hp de potencia para inyectar aire a la estructura a través de un ducto conectado del motor hacia la maqueta. Exitosamente se pudo comprobar que una vez tensionada la cúpula, si se realizaban aperturas directamente al material, disminuía la presión interior pero no caía por completo.

También se pudo observar que es necesario dejar pequeñas perforaciones para dejar escapar el exceso de presión ya que continuamente se debe inyectar aire, y

⁶⁵ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

vno se puede mantener estable sin un motor que trabaje constantemente. Por otro lado los gajos se deben unir de arriba hacia abajo y de preferencia con un pequeño anillo para evitar la aglomeración de puntas en el vértice. Por último se reflexionó sobre maquetas casi prototipos de estructuras que se pudieran habitar y tuvieran utilidad para casos de desastre.

Una maqueta a escala 1:1 no presentó inconvenientes con las experiencias anteriores, el reto ahora fue vivir internamente el espacio y sentir la presencia del aire. Para realizar el estudio, se fabricaron pompas de jabón que es la base para crear formas básicas, la curva tiene dos direcciones en la superficie, es decir, en el radio de curvatura se pueden encontrar los positivos y negativos. Las pompas de jabón son una superficie mínima y la forma debida a la tensión superficial del líquido, le confiere resistencia, flexibilidad y ligereza. En este tipo de estructuras, la superficie es mínima, cubriendo el máximo en volumen y es la forma más simple.

Imagen 57
Pompa de jabón.⁶⁶

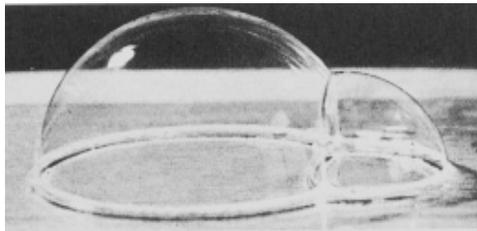
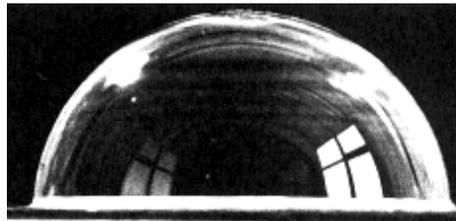


Imagen 58
Pompas de jabón.⁶⁷

Con estas estructuras se pueden construir, tanques de almacenamiento, se pueden techar albercas, gimnasios, estadios etc., ya que la forma es curva y provoca formas estéticas. Otro método para obtener "maquetas naturales" se hace aprovechando la presión y el peso del yeso, se requieren dos placas de madera de triplay de 16 mm, de aproximadamente 40x40 centímetros, para esto, se realiza una perforación de aproximadamente ½" de diámetro al centro de una de las placas para conectar una manguera del mismo diámetro.

En la segunda placa se traza el diseño en vista de planta y se corta el perímetro para dejar el espacio libre, después se coloca una hoja de caucho entre las dos placas (como emparedado) y se colocan prensas alrededor del modelo. Para inyectar el yeso, se dispone la manguera en posición completamente vertical (el corte de diseño debe quedar con la cara hacia abajo) colocando un embudo en el extremo superior de la manguera para vaciar el yeso y este pueda bajar con presión. Se puede ver que el yeso tensiona la hoja de caucho, dando forma y volumen a la maqueta. Una vez fraguado el yeso se invierte el modelo y esta listo para trazar plantillas con tiras de papel albanene realizando cortes entre las tiras de papel para obtener los gajos definitivos y pasarlos a escala.

Con la ayuda de la computadora se realizaron los trazos como se ha explicado con anterioridad y la impresión de la plantilla a la escala que se solicitó. Podría afirmar que la cúpula semiesférica presenta un solo círculo ortodrómico, o sea que en una cúpula el círculo mayor es el de la base, que para este caso fue de 5 metros de diámetro. Se tomó la decisión de realizar la maqueta con material transparente y derivado de polímero debido a la facilidad de manejo, similitud con una burbuja de jabón, transporte y costo.

⁶⁶ Otto, Frei. "Tensile Structures". Vols. 1 & 2" M.I.I. Press, 5 Th De. 1982.

⁶⁷ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Imagen 59

Estructura neumática de polietileno (hule cristal) con puerta de acceso.⁶⁸



Se procedió con el trazo y corte de doce gajos de polietileno, dejando 1 centímetro de cada lado para unir con máquina de coser solo que en este caso los gajos se unieron de arriba hacia abajo y se corto una circunferencia como remate del punto más alto para evitar la concentración de puntas. Se pensó en unir con calor sin embargo el material no soportaría la fundición y requeriría de válvula reguladora de presión, de tal forma que las pequeñas perforaciones que deja el paso de la aguja ayudan a liberar el exceso de aire y la puerta podría hacer las veces de válvula.



Imagen 60

Vista frontal. Cubo de acceso con función liberadora de presión.⁶⁹

Para esto se fabrico un esqueleto de 1mx1mx2m con madera de 1"x2" de sección atornillada y forrada con lona de rafia y dos aberturas con cinta contactel que une las hojas de las puertas y contiene el aire para evitar perdidas de presión al mismo tiempo que libera el exceso de aire. Para anclar la estructura se corto una circunferencia de lona que posteriormente se cosió a los gajos con extensiones en forma de pretinas (12 en total) para introducir un cable de acero en el borde.

El área donde se colocó la estructura permitió hincar varillas de 3/8" en forma de "u" presionando el cable de borde con ángulo de 45° para evitar deslizamientos verticales y por lo tanto, deformación de la estructura. Fueron necesarios dos inyectores de aire colocados en extremos opuestos y posteriores a la puerta con capacidad de un caballo de fuerza para "levantar" la estructura.

Imagen 61

Vista lateral. Anclaje con varilla y cable de acero.⁷⁰



⁶⁸ Arq. Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.

⁶⁹ Idem.

⁷⁰ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Imagen 62

Interior de la estructura con inyección constante de aire.⁷¹

El proceso provocó expectativa entre los curiosos que preguntaron sobre el contenido interior de la burbuja, las incógnitas referentes a la presión y fuerza de inyección del aire se experimentaron por cada visitante, sin embargo, la posibilidad de usos es ilimitada desde tiendas provisionales en caso de desastre y cimbras hasta ciudades acuáticas y aéreas y tal vez, como bolsas de aire para edificios o túneles de escape en caso de sismo. Un nicho poco explorado se da a las personas de escasos recursos y materiales ecológicos alternativos aplicados a las estructuras ligeras. Con este espíritu reflexivo se planeo la construcción de una maqueta que aprovecha los recursos naturales disponibles a muy bajo costo, como es el bambú o carrizo y hojas de washingtonia robusta. Para este caso se planeo una superficie con las mismas características que las anteriores pero utilizando nodos de lámina metálica. La

⁷¹ Idem.

propuesta se hizo con base en la facilidad de unión entre cada barra de bambú para lo cual se corto lámina calibre 18 en forma de cruz de 8 centímetros de longitud por eje con 8 barrenos para atornillar.



Imagen 63

Anillos armados de bambú y lámina metálica.⁷²

Con las medidas de recta obtenidas del trazo, se escalaron para obtener un diámetro de 2.5 metros. El proceso de armado se efectuó por anillos completos y nervios fragmentados para colocar progresivamente los subsecuentes anillos. Las partes fragmentadas de la cúpula observaron un buen comportamiento de estabilidad estructural, sin embargo, la conjunción del todo presento una leve inestabilidad que sugirió contraventeos con tirantes metálicos cruzados que dieran rigidez.



Imagen 64 Total del armado cubierta con hojas de washingtonia robusta.⁷³

⁷² Idem.

⁷³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Se procedió con la colocación de washingtonia robusta amarrada a la estructura de manera similar a las cabañas de palma en el sur de la República Mexicana, conviene aclarar que esta estructura solo propone una protección de rayos solares. Finalmente se obtuvo un ensayo de la maqueta para observar su resistencia presentando una capacidad de carga de 36 kg antes de colapsarse, la experiencia obtenida demostró la necesidad del diseño de nodos y mayor resistencia en el material empleado. A pesar de todo conviene seguir experimentando y trabajar para encontrar una solución aceptable y con facilidad en el montaje para autoconstrucción en zonas donde se puedan aprovechar estos materiales sin costo adicional de hechura y transporte.

**Imagen 65**

Sistema de contraventeo con cables metálicos.⁷⁴

⁷⁴ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

VII.- SUPERFICIES SINCLÁSTICAS

PRINCIPIOS

Cada proyecto requiere de una solución específica que responde a necesidades propias de sus ocupantes, por lo tanto, debe haber correspondencia entre la concepción arquitectónica y la parte constructiva considerando la economía y el uso racional de los recursos. Pero hay proyectos que requieren espacios cubiertos con sistemas constructivos especiales con el mínimo de puntos de apoyo y estructuras con alturas considerables, en nuestros días se elevan templos, centros de exposiciones y espectáculos, deportivos, naves industriales, viveros, puentes y rascacielos. El pasado ha dejado evidencias de catedrales, puentes y palacios, edificados con técnicas asombrosas y de gran ingenio como la Iglesia de la Sagrada Familia de Antonio Gaudí en España, el Palacio de Cristal en Londres y la Torre Eiffel en París.



Imagen 66
Torre Eiffel en París⁷⁵



Imagen 67
La Sagrada Familia⁷⁶

Lo observamos también en otras catedrales góticas cuyos constructores adaptaron el principio del arco a obras místicas y funcionales con audacia y cordura por siglos. Aquellos creadores también quisieron lograr claros desmedidos y grandes alturas, pero la tecnología de la época demostró la falta de concordancia entre sus componentes. No es sino hasta el siglo XIX que aparecen las estructuras diseñadas por los arquitectos y el reconocimiento de la ingeniería como una disciplina, se empieza a usar el fierro en la construcción así como nuevas técnicas y procedimientos con recubrimientos decorativos de piedra, tabique y fierro fundido. Hasta el siglo XX el esqueleto metálico y el de concreto armado se cubrieron con otros materiales como el vidrio o el plástico, con formas creadoras de un nuevo idioma. Gracias al avance de la tecnología hoy en día se pueden construir superficies con formas admirables generadas por curvas simples y dobles. Las primeras dan lugar a las cónica, cilíndricas, cortas y largas, y son desarrollables. Las segundas son las sinclásticas y anticlásticas y no son desarrollables. Para esta tesis solo se tocarán las de doble curvatura y en específico en este capítulo las sinclásticas. Por definición se deberá alcanzar que las superficies que tienen la misma curvatura en dos direcciones sea cóncava o convexa ortogonalmente se llaman sinclásticas. Estas estructuras se pueden desarrollar con arcos y se pretende que bajo la acción de una carga dada, sólo presente compresiones axiales, si cambia el tipo de carga estará sometida a flexión. Los arcos transforman las fuerzas verticales de la carga en componentes inclinadas y las transmiten al lado de cada arco, de igual forma ocurre con las fuerzas de empuje y peso que cada componente transmite al inmediato inferior. Cuando los empujes coincide con la directriz del arco no existen esfuerzos de flexión.

⁷⁵ Imagen modificada con filtro y utilizada solo con fines de investigación.

⁷⁶ Gaudí, Antonio. “La búsqueda de la forma”. Página 133.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

Todos estos arcos experimentan empuje, es decir, fuerza o presión hacia fuera. Si la distancia entre los puntos de apoyo de los arcos sobrepasa dos veces la flecha del arco, el empuje será mayor, así que los empujes sobre los apoyos son directamente proporcionales a la carga total y al claro que cubre e inversamente proporcionales a la flecha, por lo tanto, la cimentación que soporta y recibe los cuatro puntos de apoyo en la forma pura, presenta esfuerzos de tracción y ésta será mayor o menor dependiendo de la flecha. Las condiciones cambian cuando la estructura se corta por un plano virtual horizontal y los cuatro puntos de apoyo desaparecen para dar lugar al apoyo perimetral y al anillo de tensión. Precisa de igual manera, cuidar los bordes para evitar deformaciones, flexiones o roturas que incapacite a la estructura cumplir con la función portante para la que fue concebida. Los materiales comúnmente usados son acero y concreto, pero en la actualidad se han hecho con la combinación de polímeros, vidrio y madera.

APLICACIONES



Iglesia en Mérida, Yucatán-México.
Proyectó:
Arq. Raúl Canto.
1990.
Armado de la trabe de borde.



Iglesia en Mérida, Yucatán México.
Proyectó:
Arq. Raúl Canto.
1990.
Colocación del poli estireno como aislante térmico y acústico.

Iglesia en Mérida, Yucatán México.
Proyectó:
Arq. Raúl Canto.
1990. Estructura terminada con mortero-cemento-arena.



Gran Invernadero parque botánico nacional de Gales, Carmarthenshire, 2000.
Ing. Anthony Hunt Asociado con. Arq. Foster y Partners.
Maestros de la Estructura. Página 62.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



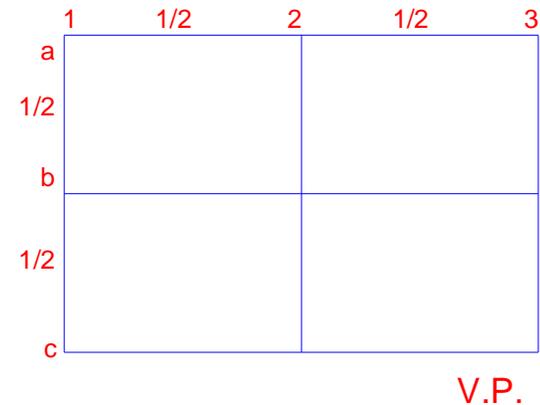
Universidad del Parque de Hooke, Arq. Ahrends, Burton y Koralek, Londres-Inglaterra. Arquitectura Industrial Página 121.



Cascarón de concreto, Auditorio Kresge, M.I. T. Eero Saarinen, 1953-1956. Bio Arquitectura. Página 55.

TRAZO GEOMÉTRICO

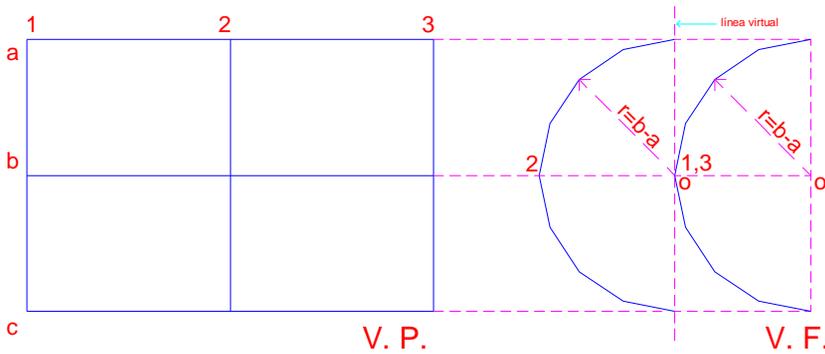
1. Se dibuja en vista de planta un rectángulo dividido por la mitad, en ambos sentidos y se numeran “1, 2, 3” las líneas verticales y “a, b, c” las horizontales estos representan los seis arcos principales de la estructura.



2. Para determinar la altura en una vista frontal (V. F.) se proyectan los arcos “a, b, c” y con medida de radio $r = “b-a”$ y con origen en la proyección del arco “b” y una línea virtual, se dibuja media circunferencia.
3. Con la misma medida de radio ($r=b-a$) y la prolongación de “b” se intersecta nuevamente para determinar el origen y dibujar otro arco similar.

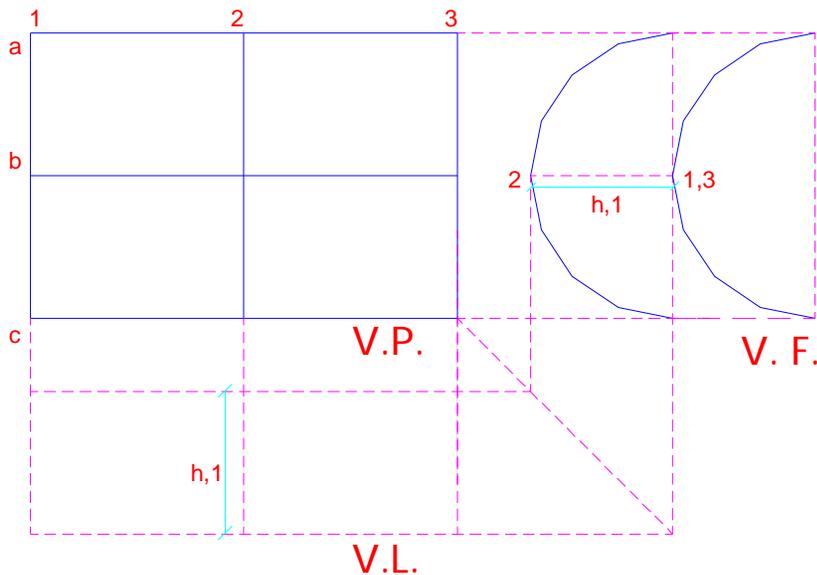
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

4. El último arco trazado son los arcos que se marcan como “1, 3” y el primero es el arco “2”.



5. Con un cambio de plano a 45° se proyecta la altura del arco “2” a una vista lateral.

6. En vista de planta (V. P.) se proyectan los arcos “1, 2, 3” hasta la vista lateral (V. L.).

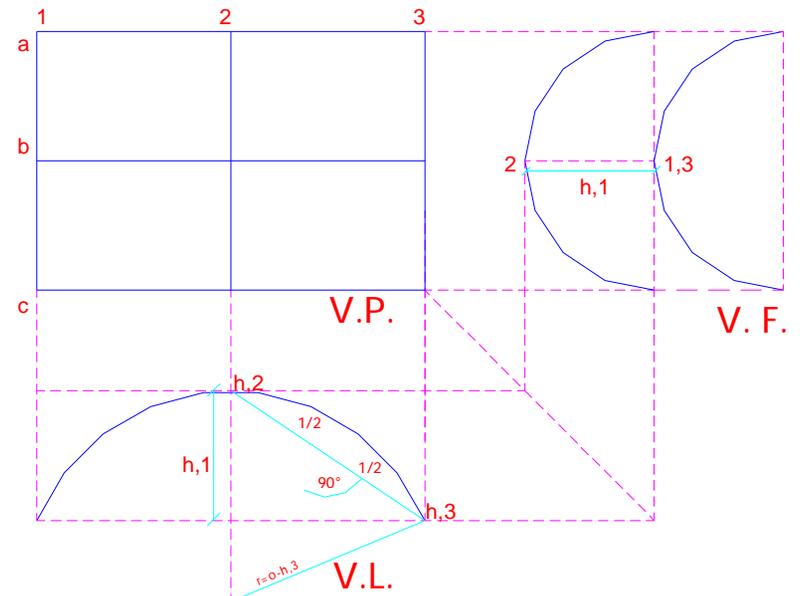


7. Donde hace intersección la proyección de la altura “h1” con los arcos “1, 2, 3” se dibuja un arco de circunferencia como sigue:

7.1 Se traza una diagonal de “h,2” hacia “h,3”.

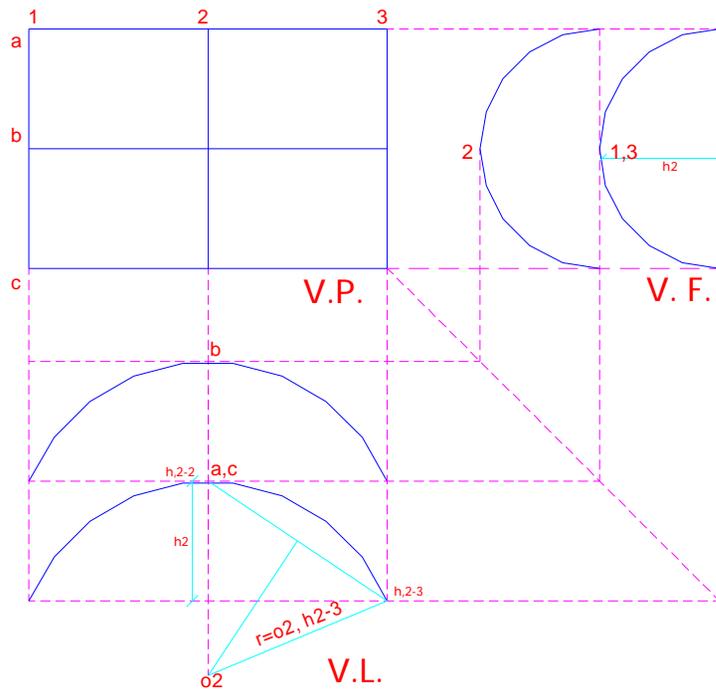
7.2 La diagonal, se divide entre dos y se traza una línea perpendicular hasta que corte con la proyección del arco “2” que viene de V.P.

7.3 Esta intersección, es el origen del nuevo arco “b” que ahora con medida de radio “r=o-h,3” se dibuja el arco.

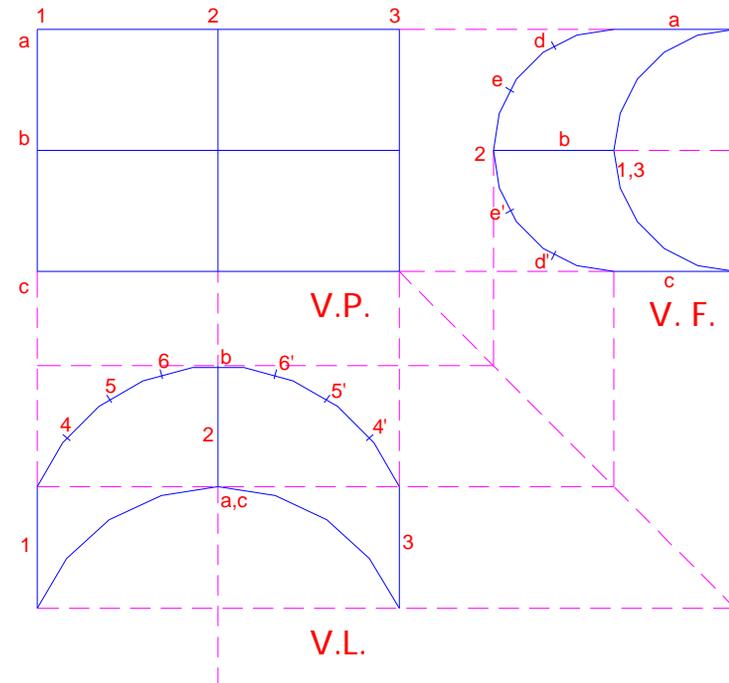


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

8. Con el mismo procedimiento que se hizo para obtener el arco “b” se hace para los arcos “a” y “c”. Se proyecta “h2” de V. F. hacia V. L.
9. Se traza la diagonal del punto “h,2-2” hacia “h,2-3” y con la proyección de una perpendicular hasta intersectar con la proyección del arco “2” de V. P. se obtiene el origen “2” (o2).
10. Con medida de $r=“o2”$, “h,2-3” se dibuja el arco “a, c”.

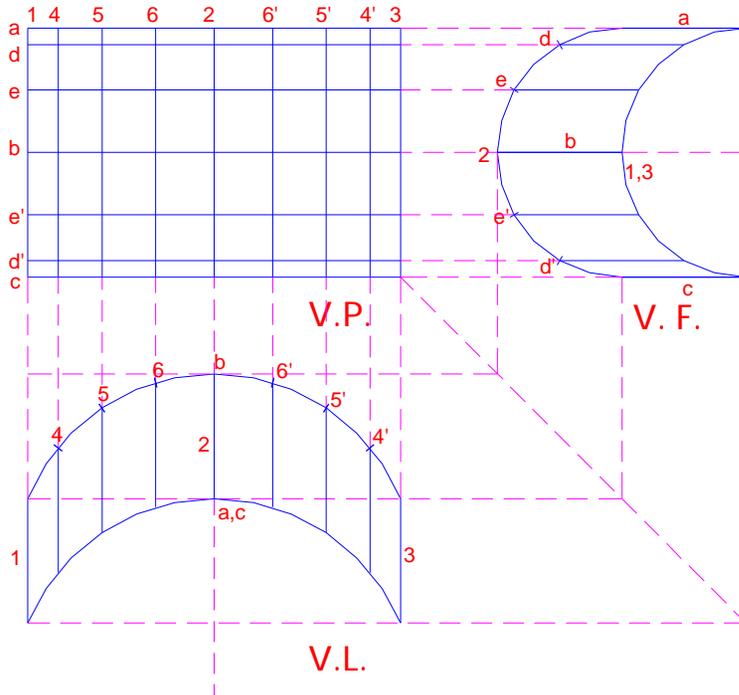


11. Los arcos “1, 2, 3” en V. L. se observan como líneas verticales, y los arcos “a, b, c” como líneas horizontales en vista frontal.
12. El arco “2” en vista frontal se divide en seis partes iguales y se marcan los puntos “(d, e, e’, d’)”.
13. El arco “b” en vista lateral (V. L.) se divide en ocho partes iguales y se marcan los puntos “(4, 5, 6, 6’, 5’, 4’)”.

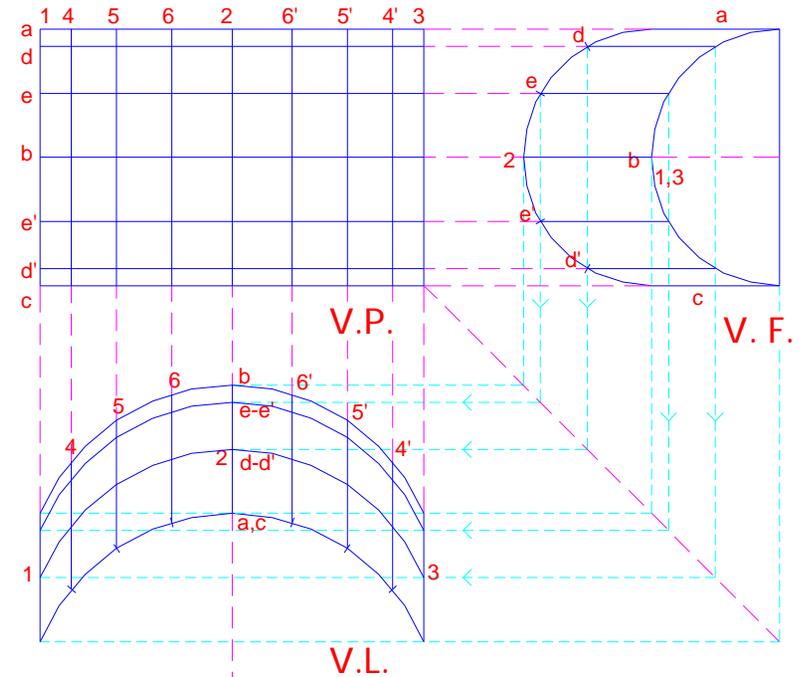


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

- 14. Las divisiones hechas tanto en vista frontal (V. F.) como en vista lateral (V. L.) marcadas con los puntos “e, d, 4, 5, 6” con sus respectivas primas, se proyectan a vista en planta (V. P.)
- 15. Los arcos “(d, e, e', d'”) en V. F. se observan como líneas y lo mismo ocurre con los arcos “(4, 5, 6, 6', 5', 4'”) en V. L.

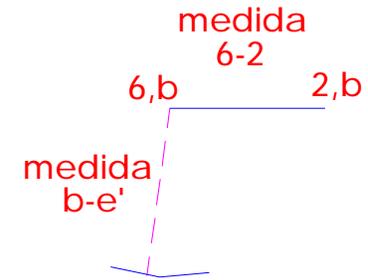
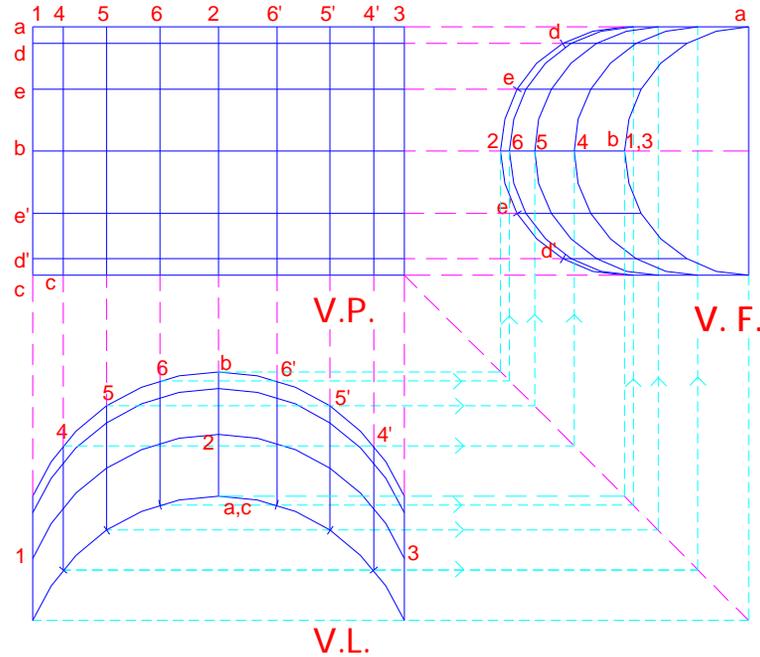


- 16. Los arcos “e, d” que intersectan con el arco “2” y con “1, 3” en V. F. se proyectan a V. L. con su respectivo arco y se dibujan los arcos “e, d” con el procedimiento del punto “7” en V. L.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

17. Los arcos “4, 5, 6” que intersectan con los arcos “b” y “a, c” en V. L., se proyectan a la V. F. con su respectivo arco y se dibujan los arcos “4, 5, 6” en V. F.



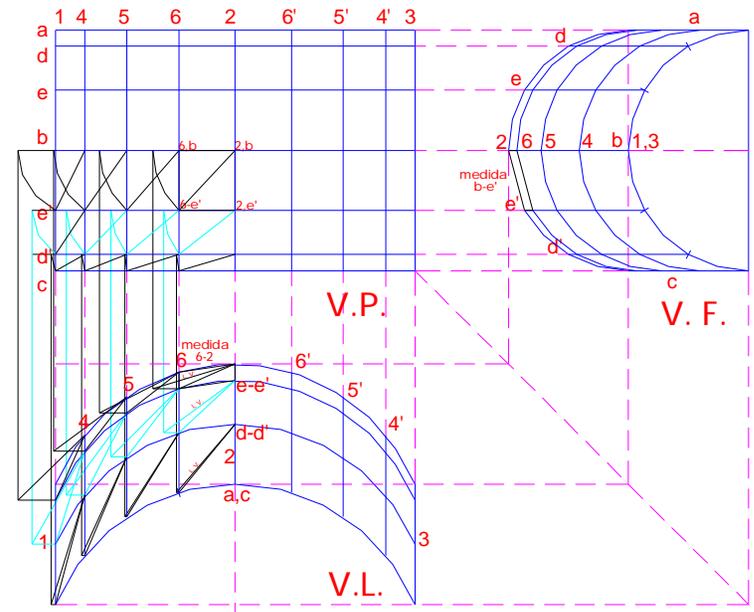
20. Con medida “(b-e)” de vista frontal se proyecta un arco de circunferencia apoyado en el punto 6, b.

21. Es necesario dibujar una línea diagonal para obtener el ángulo correcto, por lo tanto se ubican las coordenadas “2,b” y “(6,e)” para dicha línea diagonal en vista de planta (V. P.) y vista lateral (V. L.)

PLANTILLA

18. Para dibujar la plantilla, se ubica el plano contenido entre los arcos “(6-2)” y “(b-e)” con coordenadas “(6b, 2b, 6e’, 2e’)”.

19. Se dibuja una línea horizontal con medida “6-2” tomada directamente de vista lateral.

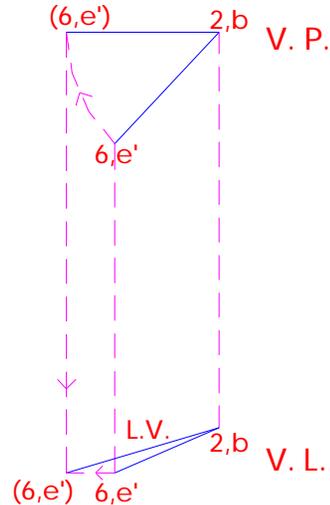


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

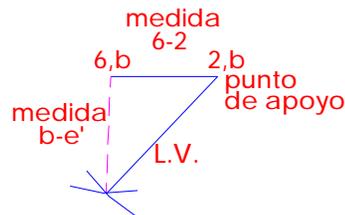
22. Se puede hacer un giro de la recta diagonal para obtener su longitud verdadera como sigue:

22.1 En V. P. con apoyo en el punto “2,b” y con medida hasta “(6, e)” se gira la recta hasta una posición horizontal.

22.2 En su actual posición del “(6-e)” se proyecta a vista lateral (V. L.) a la altura de “(6,e)” (horizontal) y se une el punto “(6,e)” con “2, b” resultando la longitud verdadera.

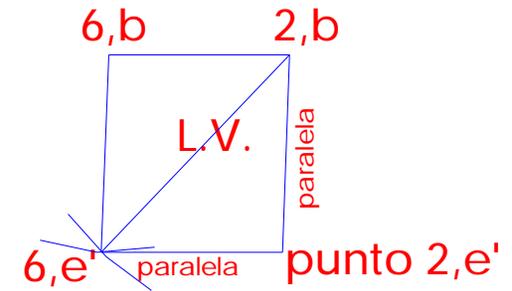


23. Retomando el trazo de las medidas “6, 2” y “(b, e)” ahora con medida de recta longitud verdadera (L. V.) y con apoyo es el punto “2, b” se corta la proyección del arco de medida “(b-e)”.

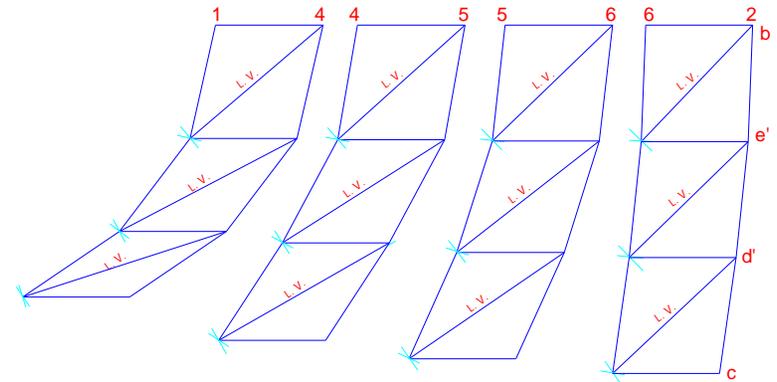


24. Se une el punto “6, b” con “(6, e)”.

25. Paralela a la recta “(6, b – 6, e)” se dibuja otra que inicie en “2, b” y paralela a “(6, b - 2, b)” se dibuja la última línea.



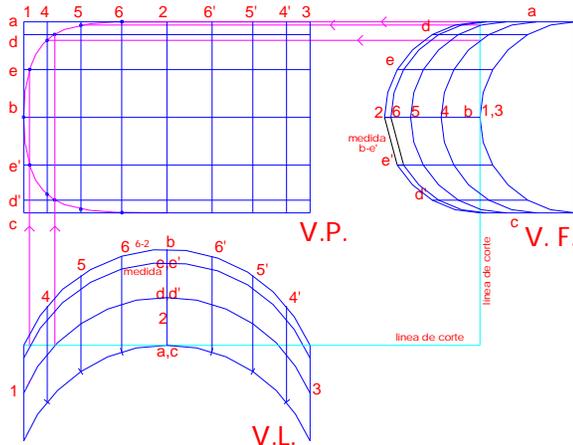
33. Con el mismo procedimiento del punto 21 al 25 se dibujan el resto de los planos, cabe señalar que si se obtiene $\frac{1}{4}$ de la estructura, y se invierte la plantilla, se obtiene el total de la estructura.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

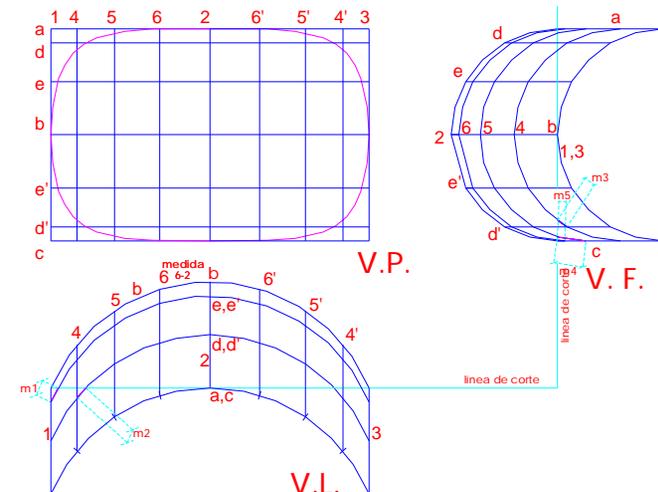
CORTES

27. Para obtener el corte en vista frontal y lateral, basta con pasar una línea tangente a los últimos arcos, “1, 3” y “a, c”.
28. El corte en vista de planta se obtiene a partir de las intersecciones de la línea de corte con los arcos “e”, “d”, “4”, “5” y “6” por ejemplo:
 - 28.1. La intersección del arco “(e, e’)” con la línea de corte en V. L. se proyecta a los arcos “e” y “(e’)” en V. P.
 - 28.2. La intersección del arco “(d, d’)” con la línea de corte en V. L. se proyectan a los arcos “d” y “(d’)” en V. P.
 - 28.3. Lo mismo ocurre con los arcos “4, 5, 6” de V. F. que se proyectan a los arcos “4, 5, 6” de V. P.
 - 28.4. Finalmente se unen los puntos intersectados.

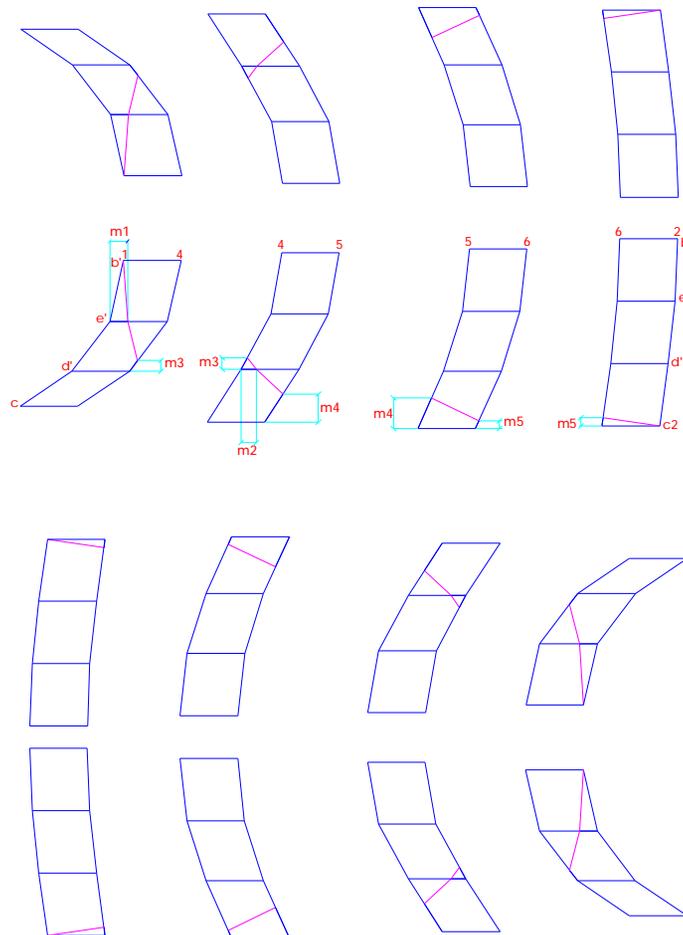


CORTE EN PLANTILLA

29. La intersección “b-1” es conocida en planta y sólo se ubica en la plantilla.
30. El arco “(e’)” en planta, se encuentra paralelo al cambio de plano, por lo tanto el arco “(e’)” en V. L. está en longitud verdadera, así es que en V. L. la parte del arco “(e’)” que se encuentra abajo de la línea de corte es la medida de longitud verdadera que se elimina en la plantilla (medida m1).
31. La medida del arco “(d’)” en V. L. que esta de la línea de corte hacia abajo, es medida (m2) y se pasa directo a la plantilla.
32. Las medidas de corte de los arcos “4, 5, 6” en V. F. se toman directamente de los arcos y se pasan a la plantilla.
33. Finalmente el punto “c,2” es conocido



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



MODELOS DE ESTUDIO

Un primer acercamiento que puede ayudar a comprender la forma de esta superficie sinclástica es a través de pequeños modelos hechos con tela de alambre y yeso, son modelos rápidos y sencillos que permiten experimentar cortes, posiciones, intersecciones y diseño de varias formas. El procedimiento consiste en cortar con tijeras, tela de alambre (tipo mosquitero sin soldar) en tamaños de diez a veinte centímetros por lado aproximadamente, después con las manos se deforma la malla hasta conseguir la forma que se desee, conviene verificar que los bordes de las telas antes cortadas no estén unidas o soldadas ya que esto no permitirá su deformación. Una vez concebidas las formas se puede jugar con cortes, intersecciones o composiciones donde las posibilidades son muchas y ricas en propuesta, al final se aplica una pequeña capa de yeso para obtener el modelo definitivo, éste, solo sirve como idea general.



Imagen 68

Modelos de tela de alambre con yeso.⁷⁷

Otra forma de obtener modelos conceptuales se hace con tela de tul, para este caso, se puede hacer un marco de

⁷⁷ Arq. Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

madera con las dimensiones a escala permitiendo analizar la proporción de la estructura. Posteriormente, se fija el tul con clavos o se prensa al marco de madera y se suspende para después colocar clavos a través del tul propiciando peso y determinando una malla a distancias iguales, simulando que el modelo se deforma de manera natural, se aplica resistol blanco para que endurezca la tela y después se pueda invertir una vez seco el pegamento. A este modelo se le puede aplicar papel, yeso o resina y funciona bien como un primer acercamiento de la escala, proporción, ritmo, simetría y demás atributos conceptuales de la forma.

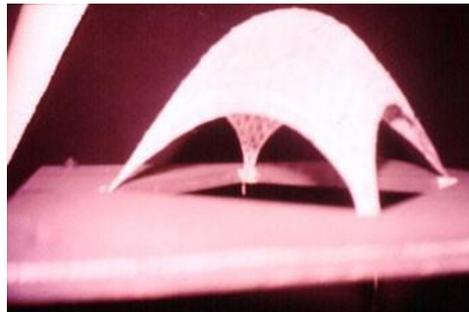


Imagen 69
Modelos de tela de tul
con resistol y resina.⁷⁸



Imagen 70
Modelo de alambre
galvanizado unidos con liga.⁷⁹

⁷⁸ Idem.

⁷⁹ Idem.

También se puede utilizar alambre galvanizado o de cobre siguiendo las características que tiene una malla para deformarse. Inicialmente se toma como medida el perímetro de los arcos en ambos sentidos, en este caso galvanizados para dar rigidez marcando las intersecciones, con la finalidad de ubicar los cruces entre arcos. En plano horizontal se amarran las intersecciones con liga para permitir el libre movimiento y la obtención de ángulos. Al término de la malla se coloca sobre un marco que puede ser de madera y se deforma hasta ubicar los cuatro apoyos al mismo nivel.



Imagen 71
Anticatenaria de cobre
unida con soldadura.⁸⁰

La experimentación de otros métodos sencillos y cercanos a la realidad ha permitido trazar arcos catenarios suspendiendo una cadena y marcando sobre papel la proyección de la curva, la finalidad es obtener un trazo directo y la marca a distancias iguales considerando los eslabones para marcar las intersecciones. Con el trazo en papel se procede a la realización del escantillón sobre una base de madera donde se colocan clavos siguiendo la curva y se marca la separación entre arcos, se continua con el corte de alambre de cobre y al doblar siguiendo el patrón de

⁸⁰ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

trazo, por último, se unen (respetando las marcas) con soldadura. Con este proceso se determina la posible problemática de trazo y unión de los elementos y también se observa el trabajo estructural y las deformaciones debidas a las condiciones de empotre, fuerzas de empuje y características de los arcos.

Los métodos antes descritos se aproximan a formas reales y las medidas se determinan directamente de los modelos, esto puede generar errores si no se cuenta con herramientas de precisión que reduzcan las posibilidades. El método que aquí se describe, no requiere de mayor exactitud que la geometría descriptiva para su trazo y obtención de plantilla, así que, con el correcto desarrollo se obtiene un primer modelo de papel o cartoncillo que ayuda a verificar medidas y trazos. Basta con dejar pestañas del mismo material para unir con resistol.



Imagen 72
Modelo de cartoncillo pegado con resistol.⁸¹

Lo ideal para el desarrollo de modelos es utilizar el material que se pretende ocupar en la maqueta final. Con este motivo se puede hacer con barras de metal, madera

⁸¹ Idem.

o plástico y se piensa en planos laminados que pueden ser de madera, metal o cartón.



Imagen 73
Sinclástica de madera laminada.⁸²

Conviene experimentar con el manejo, apariencia, resistencia, corte y unión de diferentes materiales para tomar una correcta decisión o cambio a tiempo. Respetando los planos que se obtuvieron se pueden cortar barras de madera y armar un esqueleto para después cortar triplay delgado y pegar sobre las barras. El problema visto, es el desperdicio de material debido a los cortes y la unión de barras que requiere de ángulos precisos o el diseño de nodos que facilite los ángulos de las barras. Prosiguiendo con el método, se realizan cortes de los arcos que determinan una estructura apoyada perimetralmente con mejores características de estabilidad estructural. Para esto, se traza la vista de planta con corte, sobre una superficie que se pueda perforar, incluyendo los puntos de arranque así como la altura.

⁸² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Seguido se cortan las tiras de madera, fibra de vidrio o cualquier material flexible de acuerdo al corte de su vista lateral y frontal con las marcas de intersecciones. Hechos los barrenos previamente en la base, se colocan las tiras a compresión y se unen con alambre o hilo, en este modelo se comprueba el aumento de resistencia, pero si se aplica carga en alguna intersección o tramo del arco esta área falla y el resto se mantiene debido a la continuidad e intersección de los demás arcos.



Imagen 74
Corte de sinclástica fabricada
con fibra de vidrio.⁸³

Un aspecto que requiere especial atención es el diseño de nodos, ya que al momento de decidir los materiales que se utilizaran, se debe tomar en cuenta que éstos tienen tres dimensiones y que en ocasiones por las medidas de la superficie diseñada, es necesario cortar el material o diseñar empalmes, o si el material permite dobleces. Cuando se piensa en una estructura diseñada, los nodos juegan un papel importante, pues son los elementos que reciben las barras, que determinan los ángulos necesarios y sujetan cables o reciben la cubierta. Para las superficies de doble curvatura, los nodos deben observar inclinaciones precisas en dos sentidos para determinar las

⁸³ Idem.

formas previamente concebidas, ya que una falla en el cálculo de los ángulos recaerá en una estructura que no se puede armar.

Conciente de estos sucesos que se deben solucionar, una propuesta factible son los nodos metálicos con placas de acero o aleaciones con vaciado de metal, se puede obtener un nodo con aleación de metales de hierro y aluminio pensado para la superficie sinclástica, este puede recibir cuatro barras en ángulos diferentes y tiene las ventajas que permite el giro de la barra en cualquier inclinación, con esto se logra la facilidad de ángulos en cualquier dirección. Sin embargo, precisa de cables estabilizadores para que pueda funcionar.



Imagen 75
Nodo metálico de fundición.⁸⁴

En la búsqueda de alternativas prácticas, también se ha pensado en materiales sumamente ligeros como el cloruro de polivinilo en secciones redondas, para esto, se consideró de 1/2" con nodos metálicos de lámina galvanizada calibre 16. Resulta sencillo el corte del material en una sola medida de barra ya que la vista en planta es cuadrada. Para sujetar las soleras de lámina de 1/2" de ancho por 2" de largo, fue necesario introducir un taquete de madera de un poco menos de 1/2" de ancho por

⁸⁴ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

1” de largo, con la finalidad de evitar que una parte de la pieza se fracturara al momento de presionar.

Una vez con el taquete dentro de la sección se hizo una ranura y se introdujo la solera de lámina para después barrenar y apretar con tornillo y tuerc. La cubierta se solucionó con tela de licra, los resultados fueron favorables pues se construyó en solo dos días a un costo bajo.



Imagen 76

Modelo de cloruro de polivinilo con cubierta de licra.⁸⁵

MAQUETAS ESTRUCTURALES EXPERIMENTALES

Iniciar maquetas con sistemas sencillos es recomendable para corregir y diseñar, en su caso, los planos o barras que conformaran la estructura final. Se puede realizar con cartón corrugado a la escala deseada y posteriormente con metal, madera o cualquier material que responda a las necesidades para las cuales se concibió. En este suceso se desarrollo una propuesta de cimbra metálica para cubiertas de ferrocemento, se inició con una maqueta de lámina metálica, uniendo planos a través de extensiones del mismo material. Fue necesario escalar una cuarta parte del dibujo para obtener al final una estructura de dos metros de ancho por tres metros de

⁸⁵ Idem.

longitud. Al rotar la parte escalada, se obtienen las otras tres partes restantes, con los patrones ploteados en papel, se procedió al trazo directamente sobre la lámina metálica calibre 14, cabe señalar que previamente se construyó un modelito de papel para verificar las medidas de los planos, con esto se logra mayor precisión en la maqueta metálica y se facilita el corte.



Imagen 77

Estructura de lámina metálica.⁸⁶

A cada plano se le dejó tres centímetros más de cada lado para posteriormente cortar con tijera para metal y doblar perimetralmente. Conviene recordar que para facilidad del dobles se cortaron las esquinar hasta el vértice del plano trazado. Con cada plano preparado en sus dobleces se perforó a cada cinco centímetros a lo largo de las “pestañas” de borde. En el dibujo y en la lámina se marcó cada plano para que se identificará con facilidad al momento de montaje sin mano de obra especializada. De acuerdo con el análisis que se ha hecho previamente se recomienda que el recubrimiento o sistema final considere trabes de bordeo o empotre perimetral.

Extendiendo a otras propuestas, con características similares se construyeron dos estructuras más, con

⁸⁶ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

perfiles tubulares; la primera, se hizo con perfiles cuadrados de $\frac{1}{2}$ " de sección, para facilidad de ejecución se consideró un solo tipo de arco, por lo tanto, la planta es de base cuadrada de 2.50 x 2.50 metros, se ploteó solo uno de los arcos del dibujo en papel bond y se procedió a los dobleces del perfil tubular, donde se pudo observar que el material experimentó torsión.



Imagen 78

Sinclástica de perfil tubular cuadrado.⁸⁷

Para corregir y cuidar que las intersecciones de los arcos se mantuvieran al mismo nivel fue necesario seccionar los arcos. En uno de los sentidos, este proceso de ensamble requirió cuidar el trazo del arco para evitar deformaciones, así que para soldar cada sección se marcó la posición y se verificó la curva, se pensó que la cubierta fuera de fácil colocación y con un sistema sencillo por debajo de la estructura separada de la misma. Para tal efecto se cortaron secciones de cinco centímetros de longitud y se barrenó en cada intersección para colocar un tornillo con tuerca. El comportamiento y la resistencia de la maqueta fue favorable, toda vez que no presentó inestabilidad al

⁸⁷ Idem.

aplicar fuerzas laterales o verticales, soportó 98kg de carga en nodo unión puntal al centro de la estructura, sin embargo el procedimiento sugirió la instalación de equipo para soldar en sitio, aspecto que no siempre se puede cubrir por falta de espacio, de tal manera que se extendió el trabajo para tratar de salvar y mejorar la propuesta. La segunda maqueta se fabricó con perfiles tubulares pero en esta ocasión de sección redonda como solución al contacto de las superficies, de manera similar a la estructura anterior, se doblaron los perfiles tubulares solo que en esta circunstancia no se fragmentaron los arcos y se colocaron uno sobre otro con el plan de atornillar en cada intersección y por lo tanto, transportar en poco espacio, se podía presumir que las secciones huecas se pueden deformar en su sección transversal al aplicar presión y por consiguiente reducir la resistencia. Con este objetivo se hicieron pruebas que efectivamente demostraron que el material se debilita al barrenar y comprimir por la acción del tornillo y la tuerca al presionar.



Imagen 79

Estructura metálica de secciones redondas y cubierta de licra.⁸⁸

Las alternativas eran utilizar secciones de varilla pulida con el incremento considerable de peso o el diseño de nodos que implicaría un aumento en el costo total, meditar

⁸⁸ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

al respecto condujo a una solución práctica y económica con taquete de madera introducida en el interior del tubo antes de ser doblado, para esto, se cortaron secciones de madera redonda de aproximadamente cuatro centímetros de longitud y se marcó al centro en todo el perímetro, con las secciones tubulares barrenadas precisamente sin doblar, se introdujo cada taquete hasta la posición de la marca y después se barreno y dobló cada tramo, al final con todos los arcos doblados se procedió al armado con tornillos, tuercas y rondanas apretadas en cada intersección, los mismos tornillos de 2 ½” de longitud sirvieron a la separación de la cubierta con tramos de 4 cm de largo que cubrieron el tornillo y dos rondanas y una tuerca para fijar la licra.

En busca de nuevas técnicas para estructuras que sean factibles por ser ligeras, económicas, estables, disponibilidad mínima de material y transporte se han mejorado nodos en la etapa de modelos de estudio, el proseguir conlleva a la experimentación con materiales reciclados como el papel, costales o madera desperdiciada en una construcción, así se eligió una maqueta de tiras de madera y nodos de metal.



Imagen 80

Corte de la sinclástica original con madera y nodos cilíndricos de metal.⁸⁹

⁸⁹ Idem.

Primero se recolectó toda la madera de desperdicio y se encontraron tiras de entre 50cm y 70cm de longitud en secciones de 1” x 2” y tubos de 2” de diámetro de los cuales se obtuvieron 51 piezas de madera de 50cm de longitud para las piezas completas y de dimensiones variables en los cortes. A cada barra cortada con el ángulo se le introdujeron cuatro tornillos de cuerda corrida (2 de cada lado) y después se les quitó la cabeza para introducir tuercas. Con la misma separación entre tornillos se hicieron ocho barrenos por nodo que cumple con las características de un nodo tipo sin requerimientos especiales de unión, fundición, dobléz o posición.

El proceso de ensamble solo requirió de cuidado al momento de colocar las barras con el corte hacia la dirección correcta, así como la ubicación de las barras de borde de acuerdo al corte. Se estimó que eran necesarios cables diagonales para darle estabilidad, sin embargo la madera opone poca resistencia en los puntos donde se introdujeron los tornillos provocando fracturas y por lo tanto fallas en algunos elementos.



Imagen 81 Conjunto de las estructuras que cubren las canchas de tenis.⁹⁰

⁹⁰ Imagen empleada únicamente para fine didácticos.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Una aplicación en México de este tipo de superficies, son las canchas de tenis techadas con perfiles de acero y membrana translúcida de lona plástica. Estas estructuras se proyectaron principalmente para dar protección contra los rayos solares. Se consideraron 12 metros de altura al centro a solicitud de la Federación Mexicana de Tenis para canchas techadas. Para una estructura con flecha menor al claro por cubrir, dividido entre dos, requiere de traveses de borde ó condiciones de empotre en los arcos perimetrales. Para este caso se construyeron traveses curvas de sección variable con perfiles redondos y varillas de acero diagonales con preparación para canales en forma de “L” de menor sección que los principales.

El procedimiento de montaje consistió en levantar con pluma las cuatro traveses de borde y mantenerlas en su posición con tirantes provisionales y punteado con soldadura. Al centro se colocó un poste provisional que funcionó como nivel y soporte de los primeros arcos en sentido longitudinal y transversal con soldadura al 70%, por facilidad de ejecución se colocaron todos los arcos transversales. Primero de un lado y después de otro, sin embargo lo ideal es colocar de ambos lados para equilibrar la estructura y evitar la deformación de la misma.



Imagen 82
Colocación de arcos transversales.⁹¹

⁹¹ Idem.

Al término de la colocación con el restante 30% de soldadura y la colocación de tirantes diagonales en cada plano formado por los arcos, se cubrió la doble función, primero, de absorber los esfuerzos de tensión producidos por los empujes laterales de los arcos y segundo, dar soporte a la cubierta de lona translúcida que es muy ligera y evitar la formación de bolsas de agua en caso de lluvia. Se contemplaron dos posibilidades de unir la lona, una, por medio de hilo nylon o plástico que por las dimensiones dificultaría introducir varias plantillas en la máquina de costura, y la segunda posibilidad que era fundir el material para evitar cualquier mínima gotera, esta última resultó ser la mejor opción, además de representar facilidad para el montaje en partes. Se trazaron los planos del eje longitudinal cuidando que las uniones quedaran sobre los perfiles con apariencia uniforme. Con el total de franjas cortadas y preparadas para unirse, a nivel de piso y posteriormente montar sobre la estructura se previno sobre el problema de manejo y montaje con el peligro de rasgaduras o de falla en algún elemento.

Así pues se procedió con la fundición directa en el lugar definitivo y con esto, la corrección de bordes para que coincidieran con el eje del perfil tubular y evitar la posibilidad de arrugas en el material.

Una vez superado el punto más alto, el extremo final fue más sencillo de colocar. Colocada la lona en su posición, se prosiguió con el ajuste y tensión final del material que como cualidad adicional fue la nula generación de sombras, sobre la cancha de juego.

El éxito en este procedimiento fue la realización del montaje en dos semanas sin considerar la hechura de las traveses de borde que se hizo en tres semanas. Para la colocación de lámparas, se dejaron preparaciones previas en los primeros tercios del eje transversal con placas de

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

acero soldadas en las intersecciones para recibir las bases de soporte de las lámparas, los cables de corriente eléctrica se dejaron ocultos en el interior del perfil tubular y se bajaron por las traveses de borde hasta la instalación subterránea.



Imagen 83
Colocación de gajos de lona traslúcida.⁹²



Imagen 84
Vista interior de la estructura, sin generación de sombras.⁹³

⁹² Idem.

⁹³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

VIII.- SUPERFICIES ANTICLÁSTICAS

PRINCIPIOS

Desde tiempos remotos el hombre en busca de agua y alimento tuvo que emigrar hacia mejores condiciones de sobrevivencia, es así como la única relación que mantiene el hombre es con el medio natural que le rodea. Aprovecha ramas, cueros, huesos y piedras para construir sus viviendas, sin embargo esas viviendas contaban con una serie de características que las hacía desarmables y transportables para levantarse en otro lugar.

Las edificaciones más notables son las tiendas Beduinas que resumen el empleo de técnicas constructivas con los mismos materiales disponibles y las complicadas condiciones naturales, pero al parecer hace más de cinco mil años, los navegantes del Mar Mediterráneo utilizaron velas en sus barcos como fuerza motriz con los principios estructurales de la arquitectura a tensión con las cuerdas y compresión en los mástiles.

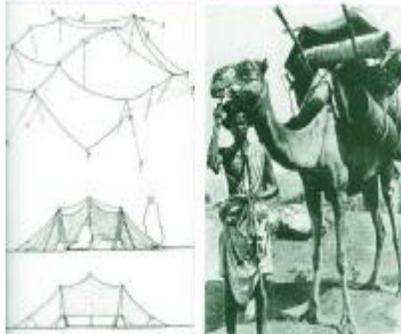


Imagen 85 La evolución de la arquitectura sustentable.⁹⁴

⁹⁴ Behling Sophia y Stefan. “Sol Power”. Ed. Gustavo Gili, S. A. Barcelona 2002. Página 67.

Posteriormente la expresión más importante en la arquitectura se dio en el coliseo romano con la cubierta textil suspendida de mástiles, siendo este, el precursor del circo contemporáneo con estructuras muy ligeras y rápidas de levantar con el mínimo de materiales. Así que las estructuras a tracción no son algo nuevo para el hombre, pero aún no se han desarrollado completamente a pesar del avance tecnológico y de materiales en años recientes. Los arquitectos no están muy familiarizados con el diseño de las estructuras ligeras que en comparación con sistemas convencionales resultan seguras y confiables con formas audaces y alto sentido estético.



Imagen 86 Circo contemporáneo con cubierta de forma anticlástica.⁹⁵

Las posibilidades formales de las superficies incluyen las de doble curvatura inversa llamadas anticlásticas, definidas para este caso, como superficies que tienen curvas contrarias en dos direcciones ortogonales o sea que la concavidad en un sentido se da hacia abajo y en otro sentido hacia arriba. Ejemplos de estas superficies son: el conoide, el hiperboloide de un manto, algunas

⁹⁵ Arq. Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

superficies de revolución como la tórica y el paraboloides hiperbólico que será el tema que ocupe éste capítulo.

Para el mejor alcance del tema, una membrana a tracción con curvatura anticlástica soportada por arcos o mástiles a compresión se denomina estructura velaría. Sin embargo, parece no haber un acuerdo de cómo se deberían definir, pues en algunos países de Latinoamérica les llaman “tenso estructuras” retomando del inglés “tensión” ó “tensile structure” que para el mejor de los casos se deberían llamar “tracto estructuras” derivado de la fuerza de tracción, entendida como la fuerza de jales aplicada en los extremos de un cuerpo que lo mantiene estirado. Sin embargo, las cubiertas colgantes, las redes de cables, las estructuras con soportes perimetrales y las construcciones combinadas de cables y barras serían también “tracto estructuras” por lo tanto, en esa circunstancia se interpretarían como “estructuras velarías” y sus características principales, es que se diseñan con doble curvatura para darle estabilidad contra el viento y el soporte de cargas accidentales para aumentar su vida útil. La forma típica es la silla de montar con dos puntos bajos y dos puntos altos, con materiales elásticos, los bordes asumen perfiles cóncavos y permanecen a tracción, de otra manera si fueran rectos, con la incidencia del viento tenderían al movimiento en forma de aleteo y se producirían rasgaduras.

En los bordes se concentran los mayores esfuerzos que se deben reforzar con cables de acero continuos a un elemento o placa conectado a otro cable que trasmite los esfuerzos de tracción a la cimentación. En los puntos altos se une a un elemento donde las fuerzas lo mantienen apretado debido al empuje en sus extremos, a este elemento se le llama mástil o poste y debe cuidar la inestabilidad lateral o de torsión proporcionada por la fuerza de compresión. El peligro de las fuerzas que

producen pandeo en los mástiles, es que se pueden dar antes de alcanzar el límite de fluencia por aplastamiento de manera repentina. Los cables son un elemento importante que dan posición y estabilidad a los mástiles así como la transmisión de fuerzas en sus dos extremos que lo mantienen prolongado, ya sea del punto más alto del mástil a la cimentación ó del elemento que recibe la membrana a la cimentación. En esta circunstancia la cimentación por un lado es un elemento que recibe las fuerzas producidas por el mástil a compresión y las trasmite al suelo, y por el otro, es un elemento que contiene la tracción producida por los cables del mástil al suelo impidiendo la falta de tracción.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

APLICACIONES



Japan Land Amusement par Shizouka, japan. MEMBRANE STRUCTURES. Taiyo Kogyo Corporation. Página 45.

Amphitheater Stage, Keyes Park. Knox, Kentucky, U. S.A. MEMBRANE STRUCTURES. Taiyo Kogyo Corporation.



Campus center & Drama Laboratory. La Verne Collage, La Veme, California, U.S.A. MEMBRANE STRUCTURES. Taiyo Kogyo Corporation.



William Hutton Younger Dynamic Earth Centre, Edimburgo, 1999. Ing. Ove & Partners. MAESTROS DE LA ESTRUCTURA. Página 71.



Canada Harbour Place. Vancouver British Columbia Canada. MEMBRANE STRUCTURES. Taiyo Kogyo Corporation. Página 80.



William Hutton Younger Dynamic Earth Centre, Edimburgo, 1999. Ing. Ove & Partners. MAESTROS DE LA ESTRUCTURA. Página 72.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Carpa Campo Marte. Jose Ollé Stefano Bertino, Calonggiero Celeste. Tarragona, España, 1998. ARQ.TÉXTIL TRANSFORMAR EL ESPACIO. Página 106.



Laboratorio de Investigación. Samyn and Partners. Venafro, Italia, 1999. ARQ. TÉXTIL TRANSFORMAR EL ESPACIO. Página 26-28.

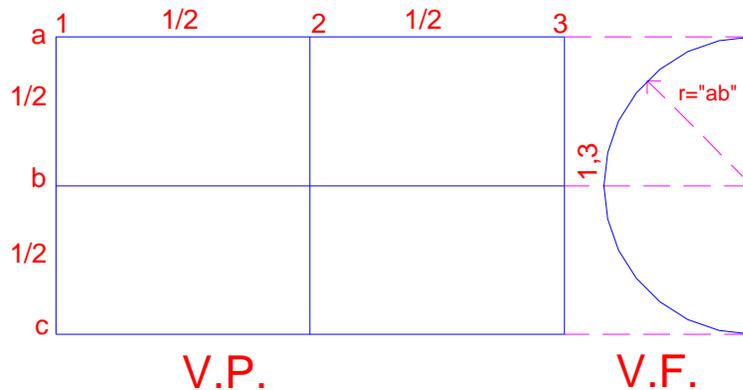


Terminal Marítima. José Lastra, Guillermo Capellán, Ricardo Miñana. Alicante, España 2003. ARQ.TÉXTIL TRANSFORMAR EL ESPACIO. Página 47.

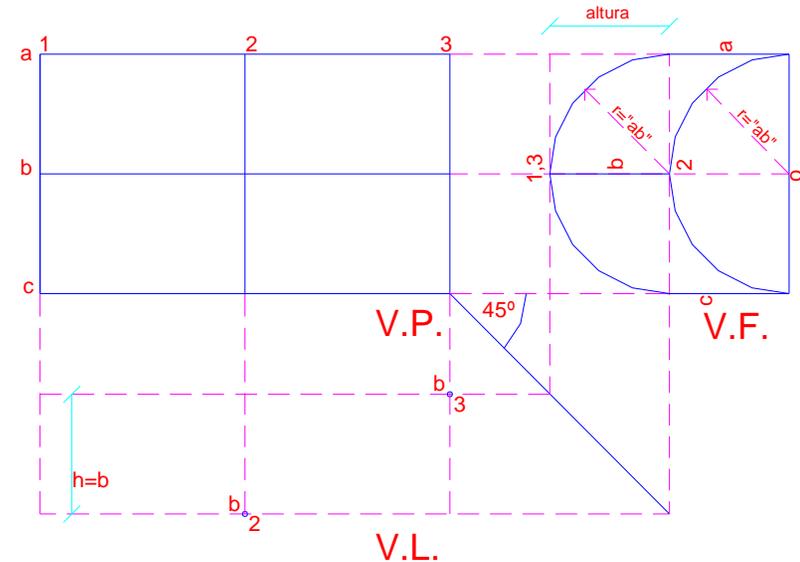
ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

TRAZO GEOMÉTRICO

1. Se dibuja un rectángulo dividido por la mitad tanto longitudinal como transversalmente. Esta es vista en planta (V. P.)
2. Las seis líneas dibujadas representan los arcos "1, 2, 3" y "a, b, c".
3. Se proyectan los arcos "a, b, c" a una vista frontal (V. F.) y con medida de radio "ab" o "bc", ($1/2$ de "ac") se dibuja un arco de medio punto y se marca como arco "1,3".

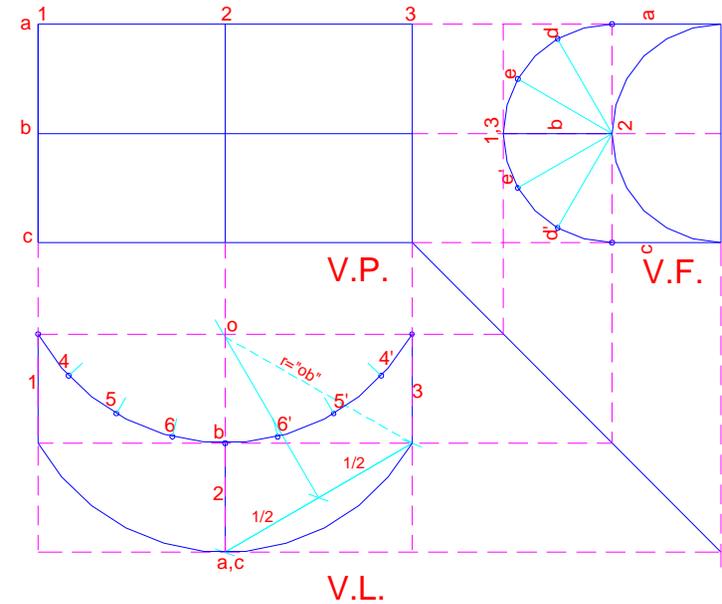
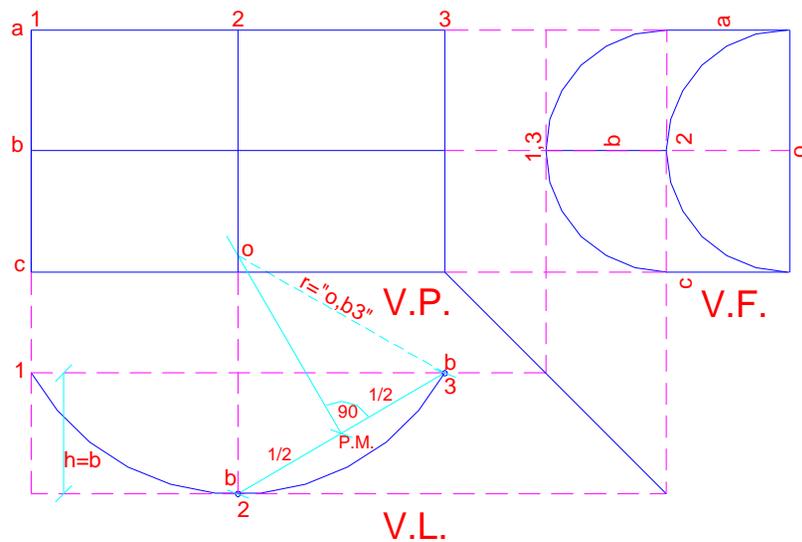


4. Se prolonga la proyección del arco "b" en V. F. Con la misma altura del arco "1,3" se marca el centro y retomando la medida de radio $r = "ab"$, se dibuja otro igual al anterior. Éste es el arco "2".
5. Los arcos "a, b, c" se representan con líneas horizontales.
6. A través de un cambio de plano a 45° o con giros se pasa la altura del arco "b" en V. F. a una vista lateral (V. L.).



7. Para dibujar el arco "b" en V. L. Se hace como sigue:
 - 7.1 Se traza una línea diagonal del punto bajo al punto alto "b3" de la proyección del arco "b" que viene de V. F.
 - 7.2 La línea diagonal se divide entre dos y del punto medio (P. M.) se proyecta una línea perpendicular hasta que corte con la proyección del arco "2" de V. P.
 - 7.3 La intersección antes hecha es el origen del arco "b" y con medida de radio "o,b3" se dibuja el arco de circunferencia.

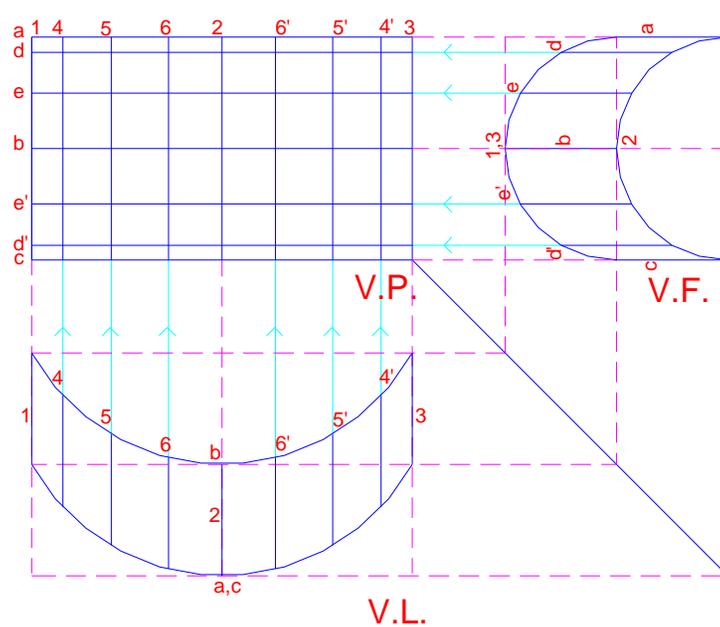
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



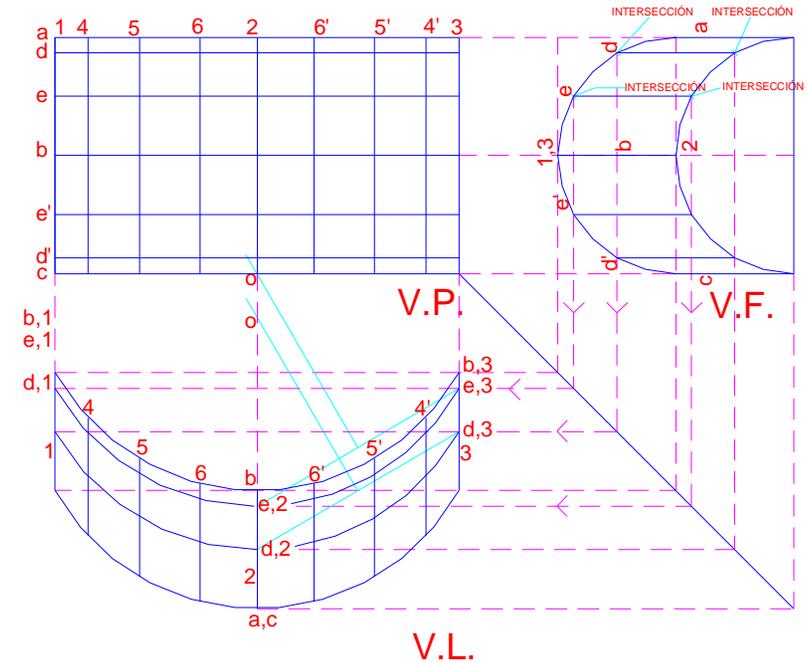
8. Para dibujar los arcos “a, c” en V. L. Se sigue el mismo procedimiento del 7.
9. Los arcos “1, 2, 3” en V. L. Se observan como líneas verticales que unen los arcos “b” y “a,c”.
10. El arco 1,3 en V. F. Se divide en seis partes iguales y se marcan los puntos “(d, e, e’, d’)”.
11. El arco “b” en V. L. Se divide en ocho partes iguales y se marcan los puntos “(4, 5, 6, 6’, 5’, 4’)”.

12. Los puntos “(e, d, e’, d’)” de V. F. Se extienden como líneas horizontales y se proyectan a vista de planta marcando con su respectiva letra.
13. Los puntos “(4, 5, 6, 6’, 5’, 4’)” de V. L. Se prolongan como líneas verticales y se proyectan a V. P. Con su respectiva letra.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

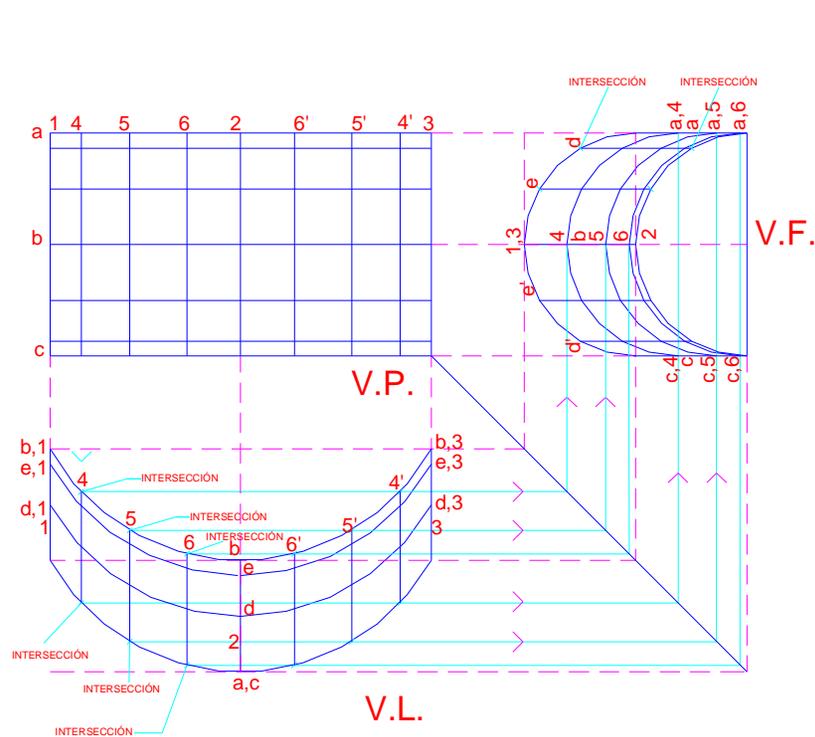


14. Para determinar el arco “(e-e’)” en vista lateral, se determina la intersección (e, 1,3) de V. F., y se proyecta al arco “3” y al arco “1” de V. L., y la intersección “e, 2” de V. F. Se proyecta al arco “2” de V. L.
15. Para dibujar el arco, se sigue el procedimiento 7.
16. La intersección (d-1,3) y (d-2) de V. F., se proyecta a vista lateral (V. L.) y se dibuja el arco.-



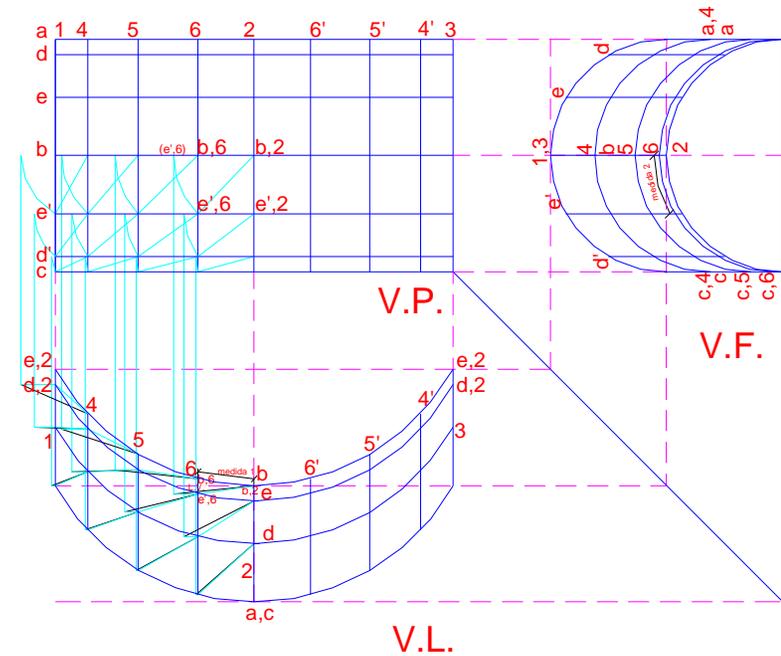
17. Se determina la intersección “4,b” en V. L. y se proyecta al arco “b” en V. F.
18. Se determina la intersección “(4, a,c)” de V. L. y se proyecta el arco “c” y al arco “a” de V. F., se determina el centro y se dibuja el arco “4”.
19. Siguiendo el procedimiento anterior del 17, se marcan las intersecciones de los arcos “5 y 6” con “b” y “a,c”, y se proyectan hacia los arcos “a, b, c” de vista frontal, para determinar lo respectivos arcos.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



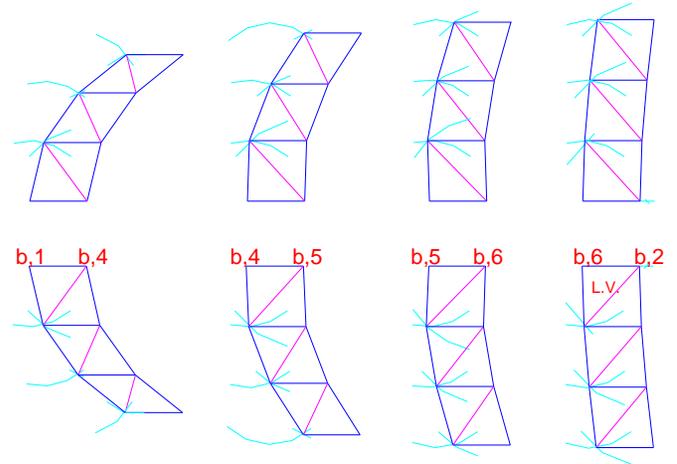
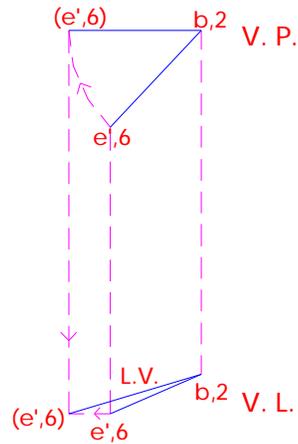
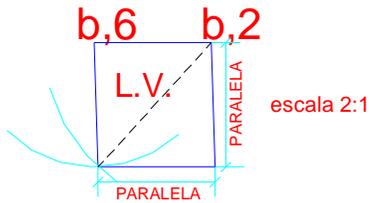
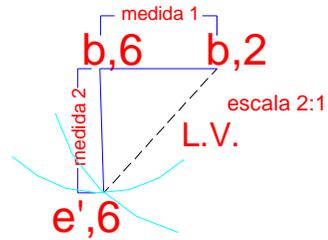
DESARROLLO DE PLANTILLA

20. Sobre el arco “b” de V. L. se mide la recta, contenida en las coordenadas “b,6” y “b,2” y se traslada con una línea horizontal en otro dibujo.
21. En el arco “6” de V. F. Se mide la recta con coordenadas “b,6”–“(e’,6)” y se traslado trazando un arco de circunferencia apoyado en el punto b,6 del nuevo dibujo.

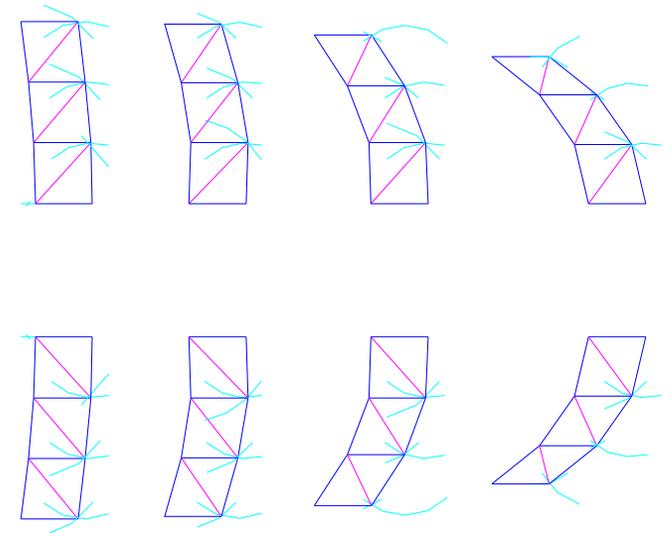
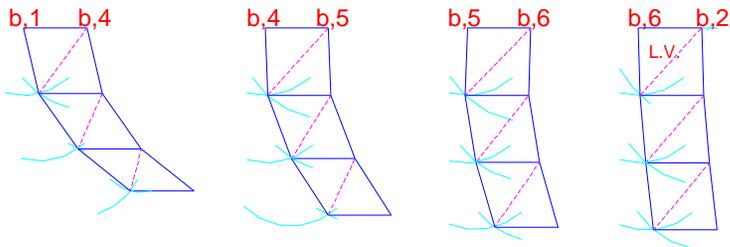


22. Para obtener el punto de intersección, es necesario hacer un giro como sigue:
 - 22.1 Primero se traza una línea diagonal en las tres vistas de la coordenada “b,2” a “(e’,6)”.
 - 22.2 En V. P., con apoyo en el punto “b,2” y con medida de recta “b,2”–“(e’,6)” se gira la recta hasta ponerla horizontal.
 - 22.3 Con la recta en posición horizontal (V. P.) el nuevo “(e’,6)” (el mismo punto en su vista lateral).
 - 22.4 Al unir el nuevo punto “(e’,6)” con “b,2” se obtiene la recta “(6, e’)”–“b,2” en longitud verdadera.
 - 22.5 Con medida de longitud verdadera se pasa al otro dibujo y con apoyo en el punto “b,2” se intersecta el arco de circunferencia antes trazado.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



23. Se une “b,6” con “(e',6)” y paralela a ésta se traza otra recta con origen en b,2.
24. Paralela a la recta “b,6–b,2” se dibuja otra con origen en el punto “(e',6)”.
25. Con el mismo procedimiento a partir del 20 se debe hacer para cada uno de los planos, sin embargo es suficiente con realizar una cuarta parte e invertir la plantilla.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

CORTE

26. En este caso se hacen cuatro cortes sencillos con el siguiente procedimiento.

26.1 Con línea de trazo se une “b,3” con “c,2” en V. P.

26.2 La recta “b,3-c,2” se divide entre dos y se proyecta una línea perpendicular.

26.3 Con centro en cualquier punto de la recta perpendicular se unen los puntos b,3 con c,2 y se dibuja un arco de circunferencia (por diseño se decide la flecha no mayor al 10% del claro).

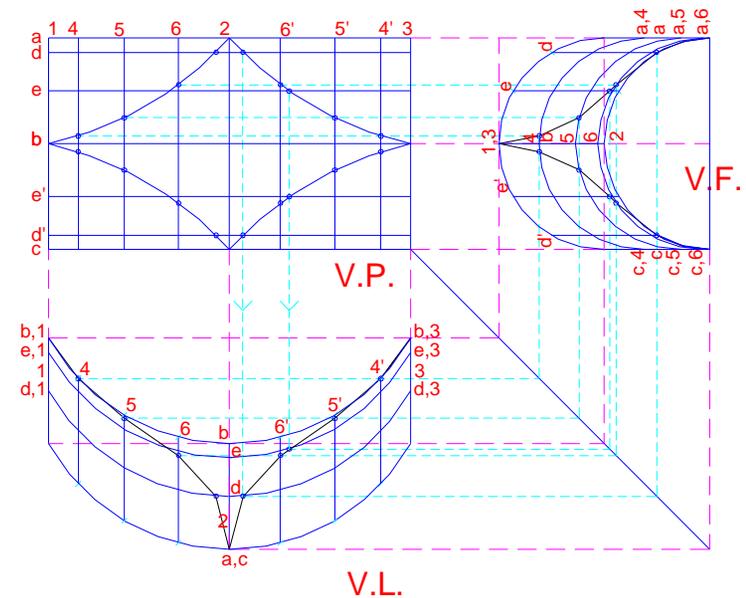
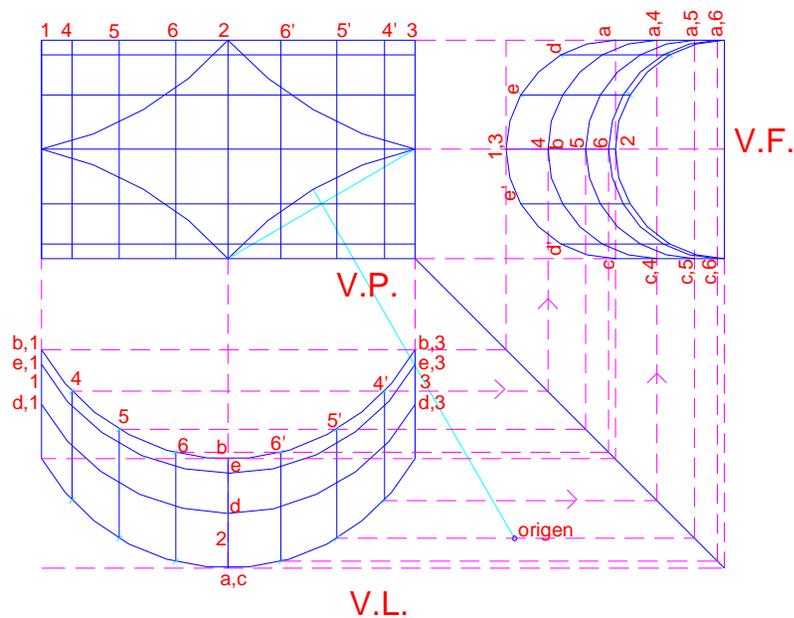
27. Siguiendo el procedimiento 26 se dibujan los tres siguientes arcos de circunferencia entre los puntos con coordenadas “b,3” con “a,2” y “a,2” con “b,1” y “b,1” con “c,2”.

28. La intersección del corte antes dibujado con el arco “e” en V. P. se proyecta a V. L. donde intersece con el arco “e”.

29. La intersección del mismo corte con “d” en V. P. se proyecta a V. L. con intersección en el arco “d” y se proyectan a V. F.

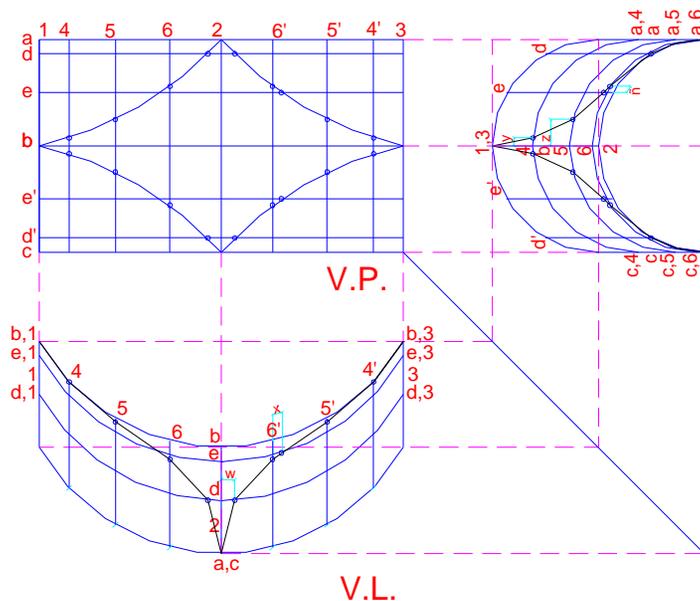
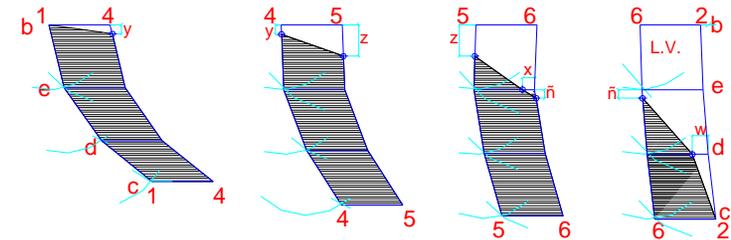
30. En V. P. la intersección del corte con los arcos “4, 5, 6” se proyectan a V. F. A los mismos arcos “4, 5, 6” y se proyectan a V. L.

31. Se unen los puntos con coordenadas “b,3” pasando por las intersecciones marcadas hasta “a,2” y “c,2” tanto en V. L. como en V. F.

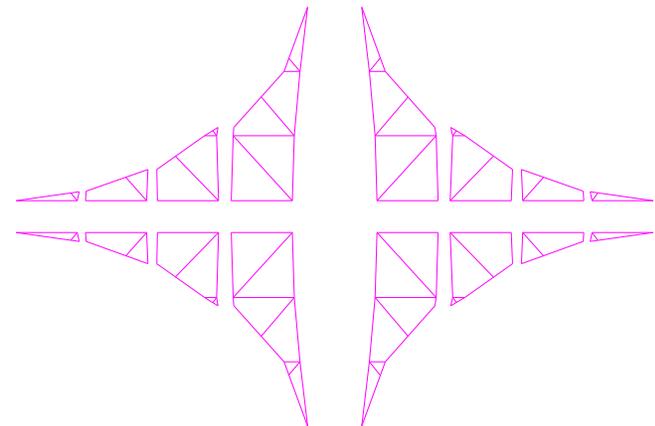


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

32. Para realizar el corte en la plantilla primero se identifica el punto con coordenadas “c,2”.
33. Si se observa el arco “d” en V. P. este se encuentra paralelo al cambio de plano, por lo tanto el arco “d” en V. L. esta en longitud verdadera, así es que se mide del arco “2” a la intersección como medida “w” y se traslada a la plantilla sobre el arco “d”.
34. En V. L. se mide sobre el arco “e” del arco “6” a la intersección y se pasa como medida “x” a la plantilla.
35. En V. F. Sobre el arco 4 se mide del arco “b” a la intersección y se pasa como medida “y” a la plantilla.
36. En V. F. Sobre el arco “5” se mide del arco “b” a la intersección y se pasa a la plantilla como medida “z”.
37. Sobre el arco 6 en V. F. Se mide del arco “(e)” a la intersección y se pasa a la plantilla como “ñ”.
38. Finalmente se unen todos los puntos encontrados.



PLANTILLA COMPLETA CON LOS CORTES CORRESPONDIENTES



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

MODELOS DE ESTUDIO

Prosiguiendo con esta metodología, se recorta la plantilla sobre papel y se unen los dieciséis gajos obtenidos para determinar cualquier error en el trazo o unión de los mismos. Se continúa ahora con el trazo de los gajos sobre el material propuesto como definitivo para experimentar su manejo, corte, resistencia y unión antes de tomar una decisión final. Se sugiere hacerlo a una escala que permita un fácil manejo y que no tenga piezas pequeñas que dificulten su elaboración. Para este asunto, se cortaron gajos de lona plástica y se unieron a través de máquina de coser, se imprimieron los gajos a escala 1:25 y se fijaron con cinta para marcar y cortar dejando medio centímetro más para la costura.

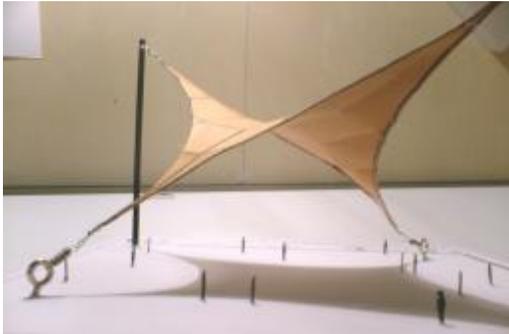


Imagen 87 Modelo de lona plástica en forma de silla de montar.⁹⁶

Es aconsejable colocar marcas sobre la lona que indiquen las intersecciones de plano y la curva de borde. En este proceso se puede observar la conveniencia de la relinga a usar por facilidad o cortes en “v” a todo lo largo de la curva para evitar amontonamiento de material. En bastidores de madera se ubicaron los dos puntos bajos y los dos puntos altos para fijar dos armellas y dos mástiles de madera que reciben cuatro cables de borde y cuatro cables que traccionan la lona. En un segundo modelo se

⁹⁶ Idem.

experimento con la unión a través de calor con seis cortes en lugar de cuatro como se hizo en la anterior, para esto, se amplió la escala a 1:10 y se utilizó lona que soportara el calor, se cortaron los gajos en sentido transversal y se pegaron para después reforzar con el mismo material sobre los puntos que van a traccionar la lona evitando que se pudiera deformar o rasgar. Para la relinga se cortó el material siguiendo el trazo de las curvas, empatando a hueso, en su interior, se introdujo un chicote de acero de varios hilos y se usaron nudos para formar dos ojales en los cables. Los mástiles se hicieron con espárragos de $\frac{1}{4}$ ” para atornillar los cables y regular las alturas, evitando al máximo las deformaciones que se dan como crestas y valles cuando el material trabaja en un solo sentido.



Imagen 88 Modelo de lona con seis cortes.⁹⁷

La determinación de cortes y la altura de los mástiles generan formas estéticas y alusivas de animales para parques recreativos. Con licra se pueden generar superficies en forma de jirafas abstractas que enmarcan en acceso de un zoológico. En esta propuesta se colocaron dos mástiles altos, uno más alto que otro, y seis partes bajas.

⁹⁷ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Imagen 89 Modelo con licra.⁹⁸



Este método es aproximado ya que se juega con los cortes y sólo da una idea aproximada de la forma. Se pueden fabricar modelos con pantimedias de mujer con posibilidades de diseño infinitas que dependen de su forma para la obtención de plantillas complicadas y fragmentadas que determinen la configuración. El procedimiento consiste en la prefiguración de formas dependiendo de los mástiles. Uno es con mástiles internos con cubierta que prescinde de cables traccionados sujetos a los postes para darle estabilidad, pero hace necesario la colocación de capuchones o platos en su puntos altos para evitar que la lona se

rompa o en su defecto abrir un ojal en la lona y colocar un anillo de tensión con cables hacia el mástil.

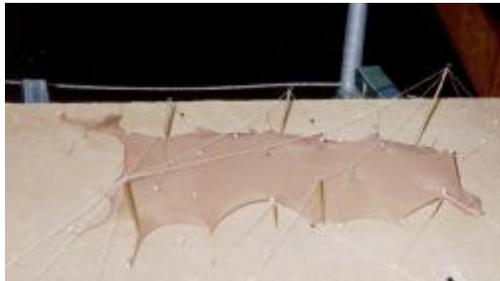


Imagen 90 Modelo con mástiles internos.⁹⁹

También puede ser con mástiles externos, determinados fuera y alejados de la membrana que requieren extensiones más haya de la cubierta y en formas complicadas, hace necesario la utilización de cables con platos a fricción para elevar la membrana en puntos intermedios.



Imagen 91 Modelo con mástiles externos.¹⁰⁰

Otra posibilidad son las formas con arcos a compresión interno o externos, estos pueden ser de concreto armado o metálicos en sección o con barras, en este caso, se sustituye el mástil recto por arcos que sujetan la cubierta en las partes altas y no necesariamente en la parte baja, ya que dependerá de la escala y la flecha del arco para encontrar los puntos bajos en el suelo o en la misma estructura y los arcos atípicos de cubiertas que se suspenden de los mismos edificios que forman un marco y del cual se tracciona la lona.

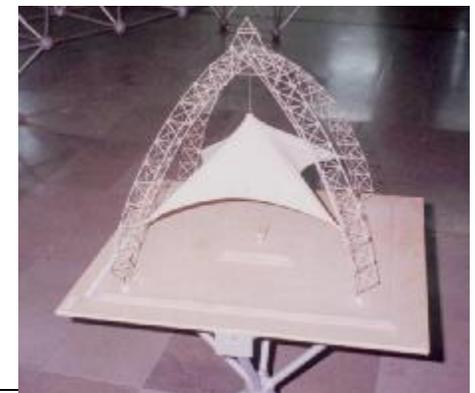


Imagen 92 Modelo de arcos con forma de estructura espacial.¹⁰¹

⁹⁸ Idem.

⁹⁹ Idem.

¹⁰⁰ Idem.

¹⁰¹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Una vez concebida la forma y elaborada con pantimedia, se aplica resistol blanco con brocha y en capas hasta que seque y endurezca el material con la finalidad de facilitar las mediciones sin variaciones por flexibilidad del material. Posteriormente, se determinan los gajos de manera conveniente tomando en cuenta el desperdicio de material, tramos largos y uniones que impliquen arrugas o falta de tracción en el material. Algunos modelos son sencillos que desarrolla una superficie de revolución con repetición de gajos radialmente. En este caso, es un gajo tipo que se repite doce veces alrededor de un solo mástil interno y un disco que recibe las doce piezas en el punto más alto y doce cables en la parte inferior.



Imagen 93

Modelo de revolución.¹⁰²

Otra manera de obtención de gajos es a través de la simulación de lona con tiras de papel transparente. Primero, se cortan tiras de papel (albanene) al tamaño que existe en el mercado 1.60m ó 1.80m y a la escala de la maqueta, tomando en consideración los traslapes para unir el material. Sobre las tiras de papel se marca un eje longitudinal y ejes transversales a cada 50 centímetros o un metro (a la mismas escala). Con varias tiras cortadas

y marcadas, se decide sobre el modelo, cual será la mejor manera de colocar las tiras, se recomienda sobreponer las franjas de papel con pegamento que permita el desprendimiento posterior sin el inconveniente que se pueda romper, se busca que los ejes longitudinales coincidan con los vértices del modelo y que en el extremo opuesto queden a hueso.



Imagen 94 Modelo.¹⁰³

Imagen 95 Modelo.¹⁰⁴

De igual manera, se debe cuidar que los ejes transversales coincidan pues la intersección de éstos va a determinar el corte entre ambas tiras. Una vez colocadas las dos primeras tiras el traslape se puntea con aguja o alfiler y se trazan los puntos para después cortar las dos franjas.

Es conveniente cortar conforme se van colocando las franjas, para evitar amontonamiento y confusión en el trazo de los gajos. Como siguiente paso se procede al trazo y corte de las curvas catenarias y las relingas para posteriormente retirar cada gajo y marcarlos sobre papel y sobre modelo, para controlar su ubicación, posición y empate con otros gajos. Retirados todos los gajos se debe trabajar a escala mayor con el material y sistema

¹⁰² Idem.

¹⁰³ Idem.

¹⁰⁴ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

propuesto en proyecto, esto ayuda mucho a corregir cortes de plantilla y traslado de medidas a escalas mayores, las observaciones realizadas a modelos previos, demuestran la ventaja de colocar gajos en el mismo sentido de las fuerzas de tracción que se generan en la cubierta y el opuesto presume desprendimientos, arrugas y zonas para empatar más de dos piezas.

MAQUETAS ESTRUCTURALES EXPERIMENTALES

Después de haber determinado las plantillas, ya sea por el método del modelo con pantimedia o por geometría, lo ideal es hacer una maqueta construida con precisión y detalle para estudio, prueba y para determinar el proceso que se siguió.

Las primeras maquetas intentan determinar la factibilidad de materiales, uniones entre planos, economía y sistema constructivo. Para el caso que nos ocupa, se utilizó lona plástica de la económica y se unieron los gajos con pistola de calor. Los ocho cortes que se hicieron a la estructura, fueron con la finalidad de observar desde un punto estético las cualidades de las curvas catenarias y de arco de circunferencia.

Para el primer caso, se traccionó una licra y se determinaron los extremos donde se trazaría la curva para trasladarlos a un papel colocado en muro y después suspender una cadena tomando como criterio para la flecha, el 10% de la distancia que había en los extremos y determinar así la curva.

Se marco en cada eslabón los puntos que darían forma a la curva y se traslado el papel al modelo de licra, para marcar sobre ésta la curva con una extensión de 10cm más para la relinga. Para el segundo caso de la curva con arco de circunferencia, se siguió el mismo proceso pero en este caso en lugar de suspender una cadena, se trazó una recta en los extremos y se marcó una línea

perpendicular para dividirla por la mitad y trazar un arco de medio punto.



Imagen 96

Maqueta de detalle para el estudio de materiales y cortes.¹⁰⁵

Los resultados obtenidos después de fabricar el modelo con una lona plástica fueron los siguientes: el arco catenario permite una salida más holgada del cable dentro de la relinga sin fricciones fuertes con la lona, mientras que el arco de circunferencia genera tracciones fuertes al centro, además que genera arrugas en la lona y la relinga es complicada de cortar, mientras que en la catenaria se resuelve con más precisión y menos cortes que evitan la sobreposición de material. Con la finalidad de medir el tiempo y observar otros procedimientos constructivos se fabricó otra maqueta con vinilona (nombre comercial), una vez impresa la plantilla, se calcó sobre la lona y cortó con tijeras y cutter.



Imagen 97 corte de material (vinilona) preparado para unirse con pegamento.¹⁰⁶

¹⁰⁵ Idem.

¹⁰⁶ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

A diferencia de la anterior, la relinga fue discontinua, es decir, se cortó por tramos para dejar a descubierto el cable y evitar cortes “v”. Como no era una maqueta de grandes proporciones, la unión del material se realizó con pegamento de contacto tipo 5000, para esto, se marcó la posición de cada gajo y se unieron aplicando pegamento con brocha sobre las pestañas que se dejaron como preparación para unir los planos. Para reforzar las uniones, se cosió con maquina de costura recta, una vez terminada, se colocaron dos cables de piola que es fácil de manejar por su flexibilidad, dentro de la relinga. El montaje fue un proceso sencillo que no requirió de elementos especiales para traccionar.



Imagen 98

cubierta preparada con cables de borde dentro de la relinga discontinua.¹⁰⁷

Con esta maqueta se pudo demostrar la importancia del “tercer” cable que tracciona la lona y el que propicia los esfuerzos en la membrana, evitando el deslizamiento de la lona sobre los cables de borde similares a las mangas de una camisa que permiten movimiento y propicia arrugas. Para quien conoce el tema, tal vez resulta

¹⁰⁷ Idem.

incomprensible montar una estructura sin estos cables, pero para el que estudia las estructuras velarías le resultaría sencillo comprender cuales deben ser los elementos que intervienen para la fabricación de una estructura. El final dio como resultado una maqueta de estudio, elaborada, en cuarenta y seis horas incluyendo el diseño, compra de material, trazo, cortes, unión y montaje y si bien es cierto que el tiempo tiene relación directa con la cantidad de material, el procedimiento constructivo, la mano de obra, el flujo de efectivo y demás elementos si es necesario llevar un control de lo que se hace.



Imagen 99

Maqueta terminada y montada en 46 horas.¹⁰⁸

En la investigación de estructuras ligeras es importante experimentar con materiales y sistemas constructivos porque de aquí se desprende la factibilidad de usar algún material específico dependiendo de sus características físicas y mecánicas, así como la compatibilidad con otros materiales. Con esta idea, se fabricó la maqueta de doble curvatura inversa conservando la forma pura de la superficie. La propuesta de usar metales, madera y tela fue una de las opciones a seguir. Primero se cortaron listones de madera de pino de 3cm de ancho por 3mm de

¹⁰⁸ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

espesor considerando la longitud total de las curvas en ambos sentidos.



Imagen 100

Forma pura de la superficie anticlástica con metal, madera y con cubierta de tela en cuatro puntos de sujeción.¹⁰⁹

Por lógica, el material permite la flexión debido al espesor en un sentido, pero en el otro, el ancho no permite que se pueda doblar, es decir, que el material colocado en posición donde la base es considerablemente mayor a la altura permite flexión, pero cuando la base es menor al peralte, hay mayor oposición a la flexión. De esta forma las curvas en el perímetro, no encuentran suficiente área de contacto al intersectar los arcos, o sea, que el contacto se da en las esquinas de la madera.

Por tal motivo se cortaron los listones con las medidas de longitud que se obtienen por geometría de la superficie. Solo dos medidas de barras facilitan el armado de la estructura, pero lo más importante es la determinación de las diagonales para dar la forma correcta. Se realizaron perforaciones en los extremos de cada barra y se sujetaron con tornillos y tuercas. Conviene aclarar que al unir cuatro barras por sus extremos con un solo tornillo se permite la libertad de ángulos o diagonales que se pretendió al inicio, sin embargo, este “plano” tiene

¹⁰⁹ Idem.

inestabilidad hasta que se colocan elementos diagonales o dobles tornillos, que no siempre es la mejor opción por el acho de los materiales que no permiten hacer más perforaciones pues se debilitan. Para este caso se utilizaron seis perfiles tubulares cuadrados de acero de 1” que conformaron el esqueleto de la superficie.



Imagen 101

Arcos de borde con metal soldado y malla de madera atornillada y sujeta al borde.¹¹⁰

Los cuatro arcos perimetrales dieron las condiciones de borde para la estructura y los dos centrales dieron estabilidad a los anteriores. La superficie de madera se montó sobre la metálica y se atornillaron. La red de madera asumió esfuerzos de tensión mientras que el acero tomó los de compresión. Por último, se colocó una cubierta de tela representando el corte de la superficie pura.

Como se ha visto, con las maquetas se pretende experimentar sobre criterios y sistemas constructivos adecuados a nuestra realidad, con la disposición de técnicas y materiales a nuestro alcance. Así se consideró la cubierta con un solo mástil y curvatura anticlástica, que da solución a un problema común que es la protección contra los rayos solares directos a las personas u objetos

¹¹⁰ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

como puede ser un automóvil o un puesto de ventas. Con el fin de colocar cubiertas en estacionamiento y áreas verdes que funcionan como centros de reunión desprovistas de árboles.



Imagen 102

Estructura de un solo mástil y ocho puntos de tracción con tela plástica.¹¹¹

Se construyó esta maqueta con acero de sección redonda y tela plástica similar a la que se utiliza para los impermeables. Se inició con la construcción del modelo a escala que determinó la forma y los gajos de la plantilla. Una vez marcada a escala la tela, se cortó y cosió con maquina para después colocar ojales metálicos en las puntas y alambre galvanizado dentro de la relinga rodeando éstos.

Un poste de 3.20 metros de altura con diámetro de 2” se ancló al suelo a través de un dado de concreto, en la parte alta se soldó una placa de ¼” de espesor y al

centro una tuerca. Dos brazos reciben ocho puntos de la tela, así que para formarlos, se utilizó tubo de 1 ½” con 2.50 metros de longitud. Con el trazo previo a la curva se dobló a contrapeso y se soldaron dos tramos de 1.20 metros a 90° en ambos lados formando una “Y”, se fabricó otro brazo igual al anterior y se barrenaron al centro para colocarlos con curva opuesta. Un tornillo de cabeza hexagonal con rondana sujetan sobre la placa en el poste. Para finalizar, se colocó la tela con tensores atornillados a los extremos de los tubos y enganchados a los ojales y cables para después traccionar.

Dentro de la metodología que aquí se sugiere, se proponen ocho etapas para la ejecución de una estructura de estas características y que a continuación se enumeran:

1. Diseño y dibujo de la estructura
2. Selección del sistema y material a utilizar
3. Costo
4. Trazo y corte
5. Unión de material
6. Accesorios
7. Montaje
8. Ajuste

Con la finalidad de comprobar dichas etapas, se elaboró una estructura de 12 metros de longitud por 8 metros de ancho, en la primera etapa, se procedió a la conceptualización de la forma que debería tener la estructura para después proceder al dibujo por computadora, utilizando autocad para tal efecto. Una vez revisado el trazo, se imprimió la plantilla escala 1:1 bastando una cuarta parte ya que en este caso particular, la estructura tiene dos ejes de simetría.

¹¹¹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Para la segunda etapa, se determinó la elección del material por las características de resistencia, facilidad de trabajo, costo y disponibilidad de tecnología para fabricar piezas especiales.



Imagen 103

estructura de 12 metros de longitud por 8 metros de ancho.¹¹²

Se pensó en utilizar textiles arquitectónicos de la marca registrada Ferrari, en específico FLUOTOP®T2 1502 ó PRECONSTRAINT FERRARI® 1002=81065 con buenas características de resistencia a la tracción, desgarre, adherencia y resistencia al fuego, pero principalmente el costo fue un aspecto que no se podía descartar, así que la decisión de usar textil de rafia fue la mejor opción, también se determinó usar postes de acero, piola, tensores y nudos. En la tercera etapa se generó una lista con el costo de los materiales que se comprarían así como de los que se contaba para obtener el costo total como a continuación se indica:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	COSTO	TOTAL
Membrana de rafia de 1.60m de ancho	mL	55	\$13.00	\$715.00
Postes de acero 2" x 6m de longitud	pz	2	\$265.00	\$530.00
Piola de 30m de largo	pz	4	\$20.00	\$80.00
Tensores	pz	14	\$8.50	\$119.00
Cinta doble Cara	pz	2	Se cuenta con el material	
Placas de lámina de acero calibre 16	pz	12	Se cuenta con el material	
Placas de acero de ¼" de espesor	pz	2	Se cuenta con el material	
Anclaje a piso con varilla de ¾" y ángulos soldados	pz	6	Se cuenta con el material	
Cable de Acero	m	24	\$8.00	\$192.00
Mano de Obra costo por soldar placas a los tubos				\$250.00
Mano de Obra costo por soldar soleras y ángulos				\$85.00
Perros	pz	8	\$5.00	\$40.00
Costo Total				\$2,011.00

En la cuarta etapa, para obtener la plantilla y cortar la membrana, primero se imprimió a escala 1:1 una cuarta parte del total invirtiendo la impresión y marcando referencias de acuerdo al cuadrante, iniciando del extremo superior izquierdo como cuadrante I y continuando en el sentido de las manecillas del reloj hasta el IV cuadrante. Para ubicar los planos se marcó con letras a, b, c, d en los vértices de abajo hacia arriba y con números en los horizontales de izquierda a derecha. De este modo se obtuvo la ubicación de planos, por ejemplo (1a2) que indica el plano en el primer cuadrante y

¹¹² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

el segundo de la primer línea horizontal. Posteriormente se cortó la plantilla impresa hasta los límites de empalme y relinga, teniendo cuidado de no cortar más allá de ellos. Se colocó la plantilla ya cortada sobre la membrana y se marcaron estos límites, tomando en cuenta el cuadrante y ubicación para no confundir las piezas, de igual forma se marcó una línea de 10 centímetros al borde para realizar los empalmes y relingas. Se procedió a realizar el corte sobre los límites de empalme y relinga, tomando en consideración cortes en “v” para doblar con mayor facilidad y permitir la curva catenaria en la relinga, cabe destacar la importancia de organizar por paquetes para identificar y trabajar más rápido. En la quinta etapa, una vez que se han cortado los gajos, se procedió a la unión de la siguiente forma:

- I. Se limpian ambos extremos de los empalmes de cada gajo comenzando por el (I,a1), (I,a2) de los cuadrantes I y II. Y así sucesivamente hasta los gajos (IVa1), (IVa2) de los cuadrantes III y IV.
- II. Se coloca cinta doble cara en uno de los extremos.
- III. Se cortan los sobrantes de membrana.
- IV. Se retira la cara de la cinta.
- V. Se realiza el empalme del otro gajo teniendo la cinta como separación en ambos límites.
- VI. Se cortan los sobrantes de membrana.
- VII. Se realiza un dobles justo a la mitad de la cinta de forma que queden empatados ambos extremos de los gajos.
- VIII. Utilizando maquina se comienza a coser los extremos de estos dobles para afianzar la unión. Se debe tomar en cuenta que en caso de utilizarse maquina de coser se debe colocar papel periódico en la parte inferior de la membrana pues al ser plástico es muy posible que no realice la costura

correctamente. Es importante utilizar la maquina en intervalos de 1 hora aproximadamente con descansos de 5 a 10 minutos, esto debido a que la aguja se calienta y quema la membrana.

- IX. Se retira el papel periódico.
- X. Se quitan excedentes de hilo que pudiesen quedar.



Imagen 104
Empalme de gajos con
cinta doble cara.¹¹³

Con la preparación de accesorios en la etapa 6, se soldó una placa de $\frac{1}{4}$ " y cuatro barrenos de $\frac{1}{8}$ " en el extremo del poste, el mismo modo se colocaron tres ángulos de 5 centímetros y una solera en forma de “u” en el extremo opuesto del tubo. Colocadas las soleras, se afianzaron dos cables por cada poste de seis metros de longitud, sujetos con dos “perros” cada uno y con tensor en el extremo bajo del cable (opuesto al poste). Con la preparación de doce placas de lámina metálica en forma trapezoidal de 10 centímetros de base por 10 centímetros de altura y 5 centímetros de corona con ocho perforaciones en el perímetro y una central, se realizaron los refuerzos en forma de sándwich sobre las seis puntas de la estructura. Aunque previamente se consideraron

¹¹³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

cuatro piezas más de la misma rafia para reforzar el material en esa zona, evitando el peligro de rasgaduras. Se colocaron las dos placas metálicas una en el as y otra en el envés, para finalmente atornillar y con este mismo proceso preparar las cinco puntas restantes. Por último, la preparación de anclaje en el piso consistió en soldar tres tramos de ángulo de 5 centímetros cada uno y un barreno por pieza, y una varilla de $\frac{3}{4}$ " de 1 metro de longitud, para esto fueron necesarias tres piezas.

El montaje (etapa 7) se realizó introduciendo la piola a lo largo de las relingas y seis tramos cortos de 40 centímetros de longitud aproximadamente, amarrados a las placas y sujetos los tres cables a los ángulos del extremo en los postes, con esto, y los dos cables de acero, se levantaron ambos postes con la tela colocada provisionalmente incluyendo los cuatro puntos bajos.

La última etapa consiste en el ajuste traccionado la tela de rafia, primero ubicando la posición final de los postes e hincando las alcajatas en la base para evitar deslizamiento del mismo. Posteriormente se hincaron las cuatro varillas con una inclinación de 60° para enganchar los tres tensores y finalmente girar hasta que quedaron lo suficientemente estirados. Reflexionar sobre estos puntos conlleva a la agregación de dos etapas más que considero importantes, la primera es el transporte como factor que puede impactar en el precio total y segundo, el tiempo para trasladar con los subsecuentes inconvenientes de roturas o rasgaduras y el lugar definitivo del montaje que implica tener un área preparada para el montaje, así como un levantamiento preciso que cumpla con calidad el objetivo de la estructura.

Los métodos empleados para la obtención de otra estructura se hizo a través de la geometría descriptiva como se ha explicado en la parte del trazo geométrico.

Una vez comprendido el concepto de superficie anticlástica (doble curvatura inversa) y siguiendo los principios del paraboloide hiperbólico (silla de montar) se procedió al diseño con tres puntos bajos y cuatro puntos altos. Se trazaron y se diseñaron los cortes catenarios de la estructura para obtener el desarrollo todo con métodos tradicionales, y posteriormente con el diseño asistido por computadora (autocad) que permite el diseño con mayor precisión, para obtener las plantillas a escala conveniente.



Imagen 105

Estructura de acceso al edificio "L".¹¹⁴

Las restricciones a la estructura fueron que debería de ser ligera, de fácil montaje y transporte, y además económica. Con el diseño y la plantilla por computadora se procedió a la realización de un modelo a escala para estudiar los sistemas de anclaje y los materiales a utilizar con la suficiente resistencia a la tracción sin que fueran materiales comerciales para experimentar nuevas posibilidades, la solución fue utilizar costales y unirlos con hilo por lo económico del material y piola como cables de borde y tracción.

¹¹⁴ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Imagen 106
Modelo de estudio para la obtención de plantillas.¹¹⁵

En los sistemas de anclaje se plantearon materiales que por su maleabilidad permitieran su construcción e hincado en los puntos bajos como lo es la madera, sin embargo para los puntos altos no se podía utilizar el mismo material por el trabajo estructural que debería desempeñar, por tal motivo, se decidió emplear el acero como recurso de seguridad y factibilidad constructiva para no dañar otros elementos.



Imagen 107 Modelo con la propuesta de anclajes.¹¹⁶

¹¹⁵ Idem.

¹¹⁶ Idem.

La propuesta fue una estructura que diera identidad al Edificio de Diseño en la Universidad Autónoma Metropolitana y solucionara el problema de la permanencia de los alumnos en el interior de los patios del edificio “L” para convertir el lápiz en un lugar de estancia y convivencia al exterior con la protección de la cubierta.



Imagen 108 Hincado de los tres 3 en el suelo.¹¹⁷



Imagen 109 Modelo con la propuesta de anclajes.¹¹⁸

En este proyecto participaron dos alumnos de la carrera de Arquitectura desarrollando el modelo de estudio con el material real y los sistemas constructivos de anclaje y tracción. Este modelo se hizo con costales unidos con hilo de acuerdo a la plantilla que se hizo por computadora, una vez montado el modelo se observó que las plantillas trabajaban mejor si se unían por franjas en lugar de planos independientes.

Para la realización de este modelo se observaron los puntos que se deberían reforzar para traccionar el material y la conveniencia de los bordes para colocar los cables, también como elementos importantes de la

¹¹⁷ Idem.

¹¹⁸ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

estructura fueron los tres puntos bajos y los cuatro puntos altos para equilibrar los esfuerzos de tensión.

En la estructura definitiva se aprovecharon los jardines laterales para colocar tres placas de madera de $\frac{3}{4}$ " de espesor unidas con tres postes redondos de madera de 2" cada uno de ellos y así resolver por la facilidad que ofrece el material en el diseño de sus piezas, la tracción con el hincado de los tres puntos bajos en el suelo, sin embargo se observó una insuficiencia de los anclajes para soportar el trabajo de la cubierta, se propuso empotrar ángulos de 2" x 2" soldados en forma de "T" como elemento adicional para ayudar a las placas de madera, como se aprecia en las imágenes 15 y 16.



Imagen 110 Hincado de los tres puntos bajos en el suelo.¹¹⁹



Imagen 111 Refuerzo del sistema de tracción.¹²⁰

En los cuatro puntos altos fue necesario fijar dos de ellos al barandal de concreto armado del Edificio "K" y los otros a las vigas prefabricadas del mismo edificio de diseño con la observación de no perforar ninguno de los elementos estructurales. Como solución se diseñaron anclajes en forma de "U" con placas de acero soldadas de $\frac{1}{4}$ " de pulgada y tornillos para presionar y evitar el movimiento del anclaje.



Imagen 112 anclaje sobre barandal de concreto armado.¹²¹



Imagen 113 anclaje sobre viga prefabricada.¹²²

La importancia en la investigación de estructuras ligeras es promover y fortalecer su enseñanza, por las ventajas que ofrece al cubrir grandes claros sin apoyos intermedios con el mínimo material y bajo costo. Estimular la difusión de las estructuras debe ser una prioridad para las Universidades.

La búsqueda y experimentación de alternativas que permitan desafiar la realidad con sistemas sencillos, fáciles de transportar y con nuevos materiales, es indispensable en el campo de las estructuras ligeras, en este caso la estructura cumplió con sus objetivos al demostrar que se pueden generar construcciones que demandan las sociedades actuales y que dan seguridad a quienes las habitan. Los que participamos en la proyección, propuestas y ejecución experimentamos con los principios básicos de las estructuras traccionadas y descubrimos que se puede mejorar aún más, esto nos ha dado la seguridad para continuar investigando no solamente con las estructuras velarías sino con estructuras que funcionen a partir de los principios físicos o de la biónica.

¹¹⁹ Idem.

¹²⁰ Idem.

¹²¹ Idem.

¹²² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

IX.- SUPERFICIES TORALES

PRINCIPIOS

La época esplendorosa de Grecia y Roma ha sido el punto de partida para muchos estudios sobre arquitectura, prueba de ello es la identificación de los órdenes y las excelentes edificaciones durante siglos. La utilización de tabiques de tierra o barro y bloques de piedra y mármol fueron los estándares para las construcciones. Combinaciones de elementos clásicos como bóvedas, frontones, molduras, etc., llegaron a ser formas características del renacimiento en Italia y posteriormente en Europa.



Imagen 114 Teatro de Delfos.¹²³

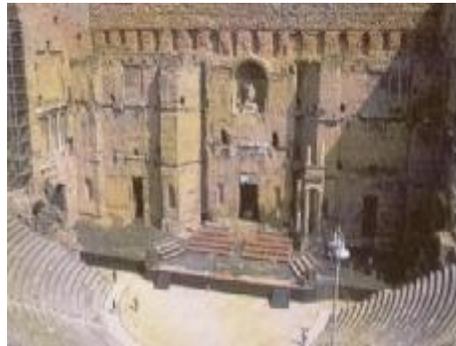


Imagen 115 Santuario de Baalbeck, Libano.¹²⁴

Estas combinaciones, nada fáciles para los arquitectos debido a los cánones prevalecientes de la época, no impidió que los edificios tuvieran un carácter bien identificado. Una serie de transformaciones tangibles en la arquitectura, han permitido que se desarrollen obras sin restricción alguna de volúmenes y materiales, de tal manera, que no se puede separar la forma de la materia y si es modificada alguna de éstas, la otra también sufre el efecto.

Así bien, durante siglos se ha experimentado con el uso de sistemas constructivos acordes con la forma desde montículos “amorfos” hechos con arcillas y pequeñas protuberancias que evitan la erosión, hasta sistemas modulares prefabricados para grandes edificaciones. Por lo tanto, podría decir, que no se puede concebir una forma arquitectónica sin meditar antes sobre los elementos que la sustentaran. De acuerdo a cada sistema, se analizan reacciones a esfuerzos de compresión, tracción, torsión, etcétera, así como comportamientos de acuerdo a la humedad, transmisión de calor, luz, intensidad de viento y demás elementos que puedan propiciar la deformación de la materia y por ende al conjunto; en este sentido, existen superficies que presentan características especiales, como es el caso de círculos trasladados alrededor de un eje virtual y exterior a estos en forma de neumático, llamadas superficies torales.

La sección pura se determina por el giro de arcos transversales, determinados por dos puntos fijos sobre el eje virtual con ángulo determinado por la división en partes iguales del arco longitudinal, presentando esfuerzos de compresión solo si la fuerza actúa con el mismo ángulo en el que se encuentra el arco. Para el caso de fuerzas verticales el trabajo de estos arcos se determina por la intersección de arcos longitudinales que

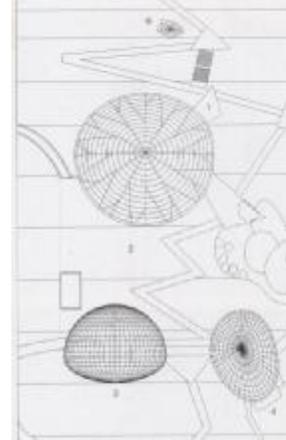
¹²³ Sharp, Dennis. “Diccionario Ilustrado Arquitectos y Arquitectura”. 1ª Edición: marzo 1993. Ediciones CEAC, S. A. Página 179

¹²⁴ Idem. Página 183.

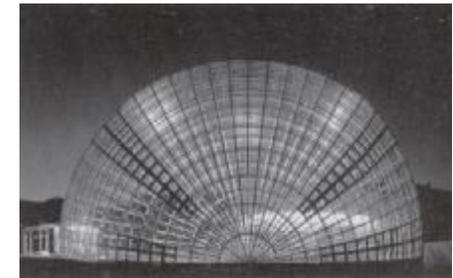
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

se desplazan a través del eje virtual con determinados puntos a lo largo del eje y según la división en partes iguales del arco transversal, soportando la fuerza de tracción generada por las intersecciones a todo lo largo del arco. La ubicación ordenada de cada elemento, determina cuatro apoyos como resultado de arcos perimetrales los cuales experimentan desplazamientos sobre el plano horizontal debido al esfuerzo de tensión determinada por una flecha menor a la longitud total entre el inicio y final del arco longitudinal. En cambio, las condiciones de esfuerzo se ven modificadas por un corte horizontal de la superficie que propician esfuerzos de compresión en los arcos y de tensión en todo el perímetro de arranque en dichos elementos a través de un anillo.

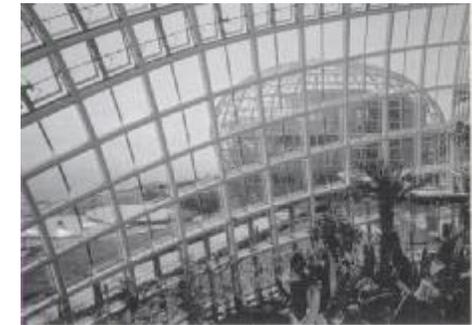
APLICACIONES



Vista en Planta.
Jardín de la Fruta.
Página.36



Vista Lateral
Jardín de la Fruta.
Arquitecto Itsuko Hasegawa.
Editorial Birkhäuser/ifa
Página.43

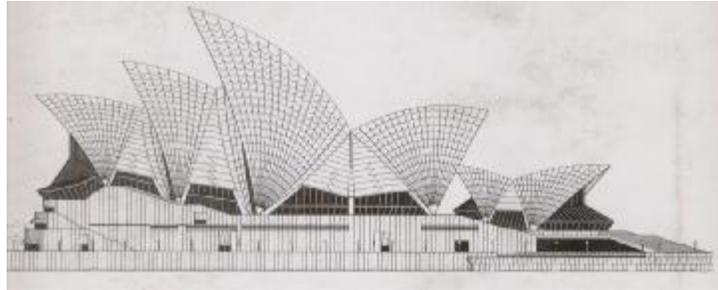


Vista Interior
Jardín de la Fruta.
Página.43



Detalle de secciones tubulares
Jardín de la Fruta.
Página.43

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Fotografías de la casa ópera de Sydney. Arquitecto Jorn Utzon.
Desarrollado por E. H. Farmer, Peter Hall, Lionel Todd y David Littlemore.
Arquitectura en el Detalle.

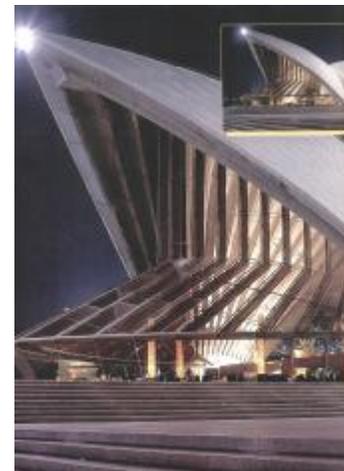
Museo de Dinosaurios,
Fukui Japan, 2000.
Arquitectos y Asociados
Kisho Kurokawa.
Página. 162



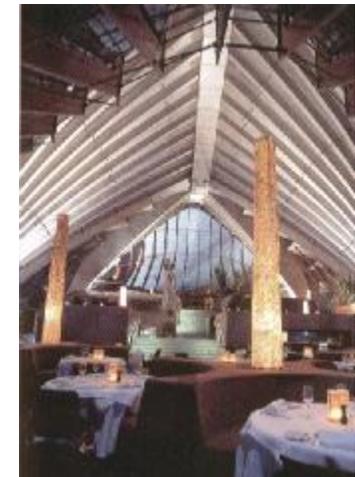
Casa de Culto.
Islam+Arhitecture.
Sabiha Foster. Página 46.



Casa de Culto.
Islam+Arhitecture.
Sabiha Foster. Página 51.



Acceso
La columnata
Food+Architecture.
Página 32.

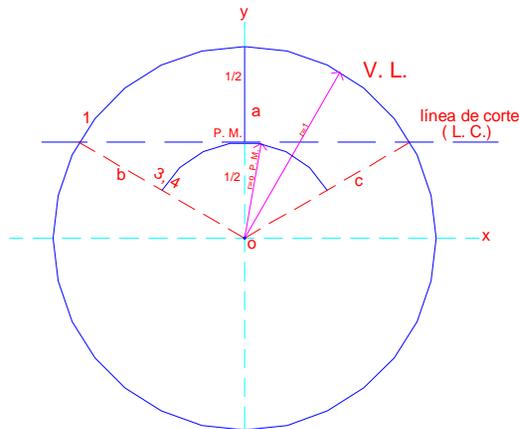


Vista Interior
La columnata
Food+Architecture.
Página 33.

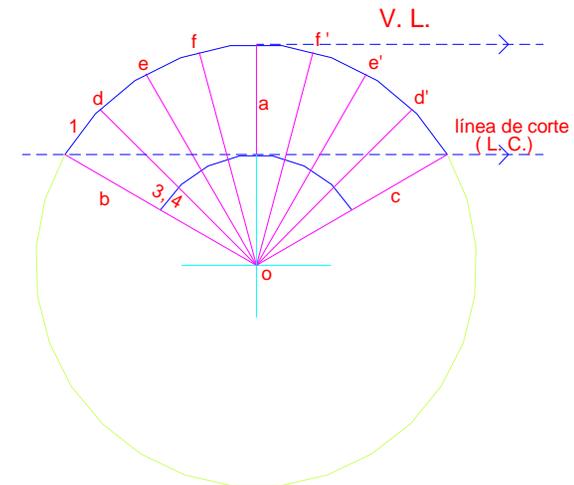
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

TRAZO GEOMÉTRICO

1. Se inicia con vista lateral (V. L.) trazando dos circunferencias (1,2) con medida de radio según proyecto, se recomienda que la circunferencia “1” sea grande en el dibujo y la “2” lo más pequeña posible con la finalidad de obtener buena altura, pero se debe analizar para determinarla según diseño. Se marcan los dos ejes “x” “y” y origen “o”.
2. Sobre el eje “y” (en los positivos), se obtiene la diferencia entre el radio de la circunferencia mayor (1) menos el radio de la circunferencia menor (2) y dividido entre dos se obtiene el punto medio P.M. En este punto, se dibuja una línea de corte horizontal (L.C.), la circunferencia “1” y la línea de corte que intersectan al eje “y” se denomina arco “a”.
3. Se proyectan dos líneas que inician en el origen “o” hasta la intersección de la línea de corte L. C. y la circunferencia “1” marcando “c” y “b”.
4. Se dibuja un arco de circunferencia con medida de radio $r = o, P.M.$ y se marca como arcos 3,4.

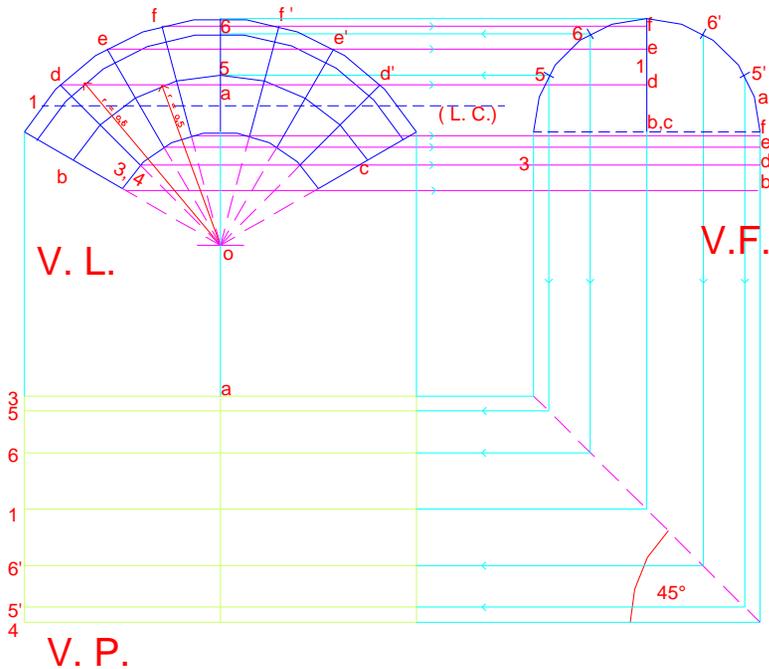


5. La parte de la circunferencia “1” que da como resultado de la línea de corte (L. C.) se divide en ocho partes iguales denominando “(d, e, f, f', e', d')”.
- 6.- Del origen “o” se proyectan líneas hasta los puntos antes marcados.
7. Para dibujar su vista frontal (V. F.) se prolonga L. C. y con medida de radio recta “a”, se dibuja un arco de medio punto (sobre la línea de corte L. C.). Éste es el mismo arco “a” de V. L. y la línea vertical representa el arco “1”.



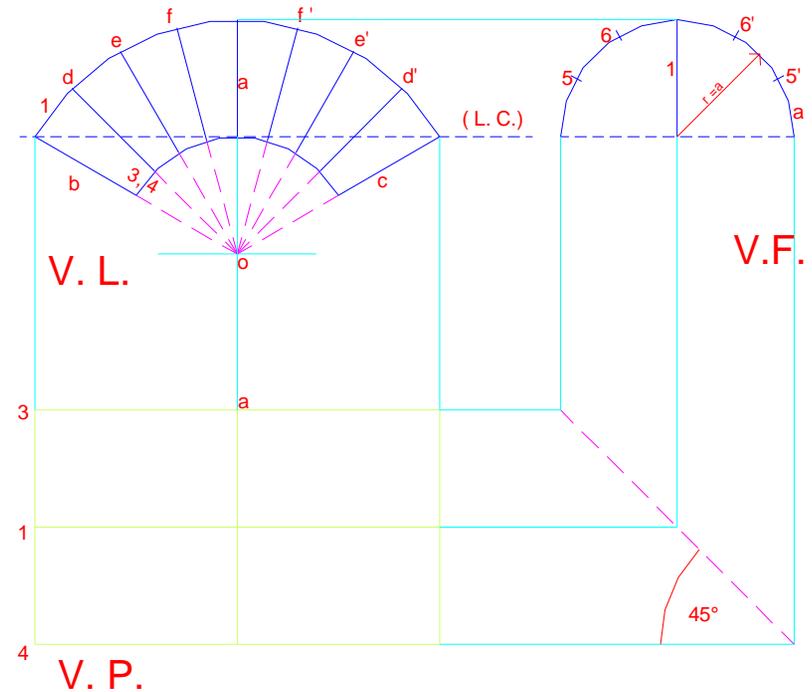
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

- 8. El arco “a” en V. F. se divide en seis partes iguales y se denominan los puntos “(5, 6, 6', 5')”.
- 9. La vista en planta (V.P.), se obtiene con cambio de plano a 45° a partir de la proyección del tamaño total del arco en V. F. y la proyección de las intersecciones de L. C. con el arco “1” denominando los arcos “1,3, 4, a”.



- 10. Los puntos “(5, 6, 6', 5')” de V. F. se proyectan hasta vista de planta representando los mismos arcos.
- 11. Los puntos “5” y “6” de V. F. se proyectan al arco “a” en V. L.

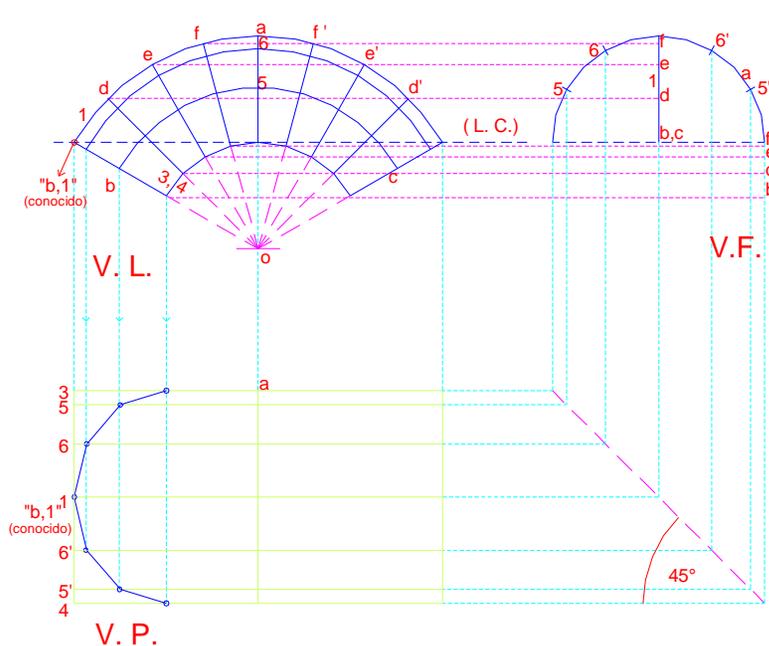
- 12. Con medida de radio “o” punto “5”, se dibuja un arco de circunferencia en V. L. lo mismos para el arco “6”.
- 13. Las intersecciones con coordenadas “1-d”, “1-e” y “1-f” de V. L. se proyectan al arco “1” de V. F.
- 14. Las intersecciones “b – 3,4” “d – 3,4” “e-3,4” y “f-3,4” en V. L. se proyectan a V. F., marcando las proyecciones “b, d, e, f”.



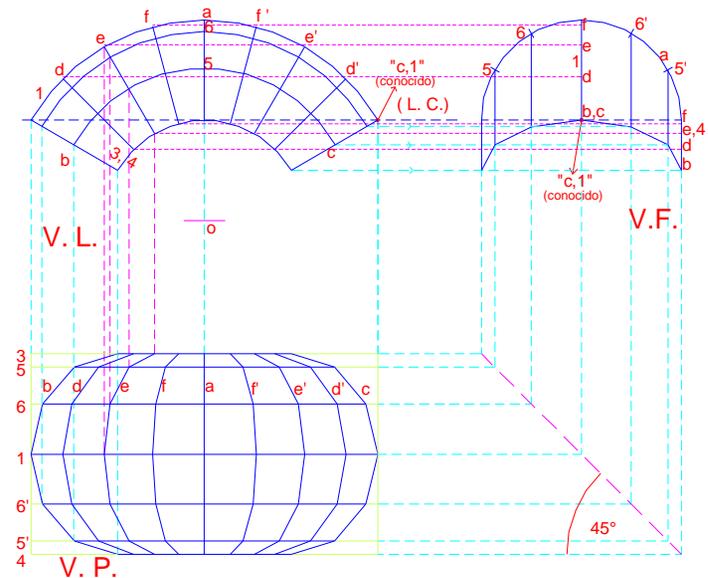
- 15. El arco “b” en vista de planta se obtiene de la siguiente manera:
 - 15.1 El punto “b,1” es un punto conocido tanto en V. L. como en V. P.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

- 15.2 En V. L. se determina el punto “b,6” y se proyecta a V. P. hasta la línea que representa el arco “6” y “(6)”.
- 15.3 De la misma forma, se localiza el punto “b,5” en V. L. y se proyecta al arco “5” y “(5)” de V. P.
- 15.4 El punto “b,3” y “b,4” de V. L. se proyecta al arco “3” y “4” de V. P.
- 15.5 Se unen los puntos obtenidos en vista de planta y con este mismo procedimiento se obtienen los arcos “d, e, f, f’, e’, d’, c”.



- 16. Los arcos “c, b, d, e, f” (con sus respectivas primas) en V. F. se obtienen como sigue:
 - 16.1 El punto con coordenadas “c,1” es conocido en V. L. y V. F.
 - 16.2 El punto con coordenadas “c, 6” en V. L. se proyecta a V. F. hasta que intersecte con la proyección del punto “6” y “(6)” de V. F.
 - 16.3 El punto “c,5” de V. L. se proyecta hasta la proyección del punto “5” y “(5)” de V. F.

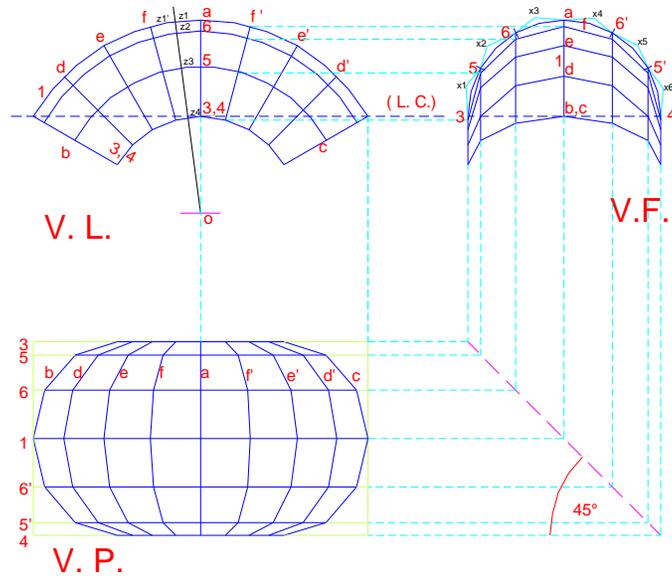


- 16.4 El punto “c,3” de V. L. se proyecta hasta la intersección del arco “3” y “4” de V. F.
- 16.5 Se unen los puntos. Para terminar, se debe seguir el procedimiento del 16 al 16.5.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

DESARROLLO DE PLANTILLA

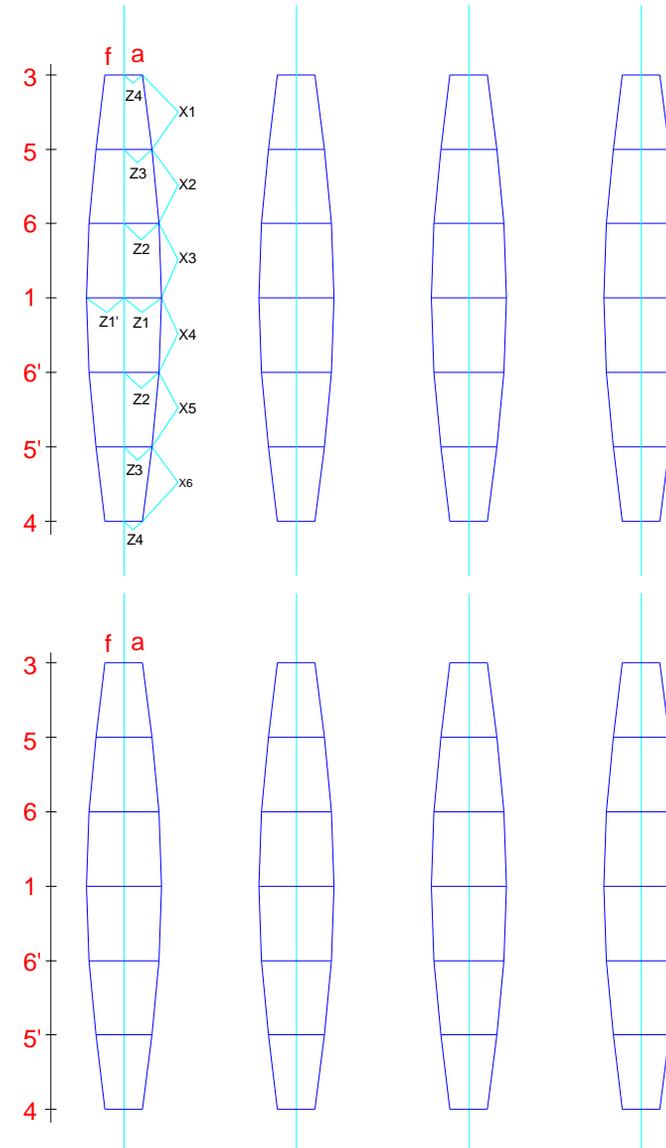
17. Para obtener la plantilla, se obtiene el perímetro del arco “a” de V. F. o con la fórmula $d/2$, es decir, se miden de “x1” a “x6” y se pasa a una línea de eje previamente trazada con sus respectivos números.
18. En V. L. se proyecta una línea a la mitad (línea intermedia), entre el arco “a” y el arco “f”.
19. Sobre el arco “1” en V. L., se mide de la línea intermedia el arco “a” y de la línea intermedia al arco f



y se pasa a “1” horizontal (que se trazo previamente) o sea, las medidas z1 y z1’.

20. Sobre los arcos “6, 5, 3” de V. L. se mide “z2”, “z3” y “z4” y se pasan a la plantilla con su respectiva línea. Es necesario dibujar ocho de éstas plantillas para obtener el total de la estructura.

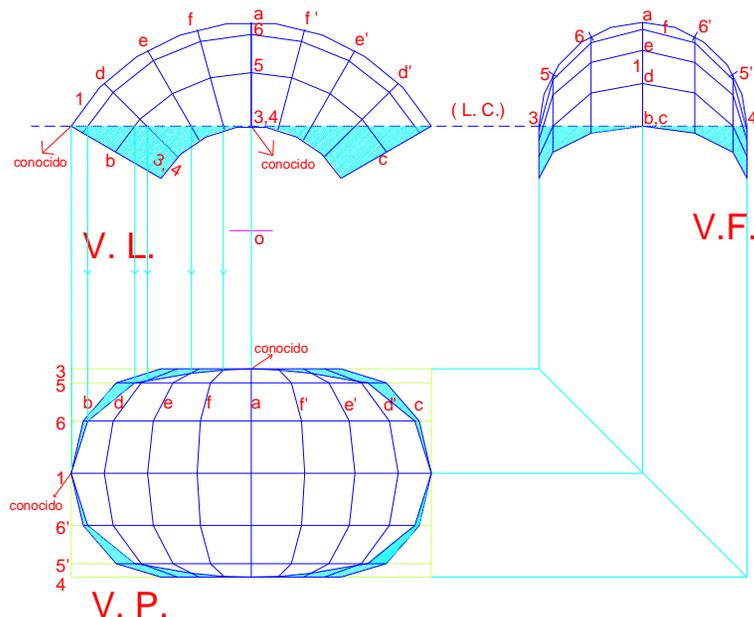
PLANTILLA



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

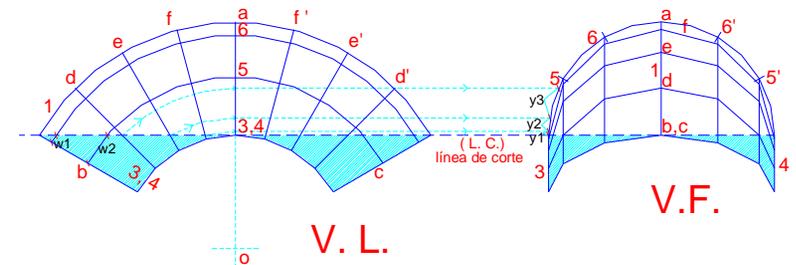
CORTE EN DIBUJO

21. El corte se encuentra determinado en V. L. y V. F. por la línea de corte (L. C.)
22. Falta determinar el corte V. P. y éste se obtiene como sigue:
 - 22.1 Se ubica la intersección L. C. con el arco “6” en V. L. y se proyecta hasta el arco “6” de V. P.
 - 22.2 Se identifica la intersección L. C. con “5” en V. L. y se proyecta hasta el arco “5” de V. P. y los puntos “b”, L. C. y “3”, L. C. son conocidos.
 - 22.3 Para obtener más puntos, se marcan las intersecciones de los arcos “f, e y d” con L. C. en V. L. y se proyectan a vista de planta hasta los arcos con la misma nomenclatura, para finalmente unir los puntos.



CORTE EN PLANTILLA

23. Basta con la mitad de la estructura para explicar el corte, identificando los arcos “a, f, e, d, b, 1, 6, 5, 3”, solamente en V. L. Y V. F.
- 23.1 En la plantilla, el arco “a” queda en su longitud total y sólo se identifican en la plantilla los puntos “a,3” y “a,4”.

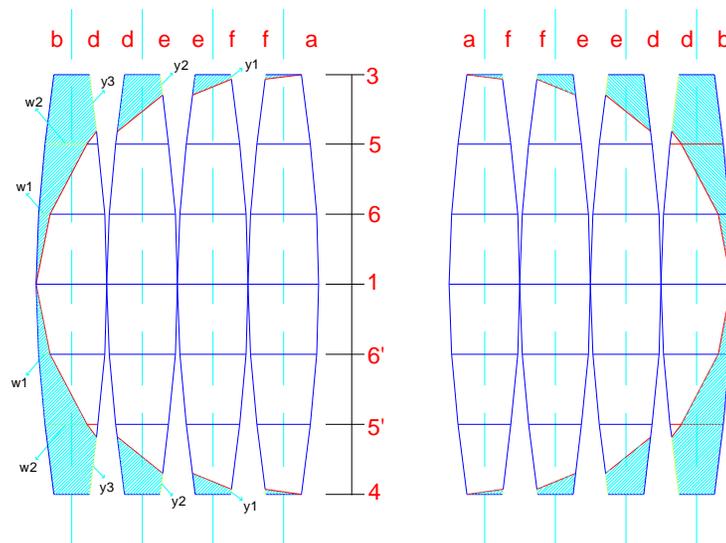


- 23.2 En V. L. se ubica el arco “f” y se determina el segmento de recta que está bajo L. C. (entre L. C. Y arco “3,4”) con un giro apoyado en “o” (origen) y la intersección del arco “f” con L. C., se proyecta hasta una posición vertical (hasta el arco “a”). en esta posición, se proyecta el arco “a” en V. F. (el único en longitud verdadera). Se mide como “y1” sobre dicho arco (de la intersección a L. C.) para posteriormente pasarlo a la plantilla.
- 23.3 Con el mismo procedimiento se ubica el segmento de recta del arco “e” en V. L. entre el arco “3,4” y L. C. Este segmento de recta se gira hasta el arco “a” en la misma vista “V. L.) es decir, a una posición vertical para después proyectar hasta el arco “a” en vista frontal. Se mide sobre el arco “a” a la

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

intersección antes hecha y se marca en la plantilla como “y2”. Para obtener “y3” se sigue el mismo procedimiento pero ahora con el arco “d”.

23.4 Para obtener las medidas de corte del arco “5”, “6” se mide directamente en vista lateral, el segmento de recta que hay entre L. C. y el arco “b”. Por ejemplo la medida “w1” es la medida que se encuentra sobre el arco “6” entre la L.C. y el arco “b”.



MODELOS DE ESTUDIO

Continuando con el proceso que aquí se plantea, se procedió a la verificación de trazo geométrico, trasladando la plantilla a cartón corrugado. Con anterioridad ya se tenía experiencia con modelos a escala 1:1 construidos con cartón doble, unidos con cinta de papel engomado. Los resultados fueron positivos, pero se vio la necesidad de tratar el cartón para evitar que la humedad no lo deteriorará.



Imagen 116

Modelo de cartón corrugado unido con papel engomado.¹²⁵

Se aplicaron resinas naturales que aumentaron la resistencia del modelo y al mismo tiempo funcionaron como impermeabilizante, pero el aumento de costo, como un factor preponderante no fue la mejor opción a seguir. La fabricación de modelos con este material es una alternativa económica que conviene para analizar la unión entre planos que conforman una estructura. Con este fin, se fabricó el modelo a escala 1:25 cortando una plantilla tipo repetida ocho veces. Con esto se demuestran las enormes ventajas de tener superficies con módulos tipo que se pueden desarrollar con rapidez. También se descarta la posibilidad de error al acoplar cada sección ya que siempre existe empate con la anterior. Otra ventaja es la facilidad de trazo con pocas

¹²⁵ Arq. Ernesto Noriega Estrada. Con fines didácticos.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

medidas, que realizadas con detenimiento acelera el proceso una vez obtenida la primer plantilla. Un aspecto que se debe prever al momento de construir modelos, es la congruente relación del modelo con las posibilidades reales de fabricación, es decir, al considerar la utilización de placas en el modelo, se deberán buscar materiales con la misma forma, por lo tanto, se analizará la viabilidad en función de las características, propiedad y adecuaciones del material. Si es planteada la ejecución con superficies curvas, conviene investigar sobre la probabilidad que tienen los elementos para doblarse. En el modelo, será sencillo cortar, doblar o unir, más nunca se deberá perder de vista la diferencia que existe entre la emulación y la real ejecución.



Imagen 117 Vista Lateral de modelo de cartón con cuatro puntos de apoyo.¹²⁶

La posición del modelo supone condiciones a refuerzos en áreas bien identificadas que permitan mantenerlo en la posición deseada. Tal es el caso de la superficie sustentada en sus cuatro puntos, donde se observa falla en los apoyos debido a la carencia de área de soporte y al vértice que forman los arcos del perímetro. Pero el diseño ha demostrado que sus condiciones estructurales cambian si la superficie se invierte, o sea, si la concavidad queda expuesta hacia arriba presentando

¹²⁶ Idem.

volteo por peso propio sobre el eje longitudinal, en este caso, las condiciones requieren de elementos para mantenerlo en posición, modificando esfuerzos a flexión. Otra posibilidad es la posición de apoyo sobre uno de los arcos transversales del perímetro, esto da condiciones de cantiliver y fuertes esfuerzos de tracción entre la estructura y la cimentación. La realización de cortes por secciones, permite desarrollar composiciones a partir de la fragmentación de la forma pura de la total.

Sus aplicaciones pueden ser muchas pero parece ser que no se ha experimentado lo suficiente en obras arquitectónicas a pesar de las cualidades estéticas que esta superficie representa. Un excelente ejemplo es el Jardín de la Fruta proyectado por Itsuko Hasegawa, en el cual utilizó una variante de la superficie total con apoyo perimetral. La cubierta se construyó utilizando placas traslucidas para crear el efecto invernadero y con esto generar condiciones favorables para el desarrollo de especies vegetales.



Imagen 118 Modelo de mica traslúcida que sirve de propuesta al desarrollo de invernaderos en el Estado de México.¹²⁷

Si consideramos la construcción de invernaderos con formas simples y alturas que no permiten el desarrollo suficiente de árboles, una opción es utilizar formas que contemplen especies de gran tamaño. Con este fin se

¹²⁷ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

construyó un modelo de mica traslúcida que sirvió para explicar las bondades de la superficie para producción de plantas en el Estado de México.

Utilizar perfiles tubulares y polipropileno ha sido la ruta más rápida para la construcción de estas “fabricas”, más en cambio no se descarta la posibilidad de usar materiales con mayor durabilidad.

Cuando hemos hablado de las propiedades de los materiales a utilizar y las variantes de la forma pura en el diseño de estructuras, emergen las probabilidades que tiene una estructura para cambiar de forma, posición o altura para ocupar menos espacio cuando no se utiliza, para bloquear el paso del sol y viento o la libre circulación de personas y aire, así como el cambio de función para captar energía. Una superficie es susceptible de mantenerse en una posición a una altura determinada para evitar pérdidas de calor en invierno y corrientes de aire no deseables en el espacio. La flexibilidad de una estructura permitirá elevarla a diferentes alturas para regular la temperatura y con esto evitar sistemas mecánicos de ventilación que son altamente contaminantes por el consumo de energía.

Imagen 119 Modelo a una altura que no permite el paso de volúmenes grandes de aire.¹²⁸



¹²⁸ Idem.

De aquí que una estructura ligera se pueda desplazar con facilidad a través de medios manuales y en su defecto con medios mecánicos, inexistiendo la comparación de consumo energético con un sistema de aire acondicionado funcionando las veinticuatro horas del día. Finalmente, una de las bondades que esta superficie presenta, es el desarrollo a partir de un eje virtual que funciona como origen para el trazo de arcos y esto por lo tanto permitirá tener gajos independientes a diferentes alturas que pudieran girar sobre este eje virtual y sobreponerse uno con respecto a otro para tener espacios cubiertos completamente y cerrados en su totalidad cuando se requiera.



Imagen 120 Estructura elevada que regula la ventilación según la época y condiciones climáticas.¹²⁹

MAQUETAS ESTRUCTURALES EXPERIMENTALES

En una economía como la nuestra, donde el poder adquisitivo es limitado, resultaría normal pensar que una preocupación generalizada es la durabilidad de la construcción, aunado obviamente al costo, que conlleva a pensar que deberá persistir para toda la vida. Al menos en nuestro país, existe desconfianza por utilizar sistemas que no garanticen tiempos prolongados y el mínimo de mantenimiento, por esta razón es mucho más común ver losas de concreto,

¹²⁹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

muros de block o tabique y columnas de concreto armado y acero en lugar de cubiertas con derivados de polímeros, muros de adobe tecnificado o colchonetas infladas con aire a presión y mástiles o postes de sección esbelta.

El concepto es hacer más con menos y por ende, un importante ahorro energético, de tiempo y costo. Al analizar esta situación, y considerando uno de los aspectos que en esta tesis se aborda, se investigó sobre un sistema constructivo a través de un proceso sencillo y adaptable a las condiciones reales de nuestro país. Tomando en cuenta los aspectos anteriormente señalados, y la indosincronía con respecto al uso de materiales pétreos con una equivocada idea de estabilidad y fuerza estructural, se desarrolló la siguiente propuesta.

La idea fue usar ferrocemento como sistema constructivo, se comprenderá que este sistema es la combinación de acero con mortero de cemento-arena con espesores no mayores a tres centímetros.



Imagen 121
Trazo del arco longitudinal de dos metros de longitud y cincuenta centímetros de flecha.¹³⁰

La superficie total presenta condiciones aceptables para este sistema ya que es un solo gajo tipo. Con esto se facilita su construcción pues no hay margen de error para colocar arcos o gajos. Para esto, sólo se trazaron sobre papel, dos arcos con el procedimiento que

describe el trazo geométrico, el primero es muy sencillo, ya que es un arco de medio punto y para este fin se hizo con medida de un metro de diámetro.



Imagen 122
Secciones tubulares de acero dobladas según plantilla sobre papel.¹³¹

Una vez realizado el trazo del arco, se dividió en seis partes iguales y sólo se dejaron las marcas sobre éste. Se utilizó perfil tubular redondo de media pulgada que con anterioridad ya se venía experimentando por las ventajas que presenta al ser doblado y por la superficie al ser intersectado con otro.



Imagen 123 Trazo del arco de medio punto, sobre papel que sirve de plantilla para el dobles de tubos.¹³²

Una muy buena opción, es usar varilla corrugada de acero del número tres, puesto que es más económica y sólida en comparación con un perfil tubular. Para obtener el segundo arco(longitudinal), se trazaron sobre papel dos rectas perpendiculares, la horizontal

¹³⁰ Idem.

¹³¹ Idem.

¹³² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

con un metro de cada lado a partir de la vertical y esta última con cincuenta centímetros a partir de la horizontal hacia arriba (en los positivos).

Imagen 124

Secciones tubulares de acero dobladas según plantilla sobre papel.¹³³



Tal como se indica en la geometría de la toral, se unieron uno de los extremos de la recta perpendicular hasta que cortara con la prolongación de la vertical y así determinar el origen y trazo del arco. Con esta plantilla se procedió a doblar las secciones tubulares redondas de acero y se marcó sobre éstas, las intersecciones de los arcos transversales. Para mayor facilidad de unión entre arcos, se utilizó arco eléctrico y de aquí se desprende la posibilidad de usar alambre recocido en caso de usar varillas corrugadas, como una opción sencilla, rápida y al alcance de cualquier persona.

Imagen 125

Ajuste de las transversales al momento de colocar las longitudinales según marcas sobre los tubos.¹³⁴



¹³³ Idem.

¹³⁴ Idem.

Para este caso, se levantaron los dos arcos longitudinales perimetrales y se puntearon todos los arcos transversales o de medio punto, con soldadura sobre la marca que se había hecho con anterioridad. En este primer paso, se pretendió determinar la posición final, sin embargo, ésta se dio al momento de colocar los transversales para finalmente reforzar con soldadura todas las intersecciones. Con el esqueleto parcialmente terminado, se tomaron directamente las medidas para trasladarlas a papel y así obtener la plantilla tipo. Se procedió a cortar esta plantilla y se fijó con cinta adhesiva al piso con el objeto de evitar movimiento y deformación al momento de colocar

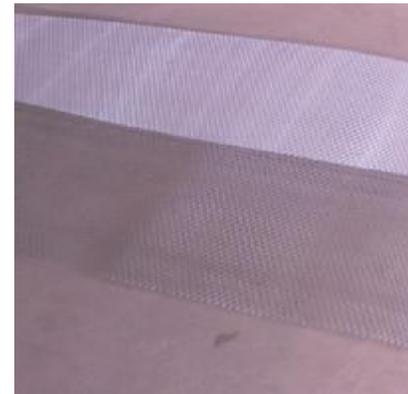


Imagen 126 Trazo de gajos tipo sobre papel y corte de metal desplegado.¹³⁵

Con el debido cuidado al momento de extender el metal, se procedió a cortar con tijeras para metal y poner cada gajo sobre los arcos y amarrar cada intersección con alambre galvanizado tratando de evitar el deslizamiento de los amarres.

¹³⁵ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Para cubrir se utilizó mortero de cemento-arena en proporción 1:3 con poca agua para obtener una masa homogénea y que se pudiera aplicar sin tener desperdicios y reutilizando la que cae al momento de la aplicación. Se pudo verificar cierta elongación del metal al recibir el mortero y por lo tanto, generación de valles que se tuvieron que reparar con una segunda capa después del fraguado de la primera. Aún y con estos inconvenientes, la apariencia y resistencia fueron aceptables para una estructura con esas características.



Imagen 127
Aplicación de mortero de cemento-arena de 3cm de espesor.¹³⁶

De cualquier modo, se construyó una segunda maqueta con un procedimiento similar al anteriormente descrito, pero en esta ocasión se utilizó malla reforzada romboidal de $\frac{1}{4}$ ", como esta malla presenta buenas características a esfuerzos de tensión, se pudo omitir la utilización de los arcos longitudinales. Se soldaron nueve arcos de varilla del número tres a dos arcos longitudinales con la posición final de acuerdo al desarrollo que se obtuvo por computadora y que rigió la medida de los arcos.

¹³⁶ Idem.

Imagen 128 Arcos de varilla pulida de acero soldados a dos arcos longitudinales de borde del mismo material.¹³⁷



Se imprimieron las plantillas que se obtuvieron por computadora y se cortó la malla, al ser un material reforzado no fue posible cortar con tijeras, así que con ayuda de amoladora angular y disco para metal se cortaron los gajos.



Imagen 129 Corte de la malla sobre plantilla de papel.¹³⁸

Como medidas preventivas, se recomienda que se realice el trazo sobre la malla para después cortarla, si se hace directamente con la plantilla bajo la malla, se deben

¹³⁷ Idem.

¹³⁸ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

tomar las precauciones pertinentes para evitar accidentes al momento del corte. Sólo se cortaron ocho gajos que se unieron con puntos de soldadura a los arcos de varillas, al permitir dichos materiales un fácil doblado, no fue necesario emplear alguna herramienta especial.



Imagen 130 Unión de malla a través de soldadura directamente a los arcos de varilla pulida de acero del número tres.¹³⁹

Una vez colocados todos los gajos sobre los arcos, se pudo corroborar que efectivamente no eran necesarios los arcos longitudinales, ya que la malla absorbió los esfuerzos de tracción y al mismo tiempo preparaba una superficie para recibir mortero de cemento-arena-tezontle en proporción 1:3:2 sin la aparente formación de valles causada por el peso propio de la masa. Con la experiencia anterior, se meditó sobre utilizar otro material que diera volumen pero que no significara un peso considerable a la estructura. El tezontle que se utilizó fue en gravilla en no más de diez milímetros. Conviene aclarar que pueden aparecer pequeñas fisuras debidas a la pérdida de humedad en poco tiempo debido al espesor del mortero, por lo tanto, se debe humedecer

¹³⁹ Idem.

constantemente y de preferencia incluir aditivos, fibras o virutas para que estas fisuras no sean mayores. También se pueden agregar perlas de poliestireno para aligerar y reducir la transmisión de calor. Al final, es necesario impermeabilizar para evitar posibles goteras y considerar canalones como trabes de borde y empotre que puedan guiar la lluvia y los esfuerzos al terreno ó al muro. La evaluación de este sistema, lleva a reflexionar sobre las ventajas que tiene sobre otros sistemas por el poco material empleado, la forma que le concede resistencia aunado a la estética y composición. Por último la aceptación del usuario final que puede sentir confianza por este sistema constructivo y el subsecuente convencimiento de construir con menos recursos.



Imagen 131
Toral con secciones redondas de acero y malla hexagonal reforzado.¹⁴⁰

El corte de la superficie toral, plantea mejores condiciones de resistencia y estabilidad estructural, de este modo, la investigación de sistemas constructivos sugirió la fabricación de una maqueta aparentemente opuesta a las anteriores. El material no tiene la dureza que tiene el concreto y no requiere de perfiles tubulares como esqueleto de la forma y soporte al mismo tiempo. Por el contrario, es super ligera, al utilizar membrana plástica soportada por aire a baja presión.

¹⁴⁰ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Con el ploteo de las cuatro plantillas, se procedió a marcar sobre la lona plástica de color negro. Se dio margen de dos centímetros por lado en cada uno de los gajos para tener cuatro centímetros de empalme entregajos y cuatro para fijar sobre la base. Una vez terminado de marcar sobre el material, se procedió al corte del mismo con navaja, este procedimiento no requiere de mayor precisión excepto cuando se marcan los empalmes y se unen los gajos. Por lo tanto, se debe marcar el empalme por el exterior para que al momento de unir sirva de guía.

Imagen 132
Plantilla de papel dispuestas sobre membrana plástica para su corte.¹⁴¹



Para este caso se usó pistola de calor para unir cada gajo. Como la maqueta no era muy grande se terminó con rapidez y se procedió a la preparación del bastidor. Se fabricó con triplay de 16 mm y tiras de madera de 2.5 cm por 2.5 cm. Para fijar la maqueta sobre el bastidor, se cortaron ángulos de aluminio de 20 cm de longitud con cuatro barrenos cada uno. Fue necesario marcar la vista en planta sobre la madera para determinar cuál sería el perímetro que fijaría la lona con

¹⁴¹ Idem.

la madera y en ángulo. Sencillamente con tornillos para madera de 1,27 cm se atornillaron los tres elementos.

Imagen 133
Gajos unidos con pistola de color y preparados para fijar sobre base de madera.¹⁴²



En uno de los extremos de la lona, se realizó una perforación y se conectó un ducto que conduciría el aire hasta el interior. Con esto se demuestra la posibilidad de usar diversos sistemas constructivos y que las formas también se deba al sistema que se utilice. Al plantear una estructura, antes se deban determinar los requerimientos del usuario y el tiempo como factor preponderante de utilidad y valor monetario.

Imagen 134
Maqueta de superficie total con inyección de aire como soporte de membrana plástica.¹⁴³



¹⁴² Idem.

¹⁴³ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

X.- ESTRUCTURAS GEODÉSICAS

PRINCIPIOS

Las cúpulas son una de las formas más antiguas en arquitectura, gracias a su doble curvatura permitieron cubrir grandes claros en esa época. La cúpula es una de las más eficaces para determinar el máximo espacio con el mínimo de superficie, y los elementos que las conforman describen superficies "limpias" de tal modo que el espacio interior queda libre.

En la Edad Media se construían principalmente con madera, sin embargo, ya se habían construido anteriormente otras con ladrillos y mamposterías de piedras naturales como cubiertas de resguardo a las inclemencias del tiempo. Las primeras cúpulas tenían la forma semiesférica, con empujes mínimos; más tarde, en la segunda mitad del siglo XIX con su estudio y análisis se disminuyó la flecha en relación con el diámetro, observando empujes importantes en los anillos de apoyo. A partir de esto, se reconoció la ventaja de sistemas espaciales como un importante desarrollo de las cúpulas de acero.



Imagen 135

Fuller en su casa
mostrando sus modelos.¹⁴⁴

¹⁴⁴ Rosen, Sidney. "El mago de la Cúpula". R. Buckminster Fuller Diseñador futurista. Ed. Diana. México, 1970. Página 185.

Las cúpulas geodésicas son una alternativa al desarrollo de estructuras ligeras con solución estética y funcional. El ingenio de R. Buckminster Fuller con el uso de "geometría de la naturaleza" creó cúpulas como el Pabellón Norteamericano en la Feria Internacional de Comercio en el año de 1956 en la Ciudad de Kabul, capital de Afganista. El Clímaton del Shaw Garden de San Luis, Misuri y el Pabellón de EE.UU. de la expo 67' de Montreal le han convertido en figura legendaria en este campo.

La geodésica que aquí se presenta, toma como base al icosaedro que es uno de los cinco poliedros regulares y convexos, conocidos también como sólidos platónicos. (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). Éstos son el inicio del estudio de los poliedros, y de ellos se derivan los sólidos de Arquímedes y los de Kepler-Poinsot. Los sólidos Arquimedianos son poliedros convexos de caras regulares y vértices uniformes pero no de caras uniformes y son once. Tetraedro truncado, cuboctaedro, cubo truncado, octaedro truncado, rombicuboctaedro, cuboctaedro truncado, icosidodecaedro, dodecaedro truncado, icosaedro truncado, rombicododecaedro, icosidodecaedro truncado. Los sólidos de Kepler-Poinsot son poliedros regulares pero cóncavos, que se logran a partir de adiciones sobre las caras de poliedros convexos y solo existen cuatro: Pequeño dodecaedro estrellado, gran dodecaedro estrellado, gran icosaedro y gran dodecaedro.

Por definición de geodésica y de acuerdo a los alcances de éste documento, se deberá interpretar como la construcción de una red triangular en la que los elementos se disponen según la proyección del icosaedro regular dentro de una esfera. Rigurosamente la cúpula geodésica es una sección del icosaedro formada por una pirámide de base pentagonal que subdivide las rectas hasta el

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

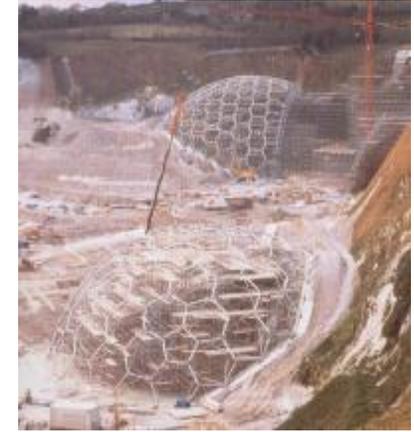
límite que contiene al poliedro, creando triángulos equiláteros, isósceles y escálenos con sólo cinco apoyos en el perímetro de la estructura. En el ejercicio práctico, la mayoría de las cúpulas geodésicas se construyen con elementos rectilíneos que forman las cuerdas de los arcos.

Para cúpulas de gran tamaño, la disposición de barras puede generar pandeo, debido a la longitud y compresión de las mismas, exigiendo el aumento de sección. Para evitar esto, sería necesario realizar una subdivisión para obtener barras cortas, sin embargo, a mayor número de frecuencias, mayor es la cantidad de barras y dimensiones haciéndola compleja. Fuller desarrolló una subdivisión de las barras a la misma altura de los triángulos; es decir, siguiendo la proyección de la esfera y con esto, un reparto uniforme de tensiones.

Seis triángulos unidos por un mismo punto determinan un hexágono que requiere ser solucionado desde un punto de vista constructivo. En tal caso, se deben reforzar los nodos y utilizar cables o barras complementarias. En este mismo orden de ideas, el recubrimiento puede formar parte del sistema para aumentar su resistencia, opuesto al caso de la armadura resistente y la cubierta como dos elementos que trabajan indistintamente.

Las cargas asimétricas de viento se reflejan en esfuerzos de tracción y compresión. Se ha encontrado solución a este problema, a través de dobles mantos con diagonales que determinan puntos al interior y exterior evitando elevadas tensiones. El interés por estas estructuras, se debe a la posibilidad de soluciones a espacios de grandes claros como en espacios mínimos con soluciones prácticas de ensamble, de manera sistemática y con orden en sus componentes, con la subsecuente ventaja de rapidez y economía.

APLICACIONES



Proyecto Edén, Boldeva, Cornualles, 2000. Architectural Supermodels. Physical design simulation. Tom Porter & John Neale. Págs. 60, 65.



Proyecto Edén, Boldeva, Cornualles, 2000. Ingeniero: anthony Hunt Associates. Arq. Nicholas Grimshaw & Partners. Maestros de la estructura. La ingeniería en las edificaciones innovadoras. Sutherland Lyall. Pág. 55, 58.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Proyecto Edén, Boldeva, Cornualles, 2000. Architectural Supermodels. Physical design simulation. Tom Porter & John Neale. Págs. 64.



Pabellón de U.S.A. en Montreal, Buckminster Fuller, 1967. Bioarquitectura en busca de un espacio. Javier Senosiain Aguilar. Pág. 63



Proyecto Edén, Boldeva, Cornualles, 2000. Ingeniero: anthony Hunt Associates. Arq. Nicholas Grimshaw & Partners. Maestros de la estructura. La ingeniería en las edificaciones innovadoras. Sutherland Lyall. Pág. 61.



Fabrica de cultura de Sumida, Tokyo (1990-1994). Yamanash. Itsuko Hasegawa. Birkhäuser/ifa. Pág.30

Centro Cultural y de Deportes, Al Ain, Cúpula de red de anillo de Abu Dhabi con Mero spaceframe. Arch.: Brian Moorhead Int. London/UK. Folleto El camino para el diseño distintivo. Pág. 6



Vivienda Prefabricada de PVC. www.ecodomos.cl/presentación.htm

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Vivienda Prefabricada de PVC.
www.ecodomos.cl/presentación.htm



Vivienda Prefabricada de Madera.
www.ecodomos.cl/presentación.htm



Vivienda Prefabricada de Madera.

www.ecodomos.cl/presentación.htm

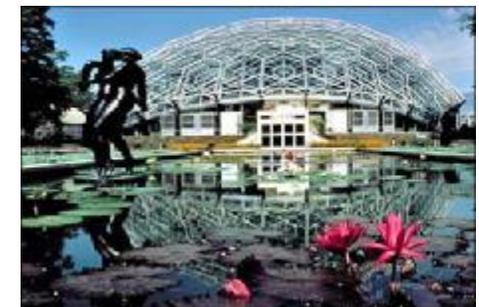


Geodésica, Ciudad de las Ciencias de la Industria, Paris.

www.usmp.edu.pe/publicaciones



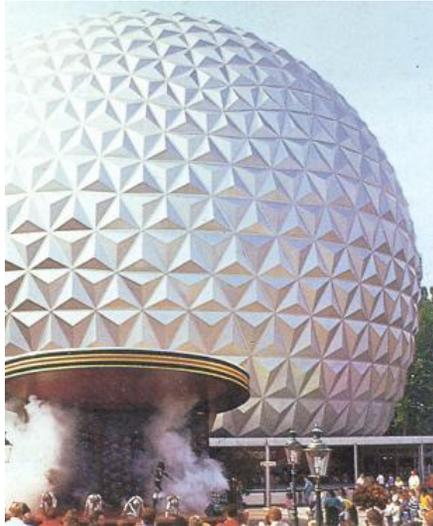
Cúpula Geodésica. Arabism Islam + Architecture. Sabiha Foster pág. 34



Climatron (Mississippi - 1960) Fuller.
http://www.arq.ufsc.br/arg5661/trabalhos_2004-1/geodesicas/historico/htm.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Wold Disney
Florida, USA.



Viviendas. cúpulas geodésicas.

<http://archilibre.org/esp/revolution/domes/contruire.html>.



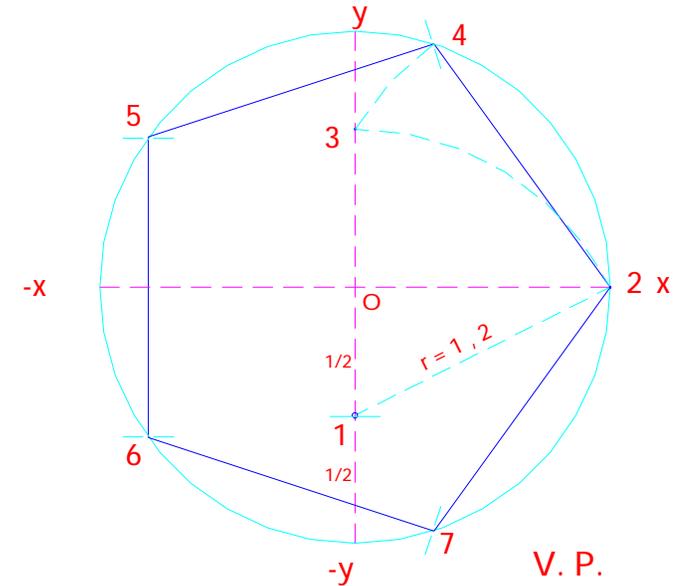
Ciudad de Trago (Colorado - 1960)_Fuller.
http://www.arq.ufsc.br/arg5661/trabalhos_2004-1/geodesicas/historico/htm.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

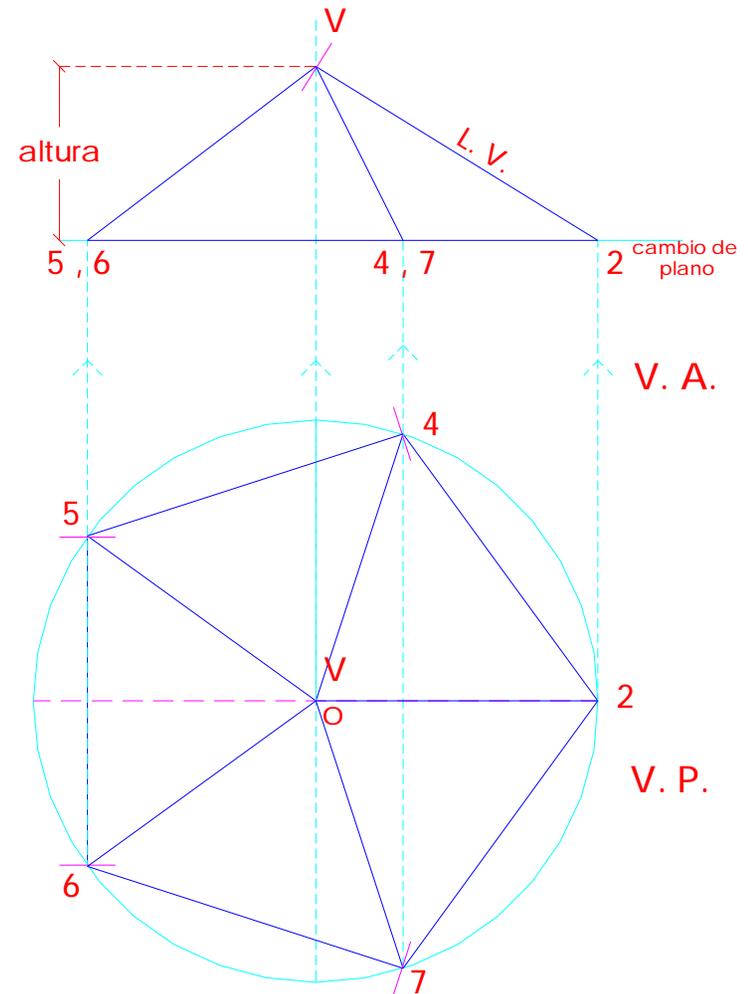
PRIMER TRAZO

1. Se traza un pentágono en vista de planta (V. P.) de la siguiente manera:
 - 1.1 Se traza una circunferencia con medida de diámetro según diseño y se proyectan los ejes “x”, “y” y marcando el origen “O”.
 - 1.2 Sobre los negativos en “y”, la recta determinada entre el origen “O” y la intersección del eje “y” con la circunferencia se divide entre dos y se marca el punto “1”.
 - 1.3 Se une el punto “1” con el punto “2”.
 - 1.4 Con medida de radio “ $r=1-2$ ” y con centro en el punto “1”, se gira hasta cortar la proyección del eje “y” marcando el punto “3”.
 - 1.5 Ahora con medida de radio “ $r=2-3$ ” y con centro en “2” se gira hasta cortar la circunferencia. Éste es el punto “4” y es la medida de cuerda del pentágono del punto “2” al “4” que se repite en el perímetro de la circunferencia para formar el pentágono con los puntos “5, 6, 7”.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

2. Los puntos que forman el pentágono, se unen al origen “O” donde también se encuentra el vértice “V” esto determina una pirámide de base pentagonal en vista de planta, (V.P.).
3. En la parte superior de la pirámide antes trazada, se marca un cambio de plano horizontal (a cualquier medida) y se proyectan los puntos “2, 4, 5, 6, 7” (hasta el cambio de plano) la unión de éstos puntos, forman el pentágono en vista de alzado (V. A.)
4. El vértice de V. P. se proyecta a V. A. y se prolonga sin medida determinada.
5. Para determinar la altura de la pirámide en vista de alzado, se retoma la medida de cualquier lado del pentágono, por ejemplo, se mide la recta “2-4” de V. P. y con apoyo en el punto “2” de V. A. se corta la proyección del vértice.
6. Se une la intersección antes encontrada con el punto “2” en V. A. determinando una recta en longitud verdadera.
7. En V. A. se une el vértice “V” con los puntos “4,7” y “6,5”.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

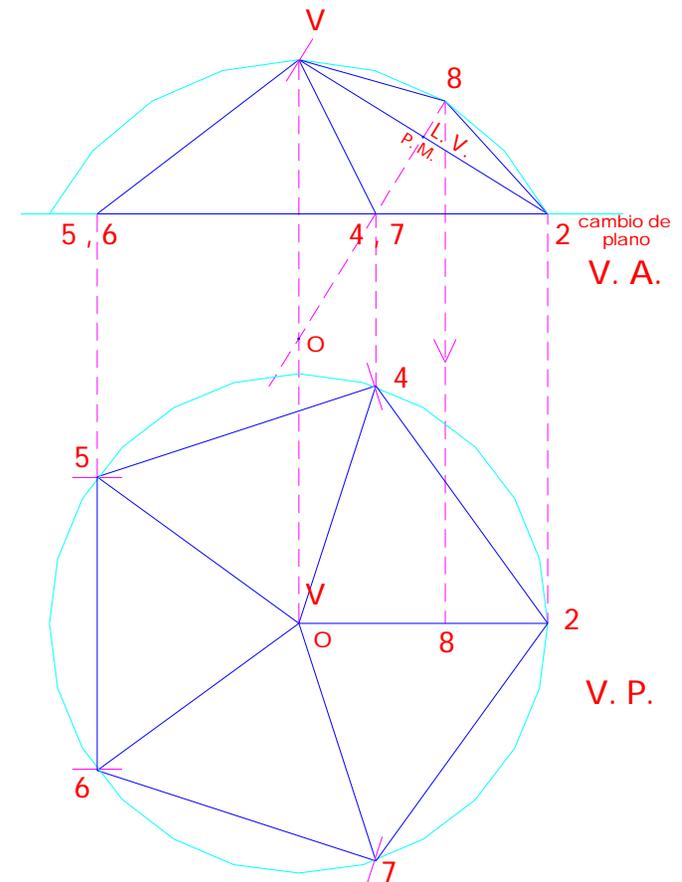
11. Cada recta, de las diez que conforman la pirámide de base pentagonal, se van a dividir en dos partes, por lo tanto es importante respetar la siguiente regla:

“Para que se pueda dividir una recta en dos partes y pueda tocar la cúpula, es necesario que la recta se encuentre en longitud verdadera”. (Como la cúpula esta en longitud verdadera, la recta también debe estar en longitud verdadera).

12. En V. A. la recta “V-2” se encuentra en longitud verdadera, por lo tanto puede tocar la cúpula, de tal forma que se proyecta una línea que inicia en el origen “O” que pase por el punto medio P. M. hasta que se intersecte con la cúpula. Esta intersección es el punto “8”.

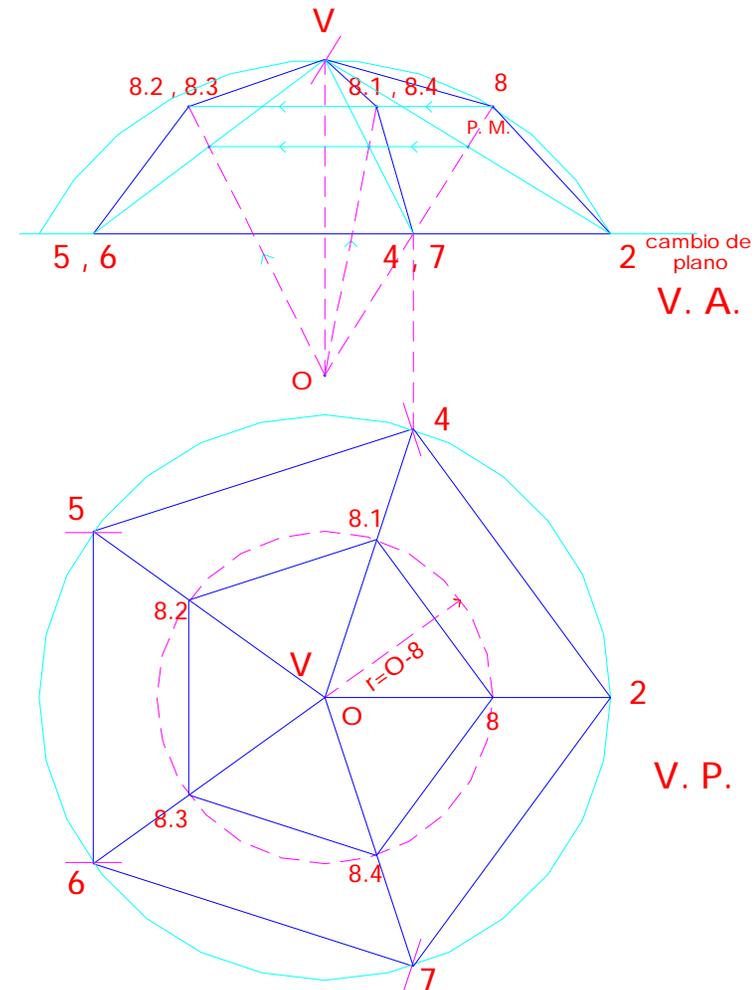
13. Se unen los puntos “V, 8, 2” en V. A.

14. El punto “8” de V. A. se proyecta a la recta “V-2” en vista de planta.



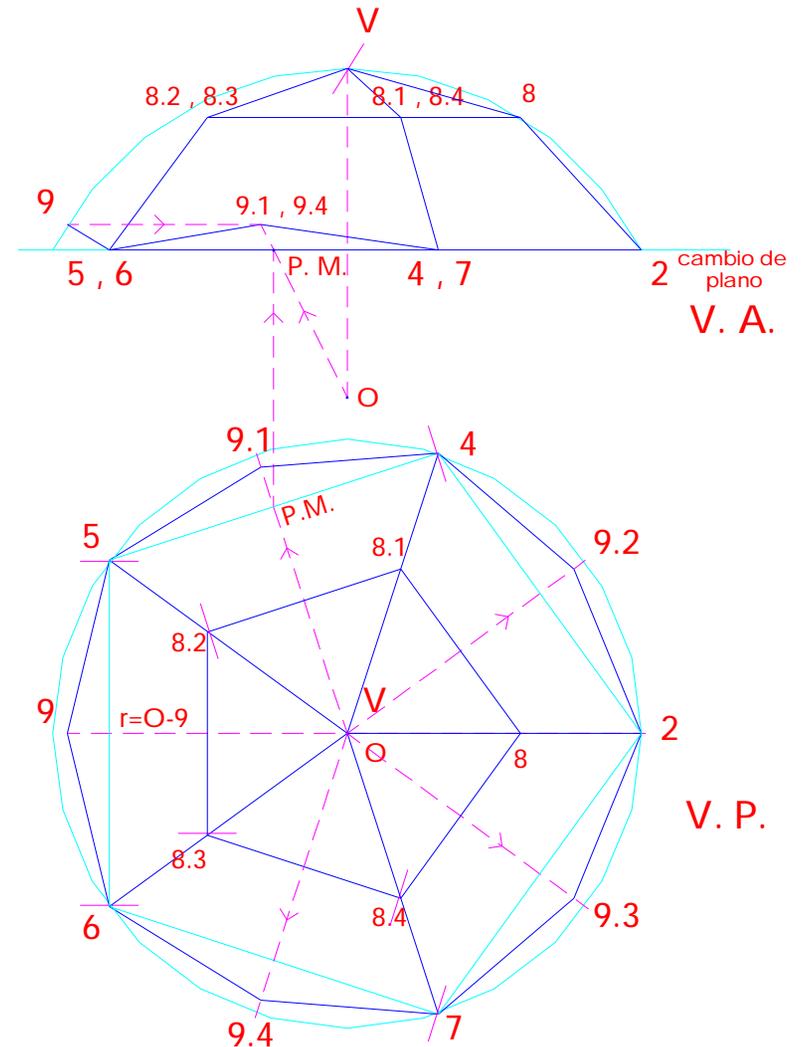
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

15. En V. P. con medida de radio “ $r=O-8$ ”, se intersectan las rectas “O-4”, “O-5”, “O-6” y “O-7” y se marcan los puntos “8.1, 8.2, 8.3, 8.4” respectivamente.
16. Se unen los puntos formando otro pentágono de menor dimensión en V. P.
17. En vista de alzado para encontrar la mitad de la recta “V-4,7” basta con trazar una línea horizontal del punto medio P. M. hasta que intersecte la recta antes mencionada.
18. Ahora se proyecta una línea que inicie en el origen de la V. A. pasando por la mitad de la recta “V-4,7” hasta la altura del punto “8”, ahí se encuentran los puntos “8.1” y “8.4.” Cabe mencionar que la recta “V-4,7” no se encuentra en longitud verdadera para que pueda tocar la cúpula, sin embargo ésta recta es igual que la recta “V-2”, sólo que en diferente posición, por eso se toma la altura del punto “8”.
19. Se unen los puntos “V, 8.1, 4,7” en V. A.
20. Con el mismo procedimiento a partir del paso 17 se obtiene la mitad de la recta “V-5,6” y se unen los puntos “5, 6, 8.2, 8.3, V”.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

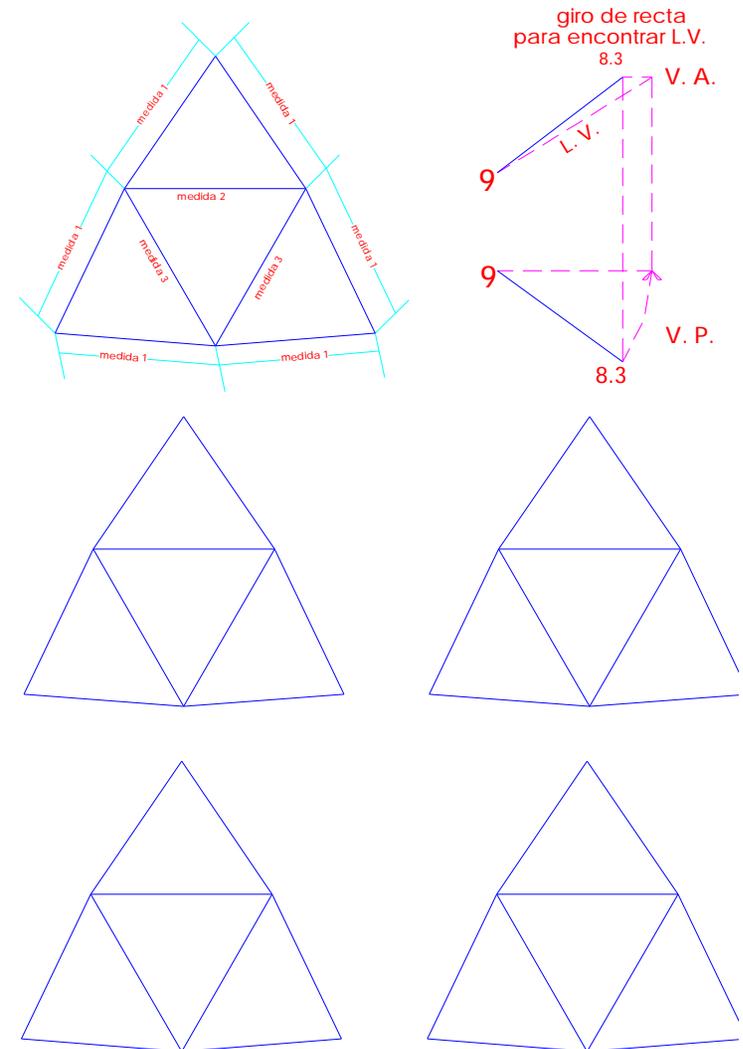
26. Para encontrar el punto medio de la recta “5,4” en V. P. basta prolongar la recta “7-O” hasta la cúpula (circunferencia) de manera similar ocurre para encontrar el punto medio de la recta “4-2” al prolongar la recta “6-O” e igual para las rectas “2-7” y “6-7”.
27. Con medida de radio “ $r=O-9$ ” se cortan todas las proyecciones y se denominan los puntos “9.1, 9.2, 9.3 y 9.4.”
28. Se une 5 con “9.1” y “4” con “9.2” y “2” sucesivamente hasta cerrar con “6”.
29. El punto medio P. M. de la recta “5-4” de V. P. se proyecta a V. A.
30. Ahora se proyecta una línea que inicia en “O” que pasa por el punto medio P. M. hasta la altura del punto “9” y éste son los puntos “9.1” y “9.4”.
31. Se une el punto “5,6” con “9.1, 9.4” y “4,7”.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

DESARROLLO DE PLANTILLA DEL 1ER. TRAZO

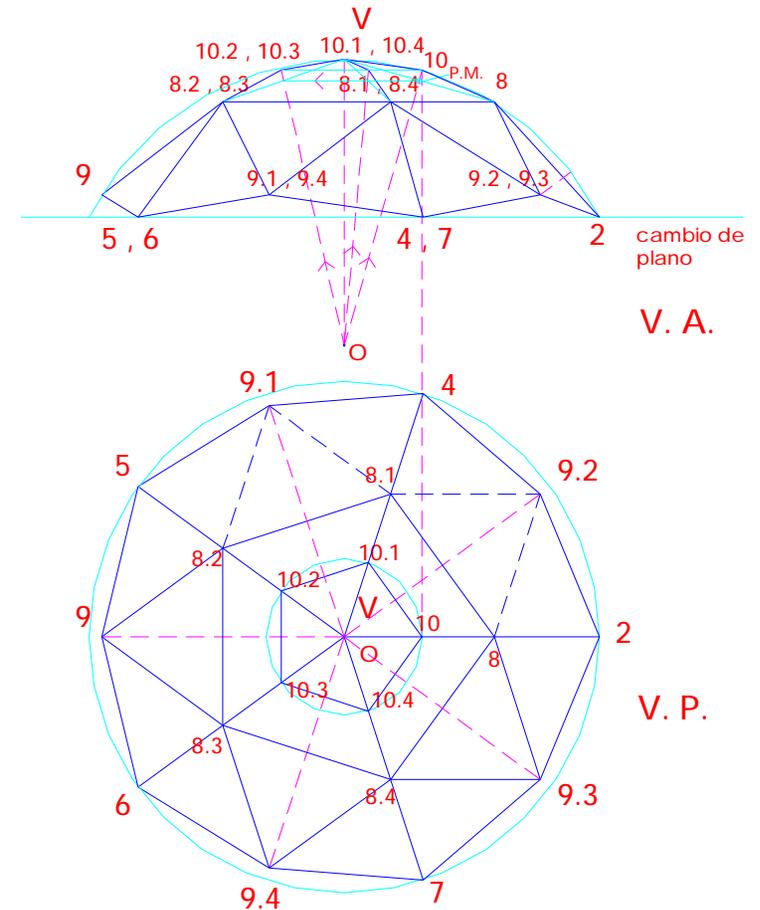
36. La plantilla se obtiene a partir de cuatro triángulos, se puede decir que la medida “1” Se obtiene de “V” (vértice) al punto “8” en vista de alzado.
37. La medida “2” es la recta contenida entre los puntos “8.2” y “8.3” en vista de planta, (por encontrarse en vista de punta). También , porque el pentágono formado por los puntos “8” hasta “8.4”, en V. A. ésta paralelo al cambio de plano, por lo tanto, en V. P. las rectas están en longitud verdadera.
38. Ninguna de las rectas contenidas entre los puntos “nueves” y “ochos” se encuentran en longitud verdadera así es que se puede hacer un giro de la recta. En este caso, se hace con la recta “9-8.3” de la siguiente forma:
- 38.1. Se ubica la recta “9-8.3” en sus dos vistas V. P. y V. A.
- 38.2 En V. P. con apoyo en el punto “9” y con medida de radio “ $r=9-8.3$ ” se gira el punto “8.3” hasta tener la recta en posición horizontal.
- 38.3. El punto “8.3” (con recta en posición horizontal) se proyecta a vista de alzado hasta la altura del mismo punto “8.3”.
- 38.4. Se une el “nuevo” punto “8.3” con el “9” y esta es la recta en longitud verdadera.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

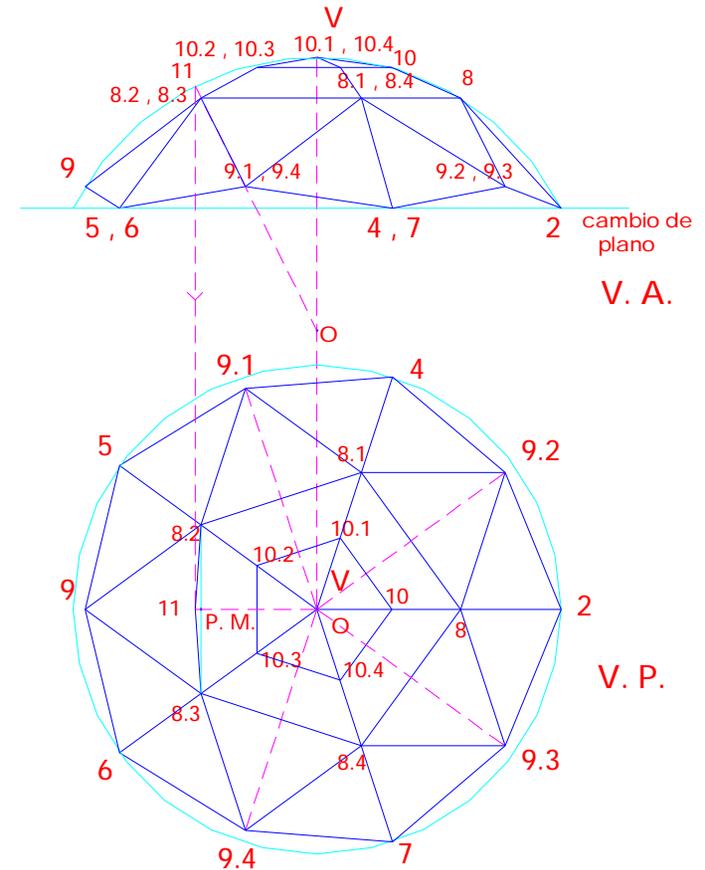
SEGUNDO TRAZO

39. En V. A. la recta “V-8” se encuentra en longitud verdadera, por lo tanto se determina el punto medio y se proyecta una línea que inicia en el origen “O” que pase por el punto medio (P. M.) hasta que intersecte con la cúpula. Ésta intersección es el punto “10”.
40. Se unen los puntos “V, 10, 8” en V. A.
41. El punto “10” de V. A. se proyecta a la recta “V-8” en vista de planta.
42. En V. P. con medida de radio “ $r=O-10$ ” se intersectan las rectas “V-8.1”, “V-8.2.”, “V-8.3” y “V-8.4” se marcan y unen los puntos “10.1, 10.2, 10.3, 10.4” respectivamente.
43. En vista de alzado para encontrar la mitad de las rectas “V-8.1, 8.4” y “V-8.2, 8.3” basta con trazar una línea horizontal del punto medio (P. M.) hasta que intersecte las rectas antes mencionadas.
44. Se proyectan dos líneas que inician en el punto O que pasen por las mitades de las rectas “V-8.1, 8.4” y “V-8.2, 8.3” hasta la altura del punto “10” y se determinan los puntos “10.1, 10.4” y “10.2, 10.3”.
45. Se unen los puntos “V con 10.1, 10.4” y con “8.1, 8.4” también “V, 10.2, 10.3” y “8.2, 8.3”.



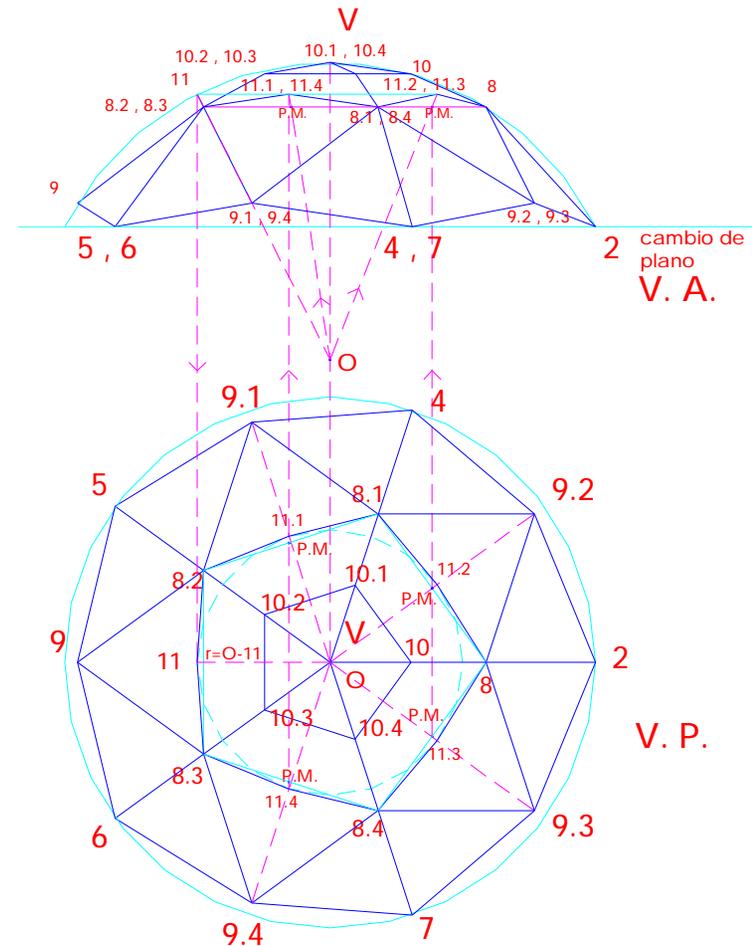
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

46. En V. A. se dibuja una línea horizontal que une los puntos “10, 10.1, 10.4” hasta “10.2, 10.3” esta línea representa el pentágono de vista en planta.
47. La recta “8.2-8.3” en V. P. se encuentra en longitud verdadera, así es que se marca el punto medio (P. M.)
48. El punto medio en V. A. se encuentra en la misma recta “8.2-8.3”, así es que se proyecta una línea que inicie en el punto “O” que pase por el punto medio hasta que intersecte la cúpula marcando el punto “11”.
49. El punto “11” se proyecta a V. P. hasta que corte la línea de proyección que inicia en “O” y que pasa por el punto medio (P. M.).
50. Se unen los puntos “8.2, 11, 8.3”.



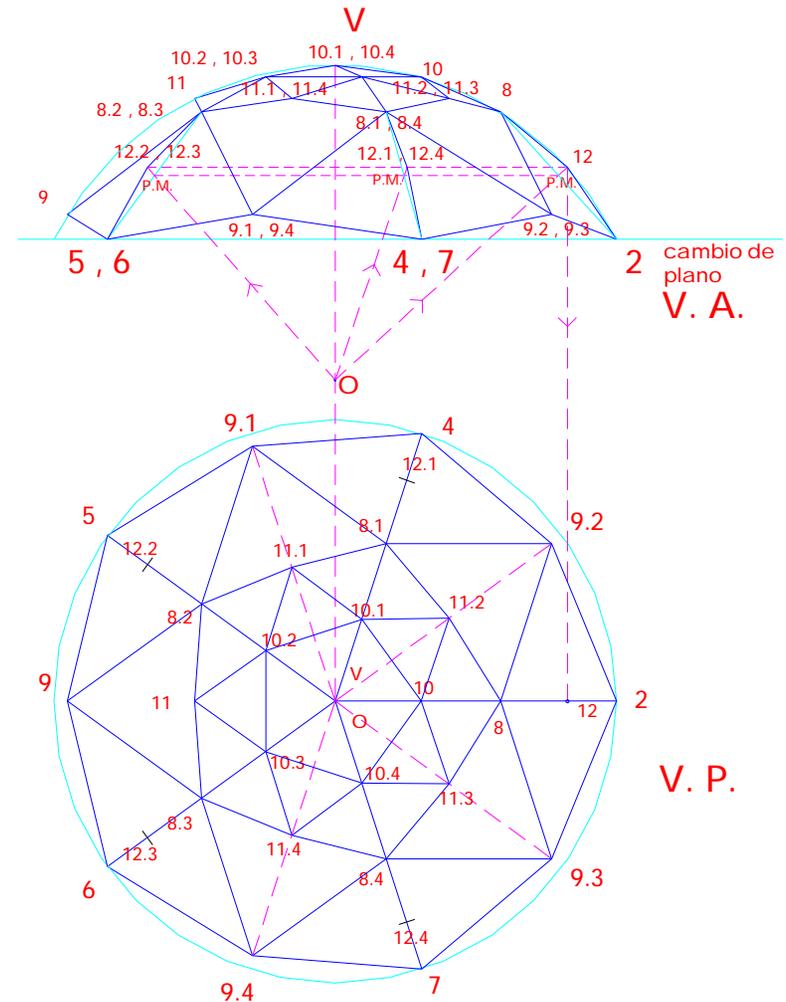
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

51. Son conocidos los puntos medios de las recta “8.2-8.1”, “8.1-8”, “8-8.4” y “8.3-8.4”.
52. Con medida de radio “ $r=O-11$ ” se cortan todas las proyecciones y se denominan los puntos “11.1, 11.2, 11.3 y 11.4”.
53. Se unen “8.2” con “11.1” y “11.1” con “8.1” sucesivamente hasta cerrar con “8.3”.
54. El punto medio (P. M.) de la recta “8.2-8.1” se proyecta a V. A.
55. Se proyecta una línea que inicia en “O” que pase por el punto medio hasta la altura del punto “11” y éstos son los puntos “11.1” y “11.4”.
56. Se unen los puntos “8.2, 8.3” con “11.1, 11.4” y “8.1, 8.4”.
57. El punto medio de la recta “8.1 – 8” en V. P. se proyecta a la misma recta en V. A.
58. Se proyecta una línea que inicie en “O” que pase por P. M. hasta la altura del punto “11” en V. A. y se determinan los puntos “11.2” y “11.3”.



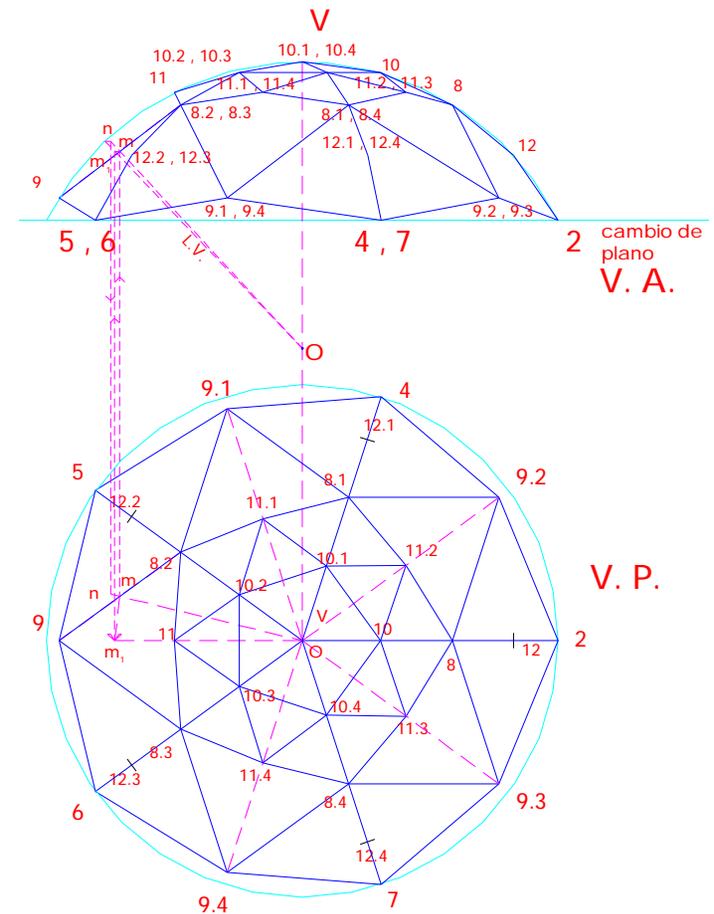
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

59. En V. P. se une el punto “11” con “10.2”, “10.2” con “11.1”, “11.1” con “10.1”, “10.1” con “11.2”, “11.2” con “10” y así sucesivamente hasta cerrar con “11”.
60. De la misma forma que se hizo en el paso 59 se unen los puntos en V. A.
61. Se divide en dos partes la recta “8-2” de V. A.
62. Con línea de proyección se inicia en “O” y pasando por la mitad de la recta “8-2” hasta la cúpula se obtiene el punto “12”.
63. El punto “12” de V. A. se proyecta a la recta “8-2” de V. P. y se denomina.
64. Con medida de radio “ $r=O-12$ ” se intersectan las rectas “8.1-4”, “8.2-5”, “8.3-6” y “8.4-7” y se marcan los puntos “12.1”, “12.2”, “12.3” y “12.4” respectivamente.
65. En V. A. se proyecta una línea horizontal que inicie a la mitad (P.M.) de la recta “8-2” hasta la recta “8.2, 8.3-5,6” (esta línea marca los puntos medios de las rectas “8.1, 8.4 – 4,7” y “8.2, 8.3-5,6”)
66. Se proyectan dos líneas que inicien en “O” y que pasen por los puntos medios de las rectas antes señaladas hasta la altura del punto “12” identificando los puntos “12.1, 12.4” y “12.2, 12.3” finalmente uniendo “8.1” con “12.1” y “4”, por otro lado “8.2” con “12.2” y “5”.

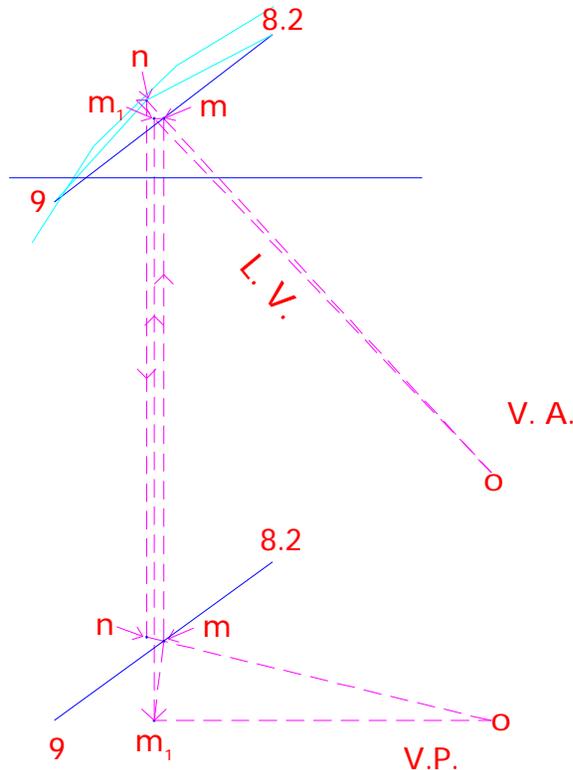


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

67. La recta “8.2–9” en V. P. se divide en dos partes, identificando el punto medio como punto “m”.
68. El punto “m” se identifica en V. A. sobre la misma recta “8.2-9”.
69. Se une el punto “m” con “O” en alzado y el punto “m” con “O” en planta
70. En V. P. se gira la recta “O–m” con centro en “O” hasta ponerla en posición horizontal y se determina como “m1”.
71. El punto “m1” en V. P. se proyecta a V. A. hasta la altura del punto “m”.
72. Si se une “m1” con “O” en V. A. Ésta recta se encuentra en longitud verdadera
73. Se proyecta la recta que esta en longitud verdadera (m1-O) hasta que intersecte la cúpula después se regresa horizontalmente hasta la prolongación de “O-m” y éste es el punto “n”.
74. Se une “n” con “8.2” y “n” con “9”.
75. El punto “n” de V. A. se proyecta a V. P. hasta que intersecte con la prolongación de la recta “O-m”, también se une “n” con “8.2” y “n” con “9” en V. P.

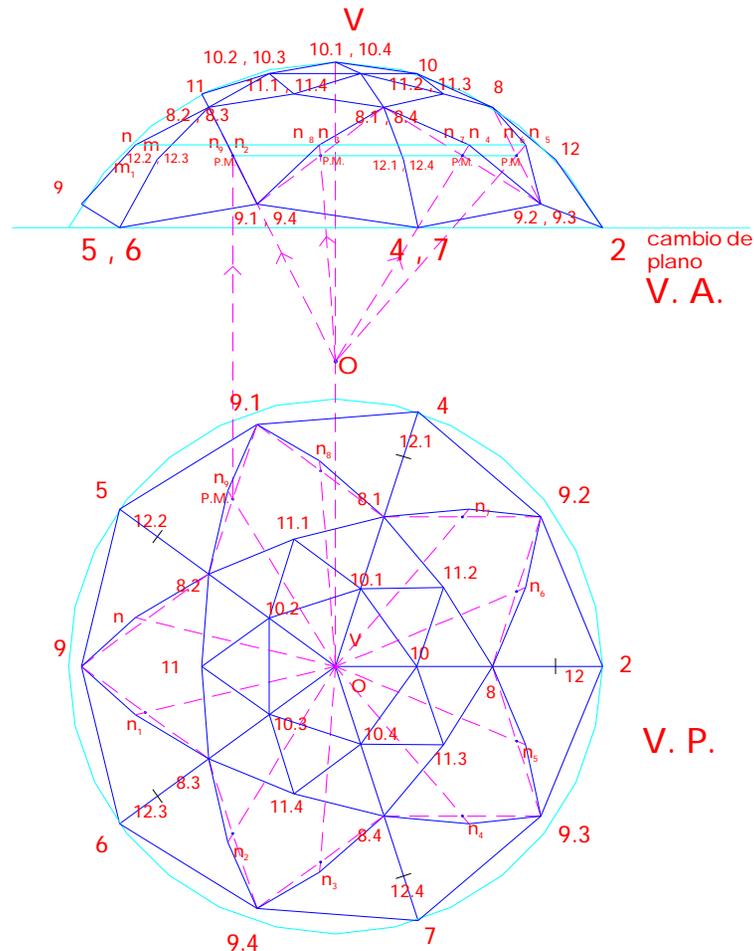


ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



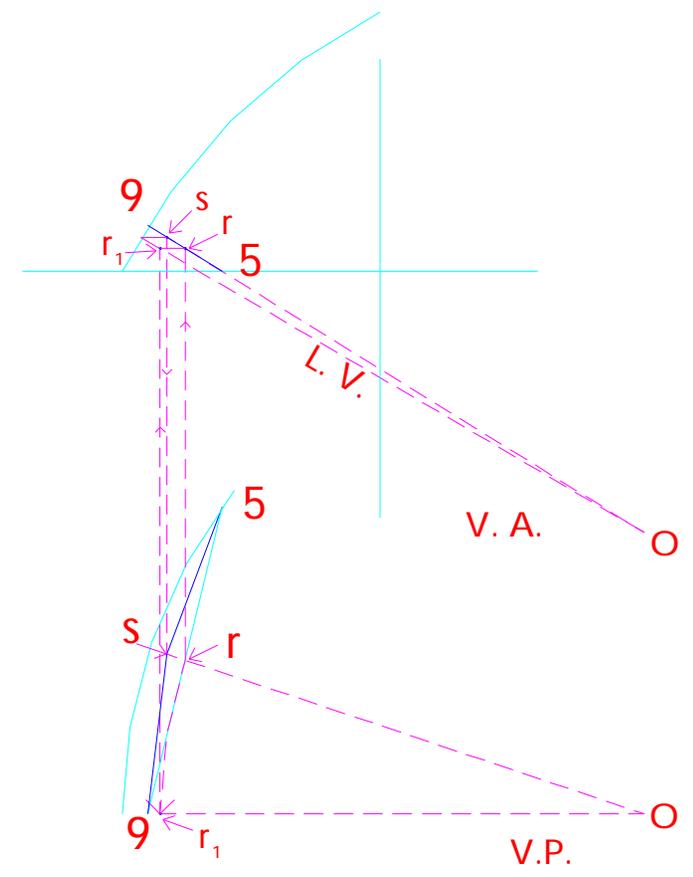
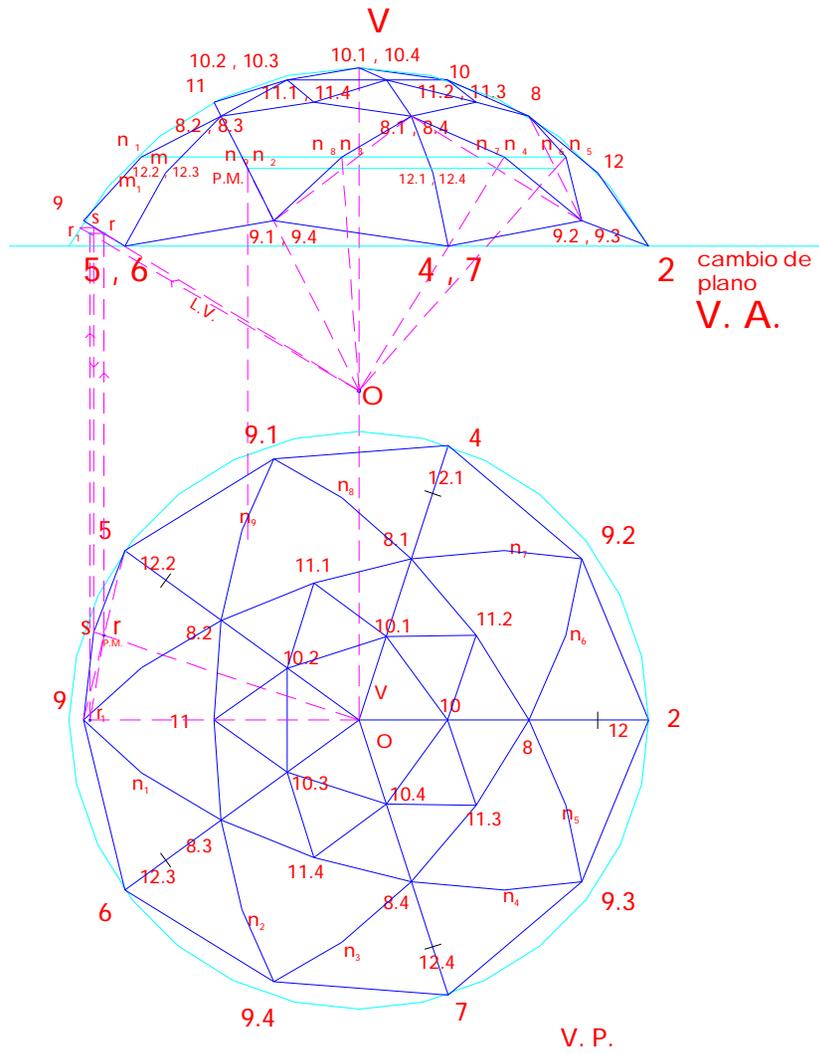
76. En V. P. es necesario identificar los puntos medios de las rectas “9-8.3”, “8.3-9.4”, “9.4-8.4”, “8.4-9.3”, “9.3-8”, “8-9.2”, “9.2-8.1”, “8.1-9.1” y “9.1-8.2” y proyectar líneas que inicien en “O” que pasen por los puntos medios sin medida determinada.
77. Con medida de radio “ $r=O-n$ ” se cortan todas las proyecciones de líneas antes trazadas y se marca desde “n1” hasta “n9”
78. Se unen los puntos “9, n1, 8.3; 8.3, n2, 9.4; 9.4, n3, 8.4”; “8.4, n4, 9.3; 9.3, n5, 8; 8, n6, 9.2”; “9.2, n7, 8.1; 8.1, n8, 9.1” y “9.1, n9, 8.2”
79. El punto medio de la recta “8.2-9.1” en V. P. se proyecta a V. A. a la misma recta “8.2-9.1”
80. En V. A. se proyecta una línea que inicie en “O” pasando por P. M. de la recta “8.2-9.1” hasta la altura del punto “n” (es decir, trazando una línea horizontal) estos son los puntos “n9, n2” y se unen con “8.2” y con “9.1”.
81. De la misma forma se tienen que marcar los puntos medios de las rectas “9.1- 8.1”, de “8.1-9.2” y de “9.2-8” para después proyectar líneas que inicien en “O” que pasen por los puntos medios a la altura del punto “n” para después determinar “n8, n3; n4, n7” y “n5, n6”.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



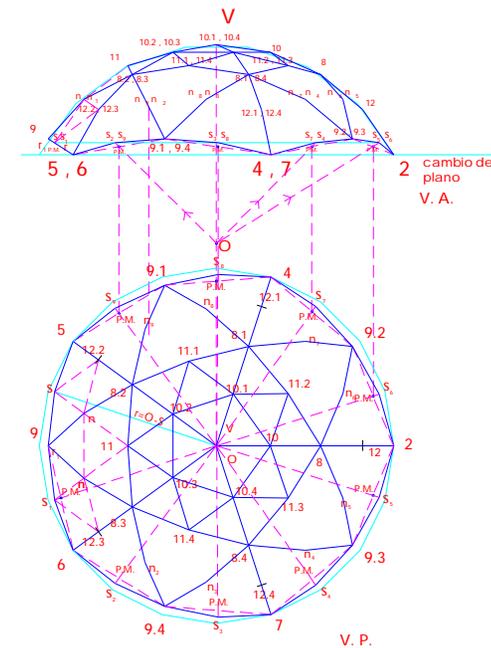
82. Se marca el punto medio “r” de la recta “5-9” en V. P.
83. Se proyecta el punto medio “r” a la vista en alzado sobre la misma recta
84. Se une el punto “r” con “O” en alzado y “r” con “O” en planta
85. En V. P. la recta “r-O” se gira con apoyo en “O” hasta colocarla en posición horizontal y se marca r’.
86. “r1” se proyecta a V. A. hasta la altura (horizontal) del punto “r” y se denomina “r1”
87. Se une “r1” con “O” y ésta es la recta en longitud verdadera
88. La recta “r1-O” se prolonga hasta que toque la cúpula y después se regresa (horizontalmente) hasta la prolongación de “O-r”, este es el punto “S” que se encuentra contenido sobre la misma recta “9-5,6”.
89. El punto “S” en V. A. se proyecta a V. P. hasta la prolongación de la recta “O-r”.
90. Se une “S” con “5” y “S” con “9”.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"



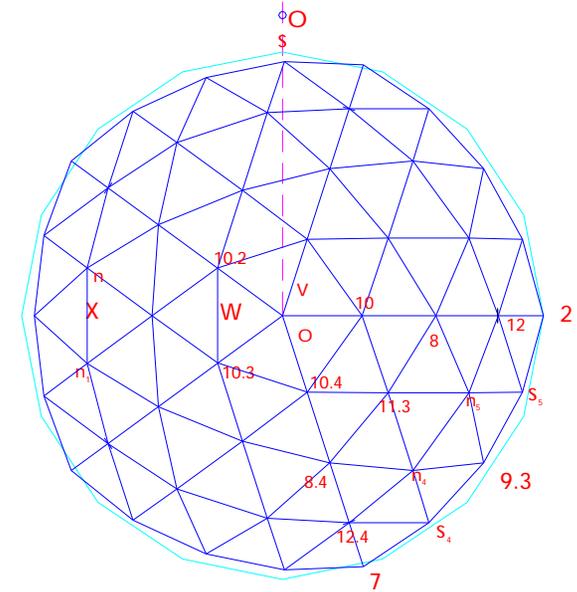
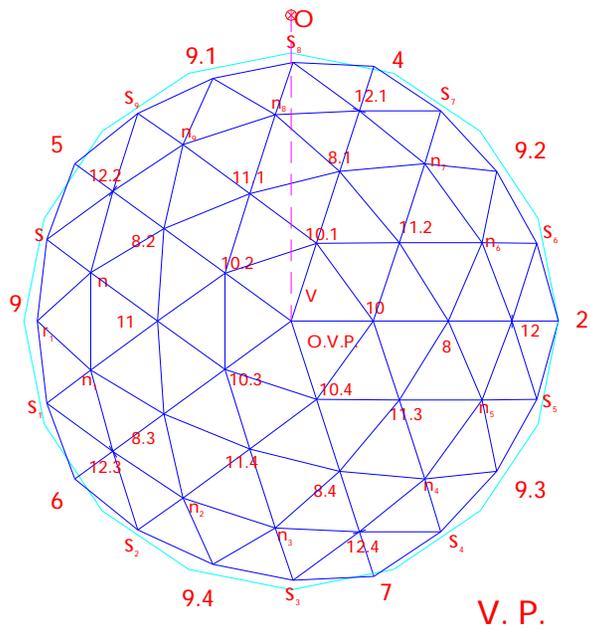
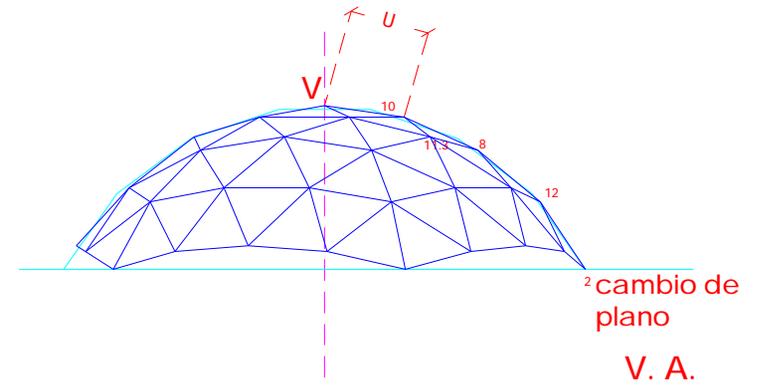
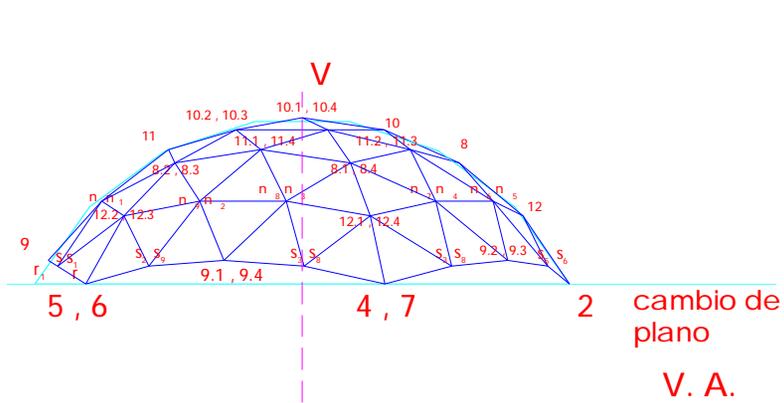
ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

91. En V. P. se marcan todos los puntos medios de las rectas “9-6”; “6-9.4”; “9.4 -7”; “7-9.3”; “9.3-2”; “2-9.2”; “9.2-4”; “4-9.1”; “9.1-5”.
92. En la misma vista, se proyectan líneas que inicien en “O” y que pasen por todos los puntos medios de las rectas antes mencionadas sin medida determinada.
93. Con medida de radio “ $r=O-S$ ”, se cortan todas las proyecciones y se marca de “S1” hasta “S9”.
94. Se dibujan líneas con la sucesión “9, S1, 6, S2, 9.4, S3, 7, S4, 9.3, S5, 2, S6, 9.2, S7, 4, S8, 9.1, S9 y 5”.
95. En V. P. se triangula como sigue:
 - a) “S” con “n”, “S” con “12.2” y “12.2” con “n”.
 - b) “n” con “11”, “11” con “n1” y “n1” con “n”.
 - c) “S1” con “n1”, “n1” con “12.3” y “12.3” con “S1”.
96. En V. A. se determinan los puntos medios de las rectas “5, 6-9.1, 9.4”; “9.1, 9.4-4,7”; “4,7 - 9.2, 9.3”; “9.2, 9.3-2”.
97. Se proyectan líneas que inicien en “O” que pasen por los puntos medios hasta la altura del punto “S” (horizontal)
98. Se marcan y unen los puntos como sigue: “5” con “S9”; “S9” con “9.1”; “9.1” “S8”; “S8” “4”; “4” con “S7”; “S7” con “9.2”; “9.2” con “S6”; “S6” con “2”.
99. En V. A. se unen puntos como se indica en el paso 95.



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

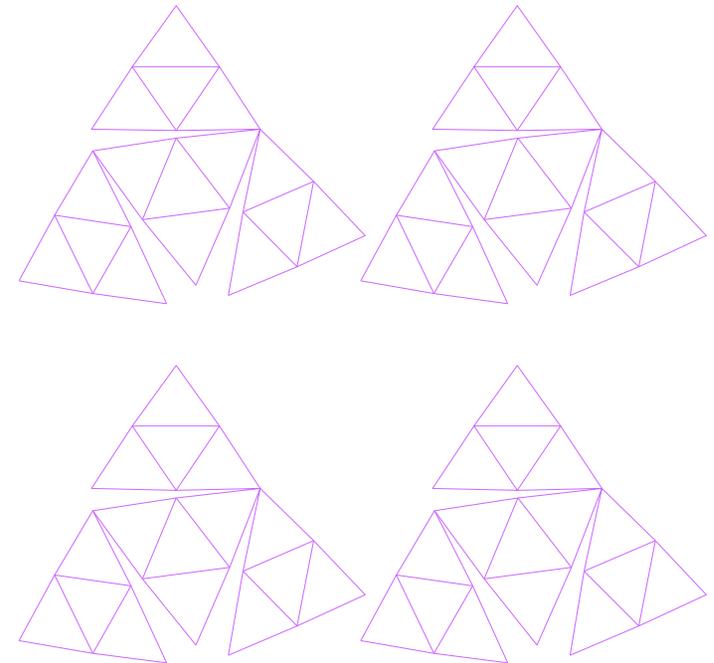
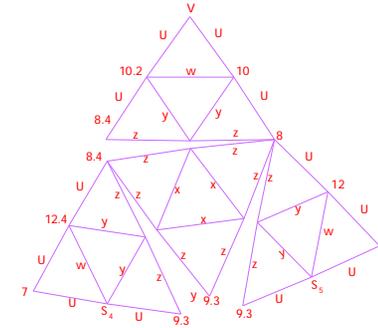
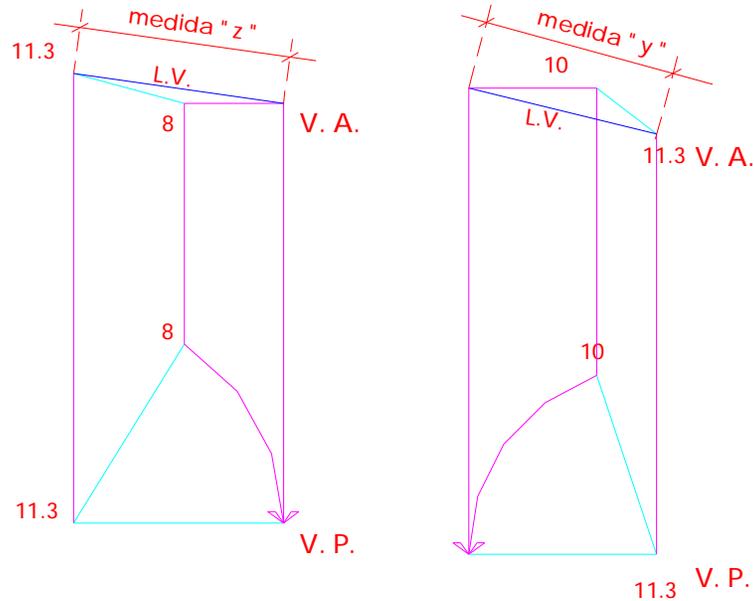
100. Finalmente se triangula como se hizo en el paso 95 cuidando que la unión de puntos que se hace en V. P. corresponda con V. A.



ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

DESARROLLO DE PLANTILLA DEL 2DO. TRAZO

- La medida "u" es la recta "V-10" de V. A.
- La medida "w" es la recta "10.2-10.3" de V. P.
- La medida "x" es la recta "n-n1" de V. P.
- La medida "y" es la longitud verdadera de la recta "10-11.3"
- La medida "z" es la longitud verdadera de la recta "8-11.3".



ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

MODELOS DE ESTUDIO

Una de las características de la forma de la cúpula geodésica, es la relación directa entre la frecuencia y la conformación de la curva como parte de la esfera que contiene la pirámide pentagonal del icosaedro. Es decir, a mayor número de rectas, mejor delimitación de la curvatura. Se ha mencionado que las cúpulas con frecuencias altas dan solución a espacios con grandes claros por lo tanto se podría pensar que no es necesario tener gran cantidad de barras para construir una cúpula no mayor a los tres metros de diámetro. La delimitación de formas claras y bien definidas con acomodo coherente de cada uno de sus elementos, son agradables desde un punto de vista estético. A menor cantidad de elementos, menor será el tiempo de ejecución, y de manera conveniente se podrán reforzar los elementos para prescindir de muchos de estos. La cúpula que aquí se explica (imagen 1) en el primer trazo, presenta características de tres diferentes longitudes de barras con cinco puntos de apoyo.



Imagen 136

Modelo del primer trazo con veinte triángulos isósceles.¹⁴⁵

La estructura se conforma por un total de treinta y cinco barras o veinte planos triangulares. Todos los triángulos son isósceles, los cinco primeros conforman una pirámide de base pentagonal en la parte superior.

Otros cinco se unen por uno de sus lados a los anteriores y los restantes diez forman el perímetro y los apoyos en la base. En el trazo de vista en planta, se pueden identificar claramente, cinco líneas rectas que dividen a cinco gajos tipo. Cada uno de ellos, presenta las tres medidas de longitud de barra, con tres tipos diferentes de plano y cuatro en total que conforman todo el gajo, por lo tanto, existen dos triángulos iguales. En su perímetro, las seis medidas que lo delimitan son iguales. De las tres medidas en su interior, dos son similares y solo una diferente. Los modelos no presentan mayor problema para su elaboración, pues basta con repetir cinco veces la misma plantilla y doblar los límites de los triángulos para después unir por dos de los lados de cada gajo. En realidad, es muy sencilla su hechura si se hace con placas en lugar de barras, siendo esta última, el método tradicional para su construcción. Así que se puede usar popote de plástico como uno de los materiales de fácil corte y ensamble. Con la idea de unir barras a través de nodos, se cortaron popotes de acuerdo a las dimensiones que se marcaron en el dibujo.



Imagen 137

Modelo fabricado con secciones redondas de plástico y nodos del mismo material.¹⁴⁶

¹⁴⁵ Arq. Ernesto Noriega Estrada. Con fines deidáticos.

¹⁴⁶ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

Posteriormente, se perforaron los extremos y se introdujo un pequeño trozo del mismo material que se machucó y deformó con calor. Este proceso permite unir seis barras en un solo punto, con la ventaja que permite el giro en uno de los sentidos y por lo tanto facilita la intersección con otros elementos sin el previo cálculo de ángulos.

Pareciera ser que el trazo se complica en su segunda etapa, pero, si se hace con detenimiento y siguiendo cada uno de los puntos para el desarrollo del dibujo y la obtención de plantilla no habrá problema alguno para su ejecución. En el segundo trazo, se observan cinco medidas diferentes de barra y un total de 130 en toda la superficie, con apoyos ubicados en el perímetro. Cuarenta barras de una medida conforman el borde y de manera continua desde el vértice en el punto más alto hasta los apoyos. Cinco barras delimitan la base del pentágono y diez más cierran los triángulos en los apoyos sumando quince de igual medida. Otras treinta se ubican después de las anteriores, quince forman cinco triángulos de la misma dimensión y las restantes treinta barras cierran el conjunto.



Imagen 138
Modelo construido con 130
barras en cinco medidas
diferentes.¹⁴⁷

¹⁴⁷ Idem.

Con respecto a la nomenclatura que se ha hecho en el desarrollo de plantilla se resume lo siguiente:

BARRA	NOMENCLATURA	MEDIDAS (cm)	CANTIDAD (pz)
1	"U"	120.60	40
2	"W"	140.30	15
3	"X"	141.90	15
4	"Y"	124.68	30
5	"Z"	136.64	30
TOTAL			130

NOTA: Las medidas están determinadas para una cúpula de 7.80 metros de diámetro.

También se puede decir que la forma se obtiene por la unión de ochenta triángulos cinco de los cuales forman la cúspide de la cúpula y diez más que identifican los apoyos, por ende se consideran quince triángulos isósceles de una sola medida. Unidos a los anteriores por uno de sus lados se localizan otros quince triángulos isósceles de diferente medida. Quince más con las mismas características pero de otra medida se ubican alrededor de cinco triángulos equiláteros y los restantes son escálenos.



Imagen 139 Formación de
cúpula geodésica a partir de 80
triángulos (45 isósceles, 5
equiláteros y 30 escálenos).¹⁴⁸

¹⁴⁸ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

La subdivisión de dicha estructura, presenta cinco gajos con las mismas dimensiones, y la plantilla que da lugar a estos, se forma a partir de un total de dieciséis triángulos de los cuales nueve son isósceles, seis son escálenos y sólo uno es equilátero. Es preciso aclarar que esta plantilla esta separada en cuatro partes, es decir, que cuatro triángulos unidos por uno de sus lados forman una de las partes y cuatro de estas dan el total de la plantilla. Otra característica es que la longitud de los triángulos que forman el perímetro de dicha plantilla es una sola medida y de manera similar ocurre con las cuatro partes que la integran.

La unión entre diferentes materiales es un aspecto que se debe cuidar, por lo regular, se usan barras de metal o madera y puede ser simplemente atornillando los extremos a través de un barreno y tornillos con tuerca. En el caso de usar metal, se puede doblar ligeramente el extremo para dar el ángulo necesario, pero cuando se usa madera hace necesario el uso de nodos, puesto que dicho material no permite doblez en un punto específico. Una vez armado el conjunto de los elementos, como una sola estructura compuesta por vectores, se debe pensar en la cubierta y la solución entre planos, con funcionalidad, estética y reparto de trabajo entre barras y placas.

Con tal fin, se construyó un modelo de sesenta centímetros de diámetro utilizando cartulina gruesa y barras de madera atornilladas a las placas; para iniciar se imprimió la plantilla tipo, y con ésta se cortaron las cinco parte que conformarían el total de la estructura. Con facilidad se marcaron y dejaron pestañas para doblar y pegar donde fuera necesario. Este procedimiento es muy sencillo ya que se rige por plantilla del trazo geométrico. Posteriormente se cortaron barras de madera de sección redonda de un

centímetro de diámetro y se realizaron cortes en “V” en los extremos con la finalidad de unir con pegamento cada barra colocada sobre el modelo. Fue necesario unir a todo lo largo de las barras con el objeto de aumentar y mejorar la resistencia y desempeño de todos los componentes.



Imagen 140

Modelo combinado de barras y placas como un solo sistema estructural.¹⁴⁹

Al final se pudo apreciar una notable mejoría en el modelo comparado con modelos que se forman con un solo material, lo cual significa que sí es conveniente unificar y utilizar barras y placas. Los análisis posteriores sugirieron utilizar nodos, así que se barrenaron y colocaron tornillos con tuerca y rondanas en cada intersección. Este fue el principio para contemplar uniones simples o nodos en las maquetas estructurales experimentales.

MAQUETAS ESTRUCTURALES EXPERIMENTALES

Considero que el sistema más sencillo es el que emplea materiales con cierta flexibilidad y capacidad para ser deformados y utilizados como barras con barrenos en los extremos que permiten uniones a través de tornillos y recubrimientos poco precisos con

¹⁴⁹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

mallas y morteros. Estos sistemas no consideran el mínimo de peso y el uso de técnicas capaces de dar soluciones agradables y prácticas, obviamente implicaría mayor tiempo y costo en su elaboración. Con este objetivo se describen cuatro cúpulas geodésicas que emplean diferentes materiales y sistemas para finalmente aterrizar con una tabla que contiene las características de cada una y permite hacer una comparativa y evaluación de las mismas. Conviene aclarar que ninguna de ellas considera cubierta ni tampoco función alguna.

Cúpula 1: Se pensó en una cúpula geodésica que fuese lo mas sencillo posible utilizando un solo material comercial, con experiencias previas, se decidió por el empleo de algún metal que fuera lo suficientemente resistente pero al mismo tiempo ligero.

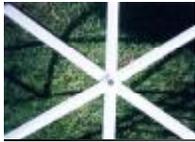


Imagen 141
Cúpula Geodésica de soleras de aluminio atornilladas.¹⁵⁰



La decisión fue usar solera de aluminio de 1 ½” de ancho atornillado en cada extremo. Para este caso se consideró la segunda división de la cúpula y se tomaron las dimensiones que el dibujo determinó. Se procedió al corte del material tomando en cuenta un aumento en cada extremo para realizar el barreno y con esto mantener sin modificación el punto de intersección entre barras. Como ya es conocido, se

¹⁵⁰ Idem.

cortaron ciento treinta barras con cinco diferentes medidas y se atornillaron con tuercas y tornillos de ¼” por una longitud de ½”. Fueron necesarias cincuenta y un piezas para armar todo el conjunto.

Cúpula 2: Se usaron barras de madera de pino de sección redonda de ½” y se fabricaron nodos de lámina de acero calibre 16 cortados con tijeras para fierro y doblados con pinzas. En esta ocasión no era factible barrenar los extremos y unir cada barra ya que en los puntos donde convergen seis barras tendríamos un amontonamiento de aproximadamente 3” de altura sin considerar el ángulo que deberían tener cada barra aumentando el peralte. Se pensó en fabricar un nodo muy sencillo y de fácil fabricación con herramientas comunes como un taladro y tijeras para cortar lámina.



Imagen 142 Cúpula de frecuencia 3 con madera y nodos de lámina de acero.¹⁵¹

El análisis de la cúpula de frecuencia tres, determinó cuatro diferentes tipos de nodo, el primero en la cúspide con cinco barras, otro intermedio para seis barras y en la base otros dos que recibirían cuatro y

¹⁵¹ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

tres barras. Por lo tanto, se decidió por fabricar dos nodos, uno tipo con capacidad para recibir seis, cuatro y tres barras y uno especial para recibir cinco. La técnica consistió en cortar cuadrados de lámina galvanizada de 3” por lado, con diez cortes hacia el centro sin llegar por completo hasta este, para posteriormente doblar los triángulos formados y barrenar donde se requiriera recibir barras. Se consideraron cuatro longitudes diferentes de barra y un total de setenta y cinco a las cuales se les hizo un barrenado en cada extremo para atornillar con tuerca y tornillos de $\frac{1}{4}$ ” por 1” de longitud, se usaron ciento cincuenta tornillos con tuerca para armar toda la estructura.

Cúpula 3: Se desarrolló utilizando tubos de cloruro de polivinilo (PVC) y lámina de acero calibre 16. Podría decir que se pensó en un nodo tipo incluido en las barras, para tal efecto, una parte de la lámina debería estar dentro del tubo y otra rebasando el límite de corte en formar de “lengüeta” con un barrenado para atornillar las demás barras y así evitar peraltes excesivos al sobreponer la lámina. Se hicieron pruebas para determinar la factibilidad de introducir y fijar la lámina dentro del perfil tubular de plástico. Primero se interceptaron dos placas en forma de cruz y se perforó el tubo atravesando dicha cruz, sin embargo una de las placas tendía a girarse.



Imagen 143 Maqueta fabricada con tubos de PVC y nodos de lámina de acero. ¹⁵²

La segunda opción fue introducir madera de 1” de longitud, con una muesca para recibir la lámina y después un barrenado que atravesara los tres elementos para después sujetar con tornillo y tuerca. Esto requería de mayor elaboración y un incremento de peso en cada barra. Por último, la técnica más sencilla y económica que se siguió fue cortar una lámina cuadrada de 4” por lado y posteriormente cortar en uno de los extremos dos cuadrados de 2” obteniendo una pieza en forma de “T”. La parte más ancha de 4” por 2”, se dobló de tal forma que siguiera la curva del perfil tubular y quedará dentro del mismo. Solo al exterior quedaba una lengüeta de 2” de longitud por 2” de ancho con un barrenado. Para sujetar, se perforó el tubo y la lámina en el interior para colocar cuatro remaches “pop”, por cada extremo. Fue necesario cortar ciento treinta tubos de cinco diferentes medidas y colocar doscientos sesenta láminas con mil cuarenta remaches y doscientos sesenta tornillos con tuerca de $\frac{1}{4}$ ” por 1”.

¹⁵² Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

Cúpula 4: Probablemente la maqueta con más elementos, mayor tiempo en su fabricación y por lo tanto a un costo mayor, pero con mejor apariencia, fue la cúpula hecha con barras de madera y nodos del mismo material. El concepto básico para la fabricación de la cúpula, fue usar únicamente madera, lo cual hacía necesario emplear nodos para unir las barras. La cantidad y tipo de barras fue la misma que se empleó para las cúpulas 1 y 3 y la cantidad de nodos la misma que en la 3. La diferencia consistió en los demás rubros, iniciando con la especificación del material. Las barras fueron de madera de pino de sección rectangular de 1” por 2” y triplay de 1/3” de espesor para la elaboración de nodos. Estos deberían permitir el libre giro de la barra con el objeto de encontrar el ángulo correcto de acuerdo con la longitud de las barras. Para esto, se reflexionó sobre la intersección de planos como sigue: si se corta una placa de triplay de forma cuadrada y a esta se le intersectan otras cuatro maderas perpendiculares, se podrán sujetar barras a través de un perno que permita el libre giro en uno de los sentidos.



Imagen 144

Geodésica con barras y nodos de madera.¹⁵³

¹⁵³ Idem.

Una forma más depurada fue la circunferencia y cuartos de la misma unidos perpendicularmente, con base en la cantidad de barras que debería recibir el nodo. Se identificaron cuatro diferentes nodos para recibir 3, 4, 5 y 6 barras, por lo tanto, se construyeron cinco nodos con las mismas características; de una circunferencia de diámetro de 4” a la cual se unieron con resistol y cuarenta y cinco clavos de 1” a tres piezas de 1/4” de circunferencia. Otros nodos se prepararon para recibir cuatro barras cada uno empleando ciento ochenta clavos. A cada barra se le hizo una muesca de 1/3” de ancho por 2 1/2” de largo para introducirse entre los cuartos de circunferencia y atornillarse con tuercas y tornillos de 1/4” por 1/4” de longitud, con un total de doscientos sesenta.



Imagen 145

Detalle de nodo hecho con madera de pino de 1/3” y barras de 1” por 2”.¹⁵⁴

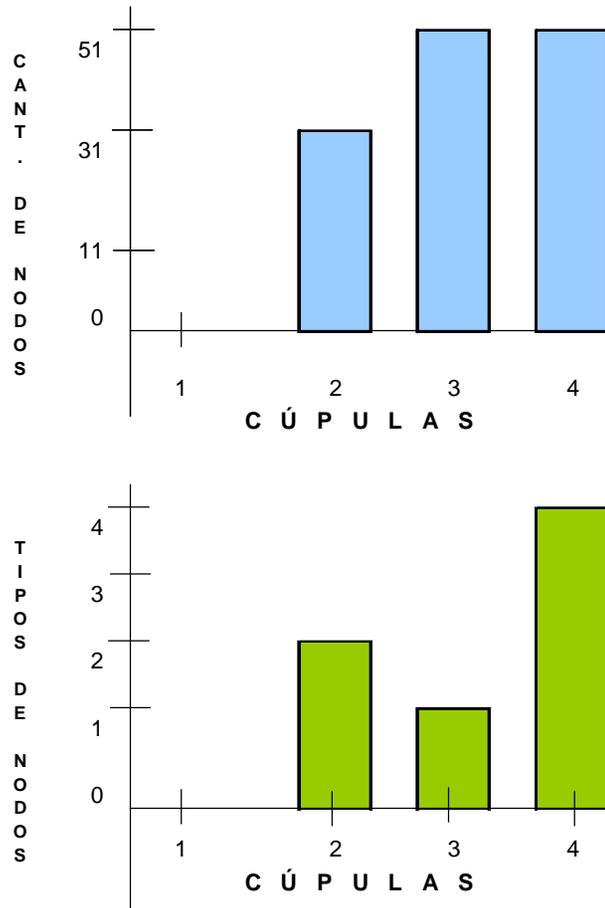
¹⁵⁴ Idem.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

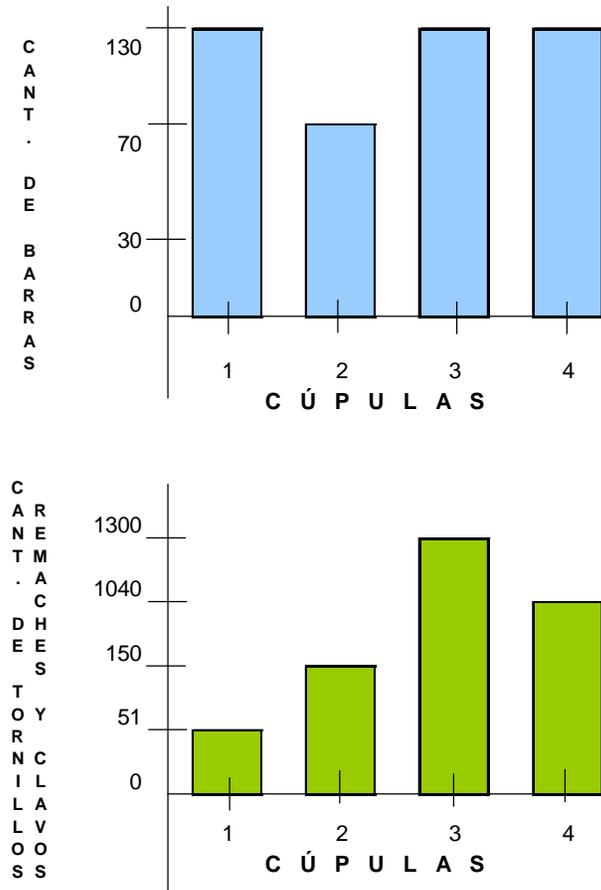
Los datos se resumen en la siguiente tabla que considera los materiales y cantidad de nodos, barras y tornillos, con el objeto de aproximarse a cual de ellas requirió de más tiempo y por lo tanto de un mayor costo.

# CÚPULA	DESCRIPCIÓN	TIPO DE MATERIALES	NODOS		PIEZAS QUE CONFORMAN LOS NODOS	BARRAS		CANTIDAD DE TORNILLOS	REMACHES O CLAVOS	TOTAL DE ELEMENTOS
			CANTIDAD	TIPO		CANTIDAD	TIPO			
1	CÚPULA GEODÉSICA FRECUENCIA 4 ARMADA CON SOLERAS DE ALUMINIO DE 3.81 CMS DE ANCHO CON TORNILLOS DE 1 1/2" DE 1/4" POR 1/2"	1 ALUMINIO	-	-	-	130	5	51		187
2	CÚPULA GEODÉSICA FRECUENCIA 3 ARMADA CON MADERA DE PINO DE SECCIÓN REDONDA DE 1/2" DE DIÁMETRO Y NODOS DE LÁMINA DE ACERO CALIBRE 16.	2 ACERO MADERA	31	2	31	75	4	150		295
3	CÚPULA GEODÉSICA FRECUENCIA 4 CON PERFIL TUBULAR DE PVC DE 2" DE DIÁMETRO Y NODOS TIPO DE LAMINA DE ACERO CALIBRE 16 CON REMACHES POP	2 PVC LAMINA DE ACERO	51	1	51	130	5	260	1040	1540
4	CÚPULA GEODÉSICA FRECUENCIA 4 HECHA CON BARRAS DE MADERA DE PINO DE 1" POR 2" UNIDAS A TRAVÉS DE TORNILLOS DE 1/4" POR 1 1/4". A NODOS DE TRIPLAY DE 1/3" PEGADOS Y CLAVADOS	1 MADERA	51	4	311	130	5	260	780	1542

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

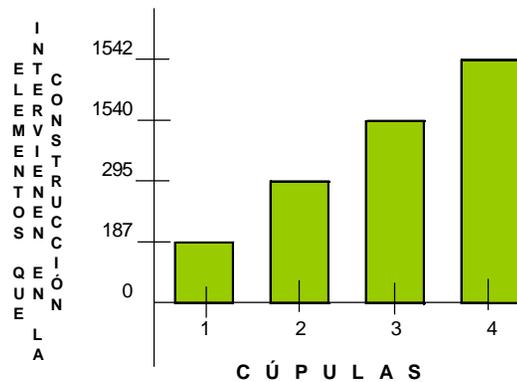


construcción a menor costo. Además, que esta última tiene un 100% de nodos con 4 tipos y un 80.38% más de tornillos para armarla (sin considerar los clavos necesarios).



Según los datos obtenidos, se puede decir que dos cúpulas (1 y 4) construidas con la misma cantidad de barras presentan los extremos de sistemas completamente diferentes. La primera sin nodos y con un 4.9% de tornillería con respecto a la cuarta 19.61%, por lo tanto, requiere menos tiempo para su

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”



Esto significa que requiere de más tiempo para fabricar los nodos y por lógica más tornillos para sujetar las barras. También se puede observar mucha similitud entre la cúpula 3 y 4 con la misma cantidad de nodos y barras y apenas con un 0.129% de diferencia entre el total de elementos que se necesitan para construirlas. Aunque exista una diferencia de 3 en los tipos de nodos y un 20% en la cantidad de tornillos, clavos y remaches, no existe mucha diferencia en tiempo pero si en calidad. Desde mi punto de vista, la cúpula 4 presenta mejor diseño y acabado que la 3 y las anteriores, lo cual invita a reflexionar sobre la relación que existe entre diseño y costo quedando como aspectos meramente subjetivos, lo mismo sería para la cantidad de elementos que determinan la belleza, pues más bien esto depende del orden, acomodo y función. Es obvio, que a mayor cantidad de elementos y tiempo se incrementa el costo, pero también es cierto que invertir tiempo en el diseño y organización incrementa el nivel de eficiencia en el proceso de ejecución.

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

CONCLUSIONES

En la gestación de este documento, se pensó en una propuesta tecnológica con el desarrollo de un sistema estructural híbrido. Los primeros postulados, a mi juicio, parecían ser inductivos porque creía conocer los resultados que se obtendrían. La evolución del trabajo permitió encontrar una línea clara al proponerse una metodología y una aportación didáctica para el diseño de estructuras ligeras. Sin embargo, la lógica conceptual sobre los componentes que conforman una estructura con cierto orden y principios de organización, permitieron una visión mucho más acertada sobre los resultados que se obtuvieron.

Lo aquí descrito, forma las conclusiones del trabajo, pero tal como se indicó en un principio, lo importante es que las hipótesis se mantengan expuestas para ser aceptadas o no.

Con juicio crítico y de la manera más objetiva posible, intento explicar los resultados obtenidos en el orden que se fueron desarrollando los temas y no como se numeraron las hipótesis ya que estas no necesariamente tienen una secuencia.

Como primer resultado, se pudo constatar que cuanto más sencillo sea el sistema para unir barras o se omita el uso de nodos, se facilitará la fabricación de una estructura, ya que intervienen menos elementos, y por lo tanto, se puede reducir la cantidad de material y mano de obra.

Esto se fundamenta con las estructuras espaciales, que una vez evaluadas en las tablas comparativas, demuestran la cantidad total de piezas y nodos empleados. Se recomienda que estos últimos sean de fácil hechura y se debe tomar en cuenta la cantidad de barras que recibirá cada uno de ellos.

Otro aspecto importante describe que: “a menor cantidad de tipos de barras mayor será la ubicación en la estructura”. Descrito de otra manera, si existen pocos tipos de barras o una sólo medida, se facilita la identificación para su colocación final. El opuesto a este dicho son diferentes medidas de barras y mayor complejidad al momento de la identificación de elementos sino se mantiene un control de marca.

Quizá uno de los datos más importantes es la comparativa hecha entre una estructura espacial de base cuadrada y una de base triangular, encontrando que:

“Con el material ordenado en forma de estructura espacial de base cuadrada se cubre mayor área comparada con una espacial de base triangular, existiendo una diferencia de 15.66%.” Esto quiere decir, que con la misma cantidad de material, se pueden cubrir más metros cuadrados con una de base cuadrada y se reduce todavía más la cantidad de material si se diseña en forma de “tablero de ajedrez”. La segunda hipótesis queda demostrada con esta comparativa, al menos para este caso de estructuras espaciales. Al cambiar de material y sistema constructivo puede haber diferencia en los resultados de costo y peso propio de la estructura. Ya que no será lo mismo hacerla con acero o con PVC.

Por otro lado, una de las superficies mínimas que cubren el máximo volumen, es la cúpula semiesférica. También se pudo determinar que esta superficie presenta un sólo círculo ortodrómico y se encuentra en la base de la cúpula, por lo tanto, es al mismo tiempo cimentación o anclaje según el sistema empleado. En este mismo orden de ideas, se pudo encontrar que es de suma importancia la decisión que se tomará para emplear el sistema constructivo según los requerimientos de la forma, es decir, que existen sistemas que se adecuan mejor a algunas formas que a otras. Para este suceso la cúpula

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

semiesférica con aire a baja presión es una de las soluciones más aceptables, por el poco volumen que ocupa antes de ser inyectada y la facilidad para montarse, además de la ligereza que ninguna otra estructura presenta, pues requiere de anclajes al suelo para evitar ser deformada en lugar de algún tipo de cimentación pesada para soportarla. El único inconveniente que presenta es la necesidad de constante energía eléctrica para que pueda funcionar el motor que inyecta el aire.

Por lo tanto, parece ser que el primer postulado en las hipótesis queda sin surtir efecto al menos para este caso, ya que no incluye al sistema estructural en la relación de cantidad con ligereza. Puesto que para el sistema neumático empleado en la cúpula semiesférica ocupa el total de la superficie y no una menor cantidad de material. Así que el sistema estructural presenta ciertos requerimientos de material y cantidad que hacen posible la ligereza en la estructura final.

Otro aspecto interesante fue la utilización de secciones para fabricar arcos, encontrando que no conviene usar secciones rectangulares para arcos de una sola pieza, pues, en las intersecciones próximas a la base no hay suficiente área de contacto, ya que toca el vértice con una de las caras de la sección. Para el mejor de los casos conviene usar secciones redondas porque presentan las mismas condiciones de superficie aunque exista torsión.

Por otro lado, uno de los puntos a tratar aquí, es la forma que adquieren las estructuras y la importancia que tiene para dar resistencia.

Para el caso de las estructuras espaciales, ya se pudo comprobar que la manera en que se colocan las barra para formar tetraedros o pirámides en las cuales el triángulo es la forma básica e “indeformable” por excelencia. Lo mismo sucede con las cúpulas geodésicas,

sólo que se pueden hacer de un solo manto y de doble curvatura o como superficie sinclástica.

Sucede que para las anticlásticas, la manera en que se disponen las partes que dan forma a la superficie, se pueden fabricar no solo con barras, sino también con membranas plásticas, fibras naturales o sintéticas. El correcto corte de las piezas va a permitir obtener una superficie bien definida, sin arrugas ni deformaciones visibles, sin embargo, esto se rige por el principio de las velarias. Así que el último postulado de las hipótesis queda desmentido en parte, puesto que deberá incluir que también depende de los materiales que se emplean así como de los principios que rigen al sistema estructural que se utilice.

Algunos otros datos interesantes que se lograron obtener fueron con respecto al costo. Probablemente pueden existir ciertas variables que incrementen o disminuyan el costo en una estructura, uno de ellos es el costo de mano de obra que para este caso no se consideró; otro es el incremento en el costo de los materiales, por su calidad o dependiendo del lugar donde se adquieran. Según la estructura de superficie anticlástica hecha con material de rafia con dos postes de acero y cuatro puntos bajos, resultó a un costo de \$22.85 m², uno de los costos más bajos para desarrollar una estructura experimental. Esta se fabricó en el mes de julio del 2006, pero le antecedió otra hecha con costales del mismo material a un costo todavía más bajo (aproximadamente \$10.20 m²). Cabe aclarar que solamente son para maquetas estructurales experimentales y que de ninguna manera se tratan de estructuras definitivas. El segundo dato importante es sobre el volumen compactado que ocupó la estructura antes de su instalación. Se pudo determinar que la estructura antes mencionada cubrió una área de 190 m²,

ESTRUCTURAS LIGERAS: “METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES”

pero hasta antes de ser instalada ocupó un espacio de 0.37 m^3 .

Finalmente la tercera y cuarta hipótesis consideran al “mínimo” o “corto” tiempo como un factor dentro del postulado. Ya se interpretó el tiempo como la duración en período para la ejecución de una estructura. Sin embargo, en este trabajo se desarrollaron diferentes maquetas que llevaron un período de tiempo que va desde 40 horas de trabajo hasta tres meses, pero esto dependió principalmente de los recursos económicos y la disposición de personas para trabajar. Esto demostró que uno de los cinco aspectos es correcto (sistema constructivo, *economía*, transporte, solución entre planos y materiales) para determinar la rapidez de ejecución.

En la cuarta hipótesis se planteó la ventaja al prescindir de equipos especiales para mover o cargar los elementos que componen una estructura. Para todos los casos de maquetas aquí presentados, no se requirió de mayor esfuerzo que el manual humano para ejecutar y montar una superficie. Así que en efecto, mientras no se rebase la capacidad de carga del cuerpo humano será menos el esfuerzo que este emplee para mover un objeto.

Con probabilidad existan cambios en los sistemas constructivos actuales que serán substituidos por otros que presenten ventajas sobre los anteriores. La tecnología aplicada a la arquitectura, permite la eficiencia constructiva y el uso racional de los recursos energéticos, de tal suerte que los recursos materiales y los procesos productivos se encuentran inmersos en este campo por tanto, el arquitecto debe asumir su responsabilidad para utilizarlos de manera óptima y con alto sentido humano.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Anillo de Tensión.- Anillo que rodea la base de una cúpula para contener las componentes hacia el exterior de las fuerzas meridianas. En una cúpula de concreto armado, este anillo se construye con una sección más gruesa y reforzado con armaduras para resistir los esfuerzos de tensión producidos por las deformaciones elásticas diferidas de anillo y cascara. También llamado anillo, cornisa o zuncho.

Anticlástica.- Dícese de la superficie que tiene curvaturas opuestas en un punto dado.

Cable.- Elemento estructural flexible, como un alambre de acero o una cadena metálica, que trabaja a tracción pura, es decir, que no representa resistencia a compresión o flexión.

Círculo Máximo.- Es el círculo de mayor diámetro de los que pueden trazarse en una esfera. También llamado círculo ortodrómico.

Cúpula.- Superficie alabeada de doble curvatura y con curvas principales del mismo sentido. La más común deriva de la esfera aún que también se emplea la derivada de la parábola. Se caracteriza por ejercer el mismo empuje en todas las direcciones.

Cúpula Geodésica.- Cúpula de estructura de acero, cuyos nervios siguen las líneas de tres juegos principales de círculos máximos que cortan a 60° , subdividiendo la cúpula en una serie de triángulos esféricos equiláteros.

Cúpula Semiesférica.- Cúpula con forma de media esfera, para la mayoría de condiciones de carga, la transición de fuerzas de los meridianos a los paralelos se produce entre los ángulos de 45° y 60° tomados con respecto al eje vertical.

Elemento a Compresión.- Pieza estructural sometida principalmente a fuerzas de compresión :Acción de las fuerzas que mantienen apretado un cuerpo empujando por sus extremos, de la que resulta el acortamiento o reducción de volumen de un cuerpo elástico.

Elemento a Tracción.- Elemento estructural sometido principalmente a fuerzas de tracción: acción de las fuerzas que mantienen estirado un cuerpo tirando de sus extremos, de la que resulta el alargamiento o elongación de un cuerpo elástico.

Estructura.- Conjunto estable de elementos estructurales proyectados, calculados y construidos para funcionar unitariamente en el sostenimiento y la transmisión de cargas al terreno, en condiciones de seguridad y sin sobrepasar los esfuerzos admisibles en sus miembros.

Estructura Neumática.- Membrana que se hace entrar en tensión y se estabiliza "hinchandola" con aire comprimido, para crear una sobre presión interior. Este caso, no se precisa de estructura soportante, ya que la sobre presión interior contraresta la acción de las cargas.

Flexible.- Dícese de una estructura o un miembro estructural que se caracteriza por su falta de rigidez y por tener una forma que responde a los cambios en la carga externa.

Flexión.- Acción y efecto de doblarse un cuerpo elástico al aplicarle una fuerza transversal externa. La flexión es el mecanismo estructural que permite que una carga vertical sea transmitida en dirección normal a la de su aplicación.

Fuerza.- Acción sobre un cuerpo que produce o tiende a producir un cambio de forma o movimiento.

Maqueta.- Modelo a escala de un edificio o estructura, construido con precisión y detalle, para estudio, pruebas o para la enseñanza.

Mástil.- Miembro vertical o inclinado que trabaja a compresión en una estructura suspendida o en una estructura atirantada de cables, y soporta la suma de los componentes verticales de las fuerzas en los cables primarios. La inclinación del mástil le permite absorber parte del empuje horizontal del cable y reducir la fuerza. También poste.

Membrana.- Superficie delgada y flexible que soporta las cargas principalmente a través del desarrollo de esfuerzos de tracción.

Meridiano.- Línea curva descrita por una sección vertical cortada por el eje de una superficie de revolución. También línea meridiana.

Modelo.- Representación en miniatura construida generalmente a escala, para mostrar el aspecto o construcción de algo.

Paraboloide Hiperbólico.- Superficie engendrada deslizando una parábola con la concavidad hacia abajo a lo largo de otra parábola con la concavidad hacia arriba, o deslizando un segmento lento con sus extremidades apoyadas sobre dos líneas oblicuas. El paraboloide hiperbólico a la par que una superficie de traslación, puede ser considerado como una superficie reglada.

Paralelo.- Línea circular descrita por una sección horizontal cortada perpendicularmente al eje de una superficie de revolución.

Rígido.- Dícese de un elemento estructural o de estructura cuya forma no cambia apreciablemente bajo la aplicación de una carga o ante una alteración del estado de cargas.

Silla de Montar.- Superficie de doble curvatura caracterizada porque en cada uno de sus puntos se cruzan una curva cóncava y otra convexa en sentidos perpendiculares. En las superficies de este tipo, las zonas de concavidad hacia abajo se comportan con el efecto arco, mientras que las zonas con la concavidad hacia arriba se comportan como una estructura de cables. Si los bordes de la superficie no están apoyados también aparece el efecto viga.

Sinclástica.- Dícese de una superficie que tiene curvaturas similares en un punto dado.

Toral.- Superficie en forma de neumático engendrada por un círculo que gira alrededor de un eje situado en su plano, pero exterior a él.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

REFERENCIAS

Bahamón, Alejandro. *"Arquitectura Textil Transformar el Espacio"*. Ed. Instituto Monsa de Ediciones, S. A.

Borrego, John. *"Space Grid Structures"*. Ed. M. I. T. press. 1968.

Bunge, Mario. *"Ciencia Técnica y Desarrollo"*. Ed. Hermes. México, 1998.

Critchlow, Keith. *"Order in Space"*. Ed. Thames and Hudson. New York, 1969.

D. K. Ching Francis. *"Diccionario Visual de Arquitectura"*. Ed. Gustavo Gili, S.A. de C. V./México. 3ra. Edición, 2000.

Enge, Heinrich. *"Sistemas Estructurales"*. Ed. Blume., Madrid, 1979.

Engel, Heino. *"Sistemas de Estructuras"*. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. 1ª Edición-3ª tirada 2003.

Folleto ADRIANN'S de México, S. A. de C. V. *"Tecnología Creativa"*.

Folleto BAMO Núm. 4-5.

Folleto EBERSPÄCHER. Tageslicht-Einfälle von Eberspächer. Internationale Glasbautechnik im Bild. Fachberater in Ihrer Nähe. Juni 1994.

Folleto MERO nr. 26, Dez 1990. *"The way to distinctive design. Construction Systems"*.

Folleto MERO D932e/10.96D. *"The way to distinctive design. Construction Systems"*.

Folleto MERO D932/12.92e. *"The way to distinctive design. Construction Systems"*.

García, Alfredo. *"Introducción a la Metodología de la Investigación Científica"*. Ed. Plaza y Valdés Editores, S.A. de C.V. México, 2000.

Hasegawa, Itsuko. *"Architectural Monographs N°31"*. Ed. Academy, Enst & Shon.

Herzog, Thomas. *"Construcciones Neumáticas"*. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. Barcelona, 1977.

Kurokawa, Kisho. *"Architects and Associates. Airport Terminal Complex. Kuala Lumpur"*. Malaysia, 1998.

Makowsski, Z.S. *"Estructuras Espaciales de Acero"*. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. Barcelona, 1972.

Margrit, J. Y C. *"Las Mallas Espaciales en Arquitectura"*. Ed. Gustavo Gili, S. A. de C. V. Barcelona, 1972.

Otto, Frei. *"Tensile Structures"*. Vols. 1 & 2" M.I.I. Press, 5 Th De. 1982.

Pérez R., Rosa A. *"Kuhn y el cambio científico"* Ed. Fondo de Cultura Económica México, 1999.

Revista. *"Architecture and Urbanism"*. au 2005:11 No. 422. Feature: Art/Space. A+U Publishing Co., Ltd. 2005. Printed in Japan.

ESTRUCTURAS LIGERAS: "METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS A TRAVÉS DEL TRAZO CON GEOMETRÍA DESCRIPTIVA Y MODELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES"

Revista. "Architectural Desing. Islam+Architecture". Guest-edited by Sabiha Foster. Nov/Dec 2004. Vol. 74 No. 6. Published in Great Britain in 2004 by Wiley-Academy.

Revista. "Architectural Desing. Food+Architecture". Guest-edited by Karen A Franck. Nov/Dec 2002. Vol. 72 No. 6. Published in Great Britain in 2002 by Wiley-Academy.

Revista. "Enlace Arquitectura y Diseño". VII Reseña de Arquitectura Mexicana.

Revista. "Enlace Arquitectura y Diseño". VI Reseña de Arquitectura Mexicana.

Revista. "Inmobiliare México Real Estate". Número 6. Publicación Bimestral Noviembre-Diciembre 2000.

Revista. "Uno más uno". Siglo Mexicano. La Obra "la construcción nacional en los últimos cien años. Agosto 1999.

Rosen, Sidney. "El mago de la Cúpula". R. Buckminster Fuller Diseñador futurista. Ed. Diana. México, 1970.

Senosiain, Aguilar Javier. "Bioarquitectura en busca de un espacio". Ed. Noriega. México, 1998.

Sharp, Dennis. "Diccionario Ilustrado Arquitectos y Arquitectura". Ed. CEAC, S. A. 1ª Edición: marzo 1993.

Sutherland, Lyall. "Maestros de la estructura: la ingeniería en las edificaciones innovadoras". Ed. Blume. Hong Kong, 2002.

Taiyo, Kogyo Corporation. "Membrane Structures". Volume I.

Tom Porter & John Neale. "Architectural Supermodels. Physical design simulation". Gran Bretaña, 2000.

<http://www.japan-photo.de/mod-ja61.htm> día de consulta 05-mayo-06 hora de consulta 11:48 hr

<http://www.ecodomos.cl/presentacion.htm> día de consulta 05-mayo-06 hora de consulta 12:36 hr

<http://www.geocities.com/researchtriangle/lab/7826>

<http://www.domegeodesique.com.fr> día de consulta 19-mayo-2006 hora de consulta 13:22 hr

<http://www.archilibre.org/esp/revolution/domes/construire.html> día de consulta 26-mayo-2006 hora de consulta 18:40 hr

<http://www.vitruvio.ch/go> día de consulta 26-mayo-2006 hora de consulta 18:48 hr

http://www.arq.ufse.br/labcon/arq5661/trabalos_2004-1/geodesicas/historico.html día de consulta 26-mayo-2006 hora de consulta 18:57 hr

http://www.domosdelangel.4t.com/nuestros_trabajos.htm día de consulta 26-mayo-2006 hora de consulta 19:23 hr

http://www.zeniteal.com.br/productos_domos.html día de consulta 26-mayo-2006 hora de consulta 19:40 hr