

00164 5



Universidad Nacional Autónoma de México

Esferoides de Doble Curvatura Inversa

Tesis

que para obtener el grado de Maestro en Arquitectura-Tecnología  
presenta Marco Arturo Jaubert Garibay



PROGRAMA DE MAESTRIA Y  
DOCTORADO EN ARQUITECTURA



México D.F. 2001



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.

Director de Tesis

Mtro. en Arq. Francisco Reyna Gómez

Sinodales Propietarios

Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos

Mtro. en Dis. Arq. Jan Van Rosmalen Jansen

Sinodales Suplentes

Mtra. en Arq. Gemma Verduzco Chirino

Mtra. en Ing. Perla Santa Ana Lozada

### Agradecimientos

Al Mtro. en Arq. Francisco Reyna Gómez, al Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos y al Mtro. en Dis. Arq. Jan Van Rosmalen Jansen, por sus valiosas ideas en torno a la invención de los Esferoides de Doble Curvatura Inversa.

A la Mtra en Arq. Gemma Verduzco Chirino, y a la Mtra en Ing. Perla Santa Ana Lozada por su apoyo en el desarrollo de esta Tesis

## CONTENIDO:

---

<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	6
<b>1. ANTECEDENTES HISTORICOS</b> .....	<b>8</b>
1.1 <i>EL SANTUARIO DE STONEHENGE</i> .....	8
1.2 <i>EL PANTEÓN DE ROMA</i> .....	12
1.3 <i>LA IGLESIA DE SANTA SOFÍA</i> .....	17
1.4 <i>LAS BÓVEDAS DE CRUCERÍA EN EL ARTE GÓTICO</i> .....	21
1.5 <i>LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA DE LA FLOR</i> .....	27
<b>2. CÚPULAS GEODÉSICAS</b> .....	<b>35</b>
2.1 <i>LA PRIMERA CÚPULA GEODÉSICA</i> .....	35
2.2 <i>EL SISTEMA STOCKADE</i> .....	36
2.3 <i>LA CASA DYMAXION</i> .....	38
2.4 <i>EL AUTOMÓVIL DYMAXION</i> .....	39
2.5 <i>LAS UNIDADES DYMAXION</i> .....	41
2.6 <i>EL INVENTO DE LAS GEODÉSICAS</i> .....	42
2.7 <i>ARMADO DE LA ESTRUCTURA</i> .....	44
2.8 <i>ELEMENTOS DE CUBIERTA</i> .....	50
2.9 <i>LA IMAGINACIÓN Y LA CIENCIA</i> .....	53
<b>3 ESFEROIDES DE DOBLE CURVATURA INVERSA</b> .....	<b>54</b>
3.1 <i>ELEMENTOS DIRECTRICES Y NIVEL DE PISO</i> .....	56
3.2 <i>ELEMENTOS GENERATRICES Y FORMAS OJIVALES</i> .....	57
3.3 <i>ELEMENTOS DE CUBIERTA</i> .....	60
3.4 <i>DOCUMENTOS DE PATENTE</i> .....	61
3.5 <i>DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN</i> .....	61
3.6 <i>REINVINDICACIONES</i> .....	64
3.7 <i>PATENTE DE INVENCIÓN</i> .....	65
<i>CONCLUSIONES</i> .....	66
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	68

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo se desarrolla con la finalidad de presentar al invento denominado Esferoides de Doble Curvatura Inversa, el cual permite la construcción de esferoides de membrana resistentes a la flexión. Su forma es producto del desplazamiento de líneas rectas sobre sus elementos directrices, por lo que puede ser considerada como una estructura laminar, de generación reglada.

Para su mejor presentación, este trabajo cuenta con el análisis del desarrollo de las cúpulas, desde las civilizaciones más antiguas, partiendo del simbolismo de la forma esferoidal y de la circunferencia, desde inicios de la arquitectura.

Las grandes bóvedas de la antigüedad se han caracterizado por haber utilizado diversas técnicas con la finalidad de evitar la flexión estructural, principalmente en la base de estas formas geométricas, por lo que resulta interesante analizar su desarrollo y los cambios practicados a la naturaleza de la esfera con la intención de ser llevada a la práctica.

En la siguiente parte se presenta como marco teórico, una invención de mediados del siglo XX, la cual es conocida como estructura geodésica, y permite la construcción de dicha forma, uniendo simplemente barras rectas a nodos estructurales mediante un procedimiento específico. Se abunda en la vida de su inventor dado que se trata de un personaje de la historia poco común, que debe sus aportaciones a la ciencia, más que a un profundo conocimiento de las técnicas y las estructuras, a su tenacidad y constancia en aras de la inventiva.

Las estructuras geodésicas son similares en su forma a los esferoides de doble curvatura inversa, sin embargo ambas estructuras presentan ventajas y desventajas al ser comparadas entre sí mismas.

Por ejemplo, las estructuras geodésicas permiten la construcción de la esfera, de una manera muy sencilla, y logran su estabilidad estructural en función de la resistencia de múltiples triángulos, que unidos entre sí, generan su superficie.

Mientras tanto los esferoides de doble curvatura inversa, al ser estructuras pretensada, son un poco más complejos, ya que para ser llevados a la práctica, requieren de una tensión específica en cada una de las barras que conforman su membrana envolvente.

A cambio se tienen módulos compacto extraordinariamente resistentes a la flexión, de superficie completamente curva en cualquier punto en que se analicen, los cuales deben su estabilidad estructural al ordenamiento y el trabajo de cada una de las barras que los conforman

Para finalizar la presentación de los esferoides de doble curvatura inversa, se presenta su descripción de manera general, sin que por tal motivo se pierda la claridad de la misma, así mismo se anexan una copia de la patente de invención No.172423 misma que fue otorgada por la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial al autor de esta Tesis.

Como es bien sabido, las construcciones de forma esferoidal tiende a ensancharse a medida en que pierde altura, esto en función de su peso y las cargas a que sean sometidas, por lo que a lo largo de la historia de la arquitectura, múltiples construcciones de este tipo han fallado.

Actualmente el problema no radica tanto en el colapso de las grandes bóvedas, dado que se cuenta con las herramientas del cálculo. Sin embargo un mal diseño estructural termina por incrementar considerablemente los costo de construcción, principalmente en este tipo de formas geométricas.

El arte es una de las expresiones más naturales del ser humano, en la que en principio se debe dejar al individuo en libertad absoluta para expresar su sentir, ya sea en la plasticidad de la escultura o de la arquitectura, o bien en cualquier tipo de comunicación humana. Sin embargo al tratarse de construcciones es mejor que dichas figuras cuenten con características estructurales que les permitan ser además de representativas del sentir humano, resistentes a la flexión, y preferentemente económicas.

Como caso particular, los esferoides de doble curvatura inversa, crean en su interior una atmósfera de protección, espiritualidad y misticismo, simplemente al envolver el espacio con sus superficies curvas.

Su doble curvatura inversa se dibuja con un trazo suave y continuo, permitiendo que cada una de sus barras formen la retícula que sujeta la flexión con su propia geometría, y al transmitir esfuerzos de sus elementos generatrices a sus elementos directrices, se convierte en un cascarón de concreto armado extraordinariamente resistente a la flexión.

## 1. ANTECEDENTES HISTORICOS

La majestuosidad de la arquitectura, que encierra en la forma, el simbolismo más legendario y universal, es transmitida a lo largo de los siglos, para revivir el sentir humano de las civilizaciones más antiguas, por lo que algunas formas como la esfera han sido empleadas para construir espacios independientemente de sus cualidades geométricas y dificultades estructurales.

Siendo tal vez la forma más repetida en las techumbres de templos e iglesias, los domos y la esfera encierran una tradición mitológica en medio de una de las más complejas formas geométricas para ser llevada a la práctica.

Tanto la esfera como la circunferencia a lo largo de la historia de la humanidad, han tenido un significado universal de protección, espiritualidad y búsqueda de conocimiento.

Estos significados los encontramos desde épocas muy remotas en ejemplos en los que las formas simbolizan entre otras cosas, la protección del espíritu, la bóveda celeste, y la forma del universo.

Como símbolo, la circunferencia ha representado a la esfera, en su proyección plana, ha representado a una forma geométrica natural y perfecta. A la esfera se le ha considerado como el símbolo sagrado donde se equilibran todas las fuerzas, un símbolo que por su naturaleza representa integridad y totalidad.

Los símbolos relacionados con la circunferencia, no solamente son universales, sino también prehistóricos, los encontramos no sólo en algunas construcciones antiguas sino también en las herramientas y los objetos más primitivos. Mientras las formas cuadradas han representado lo estático, las formas redondas han representado lo dinámico, de aquí que el cuadrado represente a la tierra, mientras la circunferencia y la esfera, al espacio sagrado y a la divinidad.

### 1.1 EL SANTUARIO DE STONEHENGE

Una de las primeras manifestación en la historia de la arquitectura, en la cual el hombre adopta la circunferencia para relacionarla con el sol, como el gran símbolo del dios de los cielos, se manifiesta desde la prehistoria con el majestuoso Santuario de Stonehenge, en Inglaterra.

Esta impresionante obra prehistórica marca el descubrimiento de la arquitectura, y se trata de una construcción megalítica, en la que es posible apreciar como el simbolismo de ciertas formas se materializa y perdura a lo largo de los siglos.

En Stonehenge, múltiples piedras colosales algunas de más de cincuenta toneladas de peso, fueron erguidas en torno a la forma de una gran circunferencia, dentro de la cual se encuentran otros de estos enormes bloques de granito, los cuales forman a su vez la silueta de otra figura similar a la de su periferia, pero abierta, como si se tratara de una herradura.

No es casualidad que los arquitectos de la antigüedad adoptaran formas como la circunferencia para crear sus espacios astronómicos o espirituales, ni que orientaran dichos espacios hacia puntos específicos relacionados con el movimiento del sol y de las estrellas.

La circunferencia y la esfera, al igual que otras figuras, tienen por sí mismas valores universales, los cuales se repiten de cultura en cultura, de religión en religión, siempre simbolizando aspectos relacionados con la vida y la muerte, con lo desconocido y lo conocido, con la luz y la oscuridad, con el pecado y la virtud, con la sabiduría y la ignorancia, etc.

Es maravilloso observar la manera como los arquitectos y constructores de la prehistoria, esculpieron y transportaron grandes rocas para darle un valor místico y espiritual al espacio.

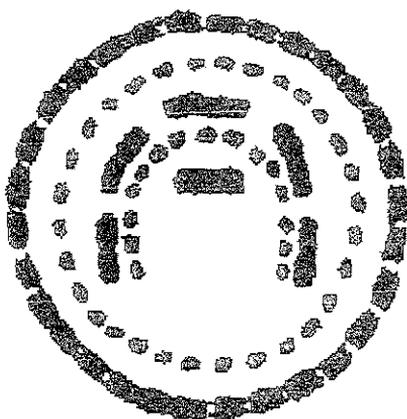
En Stonehenge pesados elementos de granito situados de manera horizontal, descansan sobre grandes rocas, que erguidas en torno a un mismo sitio, crean una atmósfera llena de valores espirituales.

En su planta se observa a la circunferencia simbolizando tal vez al sol, como el gran dios de los cielos. La manera como el sol distribuye su luminosidad a través de las colosales piedras, es impresionante, y esto se remarca aun más en el amanecer del día mas largo del año.

Aunque se desconoce con exactitud su funcionalidad, es muy probable que hubiera sido un lugar de reunión tribal o un centro religioso relacionado con la observación astronómica.

Stonehenge

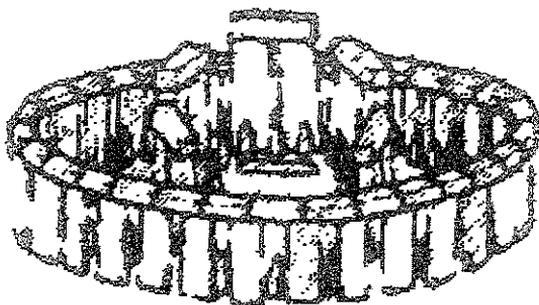
Fig 01



El círculo exterior, de 30 m de diámetro, está formado por grandes piedras rectangulares que originalmente estaban rematadas por dinteles también de piedra. Dentro de esta hilera exterior se encuentra otro círculo de bloques más pequeños de arenisca azulada. Éste encierra una herradura, construida por piedras del mismo color y trabadas con dinteles, en cuyo interior permanece una losa de arenisca micácea conocida como El Altar.

Stonehenge

Fig 02



Stonehenge es el más famoso de los monumentos megalíticos de Inglaterra y la estructura prehistórica más importante en Europa. Situado en la llanura de Salisbury, al suroeste de la Gran Bretaña, se le calculan más de cuatro mil años de antigüedad, entre finales de la edad de piedra en el periodo neolítico, y principios de la edad del bronce.

Stonehenge fue erigido en diversas etapas, iniciándose, probablemente, como un monumento circular de carácter ritual rodeado por un talud y un foso, de modo similar a muchos otros situados en el sur de Inglaterra. Alrededor del 2200 a.C. fue cuando tomó su peculiar aspecto, para lo cual se transportaron 32 bloques de arenisca desde las montañas de Preseli, al suroeste de Gales.

Se piensa que la piedra del Altar fue traída desde una región cercana a Milford Haven, en Pembrokeshire. Stonehenge fue construido por un pueblo que mantenía amplias relaciones comerciales y que había establecido sus principales asentamientos en la zona, entre el 1600 a.C. y el 1300 a.C.

La función de Stonehenge ha sido durante mucho tiempo objeto de conjeturas. Pudo haber sido utilizado para predecir los solsticios de verano e invierno, los equinoccios primaverales y otoñales y eclipses solares y lunares. También funcionó, quizás, como un instrumento para determinar la situación del sol y de la luna con respecto a la tierra y de este modo predecir las estaciones, o también como calendario. Como tal, habría constituido un lugar de reunión para ceremonias religiosas relacionadas con el sol y la luna.

En Stonehenge, como en otros yacimientos de la edad del bronce, el énfasis dado al círculo tal vez también refleje la idea de la naturaleza circular del nacimiento y muerte y del transcurrir de las estaciones.

Parece que Stonehenge perdió su importancia como lugar ceremonial a finales de la edad del bronce. Los romanos desacralizaron el lugar en alguna fecha comprendida entre el año 55 a.C. y el 410 d.C. y derribaron unos cuantos bloques que estaban erguidos.

Además, dos piedras verticales y el dintel occidental del Altar se cayeron en enero de 1797 y otro de los bloques verticales y su correspondiente dintel también se vino abajo en el año de 1900. En 1958 esos cinco bloques fueron levantados y colocados, dando al monumento el aspecto aproximado que tendría durante la ocupación romana.

Algunos grabados, que se han localizado (1953) en algunas de las piedras caídas, representan las hojas de hachas de un modelo usado en Inglaterra entre el 1600 a.C. y el 1400 a.C. y un tipo de dagas con empuñaduras empleadas en Micenas (Grecia) entre el 1600 a.C. y el 1500 a.C.

Cualquiera que halla sido la función del santuario a lo largo de la historia, la forma de la circunferencia permite suponer que el espacio utilizó los valores universales de dicha forma, tales como la representación del cielo, o del universo.

Sin embargo se trata de una obra de arte prehistórico, en la que la intención por utilizar la forma de la circunferencia para crear un espacio, es completamente clara. De este modo la forma y su significado adquiere una relación estrecha de carácter universal, que se da sin importar la época, la cultura o la región de la que se trate.

BECKER Udo, Enciclopedia de los Símbolos ed. Herder 1999

COOPER J. C. El Simbolismo Lenguaje Universal Ed. Lidiun 1988

MARTÍN Luis G. The Atlas of Mysterious Places ed Debate, Barcelona 1993

NOUGIER Louis René, Arte Prehistórico ed. Lidiun, 1997

## 1.2 EL PANTEÓN DE ROMA

No es sino hasta la civilización del pueblo Romano, en que es construida la primera gran estructura de forma esferoidal. Ninguna civilización anterior a ésta había construido domos tan grandes y perfectos, que sirvieran de inspiración para las obras medievales y para el arte renacentista.

Considerado como la primera obra arquitectónica en la que la plasticidad y la expresión humana dan forma a colosales espacios interiores, la cúpula del panteón de Roma es la antecesora de las bóvedas del arte cristiano.

Esta obra de gran majestuosidad y belleza, se ha conservado hasta nuestros días en un estado casi perfecto, tal vez debido a que desde la antigüedad ha sido habilitado para funcionar como iglesia.

La media naranja de la bóveda tiene una abertura redonda en su parte alta, por donde penetra la luz, y está construida con nervios y arcos de ladrillo, rellenos de hormigón. Esta gran obra de la construcción Romana, construida por Apolodoro de Damasco, en tiempo del emperador Adriano, se puede considerar como el modelo del que aprendieron los arquitectos del renacimiento. En ella basó sus proyectos Brunelleschi, el autor de la primera cúpula moderna, del domo de Florencia.

La monumental cúpula semiesférica de 43 metros de diámetro, descansa sobre un muro circular de algo menos de 8 metros de espesor en su base. De este modo se trata de una construcción que siendo masiva en su base, se aligera a medida en que cobra altura, hasta llegar a un gran óculo de 9 metros por donde penetra la ventilación y la luz.

Lo más extraordinario del panteón de Roma, es el hecho de haber sido el primer edificio en el que aparece el moderno concepto de la arquitectura como arte creador de espacios interiores.

Cabe mencionar que la arquitectura Griega estaba concebida de una manera muy diferente, casi para ser vivida y admirada desde el espacio exterior.

El panteón de Roma crea un espacio interior en el que el pueblo se reúne para comulgar con los dioses, en una nueva forma de interpretar los rituales religiosos, en la que se busca el aislamiento del cosmos exterior. Tanto la altura del espacio interior de la cúpula, como el diámetro de la pared circular de la planta, son de cuarenta y tres metros

La atmósfera religiosa que crea en su interior la forma esferoidal, dio origen a una nueva sensibilidad arquitectónica, la cual fue adoptada por el cristianismo, para la construcción de sus templos.

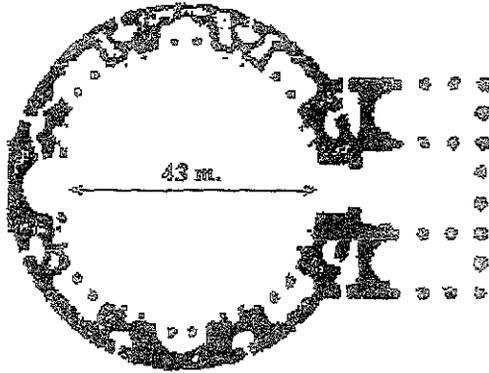
No es extraño el que el panteón de Roma, sea el único templo Romano que ha funcionado como Iglesia.

Esta morada de todos los dioses, en la que los Romanos pretendieron centralizar la enorme variedad de cultos de todo su imperio, aparece como una síntesis del cielo y de la tierra. Por eso consiste en una planta circular cuya proyección lateral es cuadrada, y la cúpula que cubre su espacio interior.

Las proporciones del panteón son maravillosas, por ejemplo si completamos la forma esferoidal que proyecta el gran domo, se puede apreciar como esta forma geométrica coincide en su parte inferior con el nivel del suelo, creando la sensación de que el espacio interior es el de una gran esfera reposando en un solo punto sobre la tierra.

Panteón de Roma

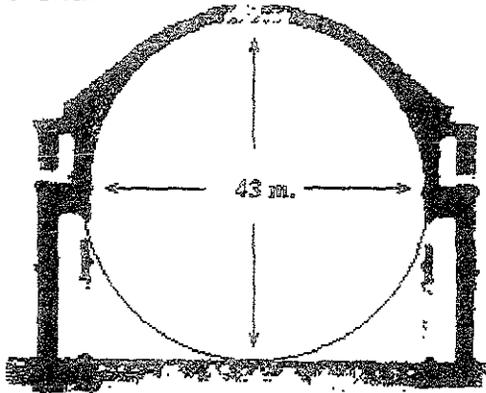
Fig 03



La impresionante bóveda de cuarenta y tres metros de diámetro que cubre al Panteón de Roma, fue construida en el Siglo II por Agripa, y reconstruido por Adriano. Su planta es circular y se integra a un pórtico de forma rectangular. Un muro de contención que rodea a la forma esferoidal de poco menos que ocho metros de espesor, soporta su peso en todas direcciones.

Panteón de Roma

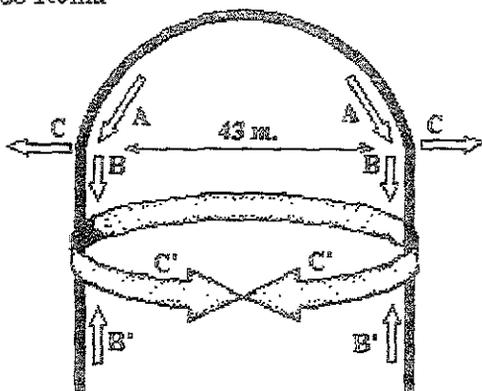
Fig 04



El Panteón de Roma se concibió como una figura geométrica perfectamente equilibrada, en la que se combina el cilindro con la esfera. Cilindro cuya proyección lateral se vincula al cuadrado de lo que resulta la relación entre el cuadrado - tierra y esfera bóveda celeste. Como se puede apreciar una forma esferoidal casi perfecta se podría dibujar dentro su espacio dadas las características geométricas que lo conforman.

Panteón de Roma

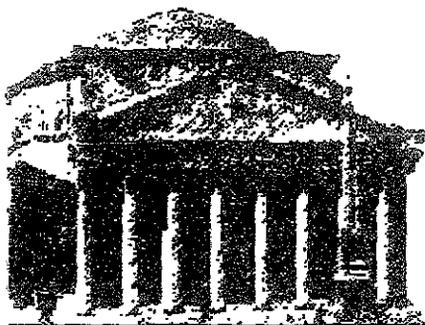
Fig. 05



La descomposición de la fuerza  $A$ , en los vectores  $B$  y  $C$ , es equilibrada por un pesado muro de forma cilíndrica, el cual permite que se generen las reacciones  $B'$  y  $C'$ . Dicho muro prácticamente abraza a la forma esferoidal evitando que esta se abra de su base. Cabe destacar que la cúpula está formada por casetones cuadrados, unidos entre si para darle la forma al gran domo.

Panteón de Roma

Fig. 06



El Panteón de Roma construido en el Siglo II, tiene la cúpula más antigua en la historia de la arquitectura. Gracias a su dimensión y su forma esferoidal pudo ser adaptado para funcionar como iglesia, y en su interior se puede apreciar los antecedentes que dieron origen a las grandes bóvedas del arte bizantino, y posteriormente a las cúpulas del renacimiento. De su grandiosidad da idea el hecho de que su claro, no fue superado por ninguna otra construcción sino hasta el siglo XIX.

Los casetones de la cúpula considerada como la más perfecta de la antigüedad, se van reduciendo de tamaño a medida que avanzan hacia el centro, acentuando la forma circundante con el efecto de la perspectiva.

Una abertura circular de nueve metros localizada en su parte más alta, deja entrar la luz, que a lo largo de las horas va barriendo los coloreados mármoles del suelo.

El conjunto en el que se integra el edificio con la cúpula, representa la imagen del mundo, ya que el elemento esferoidal reposa sobre el elemento cuadrado, lo cual nos remite al simbolismo casi universal según el cual el cielo cubre mientras la tierra soporta, pero también según el cual el cielo es redondo y la tierra es cuadrada.

Con un carácter poco definido, cuya fachada de tipo griego se empotra en la forma esferoidal y cilíndrica de su estructura, esta edificación guarda grandes valores estructurales, y se dibuja en el paisaje urbano como testimonio de la capacidad que tubo el pueblo romano para la ingeniería.

Las construcciones dolménicas, las tumbas micénicas, diversos templos rupestres, de la India a Corea, cuentan con la significación del domo cósmico. Los egipcios representaban al cielo con la forma de la diosa Nut. La cúpula bizantina, y la musulmana tienen el mismo valor.

Cabe destacar que el pueblo Romano es por su ingeniería pionero de múltiples tecnologías, algunas de las cuales han perdurado a lo largo de los siglos, y es el domo del Panteón de Roma una expresión estructural, cuyo claro de cuarenta y tres metros puede ser considerado como una de las maravillas de la antigüedad.

Con esta obra de Agripa construida en el siglo II y reconstruida por Adriano, da inicio el desarrollo de las estructuras de forma esferoidal que cubrirán las techumbres de iglesias y templos por todo el mundo, representando la bóveda celeste.

BROOKE Steven, *Views of Rome*. ed. Rizzoli International Publications 1995

CANTÚ Delgado Julieta de Jesús, *Historia del Arte*, ed. Trillas México 1996

FERNANDEZ Gómez Margarita, *Ingeniería en la Época Clásica*, ed. Valencia, Barcelona 1994

### 1.3 LA IGLESIA DE SANTA SOFÍA

La intención de generar grandes espacios interiores para la celebración del culto religioso, obliga a los arquitectos medievales a aligerar y elevar el concepto de cúpula romana.

Un majestuoso ejemplo de esto es la iglesia de Santa Sofía de Constantinopla, de las joyas de la arquitectura bizantina, localizada en Istanbul, Turquía.

Edificada primero por Constantino y reconstruida por Justiniano, la gran bóveda que logra los treinta y un metros de claro, se eleva apoyada únicamente sobre cuatro pilares, los cuales por una reacción natural que se presenta en este tipo de estructuras tienden a abrirse, pero son equilibrados mediante otras medias cúpulas que contra restan el peso.

Procopio, el historiador de la época, en su libro que trata de los edificios de Justiniano, explica la parte que en ellos tubo el monarca y las consultas que diariamente le hacían los directores de la obra.

La iglesia se construyó solamente en cinco años, entre 532 d.C. y 537 d.C. Construir cinco años una obra de esta magnitud solamente fue posible gracias a los medios económicos puestos a su disposición, por los gobernantes de la época.

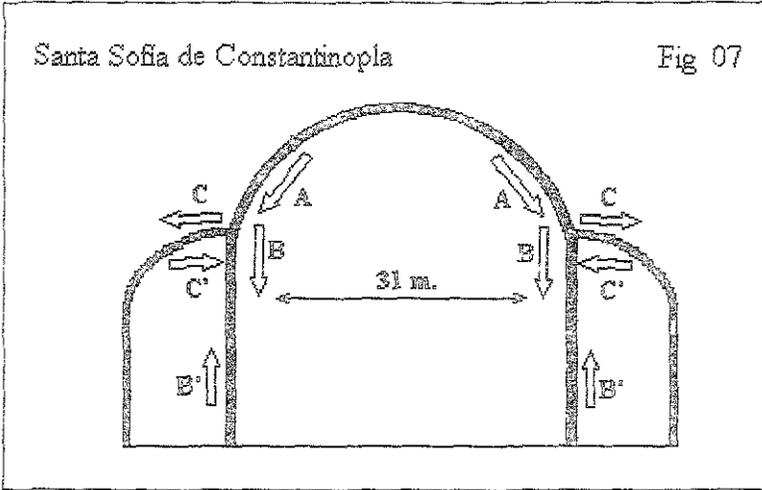
Se trata de un nuevo sentido artístico diferente al espacio creado por los romanos, el cual permite mayor abertura a la luz, pero requiere del ordenamiento de todas las partes posibles de la edificación con el único fin de contener el peso de cúpula central, logrando extraordinarios aceptables treinta y un metros de diámetro.

Pocos años después de haber sido construida, la bóveda se derrumbó por completo, y fue reedificada por un sobrino de Isidoro, quien había heredado la pericia del maestro.

Esta bóveda está inscrita en un gran cuadrado y sostenida por cuatro pechinas en los ángulos, sobre cuatro pilares, lo cual constituye la principal innovación de la arquitectura bizantina y lo que hace famosa a esta cúpula, por que se apoya únicamente sobre cuatro puntos, y no sobre una ancha pared circular, como la referida del panteón de Roma, o bien la de las salas de las termas Romanas.

Santa Sofía de Constantinopla

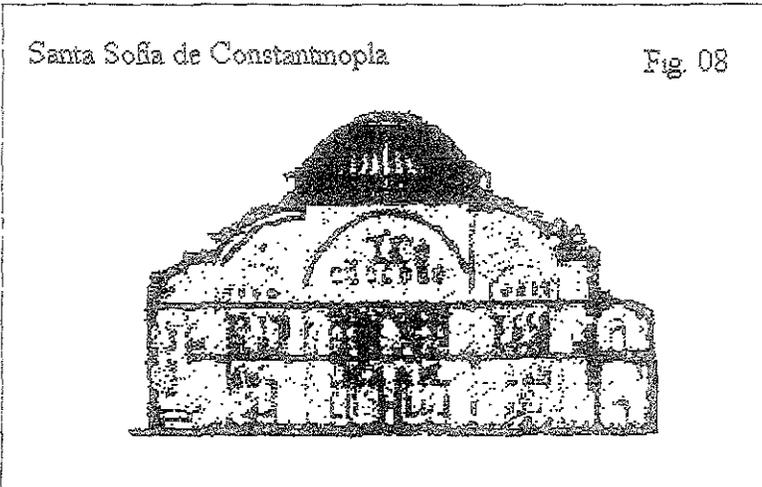
Fig 07



Como resultado del empuje vertical de la bóveda (A) las resultantes (B y C) son equilibradas por elementos estructurales de contra peso y apoyo. En su sentido vertical cuatro columnas (B') soportan el peso de la cúpula, mientras tanto en su sentido horizontal, otros elementos estructurales (C') son apoyados en la base de la bóveda para contrarrestar su empuje. Una maravilla del arte y la arquitectura bizantina, sobre todo si se considera que fue construida en el siglo VI d.C.

Santa Sofía de Constantinopla

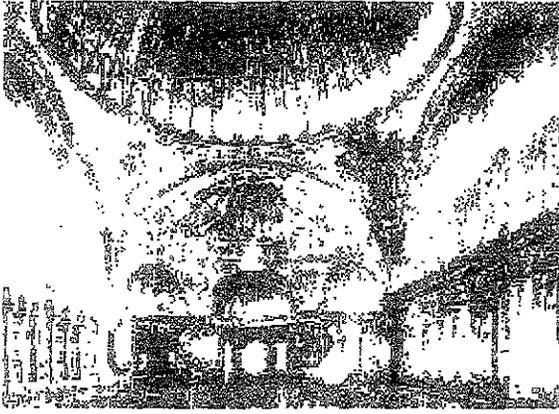
Fig 08



La gran nave central es rodeada por otras naves de menor tamaño, las cuales permiten la estabilidad de la estructura trabajando a modo de contrafuertes. Al integrar el elemento central con los elementos circundantes sobre la misma techumbre, se logra mayor superficie interior, y un espacio lleno de magnificencia y esplendor, sobre todo si se considera la riqueza de los materiales y mármoles que se pusieron a su disposición para hacerla más bella.

Santa Sofia de Constantinopla

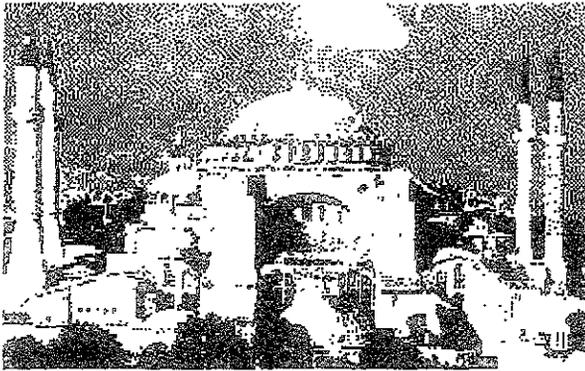
Fig. 09



El conjunto de formas esferoidales dentro de la iglesia de Santa Sofia, es una de las primeras representaciones de la bóveda celeste. Lo cual se comprueba por su decoración con motivos celestiales, y aun que los Turcos destruyeron parte de dichos motivos religiosos, respetaron en las bóvedas angulares, la presencia de cuatro serafines con las alas múltiples.

Santa Sofia de Constantinopla

Fig. 10



Vista general de Santa Sofia de Constantinopla localizada en la ciudad de Istanbul, Turquía. Imponente conjunto arquitectónico del Sultán AHAMET en el periodo otomano, siglo XVII d.C. Esta obra es considerada como la mas importante y famosa del arte bizantino. Fue edificada por Constantino y remodelada por Justiniano 532-535 d.C. Su bóveda de 31 m de diámetro, es una de las primeras estructuras de forma esferoidal construida en la historia de las civilizaciones antiguas.

Santa Sofía había costado inmensos tesoros Justiniano recomendaba a los gobernadores de las provincias que le facilitaran los mármoles y los materiales más preciados.

Mientras las cúpulas romanas se sientan en pesados muros de forma cilíndrica, la gran semiesfera de Santa Sofía, se mantenía en el aire, sobre sus arcos y pilares, por la compresión que contra ellos ejercen las bóvedas adyacentes, unos grandes nichos que permiten la estabilidad estructural.

Así recibe el empuje horizontal en dos de sus lados, mientras que en los otros dos, grandes arcos actúan a modo de contrafuertes

Un historiador moderno, después de comparar las grandes diferencias entre la sencillez de las obras de los antiguos griegos, respecto al derroche de riqueza de los constructores imperiales de Santa Sofía, y éste concluye que los primeros prefirieron la belleza del mármol blanco para sus monumentos, como el Partenón de Atenas, mientras los segundos hicieron uso de los mosaicos y de los mármoles más exquisitos, empleados sin duda con el mejor gusto.

Exteriormente, la gran cúpula central no demuestra la importancia de la obra, pues está disimulada por un tambor cilíndrico hasta una tercera parte de su altura; en este tambor se abren una serie de ventanas que dan la vuelta a la zona inferior del gran casquete esférico. Dichas ventanas sirven para iluminar la iglesia y al mismo tiempo, para descargar de peso la semiesfera de la cúpula.

A fin de aligerar el peso de la cúpula, los hábiles arquitectos de Santa Sofía adoptaron el sistema de construirla de tejas blancas y esponjosas fabricadas en la isla de Rodas, siendo estas tan ligeras que se necesitaban cinco de ellas para igualar el peso de una teja ordinaria.

Nótese los pesados elementos verticales en los que se apoya el gran casquete esférico (Fig. 10)

En el interior, en cambio, la novedad no puede ser mayor; la vista se pierde en lo alto, hundiéndose en aquel gran espacio; no es la impresión de reposo y estabilidad del Partenón de Atenas, sino un mágico equilibrio como si la cúpula estuviera misteriosamente detenida desde el cielo.

Los dos arcos laterales estaban cerrados por las galerías del segundo piso, desde donde la corte y los altos funcionarios presenciaban las ceremonias que se celebraban en el grandioso templo. De todos modos, estas dos paredes que cierran los arcos no sostienen el peso de la cúpula, y están llenos de aberturas.

Toda la carga de la gran semiesfera gravita sobre los cuatro pilares, y así no es de extrañar, por tanto, que los arquitectos de Justiniano, los construyeran con especial cuidado. "Estos pilares según describe Procopio, estaban formados por piedras cuadradas, duras por naturaleza, labradas con mucho arte y unidas, no con cal viva ni con cemento, sino con láminas de plomo que se introducen por todos los intersticios"

Los mosaicos que la decoraban debían de hacer más impresionante todavía, aquel gran casquete esférico lleno de colores; las figuras angélicas y la imagen del redentor, fueron destruidas por los Turcos. Solamente en las bóvedas angulares de las pechinas se toleró la presencia de cuatro serafines con alas múltiples.

Las delicadas proporciones de esta cúpula, cuya clave esta suspendida a una altura de cincuenta y cinco metros sobre el nivel del suelo, la convierte en una de las mayores glorias de la arquitectura del arte bizantino.

La búsqueda por cubrir el espacio con formas esferoidales apoyadas en lo alto de las iglesias, crea la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías para evitar que estas formas esferoidales se colapsen. Así como la de generar espacios amplios, que permitan la formación de atmósferas propias para la actividad religiosa.

HARRY N. Abrams History of Art, ed. Inc. New York, USA 1991  
JEANNINE Auboyer, Historia del Arte, ed Salvat México 1979

## 1.4 LAS BÓVEDAS DE CRUCERÍA EN EL ARTE GÓTICO

El gótico llega al mundo, no como una creación intelectual o mística, sino como una revolución técnica en la forma de concebir el espacio y los sistemas estructurales. Dicha revolución técnica parte de las escuelas románicas regionales, de este modo las regiones donde el estilo gótico francés llegó a su perfección fueron Normandía y la Isla de Francia, el territorio de dominio real de los alrededores de París.

El arte románico y el estilo gótico, son dos estilos que observados en conjunto, son como la iniciación y la culminación de una original y exquisita creación del arte medieval.

No es de extrañar, pues, que el arte de construir, que es lo más representativo de una sociedad y un régimen, se desarrollara en los alrededores de la capital y en el corazón de la monarquía. Cabe mencionar que la arquitectura gótica se formó en el momento en que triunfa la monarquía sobre el feudalismo.

Desde su lugar de origen se extendió rápidamente a todas las comarcas francesas, y a mediados del siglo XIII le vemos posesionado de Alemania y empezando a introducirse en España. Pero en Francia puede considerarse formado desde finales del siglo XII, y aun existen tanteos de soluciones góticas desde comienzos del mismo siglo.

La estructura es un sistema en el que arcos y diagonales se apoyan entre sí, y en el que los empujes horizontales son equilibrados con arbotantes y contrafuertes, localizados en el exterior de la construcción.

Así mismo en el estilo gótico el carácter esencial de la construcción, es un tipo especial de bóveda por arista en ojiva, por lo cual se ha llamado también estilo ojival.

Sin embargo las bóvedas por arista, como cascarones de piedra sostenidos por arcos, no son una novedad exclusiva del estilo gótico, pues ya se usaban en el periodo románico, y eran tradicionales en los edificios clásicos.

Pero en el estilo románico las bóvedas por arista no son articuladas sino sólidas, y su empuje contra los muros se amortigua por el simple peso del muro.

Para cubrir una planta cuadrada o rectangular, los romanos adoptaron a veces el sistema de lanzar arcos diagonales de ángulo a ángulo, rellenando después el espacio intermedio con una maza de hormigón, esto a fin de hacer una bóveda monolítica.

Sin embargo en el estilo gótico, los arcos torales y diagonales, son sueltos y con elasticidad propia, y sobre ellos descansan, aun que sin formar un solo cuerpo, los pedazos de bóveda también capaces de soportar esfuerzos estructurales.

Por lo tanto los arcos vienen a desempeñar el papel de cimbra permanente, cargando todo el peso y empuje en los ángulos de apoyo. Dichos ángulos son nodos estructurales que requieren de excelentes apoyos, para recibir la pesada carga del cuadrado de la bóveda.

En el interior, los haces de arcos de las bóvedas, se apoyan en los pilares, como un manojo de ramas sobre un tronco.

Además la bóveda romana por arista, se adaptaba principalmente a una planta cuadrada o rectangular, mientras que la bóveda gótica puede emplearse en toda clase de plantas, hasta en las triangulares y en forma de trapecio.

Una vez que el peso de cada uno de estos arcos de las bóvedas de crucería es apoyado sobre el elemento de soporte vertical, el empuje horizontal es equilibrado por el arco contrario, que al estar localizado de manera simétrica, es posible oponer fuerza contra fuerza.

En el arte románico, la estabilidad estructural era distinta, en primer lugar, la bóveda por lo común, era cilíndrica, y tenía un empuje uniforme a lo largo del muro, empuje que se equilibraba con el propio peso del muro, a lo más reforzada con machones o pilastras exteriores, como puntales.

En una palabra, la mecánica de la arquitectura clásica, y de los tiempos románicos, describe un funcionamiento de soporte, esto es del sistema de oponer peso contra fuerza, mientras la mecánica gótica es ya una estructura que permite oponer empuje contra empuje.

Por esto una iglesia gótica es un sistema tan complicado y tan perfecto, en el que no se puede tocar una parte del edificio sin alterar a la estructura en su conjunto.

De alguna manera, cualquier sistema de barras, nodos, y elementos de cubierta, requiere transmitir los esfuerzos estructurales, por lo que la destrucción de cualquier elemento, puede ocasionar que otros elementos también fallen.

Por ejemplo la destrucción de un contrafuerte en el gótico podría ocasionar que el peso del arco correspondiente a dicho elemento no encontraría apoyo, así como los otros arcos diagonales que concurrían al mismo punto.

Sin embargo con las estructuras del periodo gótico, es posible abrir inmensos ventanales sobre los arcos que separan las naves laterales de la nave central, ventanales que son muy necesarios en regiones, como Normandía e Isla de Francia, donde la luz escasea gran parte del año.

Los domos en el arte gótico recibe el nombre de bóveda de crucería, dada la manera en que se desplantan los elementos de soporte, los cuales permiten una adecuada estabilidad estructural en función de las secciones que se generan al cruzar el espacio. Como se sabe, un cuerpo con elementos diagonales, adquiere mayor estabilidad estructural.

En las construcciones de tres naves, la bóveda central es mucho más alta que la de las naves laterales, puesto que ya no hay necesidad de valerse de estas para contrarrestar su empuje, lo cual puede lograrse con contrafuertes exteriores. Esto evita la existencia de las galerías altas que encontrábamos en las iglesias románicas.

Se podría hablar de que las estructuras del periodo gótico, no podían modificarse tan fácilmente, pues cada elemento debió cubrir funciones estructurales, independientemente de la belleza o la plasticidad de la obra. Estilo artístico europeo con unos límites cronológicos que oscilan entre aproximadamente el año 1140 y las últimas décadas del siglo XVI, según las áreas geográficas

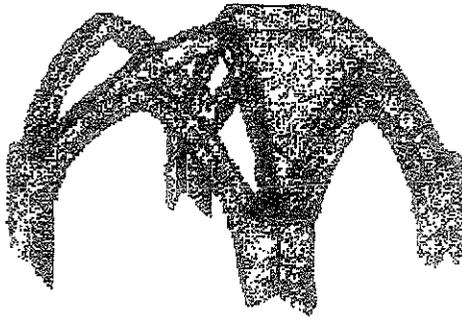
El término gótico fue empleado por primera vez por los tratadistas del renacimiento, en sentido peyorativo, para referirse al arte de la edad media, al que ellos consideraban inferior y bárbaro (godo, de ahí el término gótico) comparado con el arte clásico.

En el siglo XIX se produjo una revalorización de este periodo debido a movimientos historicistas y románticos. El gótico apareció a continuación del románico, a lo largo de la baja edad media, y hoy día se considera uno de los momentos más importantes desde el punto de vista artístico en Europa.

El estilo gótico encontró su gran medio de expresión en la arquitectura. Surgió en la primera mitad del siglo XII a partir de la evolución de precedentes románicos y otros condicionantes teológicos, tecnológicos y sociales.

Bóvedas de Crucería y Elementos de Soporte

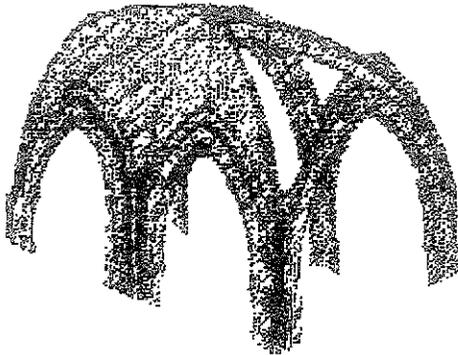
Fig. 11



A principios del siglo XII los constructores inventaron la bóveda de crucería, que consiste en el cruce de dos arcos o nervios apuntados, que conforman una estructura resistente sobre la que se colocan los ligeros elementos de relleno que configuran la bóveda. Este sistema además de ser ligero y versátil, permite un gran número de posibles combinaciones arquitectónicas

Bóvedas de Crucería y Elementos de Soporte

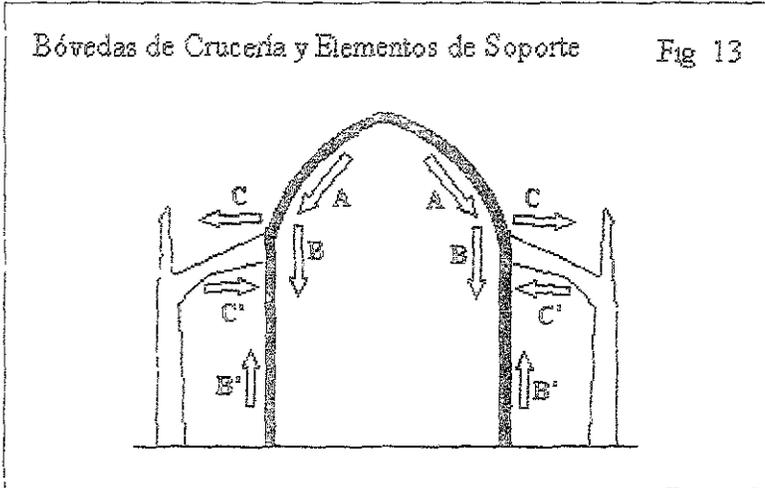
Fig. 12



Aunque las primeras iglesias góticas adoptaron una gran variedad de formas, la construcción de las grandes catedrales del norte de Francia en la segunda mitad del siglo XII se benefició de las ventajas de las bóvedas de crucería. En este caso se ilustra una bóveda de crucería partiendo de una planta de forma rectangular.

Bóvedas de Crucería y Elementos de Soporte

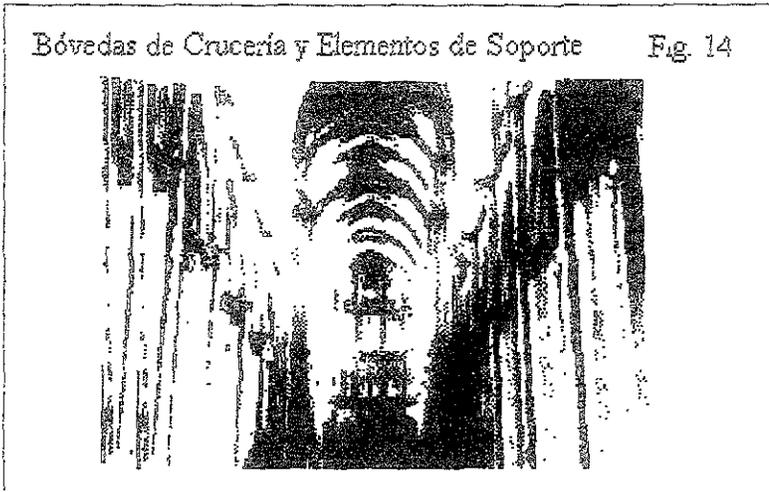
Fig. 13



Con las bóvedas de crucería se pueden concentrar los empujes denominados A en los vértices de la techumbre, cuyos vectores denominados B y C encuentran las reacciones B' y C' gracias a elementos sustentantes, que podían ser pilares o columnas, pero también el sistema de estribo y arbotante, un arco que transmite los esfuerzos tangenciales hacia un contrafuerte situado en el exterior del edificio, el cual es coronado por un pináculo.

Bóvedas de Crucería y Elementos de Soporte

Fig. 14



Como consecuencia de la nueva tecnología, los gruesos muros de la arquitectura románica pudieron ser reemplazados por ligeros cerramientos con ventanales que permitieron la aparición de la vidriera y alturas insospechadas. En este caso se ilustra el interior de la catedral de Amiens en Francia, construida entre los años de 1220 y 1280.

La arquitectura gótica perduró hasta bien entrado el siglo XVI en diversos países europeos como Inglaterra, mucho después de que el estilo renacentista hubiera penetrado en otros campos artísticos. Las mayores realizaciones del gótico se manifestaron en el terreno de la arquitectura religiosa.

En contraste con la arquitectura del románico, cuyas características esenciales son los arcos de medio punto, las estructuras macizas con escasos vanos y las bóvedas de cañón o arista, la arquitectura gótica empleó el arco apuntado, agujas, chapiteles y gabletes, reforzando el sentido ascensional que pretende transmitir el edificio, amplios vanos con tracerías caladas para conseguir la máxima luminosidad y estructuras reducidas al mínimo. Todas estas cualidades estilísticas fueron posibles gracias a las innovaciones constructivas, especialmente a la aparición de la bóveda de crucería.

Las iglesias medievales poseían bóvedas muy pesadas, que obligaban a disponer muros gruesos y con pocos ventanales para soportar sus empujes. Con la bóveda gótica los edificios pudieron adoptar formas variadas

El objetivo prioritario de la organización exterior de la catedral gótica, con sus arbotantes y pináculos, fue contrarrestar el peso de las bóvedas. En Francia, durante la primera mitad del siglo XII, la bóveda de crucería apareció esporádicamente en cierto número de iglesias.

DERIJ Carlos, Arte Gótico, ed [www.Monografias.com](http://www.Monografias.com) demand@ciudad.com arq USA 1999  
GRODECKI, Louis The Gothic Architecture, ed Electa/Rizzoli N Y. 1977

## 1.5 LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA DE LA FLOR

En un periodo en el que la estructura fue lo predominante, las formas arquitectónicas simplemente quedaron como resultado y no como creación, sin embargo al llegar los aires renovadores de nuevas corrientes artísticas, la forma esferoidal vuelve a surgir como una necesidad por contener dentro de su propio misticismo, el espacio propio para la actividad religiosa.

Al gusto por las formas que usaron las civilizaciones más antiguas, y a la multiplicidad de obras que se crearon siguiendo los cánones de los griegos y de los romanos, se le llamó renacimiento. Renacimiento que se da principalmente en las bellas artes como la arquitectura, la pintura y la escultura.

Dicho renacimiento surgió casualmente en el momento en el que el mundo occidental lograba grandes descubrimientos geográficos, y que con el conocimiento de la pólvora y la brújula, pudieron extender sus dominios hacia los continentes de América y de Oceanía.

La exquisita belleza plástica que representa el renacer de la pintura, escultura y arquitectura, tuvo su desarrollo más importante en Italia durante los siglos XV y XVI extendiéndose más tarde por Bélgica, Francia, Alemania, Inglaterra y España. Corría entonces por el mundo un aire renovador.

Habían terminado los tiempos de inseguridad y miedo de la vida en los castillos. Todo podía ahora comunicarse y darse a conocer en un mundo que ya no resultaba tan hostil.

Los tiempos del renacimiento ofrecieron dos aspectos singulares en lo que respecta a la obra artística.

En primer lugar, los artistas plásticos solían ser hombres interesados en el progreso de la cultura, por lo que podían dominar varios oficios, y en segundo lugar la riqueza que la industria, el comercio y la banca, brindaron a muchos señores de las ciudades, la posibilidad de representar el noble papel de ser protectores de la cultura y el arte.

Por ejemplo Miguel Ángel Buonarroti, fue escultor, pintor, arquitecto y además poeta. Rafael Sanzio fue pintor y arquitecto, Leonardo Da Vinci, el genio mayor de la época, fue escultor, pintor, dibujante, arquitecto, urbanista, matemático e inventor.

Con las innovaciones propias de cualquier nuevo sistema estructural para construir formas esferoidales, Santa María de las Flores, también llamada el Duomo, es sin duda el edificio más importante de la ciudad, y uno de los más bellos de la arquitectura renacentista, pues cuenta con la primera cúpula moderna, que en su original estilo, marca el inicio de una nueva época en las ciencias y en las artes.

Si la población de la época de Miguel Ángel y Leonardo Da Vinci buscó un renacimiento en todos los cánones de la vida, Santa María de la Flor es la obra arquitectónica de Brunelleschi, que rompe con las rígidas formas esferoidales del

gótico, para retomar la plasticidad y el volumen de las cúpulas de la antigüedad, pero sin duda con mucho mayor sentido de la proporción y conocimiento de la tecnología.

Al comenzar el siglo XV la ciudad de Florencia había conseguido imponer su hegemonía sobre la Toscana, desde el alto valle de Casentino

La arquitectura que se había resistido a las innovaciones del renacimiento, se conservaba gótica, pero de una especie de gótico híbrido, como el que había empleado Giovanni Pisano en Campo Santo de Pisa, el cual es gótico sólo en las formas de los elementos, pero revestido de mármoles y ordenado con otras proporciones, más al estilo del gótico francés, que dominaba en todo el continente Europeo.

La obra más importante que se ejecutaba en Florencia, por entonces era la catedral a la Madre de Dios, con el título de Santa María de la Flor.

La catedral de Florencia, si no fuese por la cúpula de Brunelleschi, solamente sería un basto edificio, gris y frío por dentro, decorado de mármoles en sus fachadas exteriores, pero monótonas y casi sin plasticidad, ni expresión.

La cúpula de Filippo Brunelleschi, no solamente vino a engrandecer la catedral de Florencia, es a su vez un símbolo indiscutible del renacimiento, y es una de las obras del espíritu más universal que halla construido la humanidad.

Hasta hace poco se había aceptado sin discutir la tradición, recogida por Vasari, de que Brunelleschi fue a buscar inspiración para esta obra, a las antiguas cúpulas romanas y que en sus viajes para el estudio de las ruinas había encontrado el secreto de construir la cúpula según el sistema de los antiguos.

Esta teoría era excelente para adular el arte romano y hacer converger la obra de Brunelleschi al mismo movimiento de restauración de la antigüedad, que se manifestaba no solo en las otras artes, sino en todos los ordenes de la vida.

De este modo se citó como modelo para la cúpula de Florencia, el panteón de Roma, pero la semejanza entre las dos cúpulas solamente estriba en las dimensiones. Aun que ambas formas esferoidales tienen casi el mismo diámetro, el sistema estructural es completamente diferente.

La cúpula del panteón de Roma es una estructura extremadamente pesada, que se empotra en un enorme muro cilíndrico, el cual la abraza y trasmite los esfuerzos directamente a la cimentación de la estructura.

Por su parte, la cúpula de Florencia subdivide su peso, para dar menos empuje, con una cúpula interior más baja y una cúpula externa que, peraltándose en arco apuntado, sirve de contra fuerte a la cúpula interior.

En efecto las cúpulas semiesféricas tienden, debido al peso de su centro, a hundirse, de forma en que sus vértices tienden a abrirse hacia fuera, en cambio las cúpulas apuntadas, tienden a abrirse por la cúspide, y consecuentemente, sus bordes ejercen un gran empuje hacia adentro.

Al combinar ambas, Brunelleschi consiguió contrarrestar el empuje horizontal de la cúpula semiesférica con el peso, en sentido contrario de la cúpula exterior de perfil apuntado.

Por primera vez es posible apreciar la belleza de una forma esferoidal erguida en el horizonte, como parte del paisaje natural.

Ninguna forma esferoidal había logrado una plasticidad tan exquisita como la de la catedral de Santa María de la Flor

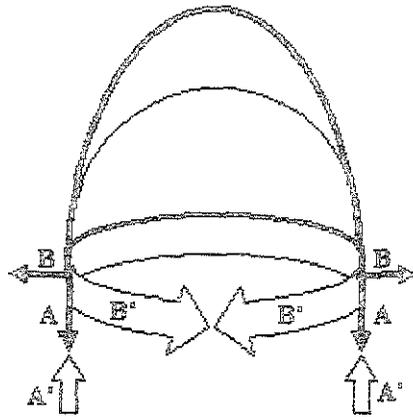
Con su forma ligeramente apuntada, puesta sobre el tambor octagonal, con las simples ventanas circulares, el severo color de sus tejas y la bella linterna de mármol en lo alto, todavía hoy la catedral de Santa María de la Flor, es lo que más caracteriza el panorama de Florencia.

Esta es la más ingeniosa invención de Brunelleschi, que debió de serle inspirada por modelos medievales; ciertamente, es el mismo sistema de las cúpulas románicas cistercienses, que, siendo esféricas en su interior, están dentro de una torre cuadrada u octogonal, más alta, que aparece como una torre exterior, pero que además, por medio de su peso, que actúa como fuerza en sentido vertical, desvía el empuje de la cúpula y hace oficio de contrafuerte.

Además Brunelleschi reunió las dos cúpulas por medio de costillas en los ángulos y cinchó la cúpula interior con grandes anillos de vigas de madera unidas entre sí con barras de hierro.

Santa María de la Flor

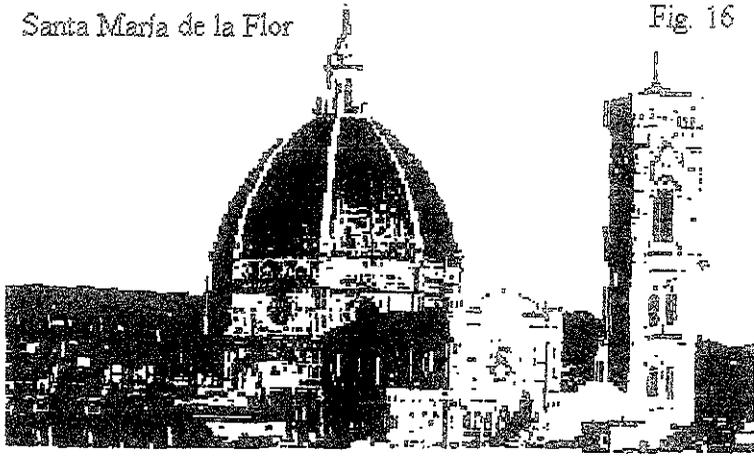
Fig 15



Al alargar la forma esferoidal, Brunelleschi modifica el ángulo de apoyo del gran domo sobre su base, permitiendo la reducción del empuje horizontal denominado B, y por lo tanto la resistencia requerida para el elemento de soporte de dicha fuerza, denominado B'. Brunelleschi, que había estudiado el problema en las numerosas cúpulas de la arquitectura oriental, lo resolvió construyendo una cúpula interior esférica, y otra exterior más alta, que, peraltándose en perfil de ojiva, hacía de contrafuerte de la primera.

Santa María de la Flor

Fig. 16



Santa María de las Flores, de Florencia, fue empezada su construcción en el año de 1274, por Arnolfo di. Sin embargo al llegar el año 1440, la cúpula, que abarcaba un ancho de tres naves, con un diámetro de 42 metros, seguía inconclusa. Para terminarla, se abrió un concurso, que lo ganó el arquitecto Felipe Brunelleschi (1377-1446).

La combinación de sistemas en el que las fuerzas resultantes entre dos cúpulas se equilibran entre sí, es lo que constituye la verdadera invención de la cúpula de Filippo Brunelleschi.

Para la construcción del domo de Santa María de la Flor, se tuvieron que emplear materiales ligeros, ya que de lo contrario, ni el tambor de forma octogonal que contiene los empujes horizontales de su base, ni el peso que ejerce sobre su superficie, la doble cúpula, hubieran logrado mantenerla estable.

Brunelleschi introdujo también el sistema de construirla sin cimbras, tan sólo con un ligero castillo de madera para que pudieran trabajar los operarios, la cúpula se cerraba a medida que iba subiendo, y ella misma se daba apoyo. Esto parece ser lo que causó más sorpresa al tiempo de construirla.

Finalmente Brunelleschi no logró verla terminada, y puede decirse que dedicó toda su vida a esta gran forma esferoidal; en el año de 1420 empezó a dirigir los trabajos pero hasta 1445 no se había puesto la primera piedra de la linterna, y Brunelleschi murió al año siguiente. Naturalmente fue enterrado en la catedral de Santa María de la Flor.

Filippo Brunelleschi nació en el año de 1377 y durante su juventud realizó trabajos de relojería y, después, de escultura junto con Donatello, el cual se declaró vencido en una competición de orfebrería entre ambos, para realizar la imagen de Cristo crucificado

Todo lo abandonó para dedicarse a la arquitectura y desarrollar un nuevo concepto de espacio, el que corresponde a la sensibilidad de los tiempos modernos, y una forma clásica que representa a la arquitectura del renacimiento.

Él fue quien descubrió los principios de la perspectiva, genial invención para representar el espacio de tres dimensiones sobre una superficie plana, igual que lo realiza la cámara fotográfica, inventada cuatrocientos años más tarde.

La fecundidad increíble de su invención de la perspectiva que aplicó en sus construcciones arquitectónicas, como método para analizar el espacio, se revela en el hecho de que casi quinientos años, los pintores no concibieron otra forma de representar el espacio tridimensional y esto pese a que la cámara fotográfica era capaz de realizar la misma operación mecánicamente

La proyección de la doble cúpula no responde únicamente a cuestiones de carácter estructurales, así mismo como lo dijera el propio Brunelleschi, su forma es para que resulte más magnífica y turgente.

Es decir, que la finalidad de la doble cúpula, desde este punto de vista, es diferenciar sus proporciones según se trate ya sea de los espacios vacíos del interior, o bien de volúmenes llenos y distribución de masas del exterior.

En efecto, en el interior la cúpula no tiene nervaciones, y los triángulos esféricos, al encontrarse determinan ángulos diedros curvados; de esta forma la cúpula interna coordina las diversas direcciones espaciales de la nave y del tambor octogonal, y las conduce a un profundo vacío, que se fuga en la linterna, de acuerdo con su propia perspectiva.

En el exterior en cambio donde se trata de coordinar la masa, y los volúmenes llenos, los triángulos esféricos, más esbeltos porque aquí son apuntados, aparecen como tensas membranas rosadas, entre el armazón de las nervaciones de mármol blanco, hasta la airosa linterna que corona la cúpula.

Filippo Brunelleschi que había estudiado sistemáticamente la arquitectura romana antigua, no se proponía imitar la antigüedad, simplemente partió de la experiencia que van dejando las obras arquitectónicas a lo largo de los siglos, para idear y dirigir una obra de gran magnificencia y esplendor, considerada como símbolo indiscutible de la época del renacimiento

A medida en que se va comprendiendo mejor el sentido de la estructura, se advierte que el autor uniría a la pasión por las formas.

Para levantar la cúpula de Florencia, Brunelleschi acudió al estudio de las colosales obras de la antigua civilización romana, y de las cúpulas bizantinas, con lo que produjo una obra original en todos sus sentidos.

León Bautista Alberti, en su Libro de pintura dedicado a Brunelleschi, dice: "Quien antes que tu Felipe arquitecto, se atrevió a construir de tal dimensión estructuras erguidas al cielo, anchas para poder cubrir con su sombra a todas las gentes Toscanas, y ejecutada sin ayuda de cimbras, ni maderaje, con tal artificio que, si yo entiendo bien, parece tan increíble a los de ahora, como ignorado a los antiguos"

Pero ahora lo que da valor a la cúpula de Brunelleschi no es su magnitud, sino su belleza. Vasari, al verla erguirse sobre la ciudad, escribe un siglo más tarde: "Parece una nueva colina que hubiese nacido en medio de las casas; las graciosas colinas Toscanas de los alrededores la reconocieron enseguida como su hermana"

Así se indica la admirable compenetración de esta obra arquitectónica con el ambiente que la rodea: ella no puede ser sino florentina.

Es una de las obras más universales en espíritu que ha construido la humanidad, disimulando su volumen por el gesto gracioso de su perfil y una elegancia natural que sólo Florencia podía producir.

De estas expresiones artísticas y tecnológicas, la ideada por Brunelleschi permite la mayor semejanza a una esfera, pero con las variaciones que le dan el carácter humano, y que la engrandece como una creación del renacimiento para la posteridad.

Al analizar la evolución de la forma esferoidal desde las civilizaciones más antiguas como el Panteón de Roma, hasta el renacimiento en obras como la catedral de Santa María de la Flor, es posible observar diversas expresiones artísticas y tecnológicas, cuya finalidad es la de llevar a la práctica la forma esferoidal. Forma geométrica difícil de construir, pero con grandes valores de misticismo y espiritualidad

En dicha evolución, las bóvedas del renacimiento son las que alcanzan la mayor exquisitez, no solamente por su belleza, así mismo por su desarrollo tecnológico.

Se podría decir que dicho desarrollo tecnológico principia en la época romana, con sus pesados elementos de soporte estructural y un domo un tanto ligero, y culmina en el renacimiento, con una forma esferoidal ligera, de forma redonda si es vista desde el interior del edificio, y un tanto alargada hacia las alturas, si es vista por fuera.

CANTÚ Delgado Julieta *Historia del Arte*, ed. Trillas México 1996

DOREEN Yarwood *La Arquitectura en Europa/ Renacimiento* ed. Ceac 1994

FERNANDEZ Gómez Margarita *Ingeniería en la Época Clásica*, ed. Valencia, Barcelona 1994

GARCÍA Martínez Heriberto, *Historia del Arte*, ed Trillas México 1996

GOMBRICH E.H *The Story of Arte*, ed Phaidon USA 1968

## 2 CÚPULAS GEODÉSICAS

El objetivo de tratar de manera más amplia el tema de las cúpulas geodésicas, es por la naturaleza de estas estructuras, que permiten la generación de la forma esferoidal, combinando nodos, barras y elementos de cubierta, procedimiento algo similar al de los esferoides de doble curvatura inversa, pero con un funcionamiento estructural completamente diferente.

Los tiempos modernos han hecho que cambie el sentido de la arquitectura. la sociedad exige que el arquitecto produzca más espacio con menos recursos, que produzca el hábitat de manera comercial, buscando la rentabilidad de la inversión más que la expresión artística. Las estructuras geodésicas ofrecen todo esto, y sin que la obra sea una expresión plástica, con grandes valores nacidos de los humanos, estas estructuras son simplemente el resultado de combinar la forma esferoidal con figuras triangulares

Dado que se trata de una invención desarrollada a mediados del siglo XX, y su incorporación al estado de ciencia dio origen a miles de estructuras geodésicas construidas por todo el mundo en unas cuantas décadas, se trata de manera detallada algunos puntos de interés acerca de su inventor.

La siguiente parte trata del procedimiento para construir la forma geodésica, uniendo simplemente barras y nodos al contorno de la forma esferoidal, dicho procedimiento puede variar de un proyecto a otro, por lo que es conveniente conocer el sistema más que seguir las instrucciones de su armado.

Para finalizar este capítulo se presentan algunos ejemplos de estructuras ya cubiertas, con las variaciones y el carácter propio de cada obra. Dicha parte es manejada como elementos de cubierta, dado que la membrana envolvente puede variar considerablemente en función de lo que se requiera para cada proyecto.

### 2.1 LA PRIMERA CÚPULA GEODÉSICA

En el año de 1952, la Ford Motor Company proyectaba construir un edificio, anexo a los talleres de River Rouge en Dearborn, Michigan, U.S.A. Esta obra fue diseñada para contener oficinas, y una gran sala de forma cilíndrica, para exposición y venta de automóviles. En el desarrollo de la obra fue requerido un gran domo translucido de forma esferoidal, que con un claro de 28 metros, permitiera la entrada de luz a la gran sala de exposiciones.

Los almacenes de acero convencionales de la época tenían un peso de aproximadamente ciento sesenta toneladas, lo cual no solamente incrementaba considerablemente los costos estimados, así mismo modificaba las características de la obra desde su cimentación.

Los funcionarios de la Ford, sabían de la existencia del señor Buckminster Fuller, un inventor de estructuras que por una u otra razón, no había podido llevar a la práctica sus proyectos. Al brindarle la oportunidad de que resolviera el problema, el señor Buckminster presentó una estructura octeta de cúpula, forrada de plástico translucido, la cual solamente con ocho y media toneladas lograba cubrir los 28 metros de claro, además de lucir ligera, innovadora y moderna. A la edad de 57 años, el señor Fuller construye por primera vez una estructura geodésica. Estructura que en el año de 1953 es presentada al mundo, con una obra en la que el efecto de la luz solar, a través del curvado panel de triángulos grandes y pequeños era asombroso.

Lo que el señor Buckminster Fuller en su patente de estructuras espaciales denominó como: "*Almacén para Encerrar el Espacio*", se convirtió en una de las más bellas, formas de construir el espacio esferoidal.

## 2.2 EL SISTEMA STOCKADE

El señor Richard Buckminster Fuller nació en Milton, Massachusetts U.S.A. en el año de 1895, y desde muy temprana edad mostró dificultades para aprender geometría, desconcertaba a sus maestros con errores en sus respuestas cargados de conjeturas lógicas. Por ejemplo decía que todo cuerpo cúbico era imaginario, ya que estos se formaban a partir de planos imaginarios, que a su vez se formaban de líneas imaginarias y éstas a su vez se formaban de puntos imaginarios, y que por lo tanto para que un cubo pudiera generar un volumen debería formarse de puntos reales y no de puntos imaginarios.

En 1918 había nacido la hija de Buckminster y Anne Fuller, sin embargo fue una época en la que la influenza pandémica alcanzó a casi todos los hogares norteamericanos, y la familia Fuller no fue la excepción.

Durante largo tiempo su pequeña hija Alejandra padeció los males de la influenza, y débil como consecuencia de este padecimiento, enfermó de meningitis espinal, una de las más temidas enfermedades infantiles.

La pequeña hija de la familia Fuller murió a los cuatro años de edad. La vida del señor Fuller cambió en todos sentidos, renunció a su trabajo en Kelley Springfield Truck Company, y formó una sociedad con el padre de su esposa para fabricar bloques. Buckminster sería el presidente de la corporación y gozaría de los derechos de patente, además del cincuenta por ciento de las utilidades.

El señor Buckminster sabía poco del negocio de la construcción y menos aun de la forma como una corporación industrial debía de dirigirse, pero estaba dispuesto a aprender. Se propuso demostrar al mundo que el invento del señor Hewlett era lo más maravilloso que había ocurrido en toda la historia de construcción de casas. A los 33 años de edad, Buckminster había surtido material para la construcción de doscientas cuarenta casas empleando el sistema Stockade. Los bloques que había inventado el suegro de Buckminster diferenciaban en mucho de los ladrillos convencionales, pues estos eran huecos, tenían dos orificios verticales lo que les permitía reducir su peso, introducir instalaciones, y evitar fallas por cambios bruscos de temperatura. Así mismo al construir los muros con bloques de este tipo, se podían llenar los huecos con hormigón, dando lugar a la formación de castillos ahogados.

La Stockade Company prosperó y tuvieron que abrir más sucursales, para satisfacer la demanda de los bloques. La cuarta de estas fábricas se estableció en Chicago en el año de 1926. Por lo que Buckminster y Anne se mudaron a la gran ciudad de las riberas del lago Michigan.

Al año siguiente nació otra niña del matrimonio Fuller, a la que le pusieron por nombre Allegra, de la palabra italiana que significa alegre, feliz. La nueva vida de la familia Fuller parecía mejorar, pero junto con la alegría recibieron un nuevo golpe, el señor Hewlett había perdido el control del Stockade Building System, y se vio obligado a vender su parte de acciones a una gran firma comercial, a la Celotex Corporation.

La nueva firma decidió que el señor Fuller no era competente para continuar en su cargo y fue despedido, por lo que un día del año de 1927, el señor Fuller se quedó sin trabajo. Mientras la prosperidad del mundo capitalista se veía desbordar por todas partes, el señor Fuller parecía no tener un lugar, o un sitio donde hiciere falta, no sabía si él le había fallado al mundo o el mundo le había fallado a él.

Parecía solamente tener una alternativa, terminar con su vida y dejar que su esposa Anne y su hija Allegra, no sufrieran más carencias económicas, ya que tanto la familia Fuller como el señor Hewlett se encargarían de ello. Pero de pronto encontró la respuesta correcta: lo que Buckminster necesitaba era tiempo para pensar y crear ideas.

Todo hombre podía saber si su fuerza intelectual era valiosa sólo si no hacía otra cosa que pensar durante mucho tiempo. Así fue como un gran filósofo llamado Descartes, más de trescientos años atrás, había dado nacimiento a su genio; se encerró en una pequeña choza durante el invierno, con sólo unos alimentos, una cocina y sus pensamientos. No era ello un misterio, ni un secreto. Si una persona sentía que poseía alguna clase de genio, necesitaba tiempo para considerar las cosas, por grande que fuese el sacrificio.

Así se lo dijo a su esposa, una ama de casa norteamericana dedicada al hogar, con una criatura recién nacida. Querida he decidido no trabajar durante uno o dos años, para dedicarme a pensar, pues debo resolver que puedo hacer en beneficio para la humanidad.

De este modo la familia Fuller se mudó a una vecindad, localizada en los barrios bajos de Chicago. De una u otra manera la familia Fuller conseguía alimentos, mientras Buckminster se pasaba las horas metido en las bibliotecas buscando los últimos adelantos tecnológicos y científicos que le pudieran ser útiles para lograr su cometido.

## 2.3 LA CASA DYMATION.

En el año de 1928, Buckminster había avanzado en una idea en la que fincó todas sus esperanzas, se trataba de una casa de forma cilíndrica, muy adelantada para los materiales que se conocían hasta ese año, sin embargo no solamente ideó su funcionamiento, así mismo se dio a la tarea de patentar planos e innovaciones, para que nadie le robara sus ideas.

Para el mes de mayo de 1928, Buckminster le pidió al papá de su esposa Anne, al señor Hewlett que le dijera a la American Institute of Architecture, que estaba dispuesto a ceder los derechos completos de todas las patentes de su casa 4-D. En ese momento el señor Hewlett era el vicepresidente de la institución, que en esos momentos era el organismo más prominente del ramo en la arquitectura.

Para lo que la institución formada por arquitectos conservadores simplemente contestó, que esas patentes no eran de interés para la institución. Sin embargo la suerte le llegó por otro lado, el señor Fuller recibió una invitación para que exhibiera su moderna casa, en el departamento de muebles de una de las tiendas de departamentos más famosas del mundo, la de Marshall Field and Company, of Chicago. La idea era exhibir un embarque que había llegado de París de muebles modernos de último diseño, dentro de la casa de Fuller. Encantado de que al fin alguien se había interesado por su casa D-4 aceptó la propuesta.

Un experto en publicidad le dijo que su casa era un invento formidable, pero que el nombre casa D-4 era desatinado, a lo que contestó Fuller que se trataba de la cuarta dimensión, algo que las personas podían relacionar con las teorías de Einstein. La casa de Fuller adoptó un nuevo nombre, la Casa Dymaxion. A pesar de la exhibición de la Casa Dymaxion en la gran tienda departamental de Chicago, muy pocos arquitectos o constructores se interesaron en el nuevo proyecto futurista.

El autor de bóveda geodésica, el señor Fuller, no había logrado él existo en ninguna de sus ideas, ni asestado ningún golpe de suerte que le permitiera llevar a la practica sus inventos, pero en medio de la gran depresión que se vivió en los años de 1932 y 1933 en la unión americana, uno de sus admiradores y amigos, un empresario ofreció a Buckminster que invirtiera unos cuantos miles de dólares en cualquiera de sus ideas.

La cantidad que Fuller invertiría, no era suficiente como para echar a andar una constructora de casas D-4, por lo que tenía que pensar en nuevas ideas. Así que se decidió por desarrollar un automóvil con forma aerodinámica, al que llamaría el automóvil Dymaxion.

## 2.4 El AUTOMÓVIL DYMAXION.

Con un motor V-8 ordinario comprado a la fábrica Ford, el automóvil Dymaxion alcanzaba velocidades de hasta 190 kilómetros por hora sin ninguna dificultad. Se habrían necesitado motores tres veces más potentes para realizar la misma hazaña con cualquier otro automóvil de 1933. Buckminster lo había presentido; por fin el triunfo había llegado. Por fin había podido hacer que una parte del mundo futuro fuese dada a conocer en el mundo presente, por fin había logrado adelantarse a su tiempo.

El automóvil de Fuller dejaría atrás a todos los modelos de automóviles existentes en el mundo, convirtiéndolos en historias. De este modo la fábrica de automóviles Dymaxion vendió su primer vehículo al capitán Alford Williams, un conocido aviador norteamericano. Los siguientes clientes serían un grupo de ingleses.

Uno de ellos, el coronel William Forbes Sempill, quien cruzó el Atlántico en el famoso dirigible Graf Zeppelin, y quien pudo constatar el extraordinario desempeño del Auto Dymaxion.

El automóvil de forma aerodinámica que había ideado el señor Fuller, y que era propiedad de capitán Alford Williams, era manejado por un corredor de automóviles llamado Turner. Quien se encargó de presentar la innovadora máquina de la velocidad al coronel inglés.

Los automóviles de la época eran poco aerodinámicos, así que el éxito dependía de crear una nueva forma que presentara menor resistencia al aire. La forma del automóvil que proyectó y construyó el señor Richard Buckminster Fuller, fue similar a un pez, lo cual le permitió un importante incremento en la velocidad, o bien un considerable ahorro de combustible para recorridos similares.

Desgraciadamente en su regreso al aeropuerto de Chicago, el automóvil capaz de levantar grandes velocidades se estrelló de frente contra otro vehículo, ocasionando que Turner y el conductor del otro automóvil murieran, y que el coronel inglés William. Forbes, quedara gravemente herido.

Al día siguiente en los diarios de circulación nacional, apareció la noticia, Dos muertos y un herido, al estrellarse misteriosa nave en las proximidades del aeropuerto de Chicago.

A los pocos días de haber abierto, la fábrica de automóviles Dymaxion se vio obligada a cerrar. El señor Fuller había fracasado nuevamente en su intento por trascender en el mundo del desarrollo tecnológico y la ciencia.

La Phelps Doge Corporation, una industria especializada en productos de metal, contrató al Sr. Richard Buckminster Fuller para que se dedicara exclusivamente de idear nuevos productos. Lugar donde pudo crear múltiples innovaciones tecnológicas, en artículos relacionados con diversos tipos de metales.

## 2.5 LAS UNIDADES DYMAXION

En el otoño de 1940, las fuerzas aéreas del ejército Nazi, atacan las ciudades de Inglaterra, pero gracias al invento del radar, los ingleses pudieron derribar muchos de los bombarderos Alemanes, y evitar su rendición.

En junio de 1941 comienza la invasión de la Unión Soviética. Los Estados Unidos de Norte América requerían concentrar todos sus ejércitos, armamento y logística militar, para frenar la expansión del nazismo.

La guerra fue el motor de la ciencia y la tecnología, cualquier invento podría inclinar la balanza. Los hombres de ciencia estaban dedicados a generar ideas, y el señor Fuller no fue la excepción.

Su contribución a favor de los Aliados consistió en la Unidad Dymaxion, que ahora consistía en una vivienda cilíndrica para campamentos militares. El módulo de metal que contaba con baño, cocina y áreas para dormitorio, fue diseñado para su producción industrial.

En unos cuantos meses se construyeron los cilindros vivienda en distintas partes del mundo, a medida que el ejército de los Estados Unidos de Norte América iba instalando unidades de radar en los lugares estratégicos.

En junio de 1944 se inició la invasión de la Europa de Hitler. Al mismo tiempo las tropas norteamericanas iniciaban la reconquista una a una de las estratégicas islas del pacífico, en poder de los japoneses. Albert Einstein, el gran físico teórico que había abandonado Alemania para vivir en los Estados Unidos, escribió una carta al presidente Roosevelt en la que le indicaba la clase de energía que se podía desprender de la fusión de un átomo de uranio, energía de gran capacidad destructiva, que podría caer en manos de los alemanes.

El desarrollo tecnológico había dado lugar a la creación de la bomba atómica, y en agosto de 1945 la energía liberada tan solo por dos bombas, mató a más de cien mil personas. El 2 de septiembre de 1945 tuvo lugar la rendición del ejército japonés, y con ello la terminación de la segunda guerra mundial.

Las casas Dymaxion que se fabricaron en la Beech Company para el ejército de los Estados Unidos, ahora se podrían fabricar para resolver problemas de vivienda, sin embargo esta idea solamente resultaba interesante para el señor

Fuller, pues para el consorcio industrial era más rentable fabricar pequeños aviones particulares, para los miles de pilotos adiestrados que regresaban a la vida civil.

## 2.6 EL INVENTO DE LAS GEODÉSICAS

Buckminster Fuller a los cincuenta años de edad, no consideraba que hubiere logrado el éxito en su vida de inventos, así que debía descubrir algo realmente valiosos, algo que le diera la fama y la fortuna que durante tantos años había anhelado.

Su inicio en el estudio de las formas geométricas, le permitieron descubrir que el cubo no era una figura estable, mientras la pirámide si lo era, luego entonces había figuras geométricas estables y figuras geométricas inestables dependiendo simplemente de sus características geométricas.

Sin un profundo conocimiento de las estructuras, el señor Fuller comenzó a crear sus propias teorías. Primero describió que un sistema estructural era una forma compacta de vectores, que los sistemas siempre tenían un interior y un exterior, y que si se elegía alguna esquina o vértice de un sistema, los ángulos tendrían que ser cóncavos o convexos, dependiendo de si éstos están adentro o afuera de la estructura.

Cualquiera que hubiera escuchado hablar a Buckminster de estructuras, se daría cuenta de su falta de experiencia en la materia, sin embargo su extraordinario sentido común lo llevó a crear con palillos flexibles de plástico, tres figuras rígidas, ya conocidas en el mundo de la ciencia, el tetraedro, el octaedro, y el icosaedro.

Emocionado de sus aparentes descubrimientos, continuó indagando en estas figuras geométricas, a las cuales continuó cerrando con triángulos, que siguieron la forma de la circunferencia. En ese momento observó como mientras la figura más se acercaba a ser como la esfera, lograba mayor rigidez en el sistema de barras y nodos que había diseñado.

En medio de múltiples errores gramaticales por falta de familiaridad con los términos técnicos de la materia, el señor Fuller había descubierto una de las estructuras espaciales que mayores beneficios ofrecen para la generación de espacios de forma esferoidal, la estructura geodésica.

Ya en el año de 1948 y cansado de los fracasos que había tenido a lo largo de su vida, en el mundo de los industriales, el señor Fuller acudió a las universidades y centros de investigaciones para interesar a profesores y alumnos con su nuevo descubrimiento. Sin embargo tampoco encontró una respuesta positiva.

Los arquitectos de ideología conservadora, y los físicos, como de costumbre lo consideraron como un intruso, ya que cuando intentó demostrar sus conceptos de las energías internas y externas, simplemente encontró sonrisas y la frase de siempre, ha hecho usted un buen intento para no ser un profesional de la materia, pero sus ideas no demuestran nada nuevo.

Finalmente Buckminster logró interesar a artistas y estudiantes de arquitectura más jóvenes, quienes se admiraron de su empeño por describir algo que realmente parecía interesante, una estructura redonda sumamente resistente a la flexión.

No fue sino hasta el año de 1953, en que el señor Fuller logró construir la primera estructura geodésica en tamaño real, la cual consistió en una cúpula de veintiocho metros de claro, para el edificio de la Ford Motor Company de Michigan.

Esta estructura se dio a conocer al mundo a través de su curvado panel de triángulos, que seguían de una manera casi perfecta, la armónica figura de la gran esfera. Ante la demanda de estructuras geodésicas, el señor Fuller formó dos compañías, la Synergetics y Geodesics.

Todo residente de los Estados Unidos que quisiera construir cualquier clase de estructura geodésica tendría que dirigirse a cualquiera de estas dos compañías para solicitar licencias y consultas.

El día 29 de junio de 1954 fue la fecha que marcó el cambio efectivo en la carrera de Buckminster. Ese día la oficina de patentes de los Estados Unidos expidió la patente número 2682235 a nombre del señor Richard Buckminster Fuller, dándole el control de la fabricación de todas las estructuras geodésicas del país.

Al fin el mundo parecía tomar en cuenta a ese individuo soñador de cosas futuras, a ese escritor de palabras desatinadas, a ese señor de sesenta años que de la noche a la mañana se había convertido en el genio de las estructuras geodésicas.

Para el año de 1966 las compañías del Sr. Richard Buckminster Fuller habían adquirido ciento cincuenta y cinco patentes tanto en los Estados Unidos de Norte América, como en otros ciento cincuenta y cinco países. A tan sólo doce años de haberse construido la primera estructura geodésica, ya se tenían registros de más de cinco mil obras de esta naturaleza, distribuidas por todo el planeta.

## 2.7 ARMADO DE LA ESTRUCTURA

Las estructuras geodésicas son una invención de mediados del siglo XX que ha permitido construir formas esferoidales de manera económica y segura, satisfaciendo necesidades de espacio prácticamente en todos los países el mundo.

Como todo sistema en el que es adoptada la forma esferoidal para cubrir superficies, las estructuras geodésicas también presentan complicaciones estructurales, por lo que antes de su construcción, se requieren definir las características tanto de sus conectores y barras, como de sus elementos de cubierta.

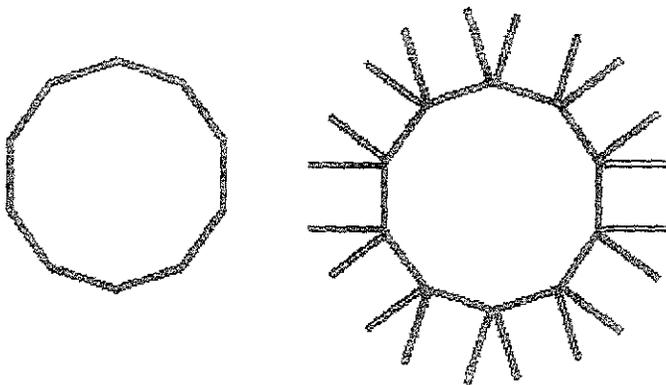
El proyecto deberá iniciar con el diseño de redes y ritmos espaciales que permitan un ambiente geométrico interesante y armónico. Dadas las características de esta estructura, es posible explotar la combinación entre formas, colores, texturas, y sombras, que se generan sobre su superficie

Así mismo es recomendable que las barras generatrices del sistema, sean resistentes tanto a esfuerzos de tracción como a esfuerzos de compresión, dado que estos elementos se combinan entre sí, formando triángulos para lograr la estabilidad estructural de la forma esferoidal.

La unión de sus múltiples barras, deberá practicarse mediante conectores, o cualquier técnica que permita un adecuado trabajo estructural, de tal manera que éstas permanezcan unidas aun después de aplicar esfuerzos que destruyan a la estructura en su conjunto.

Armado de la Estructura

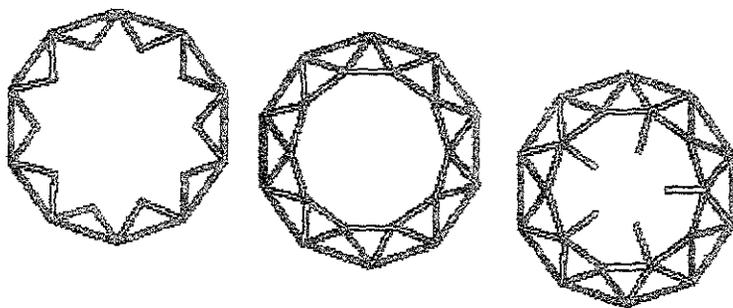
Fig 17



En este caso el polígono que forma la base de esta estructura geodésica cuenta con 10 lados, y por lo tanto 10 vértices. En el primer desplante de triángulos se unen dos barras por vértice, cuya longitud dependerá de las características de cada proyecto. La superficie de la estructura geodésica quedará formada por la unión de múltiples triángulos equiláteros e isósceles.

Armado de la Estructura

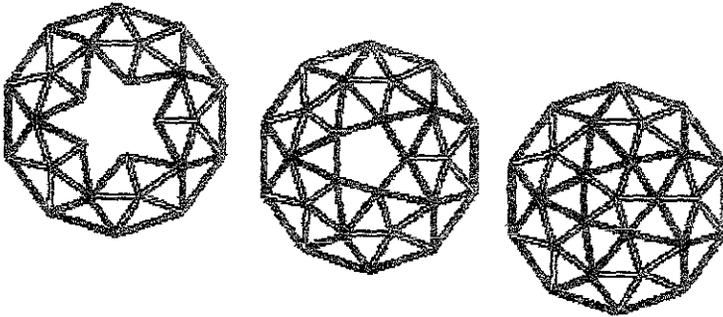
Fig 18



Haciendo un poco de geometría para dividir el espacio se continua cerrando la figura, tal y como se aprecia en este segundo nivel, donde nuevamente se unen las barras del sistema a sus vértices para dar lugar a un nuevo grupo de triángulos. Mientras en la base se armaron 20 caras de la geodésica, en el segundo nivel simplemente se contará con 15 de dichas superficies. Cabe mencionar que dependiendo de cada proyecto se pueden hacer variaciones a su geometría

Armado de la Estructura

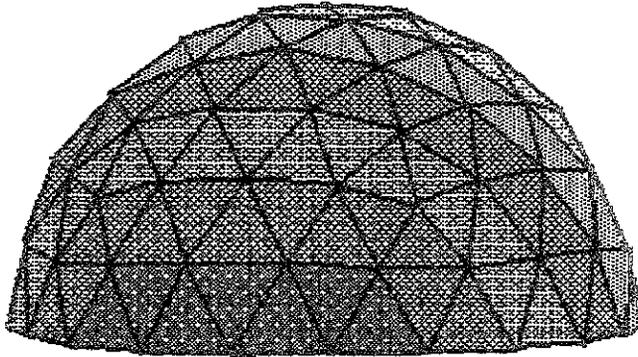
Fig. 19



En el tercer nivel de esta estructura geodésica, se puede apreciar la forma de un pentágono, por lo que la unión de barras a los vértices en este nivel, dará lugar a la formación de cinco figuras triangulares. La cúpula cuenta en este momento con una retícula interesante, donde se pueden apreciar múltiples formas intercaladas entre sí, como hexágonos, pentágonos y estrellas

Armado de la Estructura

Fig. 20



En estructuras donde se incorporan un mayor número de barras, caras y vértices, la forma tiende a ser mas redonda, dado que se cuenta con un mayor numero de líneas periféricas sobre su superficie. Cabe mencionar que para cualquier poliedro convexo el número de caras mas el número de vértices es igual al número de aristas mas dos. Esta es la relación de Euler aplicable tanto a poliedros regulares como a las mismas estructuras geodésicas, que en esencia .son poliedros.

Las estructuras geodésicas pueden construirse de manera completa, enterrando la parte inferior y usando materiales de relleno, para lograr un adecuado nivel de piso, o bien se pueden desarrollar como medias esferas, apoyadas simplemente sobre sus propias barras generatrices, sin que por tal razón pierdan sus cualidades estructurales y propiedades geométricas. Una vez definido el proyecto y obtenido los materiales para su construcción, se podrá iniciar su armado, mediante la limpieza del terreno y en su caso el colado de firmes en el lugar de la obra.

Considerando que se trata de un poliedro, la forma de su base estará generada por la unión de múltiples líneas rectas sobre su periferia, dando lugar a la formación de un polígono casi de forma circular. Al analizar con la relación de Euler, el poliedro ilustrado en las Figuras 17, 18 y 19 es necesario considerar la forma geométrica completamente cerrada. Dado que se trata de una cúpula o lo que es lo mismo, de medio esferoide geodésico, habrá que hacerle algunos ajustes para practicar dicho análisis.

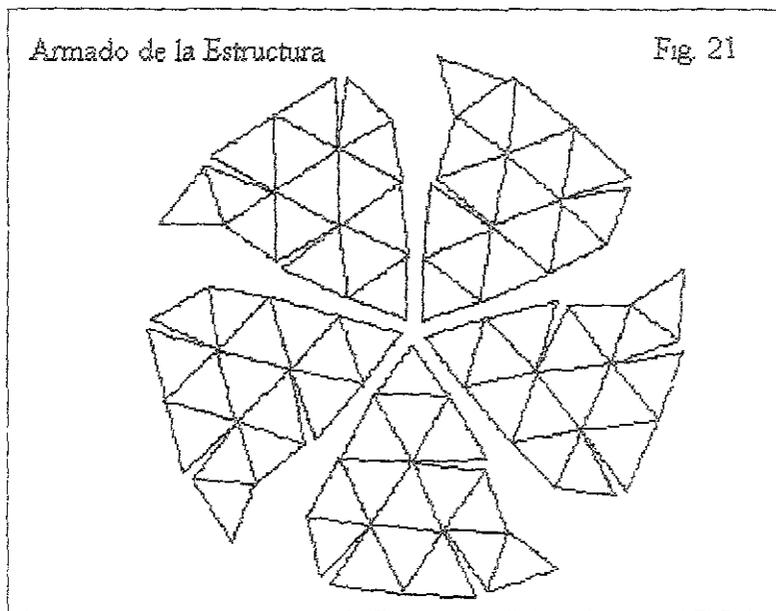
La cúpula cuenta con tres niveles, donde se pueden observar un total de 40 caras, distribuidas de la siguiente manera: 20 caras en el primer nivel, 15 caras en el segundo nivel, 5 caras en el tercer. Así mismo se pueden observar un total de 26 vértices, distribuidos de la siguiente manera. 10 vértices en la base del primer nivel, 10 vértices en la base del segundo nivel, y cinco vértices en la base del tercer nivel, mas un vértice en el punto más alto.

Se pueden observar un total de 65 aristas distribuidas de la siguiente manera: 10 aristas en la base del primer nivel, 10 aristas en la base del segundo nivel, 5 aristas en la base del tercer nivel, 20 aristas entre la base del primer nivel y la base del segundo nivel, 15 aristas entre la base del segundo nivel y la base del tercer nivel, y 5 aristas entre la base del tercer nivel y el punto más alto de la estructura.

Para cerrar la estructura habría que multiplicar todos sus elementos por dos y restarle los vértices y aristas que coinciden sobre su base de tal manera que: El total de caras es igual a  $(40 * 2)$ , el total de vértices es igual a  $(26 * 2) - 10$  y el total de aristas es igual a  $(65 * 2) - 10$  De este modo el total de caras del esferoide geodésico ilustrado en las figuras 17, 18, y 19 una vez cerrado sería igual a 80, el total de vértices sería igual a 42 y el total de aristas sería igual a 120, por lo que si  $C + V = A + 2$  donde C es el número de caras, V es el número de vértices y A es el número de aristas.

Entonces  $80 + 42 = 120 + 2$  de tal manera que  $122$  es igual a  $122$ . Así queda comprobado con la relación de Euler que la cúpula geodésica proyectada se trata de la sección media de un poliedro convexo, formado por 80 caras, 42 vértices, y 120 aristas. De este modo para construir la media esfera geodésica, simplemente habrá que reunir 65 barras, 26 conectores, y 40 elementos de cubierta. Ahora bien si lo que se requiere es construir el módulo completo, habrá que reunir entonces 120 barras, 42 conectores y 80 elementos de cubierta.

Otra manera de construir las estructuras geodésicas, es mediante el ordenamiento de cada una de sus partes sobre una superficie plana, como si se tratara de armar un prisma de papel, sobre una mesa. Cabe mencionar que dicho sistema resulta inoperante para estructuras de mayor tamaño, y se puede utilizar en estructuras donde simplemente se unan las partes de cubierta entre sí.



Como se puede observar, al desarmar la estructura geodésica, para colocar todas sus caras sobre una superficie plana, se tiene un conjunto de triángulos isósceles y equiláteros, de proporciones similares entre sí, los cuales se unen ya sea pegando las aristas de los elementos de cubierta, o bien uniéndolos en sistemas estructurales de uniones y barras. En este caso la cúpula consta de 30 triángulos entre la base y el primer nivel, 20 triángulos entre el primer nivel y el segundo nivel, 15 triángulos entre el segundo nivel y el tercer nivel y 5 triángulos entre el tercer nivel y el punto más alto de la estructura.

También es posible cortar al esferoide de tantas maneras como la imaginación lo permita, haciendo juegos entre varias estructuras similares, uniéndolas mediante túneles geodésicos, o simplemente integrándolas entre si mediante módulos intermedios.

De cualquier manera se trata de una forma geométrica que puede adquirir múltiples características y posibilidades de armado.

La versatilidad de estas estructuras permiten hacer uso libre de la creatividad, tanto para proponer materiales de cubierta, como para idear mecanismos que funcionen como ventanas y puertas.

La unión de elementos generatrices del sistema, mediante conectores localizados sobre sus líneas directrices, da lugar a la triangulación de la superficie esferoidal, describiendo la forma geodésica.

Dichos triángulos se unen entre sí, a través de la red generatriz, y permiten crear módulos de gran versatilidad y belleza.

Para proyectar estructuras geodésicas se requiere dividir la forma esferoidal de tal manera que se forme una red generatriz conformada por figuras triangulares. Una vez definidas las características de dicha red, se procede a su armado y a la incorporación de su cubierta.

La prefabricación de partes permite bajar considerablemente los costos de construcción de las estructuras geodésicas, sin embargo en algunos casos se pierde la posibilidad de crear diseños propios para cada construcción.

Actualmente se construyen estructuras geodésicas por todo el mundo, y con algo de creatividad e imaginación es posible desarrollar proyectos sumamente interesantes, económicos y bellos, capaces de satisfacer necesidades de todo tipo en materia de construcción, simplemente con la proyección de formas esferoidales y la combinación de triángulos.

También es posible unir la estructura geodésica a otro tipo de estructuras para crear conjuntos ya sean habitacionales o de cualquier naturaleza.

## 2.8 ELEMENTOS DE CUBIERTA

En algunos casos los elementos de cubierta no tienen una función estructural, y simplemente son aislantes entre el medio exterior y el ambiente interno, por lo es recomendable que cuenten con propiedades térmicas y preferentemente que sean de materiales impermeables .

Si se construyen con barras de aluminio y se cubren con materiales acrílicos o fibra de vidrio, son extraordinariamente ligeras, en comparación con cualquier tipo de domo ordinario. Una vez construida la estructura cubrir su superficie no representa mayor problema.

Sin embargo se recomienda utilizar materiales apropiados para cada clima y para cada función. Por ejemplo, en climas extremos se recomienda el uso de materiales térmicos, para calentar o enfriar el espacio interior, según convenga.

Si el diseño lo requiere, se pueden crear diversas combinaciones con su geometría, pudiéndose proyectar multiplicidad de formas entre texturas, colores, y su juego de luces y sombras.

La forma geodésica permite que se le incorporen diversos elementos a su estructura, ya sea que éstos funcionen como parte de la cubierta o bien que se utilicen para abrir ventanas o puertas.

La cubierta no debe verse como algo aislado de la estructura, pues aun que en la mayoría de los casos el trabajo de soporte es resuelto por los nodos y las barras generatrices del sistema, los materiales de cubierta ejercen un peso sobre dichas barras y requieren ser resueltos de manera conjunta.

Mientras las barras generatrices desempeñan funciones estructurales, los materiales de cubierta aíslan y protegen el espacio interior del medio ambiente, por lo que requieren integrarse al módulo formando un solo cuerpo geométrico.

En el caso de que simplemente se unieran materiales de cubierta siguiendo la forma geodésica, pero sin incorporar conectores ni barras generatrices, estos materiales tendrían que desempeñar funciones de soporte, por lo que se recomienda además de las propiedades térmicas e impermeables, capacidad para resistir esfuerzos estructurales.

Elementos de Cubierta

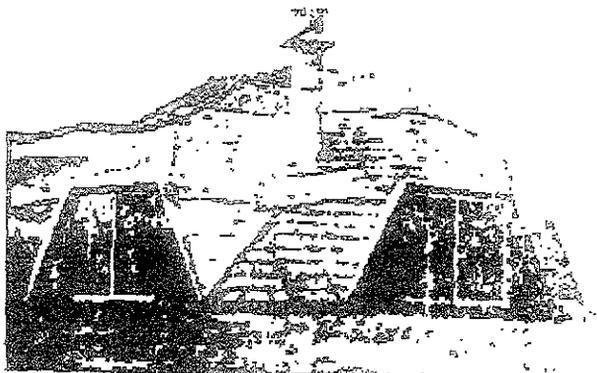
Fig 22



Las viviendas que se han construido con las estructuras geodésicas, permiten extraordinarias cualidades térmicas dado que su superficie de contacto con el medio exterior es relativamente baja en función de su volumen, así mismas son estructuras que no rompen con la imagen del paisaje natural, como esta cabaña construida por la empresa *Geodesic Domes & Homes U.S.A.* 1998

Elementos de Cubierta

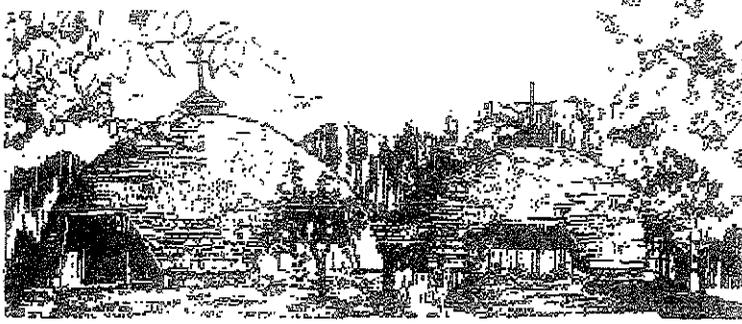
Fig 23



Una vivienda geodésica con a ventanales incorporados a su retícula. Nótese como todos los elementos de cubierta son de superficie plana y se unen entre si, siguiendo las barras generatrices de la forma geométrica. En este caso se trata de una estructura geodesica construida por la empresa *Geodesic Domes & Homes U.S.A.* 1998

Elementos de Cubierta.

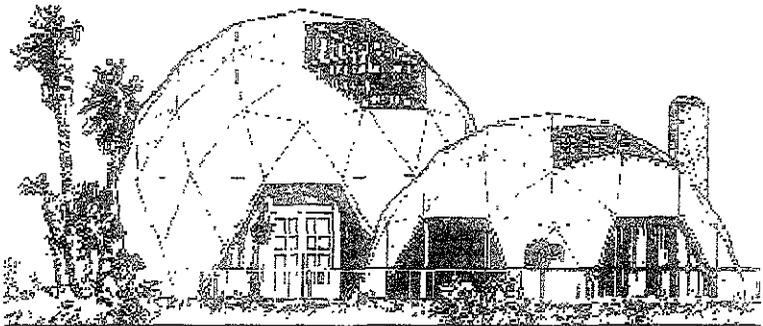
Fig 24



De las cualidades de los materiales de cubierta de las estructuras geodésicas depende el nivel de confort interno, y la belleza de la obra, ya sea que se trate de una pequeña vivienda construida en una aldea, o bien de grandes domos estructurales. En este caso se trata de dos cabañas proyectadas por la empresa *Geodesic Club House, Publishing USA 1999*

Elementos de Cubierta

Fig 25



Utilizando el juego entre diversas estructuras geodésicas, es posible crear conjuntos interesantes, logrando un adecuado aislamiento entre las diversas habitaciones que conforman la obra. Al unir dos estructuras espaciales entre sí, es recomendable utilizar juntas constructivas para evitar agrietamientos. En este caso se trata de una casa de playa proyectada por la empresa *Geodesic Club House, Publishing USA 1999*.

## 2.9 LA IMAGINACIÓN Y LA CIENCIA

Una vez un niño se encontró una piedra algo extraña, la cual parecía tener ciertos poderes, sin embargo dichos poderes no pasaban de ser producto de la imaginación y la inocencia que se puede tener en la infancia. Corriendo la llevó con su hermano mayor, quien con toda la experiencia del mundo le indicó que efectivamente se trataba de un objeto lleno de poderes, el cual seguramente había caído del cielo.

En ese momento una piedra como cualquier otra había adquirido los poderes que solamente la imaginación puede darle a las cosas. Lleno de ilusiones, el niño tomó la piedra y la frotó pidiendo su más grande deseo, viajar a las estrellas y conocer otros mundos.

Después de unos instantes el infante vió caer de un viejo árbol, una semilla, sin que nada más sucediera. Creyendo que la semilla había caído como parte de su deseo, decidió sembrarla, considerando que nacería un árbol tan grande, que alcanzara con sus ramas, los lugares más interesantes del universo.

Efectivamente de esa semilla brotó lo que con el tiempo sería un árbol, sin embargo en la imaginación de este niño, no se trataba simplemente de un árbol, sino del camino que lo llevaría a conocer el infinito.

Pasaron los años, y el árbol nunca alcanzo a las estrellas, sin embargo durante todo ese tiempo, el niño pudo viajar con su imaginación a tantos lugares como sus sueños lo pudieron haber llevado.

En la mente de los científicos muchas veces pasa lo mismo, se encuentra en la imaginación ideas sin ningún valor aparente, pero se cree ciegamente en ellas.

El Sr. Richard Buckminster Fuller, creía en sus inventos, aun que en la mayoría de los casos, éstos no tuvieran mayor valor, ni trascendencia, sin embargo su imaginación lo llevó a vivir mundos muy diferente al real, y en medio de dichas aventuras, nos dejó parte de su espíritu, en cada una de las estructuras geodésicas, que hoy se construyen por todo el mundo.

BUCKMINSTER Fuller, *Synergrtics* E.J. Applewhite, ed. Macmillan N.Y. 1995

JACOBS. David, *An Expo Named Buckminster Fuller*, ed NY Times USA 1987

MARKS Robert W. *The Dymaxion World of Buckminster Fuller* ed Reinhold 1970

SIDNEY Rosen, *El Mago de la Cúpula*, ed Diana, México 1970

### 3 ESFEROIDES DE DOBLE CURVATURA INVERSA

La patente denominada Esferoides de Doble Curvatura Inversa, se presenta en este capítulo, en el que se describe el funcionamiento estructural de cada una de sus partes y las características del módulo en su conjunto.

Al unir diversas elipses en torno a un eje común, (Fig. 26) y crear sobre su superficie la doble curvatura inversa propia de algunas laminares de generación reglada, se logra una figura espacial poco conocida, se trata de estas estructuras, cuyas cualidades geométricas dan mayor semejanza a la esfera, que aun las mismas estructuras geodésicas.

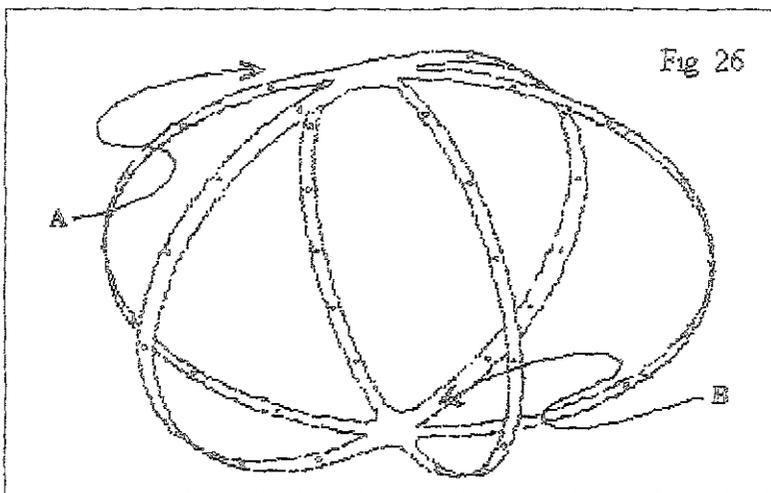
Considerando que las formas esferoidales han sido construidas desde la antigüedad con la intención de crear espacios de carácter religioso, las estructuras geodésicas son una alternativa relativamente reciente que pueden ser utilizadas para dicho fin, sin embargo su forma no logran la plasticidad y las curvas de las bóvedas clásicas, pues éstas estructuras simplemente son poliedros convexos diseñado en base a una geometría de caras planas.

Por su parte los esferoides de doble curvatura inversa, mantienen una mayor semejanza a dichas formas esferoidales, y su belleza es comparable con la la armonía y las proporciones de las cúpulas del renacimiento, pero con las ventajas y la versatilidad de las estructuras contemporáneas

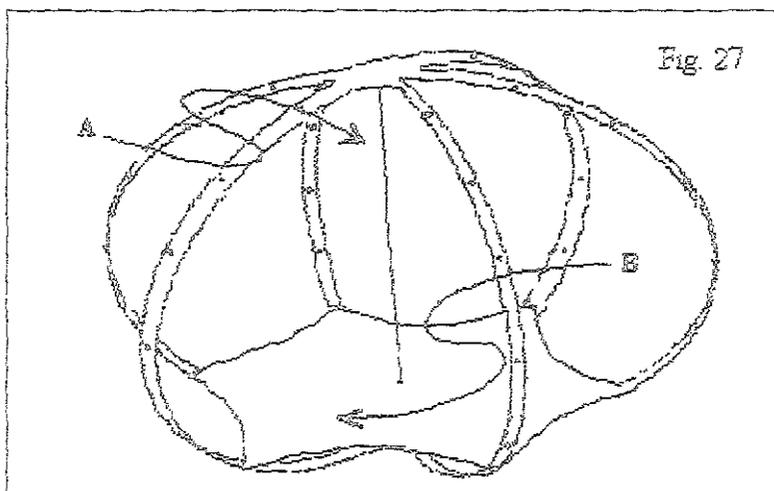
Su superficie se describe con la esbeltez de su doble curvatura inversa sobre cualquier punto en que se analice, como si realmente se tratara de una esfera, pero generada simplemente por el desplazamiento de una línea recta.

Su extraordinaria resistencia a la flexión se debe al trabajo de su malla generatriz, la cual transmite esfuerzos de tracción entre las múltiples barras que la conforman, a sus elementos directrices, mismos que al trabajar a compresión incrementan a un más resistencia, haciendo del sistema, un módulo pretensado de gran belleza estructural

Como una reacción propia del pretensado de la malla generatriz, los conectores polares tienden a separarse entre sí, por lo que es necesario mantenerlos unidos mediante un tensor, (Fig. 27) el cual es provisional mientras se incorporan los materiales de cubierta.



En este caso se trata de un esferoide de doble curvatura inversa que será proyectado a partir de tres elipses yuxtapuestas en torno a un eje común. Dichas elipses coinciden en los puntos A y B por lo que requieren de conectores polares para permitir un adecuado trabajo estructural. Las barras directrices del sistema trabajan a compresión al momento de ajustar la malla generatriz, por lo que se pueden considerar elementos reforzados.



Es necesario unir los conectores polares con un tensor (A) antes de ajustar la malla generatriz del sistema para evitar que la estructura se deforme en el sentido vertical. De igual manera es conveniente definir el nivel de piso desde el inicio (B), para una adecuada incorporación de materiales de relleno que permite mejorar sus cualidades funcionales y estructurales.

### 3.1 ELEMENTOS DIRECTRICES Y NIVEL DE PISO

El proyecto debe iniciar por el armado de sus elementos directrices y la cimentación de la estructura.

Los elementos directrices son barras de forma elipsoidal que giran en torno a un eje común, o eje de rotación del esferoide, y trabajan a compresión dándole las características de extensión, forma y altura, al módulo en su conjunto. (Fig. 26)

Al aumentar la excentricidad de los elementos directrices en los esferoides de doble curvatura inversa, se obtienen estructuras de mayor anchura, lo cual significa mayor superficie de piso en relación a su volumen.

Sin embargo las barras generatrices del sistema que sujetan la flexión del módulo, incrementan su trabajo estructural.

Es necesario que antes de ajustar las barras que conforman la malla generatriz, las barras directrices queden perfectamente unidas entre sí, para evitar deformaciones. El ajuste excesivo de una de las barras generatrices daría por resultado la deformación de los elementos directrices, modificando tanto su forma como su trabajo estructural.

Mientras mayor sea la extensión del esferoide y menor su altura, se requieren mayor número de elementos directrices, con la finalidad de reducir la distancia entre los arcos de elipse de su contorno.

Para su relleno y cimentación preferentemente se deben utilizar materiales inertes, los cuales se incorporan una vez terminado el ajuste de la red generatriz y en su caso de que los materiales de cubierta queden debidamente unidos al módulo de forma esferoidal. (Fig. 27)

Las instalaciones hidráulicas, sanitarias y eléctricas deberán quedar ocultas, preferentemente por debajo de dicho nivel de piso.

Dependiendo del proyecto arquitectónico del que se trate, algunas de dichas instalaciones podrán requerir pequeñas construcciones externas de apoyo, ya sea para elevar los depósitos del agua, o bien para proteger de la intemperie las instalaciones eléctricas.

### 3.2 ELEMENTOS GENERATRICES Y FORMAS OJIVALES

La parte en la que se requiere poner mayor cuidado para la construcción de este tipo de estructuras, es la referente al armado y ajuste de la red generatriz de la doble curvatura inversa.

Cada elemento debe quedar perfectamente ajustado, en relación a los demás elementos de la red, como si se tratara del ajuste de una rueda de bicicleta, donde cada rayo requiere conservar una tensión específica que evite deformaciones.

De igual manera que en el ciclismo, es recomendable poner guías para cerciorarse de que los elementos directrices no han sufrido deformaciones, y en su caso reducir la tensión de algunas barras e incrementar las de otras hasta lograr la tensión exacta.

Una adecuada cimentación y un adecuado ajuste de las estructuras de forma esferoidal permite extraordinarios resultados. Lo que se traduce en formas más ligeras, con mayor capacidad de resistir esfuerzos estructurales, y sobre todo más económicas.

La red generatriz se forma por barras inclinadas con respecto a la línea del horizonte, lo que le da la forma de la doble curvatura inversa. Mientras mayor sea la inclinación de las barras del sistema, la forma resultante parecerá un tanto más delgada, y será más resistente a esfuerzos de flexión. (Fig. 28)

Tanto la inclinación de las barras generatrices, como la excentricidad de las elipses directrices, y el número de éstas, permiten variar la forma resultante, por lo que el diseñador requiere de un sentido que le permita calcular las proporciones propias para el carácter y la función de cada obra.

El tensor que sujeta los conectores polares, deberá permanecer en su lugar hasta que los elementos de cubierta proporcionen el peso y la resistencia necesaria para evitar deformaciones en el sentido vertical de la estructura.

La doble curvatura inversa que se genera con la malla generatriz unidas a las barras directrices, adquiere una continuidad tan perfecta, que no permite cambios abruptos a la forma, y que le da desde un principio valores de integridad, unidad y protección, cualidades legendarias y místicas de las formas esferoidales.

Con el propósito de abrir ventanas a la malla generatriz de doble curvatura inversa, se requiere incorporar un nuevo elemento estructural, las formas ojivales, ampliamente conocidas en la familia de las laminares de membrana.

Dichas formas permiten abrir orificios sin afectar las cualidades estructurales del sistema, pues se acoplan perfectamente bien a la malla envolvente, transmitiendo la tracción de unos elementos generatrices a otros de su misma naturaleza.

Como la función de dichas formas es la de brindar acceso al interior de los esferoides de doble curvatura inversa, se requiere que cuenten con dimensiones mínimas para la referida función.

Para lo cual es necesario que la separación entre un arco directriz y otro inmediato, no sea demasiado estrecha, ya que la forma ojival quedará localizada y estructurada entre dichos elementos directrices. (Fig. 29)

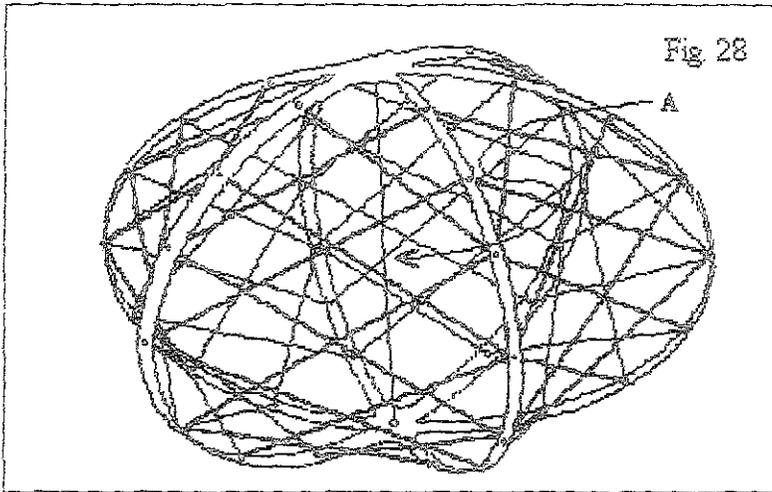
Por ejemplo, una separación de dos metro entre dos arcos de elipse inmediatos, permite ampliamente que se incorporen formas ojivales de 90 cm. Ancho suficiente para la incorporación de puertas de acceso.

Si en vez de utilizar estas formas ojivales, simplemente se tomara la decisión de cortar la red para tener acceso al módulo, entonces se perdería el equilibrio entre las barras generatrices del sistema, deformando consecuentemente a los elementos directrices y generando la destrucción parcial o definitiva de la estructura.

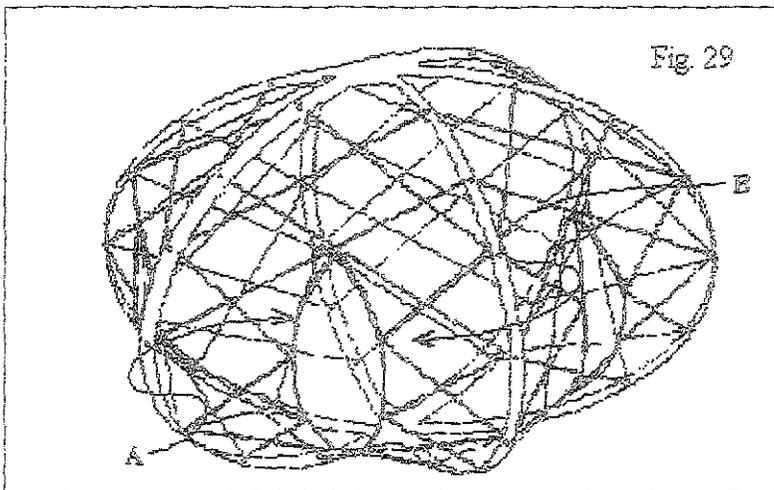
Los marcos de forma ojival trabajan a tracción, sujetando las barras de la malla generatriz de la estructura, por lo que requieren estar calculados para dicha función.

No es recomendable incorporar otro tipo de marcos estructurales, cuya forma sea cuadrada o de otro tipo diferente a la ojival, ya que esto modifica la forma de la membrana envolvente afectando sus cualidades estructurales.

En el caso de abrir orificios sobre los elementos directrices, éstos necesariamente serán pequeños en relación al tamaño del módulo en su conjunto, pero en algunos casos pueden ser suficientes para iluminar y ventilar el interior de la estructura.



La estructura adquiere su forma al ser cubierta por la malla generatriz, la cual es pretensada antes de ser cubierta. Como se puede observar el tensor denominado (A) evita las deformaciones del módulo en el sentido vertical de la estructura. Cabe mencionar que un mal ajuste de las barras de la malla generatriz, daría por resultado la deformación de los elementos directrices del sistema



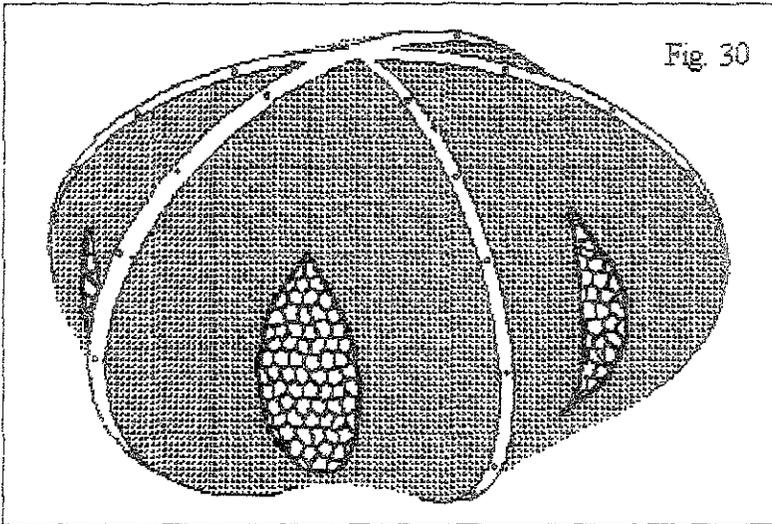
Al colocar un marco de forma ojival justamente en la parte media entre dos arcos directrices (A), se logra abrir la malla generatriz, transmitiendo los esfuerzos de tracción al nuevo elemento estructural. Dichas aberturas modifican en parte la posición de las barras generatrices afectadas (B) sin embargo estas modificaciones no son relevantes, pues se acoplan de manera satisfactoria a la doble curvatura inversa de la membrana envolvente

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES  
DE LA BIBLIOTECA

### 3.3 ELEMENTOS DE CUBIERTA

Con su superficie completamente curva, y su membrana delgada, los esferoides de doble curvatura inversa pueden ser cubiertos por cualquier materia que sea resistente a los agentes de la intemperie, como el sol y la humedad.

Para mejorar el confort interno es recomendable que dichos materiales sean térmicos, sobre todo si se construyen en climas extremos, ya sea para enfriar al módulo o bien para calentarlos.



Con sus elementos directrices de forma elipsoidal y sus ventanas y puertas en forma de ojiva, los esferoides de doble curvatura inversa, son una aportación de la arquitectura mexicana al estado de ciencia. Su resistencia a la flexión y la doble curvatura de su membrana envolvente, le hacen ser una útil para múltiples funciones.

El módulo cuenta con dos cualidades estructurales que lo hacen ser extraordinariamente resistente a la flexión, por un lado tanto los elementos que trabajan a tracción como los que trabajan a compresión, son presforzados, lo cual quiere decir que la malla generatriz queda completamente tensa antes de ser cubierta, y que las barras directrices quedan comprimidas aun en gravedad cerc.

Por el otro lado se trata de estructuras cuya forma es estable, la cual pertenece a las laminares de membrana, por lo que se trata de un cascarón de concreto armado, ligero y versátil.

En algunos casos es posible retirar el tensor de ajuste localizado entre los conectores polares, principalmente en estructuras de cubiertas pétreas cuya malla generatriz no haya sido ajustada en exceso. De cualquier manera es recomendable calcular la tracción que se la aplique a cada elemento de la malla generatriz, tanto para evitar deformaciones en el sentido vertical de la estructura, como en sus propios elementos directrices.

Una vez cubierta la malla generatriz, se podrá observar un módulo resistente a la flexión, sumamente versátil y ligero, cuya tecnología de nodos, barras y elementos de cubierta la hacen ser sumamente ligera y económica.

En el caso de utilizar pre-concreto lanzado, será necesario añadir una tela de alambre más cerrada a la red generatriz, que permita la adecuada adherencia del material a la superficie del módulo. Una adecuada incorporación de materiales pétreos a la estructura permite aumentar el monolitismo y la seguridad estructural del sistema.

### 3.4. DOCUMENTOS DE PATENTE

Las estructuras espaciales denominadas Esferoides de Doble Curvatura Inversa, son producto de una invención mexicana, y tanto su sistema estructural, como el procedimiento constructivo que les permite ser llevadas a la práctica, cuentan con los documentos de patente correspondientes.

Dichas patentes son propiedad del autor de esta tesis y fueron motivada por las valiosas ideas y la participación de los profesores de la Maestría en Arquitectura-Tecnología, que se imparte en la Unidad de Posgrado, de la Facultad de Arquitectura de la U.N.A.M.

Particularmente las aportaciones de los profesores, Mtro. en Arq. Francisco Reyna Gómez, Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos y Mtro. en Dis. Arq. Jan Van Rosmalen Jansen.

### 3.5 DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

Los esferoides de doble curvatura inversa son estructuras resistentes a la flexión que deben su estabilidad estructural al trabajo de cada una de las partes que los conforman, las cuales son básicamente elementos directrices y elementos generatrices.

Los elementos directrices son elipses que giran en torno a un eje común, que es el eje de rotación de la figura, y su trabajo es a compresión. Por su parte los elementos generatrices son barras rectas que trabajan a tracción generando la doble curvatura inversa de su superficie y sujetando la flexión del módulo en su conjunto.

En la Figura 31 dos elipses directrices de un esferoide de doble curvatura inversa han sido colocadas de manera simétrica en torno a un eje común, y múltiples barras rectas forman la malla generatriz que será cubierta con algún material propio para aislar el espacio interior del medio ambiente.

Al aplicar la tracción a cada una de las barras de la malla generatriz, se genera una reacción en un tensor que une los extremos superior e inferior de la estructura, los cuales se denominan como conectores polares, dicho tensor evita la deformación del módulo en su sentido vertical.

El ajuste de cada barra generatriz se practica evitando deformaciones en los elementos directrices del módulo, como si se tratara del ajuste de los rayos de una rueda de bicicleta. Una vez pretensada la malla del sistema se procede a la incorporación de los materiales de cubierta.

En la Figura 32 ya se han incorporado los materiales de cubierta, utilizando en este caso una malla de alambre previamente sujeta a las barras generatrices y posteriormente cubierta por preconcreto lanzado.

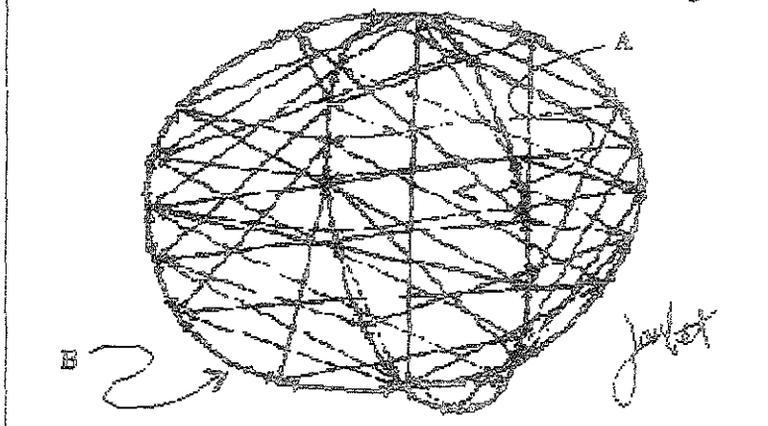
Como se puede apreciar para abrir ventanas se utilizan formas ojivales las cuales se acoplan a la superficie de la malla generatriz sin afectar su trabajo estructural. Dichas formas ojivales son utilizadas en estructuras de membrana, especialmente en estructuras de doble curvatura inversa.

Una vez cubierto el módulo se incorporan materiales de relleno que permitan un adecuado nivel de piso, ocultando tanto las instalaciones hidráulicas y sanitarias, como las instalaciones eléctricas de la estructura.

El cascarón de concreto armado es una estructura laminar de membrana, resistente a la flexión, que puede ser llevado a la práctica ya sea de manera artesanal, o bien mediante la prefabricación de cada una de las partes que lo conforman.

Esferoideos de Doble Curvatura Inversa

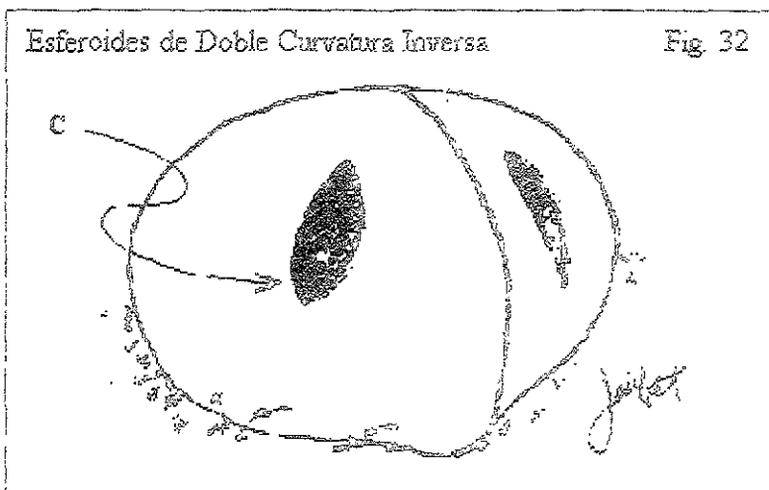
Fig. 31



En esta ilustración se puede apreciar un esferoide de doble curvatura inversa, compuesto por dos elipses directrices y múltiples barras generatrices. Nótese como la malla generatriz del módulo (A) trabaja a tracción mientras los elementos directrices (B) trabajan a compresión

Esferoideos de Doble Curvatura Inversa

Fig. 32



Una vez cubierta la malla generatriz de cualquier material de preferencia aislante y térmico, ésta adquiere una forma monoítica y compacta. Nótese la forma de ojiva de sus ventanas (C), la cual permite abrir orificios a superficies de doble curvaturas sin afectar su comportamiento estructural.

### 3.6 REINVINDICACIONES

Estructura espacial de forma esferoidal, cuya superficie de doble curvatura inversa, es generada por el desplazamiento de líneas rectas sobre sus directrices elípticas, las cuales se unen en torno a un eje común, que es el eje de rotación de la figura, la cual comprende la combinación de las siguientes partes:

- Elipses directrices del sistema que giran en torno a un eje común y que trabajan a compresión.
- Barras generatrices de la malla envolvente que unen entre sí a los elementos directrices, generando una superficie reglada de doble curvatura inversa, y que trabajan a tracción.
- Conectores polares que unen a los elementos directrices del sistema en torno, a un eje común, que es el eje de rotación de la figura.
- Tensor de ajuste, que une a los conectores polares entre sí, permitiendo mantener la altura del módulo constante, mientras se le da la tracción requerida a las barras generatrices.
- Marcos de forma ojival utilizados para abrir ventanas, los cuales permiten modificar el ordenamiento de las barras generatrices sin afectar la estabilidad estructural del sistema.
- Elementos de cubierta utilizados para aislar el espacio interior, del medio ambiente en que dichas estructuras sean construidas..

Caracterizada por su resistencia a la flexión, por su forma esferoidal y por su superficie reglada de doble curvatura inversa. En testimonio de lo cual firmo la presente en la ciudad de México D.F.



Atentamente Marco Arturo Jauberi Garibay

### 3.7 PATENTE DE INVENCION

**SECOFI**

Secretaría de Comercio  
y Fomento Industrial

**DIRECCION GENERAL DE DESARROLLO TECNOLÓGICO**

**TITULO DE PATENTE DE INVENCION NUMERO 172423**

**TITULAR:** Marco Arturo Joubert Garibay  
**DOMICILIO:** Av Universidad 1330 C1302  
Col. del Carmen México, D.F.  
**INVENTO:** Estructura Espacial Esteroide  
de Generación Reglada  
**CLASE:** E04B 001/348  
**INVENTOR:** Marco Arturo Joubert Garibay

#### SOLICITUD

NUMERO	FECHA DE PRESENTACION	HORA
026968	17 SEPTIEMBRE 1986	13:45

EN NOMBRE DEL C. PRESIDENTE DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, ESTA PATENTE  
CONCEDE A SU TITULAR EL PRIVILEGIO EXCLUSIVO DE EXPLOTACION DEL INVENTO  
CLASADO EN EL CAPITULO QUINDECATORNO Y TIENE UNA VIGENCIA DE VEINTE ANOS  
CONTADOS A PARTIR DE LA FECHA DE PRESENTACION DE LA SOLICITUD

FECHA DE EXPEDICION  
**15 DICIEMBRE 1986**

DE ACUERDO DEL SECRETARIO DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL  
EL DIRECTOR GENERAL DE DESARROLLO TECNOLÓGICO



PRIMA

## CONCLUSIONES

Los esferoides de doble curvatura inversa son estructuras espaciales que permiten generar una forma esferoidal con la versatilidad y la ligereza de las estructuras geodésicas pero con su membrana envolvente de forma completamente curva en cualquiera de los puntos en que se analice.

Pueden ser llevados a la práctica tanto en la construcción de pequeñas viviendas, como en la estructuración de grandes naves espaciales, o bien hacerse combinaciones entre ellas mismas para crear conjuntos arquitectónicos interesantes, funcionales y bellos.

Como viviendas de interés social se pueden desarrollar bajando los costos de construcción mediante sistemas de prefabricación, en los que no solamente se fabriquen sus partes, así mismo se le da la tracción requerida a cada una de las barras que conforman la red generatriz o malla envolvente, antes de ser cubierta por cualquier material. Procedimiento que ayudaría a evitar deformaciones al ajustar dichas barras.

Como construcciones residenciales se pueden combinar a otro tipo de estructuras para sumar a sus cualidades las ventajas de la construcción en general, de este modo pueden verse como una alternativa más para crear espacios dentro de conjuntos desarrollados con tecnologías conocidas.

Si se les aumenta la excentricidad a los elementos directrices, es posible incrementar la superficie de suelo interior en relación con su altura, sin embargo es necesario considerar los momentos estructurales que se generen en cada una de sus uniones.

También es posible dividir la forma esferoidal en niveles interiores, los cuales se pueden construir de materiales que no necesariamente tengan que ser resistentes a la intemperie, como la madera por ejemplo, solamente es necesario considerar que al unir dichos cuerpos a los elementos generatrices o directrices del sistema, es posible que se generen momentos estructurales. Para lo cual es conveniente ajustar la malla generatriz incrementando la solidez del módulo.

Estas estructuras permiten aislar de mejor manera el espacio interior de la temperatura ambiente, dado que la relación volumen superficie, es muy similar a la de la esfera, y como se sabe, la forma esferoidal es la figura geométrica que menor superficie de contacto tiene en figuras del mismo volumen.

Una de las principales complicaciones que se presenta en los esferoides de doble curvatura inversa, es la de abrir orificios a la malla generatriz que puedan funcionar como ventanas, ya que dicha malla trabaja a tracción sujetando la flexión del módulo en su conjunto. En este caso es posible incorporar formas ojivales entre un arco directriz y otro inmediato. Como se sabe, las formas ojivales permiten acoplarse a retículas de membrana sin afectar su comportamiento estructural, y en el caso de los esferoides de doble curvatura inversa, lo único que se requiere es que en dicho dichos elementos estructurales sujeten la tracción de las barras generatrices que se requieran cortar para permitir aberturas a la malla envolvente.

Como los elementos de cubierta pueden no trabajar de manera estructural, es posible que se cubran con infinidad de materiales, la única condición es que estos sean térmicos e impermeables, sobre todo si se construyen en lugares de climas extremos.

Otra ventaja que se tiene al construir espacios utilizando el sistema de los esferoides de doble curvatura inversa, es la imagen urbana o rural, construir formas similares a las creadas por la naturaleza permite que el espacio exterior sea sedante, sobretodo si se habla de lugares donde la naturaleza domine y no las construcciones.

Mientras el espacio interior es particular, y beneficiar simplemente a su usuarios, el espacio exterior es de todos y los errores afectan a todos, por eso debe ponerse especial cuidado en el aspecto de las obras que se construyen, buscando más que dominar con formas abruptas, integrarse a las características del lugar ya sea para embellecerlo o bien pare pasar desapercibido. Los esferoides de doble curvatura inversa crean un espacio interno amplio y redondo, por lo que pueden adquirir un carácter místico si se desea, o simplemente decorarse para hacerlos más confortables.

La tecnología en la arquitectura debe procurar hacer frente a las necesidades de vivienda de la población en general, dichas necesidades son vitales para el desarrollo del individuo en la sociedad.

No se trata simplemente de un espacio para dormir o comer, se trata del espacio que aísla al individuo de los problemas y de la gente para integrarlo más a su familia, a su pareja y finalmente a si mismo. Sin embargo no todos los seres humanos tienen acceso a la vivienda, y comúnmente el individuo vive en hacinamiento. Tanto los esferoides de doble curvatura inversa como las estructuras geodésicas, son alternativas que pueden atender el problema, bajando considerablemente los costos de construcción en lo que a la envolvente y la estructura de las viviendas se refiere.

## BIBLIOGRAFÍA

- BECKER *Udo* *Enciclopedia de los Símbolos. ed Herder 1999*
- BROOKE *Steven* *Views of Rome. ed Rizzoli International Publications 1995*
- BUCKMINSTER *Fuller,* *Synergrics E.J. Applewhite, ed. Macmillan N Y 1995*
- CANTÚ *Delgado Juheta* *Historia del Arte, ed Trillas México 1996*
- CATALANO *Eduardo* *Estructuras de Superficies Alaveadas, ed UNAM, 1975*
- COOPER *J. C* *El Simbolismo Lenguaje Universal Ed. Lidiun 1988*
- CHEVALIER *Gheerbrant* *Diccionario de los Símbolos ed Océano, 1991*
- DERIJ *Carlos* *Arte Gótico, ed www Monografias.com demond@ciudad.com.arq USA 1999*
- DOREEN *Yarwood* *La Arquitectura en Europa/ Renacimiento ed. Ceac 1994*
- FERNANDEZ *Gómez Margarita* *Ingeniería en la Epoca Clásica, ed Valencia, Universidad Politécnica, Barcelona España, 1994*
- GARCÍA *Martínez Heriberto,* *Historia del Arte, ed Trillas México 1996*
- GAVINELLI, *Corrado* *Arquitectura Contemporánea. ed Libsa, 1998*
- GOMBRICH *E.H* *The Story of Arte, ed Phaidon. USA 1968*
- GRODECKI, *Louis* *The Gothic Architecture, ed Electa/Rizzoli N Y 1977*
- HALE *Ma, John, R* *Buckminster Fuller ed Brasiller 1962*
- JACOBS, *David, An Expo Named* *Buckminster Fuller, ed. NY Times USA 1987*
- JEAN *Cks G Baird,* *El Significado en la Arquitectura, ed. H. Blume 1975*
- MARTÍN *Luis G* *The Atlas of Mysterious Places ed Debate, Barcelona 1993*
- MARKS *Robert W.* *The Dymaxion World of Buckminster ed Reinhold 1960*
- MIRAFUENTES *José,* *Estructuras Contemporáneas ed UNAM, 1980*
- NOUGIER *Louis Rene.* *Arte Prehistórico ed. Lidiun, 1997*
- PIPER *Peter,* *Geodesic Club House, ed Peter Piper Publishing, web@yesmag.bc.ca USA 1998*
- SIDNEY *Rosen,* *El Mago de la Cúpula, ed Diana, México 1970*