



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ARQUITECTURA

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES  
ESPACIALES TRIDIMENSIONALES

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE ARQUITECTO

PRESENTA:

**ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA**

ASESORES:

DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

DR. EN ARQ. JOSÉ GERARDO GUÍZAR BERMÚDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2015



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.

## **DEDICATORIAS**

*A **Dios**, por estar siempre a mi lado*

*A mis padres, **Arturo** y **Olivia** por todo su amor, apoyo y buen ejemplo.*

*Gracias, los amo*

*A mi hermana **Teresa Paulina**, mi mejor amiga. Te quiero hermanita*

*A mi cuñado **César**, por ser como un hermano para mí*

*A mis **abuelos, primos** y **tíos***

*A mis amigos y colegas, **Arturo, Claudia, Jorge, Karla, Mauro, Óscar, René** y **Tonatiuh***

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura**, por mi formación académica*

*A la profesora y asesora de esta tesis, **Dra. en Arq. Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino**, mi gratitud siempre*

*Al profesor y asesor de esta tesis, **Dr. en Arq. José Gerardo Guízar Bermúdez**, mi gratitud siempre*

*A mis **profesores de la Facultad de Arquitectura**, mi reconocimiento*

*“La madre del arte es la Arquitectura.*

*Sin la arquitectura de nuestro propio ser no tenemos alma de nuestra propia civilización”*

*Frank Lloyd Wright*

# ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES ESPACIALES TRIDIMENSIONALES

Introducción .....	1
I. Marco teórico .....	6
a) El surgimiento de las estructuras ligeras .....	7
b) Los primeros modelos .....	12
c) Descubrimientos e invenciones de R. Buckminster Fuller .....	16
d) La sistemática del Dr. Max Mengerhausen y el sistema MERO .....	25
e) El desarrollo de estructuras espaciales a mitad del siglo XX .....	29
f) Los sistemas de Stéphane Du Château .....	33
II. Antecedentes en México .....	36
a) La influencia de la reciente Arquitectura Industrial .....	37
b) Los nuevos sistemas estructurales .....	39
c) Las estructuras espaciales en México .....	44
d) La tridilosa de Heberto Castillo .....	52
e) Compañías especializadas en México .....	54
III. Análisis de las estructuras geométricas espaciales .....	60
a) Definición .....	61
b) Clasificación .....	65
c) Composición geométrica .....	75

d) Retículas en armaduras espaciales tridimensionales y sistemas estructurales de nodos .....	82
IV. Análisis del sistema y construcciones análogas .....	101
a) Nodo esférico .....	102
b) Retícula: malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros, sistema octa-tetra .....	110
c) Diseño y precálculo estructural del sistema .....	113
d) Construcciones análogas .....	124
V. Caso de estudio. Nuevo edificio “Unidad de Posgrado” .....	128
a) Antecedentes .....	129
b) Planos arquitectónicos .....	130
c) Planos estructurales .....	132
d) Acabados .....	134
e) Instalaciones .....	135
f) Análisis estructural de cubierta por método de $F = 0$ .....	136
g) Análisis de cubierta por efectos de viento .....	139
VI. Conclusiones .....	145
Referencias .....	147
Glosario .....	161

## Anexos

- A. Planos de plantas arquitectónicas del Nuevo edificio "Unidad de Posgrado"

## INTRODUCCIÓN

Las estructuras espaciales tridimensionales forman parte importante de la Arquitectura Contemporánea. Su desarrollo en las últimas décadas, ha permitido la creación de nuevos sistemas estructurales de mayor complejidad para su aplicación en proyectos a diversa escala, ejemplo de ello son los sistemas desarrollados por MERO y Stéphane Du Château a nivel internacional y en México las estructuras construidas por Adriann's de México (actualmente Space Frame Technology), Juan José Díaz Infante (Kalikosmia) y la invención del sistema de Tridilosa, entre otros.

Contrariamente a lo que se creía a principios siglo XVIII, las estructuras metálicas necesitan precauciones para su correcto funcionamiento, principalmente la protección contra el fuego; a pesar de que algunos miembros estructurales son incombustibles, sus resistencias se reducen considerablemente durante los incendios, poniendo en peligro la integridad del edificio. En lugares con climas aversivos como playas y bosques, los metales son altamente susceptibles a la corrosión al estar expuestos al agua y al aire, por lo cual deben pintarse periódicamente.

El pandeo puede presentarse en el diseño de algunas estructuras con este sistema, ya que entre más esbeltos sean los miembros a compresión, mayor es el peligro de pandeo; situación que es resuelta al colocar mayor cantidad de material como refuerzos y/o utilizar perfiles que tengan entre sus propiedades grandes momentos de inercia (Estructuras de acero, 2007, párr. 34).

## Fundamentación

Los sistemas estructurales basados en la geometría básica de poliedros más la aplicación de los principios de “tensegrity”, ofrecen grandes ventajas ante los sistemas tradicionales. Proyectos realizados bajo estos sistemas, como las cúpulas de Buckminster Fuller, pueden ofrecer gran ahorro energético, al aprovechar recursos como la iluminación solar y la ventilación natural. Además la capacidad de ser fácilmente transportables y desmontables, las hacen ideales para ser edificaciones efímeras, que permiten la solución rápida y a bajo costo para utilizarlas como refugios o en zonas de desastre.

El bajo número de componentes, con dimensiones similares y formas unificadas, logran la estandarización, reduciendo notablemente el costo de producción y ensamble. Estructuralmente al trabajar los miembros de manera conjunta, existe una mejor distribución de cargas, permitiendo gran reducción del peso total y la simplificación de la cimentación. En el aspecto de seguridad, al distribuir las cargas uniformemente, estos sistemas mantienen gran estabilidad, ya que no permiten una sobrecarga concentrada (trabajando los miembros en conjunto y no sobrecargando un elemento aislado); asimismo al ser una estructura hiperestática, el desarrollo de su ductilidad es muy lento, combinado con la esbeltez de sus componentes y la rigidez conjunta, aseguran un buen comportamiento ante sismos.

El concepto de “sinergia” aplicada (designado por Buckminster Fuller, para referirse que el efecto creado por el trabajo de dos o más agentes actuando en conjunto, es mayor al esperado considerando la suma de las acciones de los agentes por separado), da como resultado la construcción de grandes claros, sin necesidad de apoyos verticales intermedios, otorgando así gran flexibilidad de los espacios (Rosen S. , 1970, pág. 137). El potencial estético de las estructuras basadas en estos sistemas es importante, ya que permite gran variedad de expresión y composición en los proyectos, a la altura de la Arquitectura actual.

La investigación del tema puede ofrecer grandes beneficios en el desarrollo de la profesión de Arquitectura, principalmente en la geometría tridimensional, que aplicada a las estructuras, puede utilizarse para crear diversos elementos en una construcción, como cubiertas, muros cortina, entresijos, puentes o un conjunto estructural.

## Objetivos

- Como objetivo se plantea ampliar la información existente sobre el origen y desarrollo de los sistemas estructurales espaciales a nivel internacional y en nuestro país, para conocer sus aplicaciones en la Arquitectura, y los beneficios de cada sistema según la estructura proyectada, como claros, cantidad de material y variedad de diseños.
- Analizar la geometría, composición y función de los elementos de una estructura espacial y de una retícula tridimensional, para saber cómo trabajan estos sistemas y aprovechar sus ventajas en el diseño de una estructura.
- Estudiar la aplicación de estos sistemas en proyectos ya existentes, para seleccionar los más adecuados a utilizar en diferentes escalas y necesidades en nuestro país.

## Hipótesis

Para realizar la investigación del desarrollo de los sistemas estructurales espaciales tridimensionales y determinar el modelo apto de retícula para el proyecto de la cubierta del Nuevo edificio “Unidad de Posgrado”, el trabajo se constituye en dos ámbitos, la parte teórica que comprende el análisis de la geometría, composición y función de los elementos de una estructura espacial, su método de cálculo, diseño y trabajo estructural. La parte práctica, la elaboración de un proyecto, que consiste en una cubierta espacial tridimensional para la Unidad de Posgrado de la UNAM en Ciudad Universitaria.

La investigación se integra de seis capítulos, definidos de la siguiente forma:

- El capítulo uno consiste en los antecedentes históricos a nivel internacional, con las causas del surgimiento de las estructuras ligeras en Europa a mediados del siglo XX y las obras arquitectónicas más representativas. Las aportaciones de R. Buckminster Fuller (cúpula geodésica) y Max Mengerlinghausen (sistema MERO). El desarrollo de las estructuras espaciales a mitad del siglo XX, destacando las

investigaciones de Z. S. Makowski, Stéphane Du Château, y algunos sistemas utilizados en la actualidad (Triodetic, Unistrut).

- El capítulo dos se refiere a los antecedentes en México. La llegada de los nuevos sistemas estructurales desde Europa al país, su uso en la arquitectura industrial y edificios representativos como el Palacio de Cristal (actual Museo Universitario del Chopo) y las estructuras internas del Palacio de Bellas Artes y el Palacio Legislativo. La aplicación de las estructuras espaciales en la Arquitectura mexicana, destacando arquitectos como Félix Candela, Manuel Rosen, Juan José Díaz Infante y la invención del sistema de “Tridilosa” por el ingeniero Heberto Castillo. Las compañías especializadas en México, como Space Frame Technology (anteriormente Adriann’s de México), Geometrica, Tridiacero, Trimetika y GMI.
- El capítulo tres abarca el análisis de una estructura geométrica espacial, desde su definición y características según especialistas, clasificación en base al investigados Heino Engel y la composición geométrica y diseño de una armadura espacial. Los ejemplares más comunes de retículas espaciales tridimensionales y sistemas estructurales de nodos.
- El capítulo cuarto contiene el análisis del sistema de retícula y nodo seleccionados: malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros, y nodo esférico; dando características, especificaciones técnicas y diseño geométrico. El diseño y precálculo estructural del sistema para el proyecto planteado, tomando en cuenta la normativa, precálculo estructural, dimensiones y peso. Construcciones análogas que sirven de referencia funcional y estética para el desarrollo del proyecto.
- El capítulo cinco comprende la aplicación práctica del sistema en el proyecto: cubierta espacial tridimensional para la Unidad de Posgrado de la UNAM en Ciudad Universitaria. Incluyendo los antecedentes y justificación del proyecto, planos arquitectónicos explicando el desarrollo de la cubierta, dimensiones y peso; planos estructurales con cálculos para los apoyos y cimentación; acabados e instalaciones. El análisis estructural del sistema utilizado en la cubierta por método de  $\Sigma F = 0$  (módulo tetraédrico) y el análisis de la cubierta por efectos de viento.

- En el capítulo seis doy a conocer las conclusiones de la investigación realizada, teniendo en cuenta las características y beneficios de los sistemas estructurales espaciales tridimensionales. El cumplimiento de los objetivos iniciales y la conclusión a la hipótesis planteada, para la selección del sistema estructural más adecuado para el proyecto de la cubierta espacial tridimensional para la Unidad de Posgrado de la UNAM.

## **I. MARCO TEÓRICO**

- a) El surgimiento de las estructuras ligeras
- b) Los primeros modelos
- c) Descubrimientos e invenciones de R. Buckminster Fuller
- d) La sistemática del Dr. Max Mengeringhausen y el Sistema MERO
- e) El desarrollo de estructuras espaciales a mitad del siglo XX
- f) Los sistemas de Stéphane du Château

## a) EL SURGIMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS

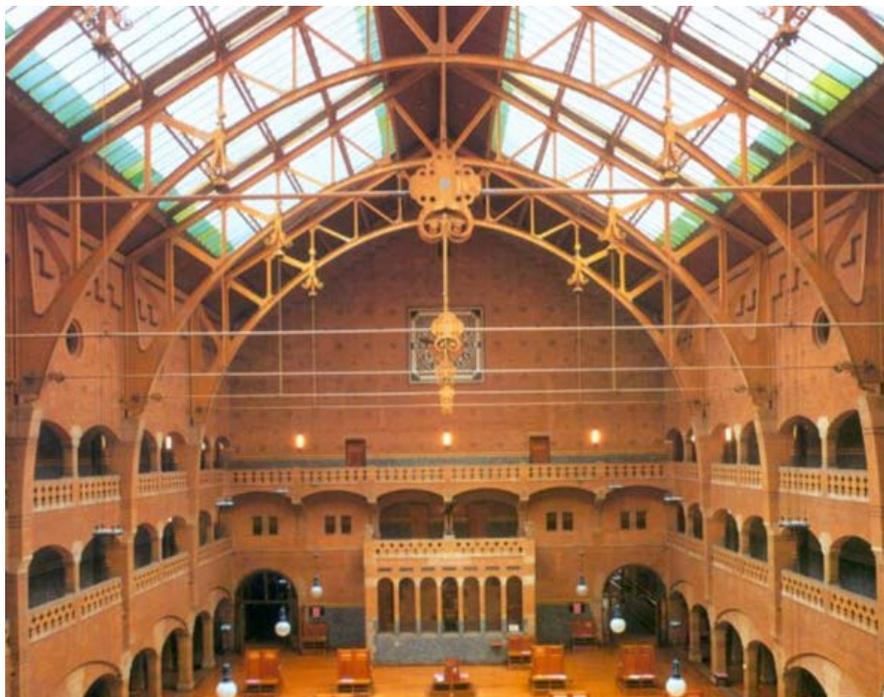
A mediados del siglo XVIII surgió en Inglaterra la Revolución Industrial, teniendo como consecuencia el incremento de la producción de hierro, la creciente industria requería la rápida edificación de inmuebles, por lo que materiales como la piedra y la madera comenzaron a ser sustituidos por los metales. La creación de altos hornos permitió la fundición de piezas metálicas de grandes dimensiones, lo que propició el uso del hierro como material elemental de construcción (Alacero, 2014, párr. 4). Las características del hierro comenzaban a mostrarse superiores a las nuevas necesidades de la arquitectura monumental, frente a materiales como la piedra y la madera, siendo las principales:

- Ahorro económico: La causa más importante del implemento del hierro se dio a su producción en masa, lo que logró disminuir el costo de elementos estructurales y exigía menor fuerza de trabajo (logrado a través de la producción en serie, el cual al tener una producción consistente, sin esperar que se solicite previamente, se generan reservas y se satisface así la demanda a futuro).
- La piedra era el material predominante en los elementos estructurales verticales, debido a sus propiedades, para lograr grandes claros, las secciones de los apoyos poseían grandes dimensiones. Con el uso de apoyos fabricados de metal las secciones de las columnas disminuyeron notablemente (reduciendo casi la mitad del área de la sección), esto significaría mayor eficiencia del espacio y la necesidad de proyectar estructuras más ordenadas, posteriormente reticuladas (Alacero, 2014, párr. 5).
- La sustitución de elementos horizontales y de cubierta tradicionales (bóvedas y vigas de madera) por armaduras de hierro de gran esbeltez, implicó una estructura más ligera, lo que propició construir edificaciones de mayor altura.
- La dificultad de encontrar grandes troncos de madera para utilizarlos como vigas y la elaborada técnica de esculpir la piedra para las bóvedas de grandes claros, hicieron que las armaduras de hierro fueran más adecuadas para la creación de grandes estructuras (que inicialmente no mostraron gran adelanto para superar

grandes luces, pero que posteriormente fueron perfeccionadas teniendo como ejemplo los grandes palacios de cristal).

La arquitectura industrial optaría por los metales como material esencial para la edificación de grandes naves. La elaboración de los primeros elementos estructurales metálicos, se basaría en las ya conocidas estructuras de madera, pero las características del hierro fundido no siempre eran favorables, ya que este material sólo soportaba esfuerzos de compresión y además las piezas por sí solas no lograban grandes claros, no podían ser soldadas y por lo tanto eran unidas por acoples sencillos; todo esto provocaría posteriormente su sustitución por el acero (Alacero, 2014, párr. 11).

Dentro de la arquitectura académica del siglo XVIII, el uso de los metales como elemento aparente no era aceptado, por lo que podemos observar pocos ejemplos del uso de estos; sería más tarde en el siglo XIX tras el naciente Racionalismo Arquitectónico, que los proyectos se enfocarían al ámbito estructural, tras numerosos análisis y descubrimientos ahora era posible calcular las líneas de fuerza en las estructuras (Fotografía 1, 2); las matemáticas se convertirían en una herramienta básica para los constructores, apoyándose por los tratados teóricos.



Fotografía 1. Hendrick Berlage. Salón principal de la Bolsa de Valores de Ámsterdam (1897-1903). Destaca la cubierta a 22 metros de altura, formada por armaduras de arco de medio punto con techo de paneles dobles de vidrio; evidenciando las líneas de fuerza en la estructura propuestas por el Racionalismo Arquitectónico.

Pronto las grandes estructuras se proyectarían reticuladas, trasladando el racionalismo estructural de la ingeniería a la arquitectura y desplazando al ornamento a una función secundaria; esto provocaría en el campo de la Arquitectura una fuerte divergencia sobre la importancia de la función sobre la forma y viceversa, durante varias generaciones (Melvin, 2005, págs. 78, 79).



Fotografía 2. Henri Labrouste. Interior de la Biblioteca Nacional, París, Francia. (1860-1868). Sala Labrouste compuesta por dieciséis columnas de hierro de 30 cm de anchura y 10 metros de altura, cubriendo un área de 1,150 m<sup>2</sup> (claros aprox. de 11 metros). Labrouste propone que la ornamentación debe proceder de la estructura misma.

Más tarde, a principios del siglo XX, varios teóricos incluyendo al arquitecto holandés Hendrick Berlage, explorarían la idea de que la estructura por sí sola, podría crear un espacio y transmitir un significado sin necesidad de ornamentación; concepto que sería base de la arquitectura del Movimiento Moderno.

Las primeras grandes edificaciones que evidenciarían el uso de los metales como elemento primario arquitectónico, serían las galerías de comercio, cuya necesidad de

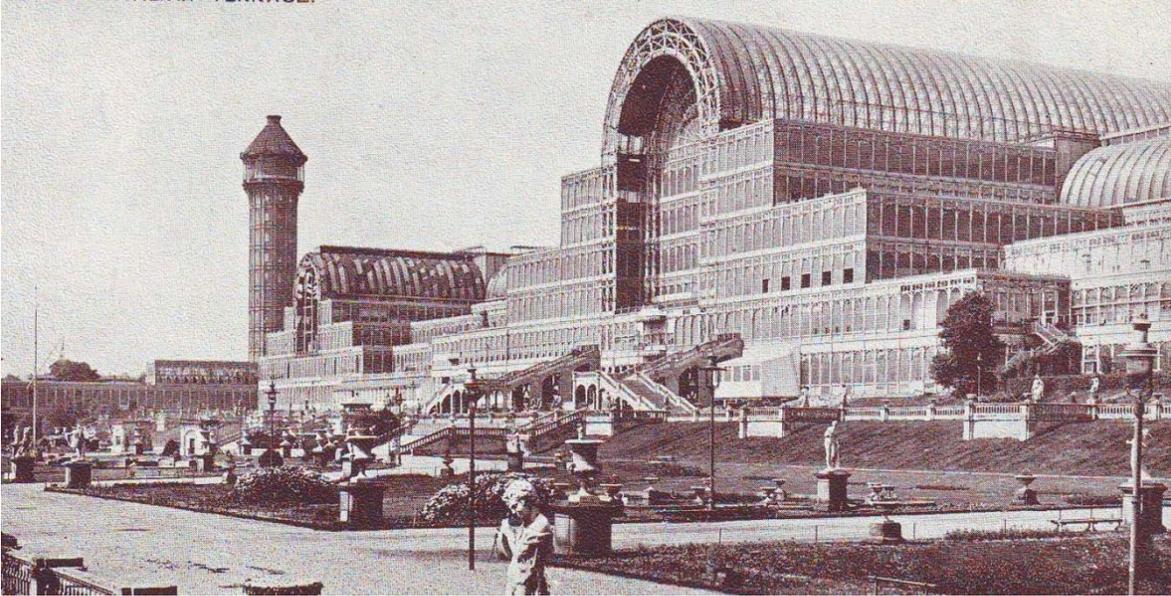
cubrir las pasarelas entre comercios y poseer iluminación natural, necesitarían de la combinación de una estructura ligera y estrecha como el hierro y un panel transparente como el vidrio; dichas galerías comenzarían a pequeña escala, que servirían de ejemplo para la edificación de famosas galerías de comercio como las galerías Vittorio Emanuele II en Milán y Saint Hubert en Bruselas (Fotografía 3).



Fotografía 3. Giuseppe Mengoni. Interior de la Galería Vittorio Emanuele. (1880). Se observan las galerías formadas por bóvedas con estructura de hierro y cubierta de cristal con claros de aprox. 15 metros, alzando la cúpula de 36 metros de diámetros a 47 metros de altura.

Poco después se desarrollaría la más significativa propiedad de los metales en la arquitectura de la época, una estructura desmontable; esta característica junto con la producción en serie de los elementos estructurales permitiría la creación no sólo de edificios de enormes dimensiones y adelantos tecnológicos, sino que la estructura pudiera ser desmontada y reconstruida rápidamente y en diferentes sitios; los grandes palacios expositores serían la nueva referencia de las estructuras en la Arquitectura, los más

famosos, el Palacio de Cristal en Londres y la Galería de las Máquinas en París (Fotografía 4). Durante las últimas décadas del siglo XIX y principios de XX se desarrollarían nuevos sistemas, más eficientes, de mayores dimensiones y en su caso desmontables que servirían de fundamento para la creación de las primeras estructuras espaciales; otra faceta de estructuras metálicas ligeras se expresaría en las obras de ingeniería civil, principalmente los grandes puentes.



Fotografía 4. Joseph Paxton. Vista del Palacio de Cristal. (1851). Estructura desmontable de hierro, con dimensiones de 563 metros de largo, 124 de ancho y 33 metros de altura, cubriendo una superficie de 9 hectáreas. La estructura principal consistía en piezas que formaban arcos de 7.3 metros de luz con ménsulas de hierro fundido y un tirante de hierro forjado. Fue sustentado por 3300 columnas de hierro, 2224 travesaños y 300000 láminas de cristal.

## b) LOS PRIMEROS MODELOS

A partir de la mitad del siglo XIX las estructuras metálicas comenzaron a ser monumentales, los palacios expositores y grandes puentes eran vistos en varias partes del mundo, la característica de ser desmontables hacía posible su construcción en meses en lugar de años. Hacia 1864, Gustave Eiffel

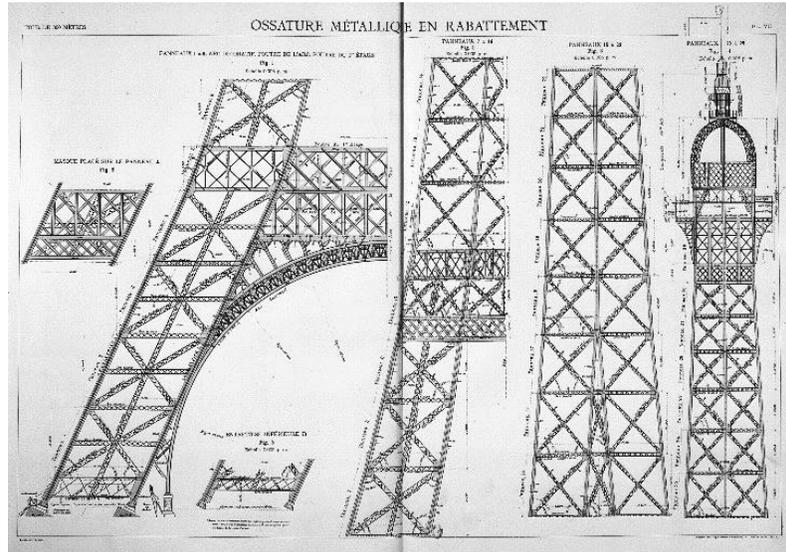
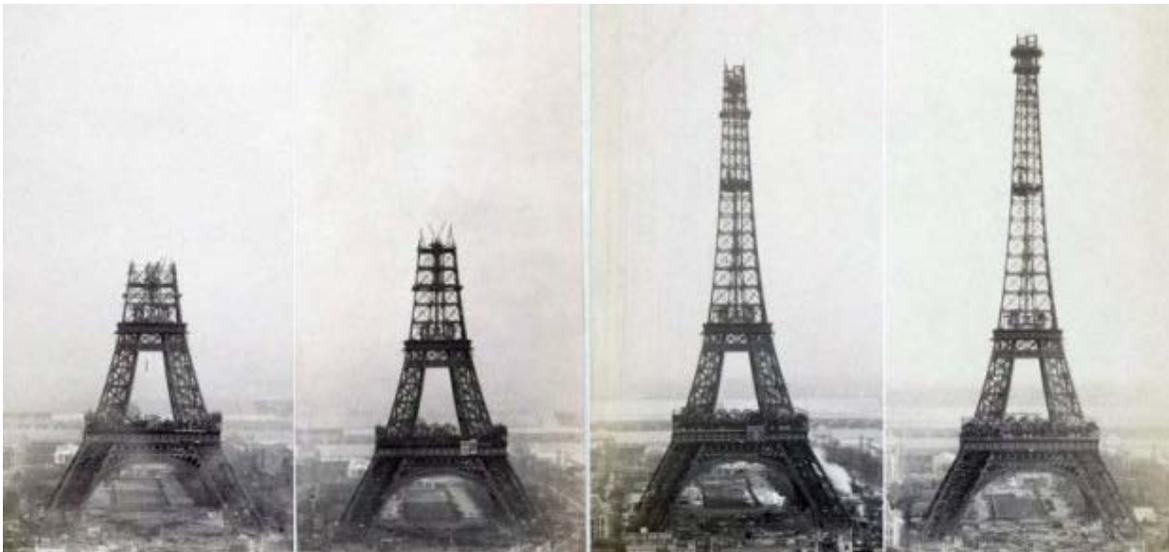


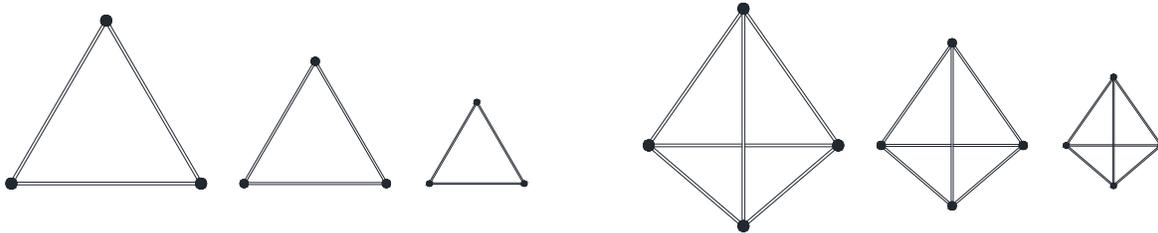
Imagen 1. Gustave Eiffel. Detalles constructivos de la Torre Eiffel, realizada con piezas de hierro forjado unidas con remaches puestos con calor. (1887).

comenzó a trabajar en puentes, utilizando el principio estructuras espaciales en tres dimensiones, con perfiles comerciales como ángulos y soleras, lo cual concedía a la estructura gran estabilidad con un peso mínimo; con la torre Eiffel terminada en 1889, Gustave sintetiza su conocimiento previamente adquirido, manifestando la armonía creada entre la forma construida y la función del edificio (Imagen 1, Fotografía 5).



Fotografía 5. Gustave Eiffel. Etapas de construcción de la Torre Eiffel. (1887-1889). Con una altura total de 324 metros, fue erigida en dos años con dos meses y cinco días, para la Feria Mundial de la Exposición Universal de 1889 en París, Francia. Los arcos internos libran un claro de 74 metros con una altura de 39 metros.

En 1892 el ingeniero alemán August Föppl publica el artículo: “Armaduras en el espacio”, en el cual enuncia la ley de estabilidad de las armaduras espaciales: “Una armadura espacial es estáticamente determinada y estable cuando entre el número  $n$  de nudos y el número  $b$  de barras se llena la condición:  $b = 3n - 6$ ”. Con esto establecía que de todos los cuerpos regulares de los antiguos griegos, sólo el tetraedro, el octaedro y el icosaedro, eran estables; mientras que el cubo y el dodecaedro sólo forman armaduras estables si se triangulan en sus caras laterales. De esta manera, el triángulo ( $n = 3$ ,  $b = 3$ ) se muestra como la superficie más simple formada con barras estáticamente estable y que el tetraedro ( $n = 4$ ,  $b = 6$ ) es el volumen más simple, estáticamente estable, formado con triángulos (Mirafuentes, 1976, pág. 47), (Imagen 2).



TRIÁNGULO FORMADO POR  $N = 3$  Y  $B = 3$ .

TETRAEDRO FORMADO POR  $N = 4$  Y  $B = 6$ .

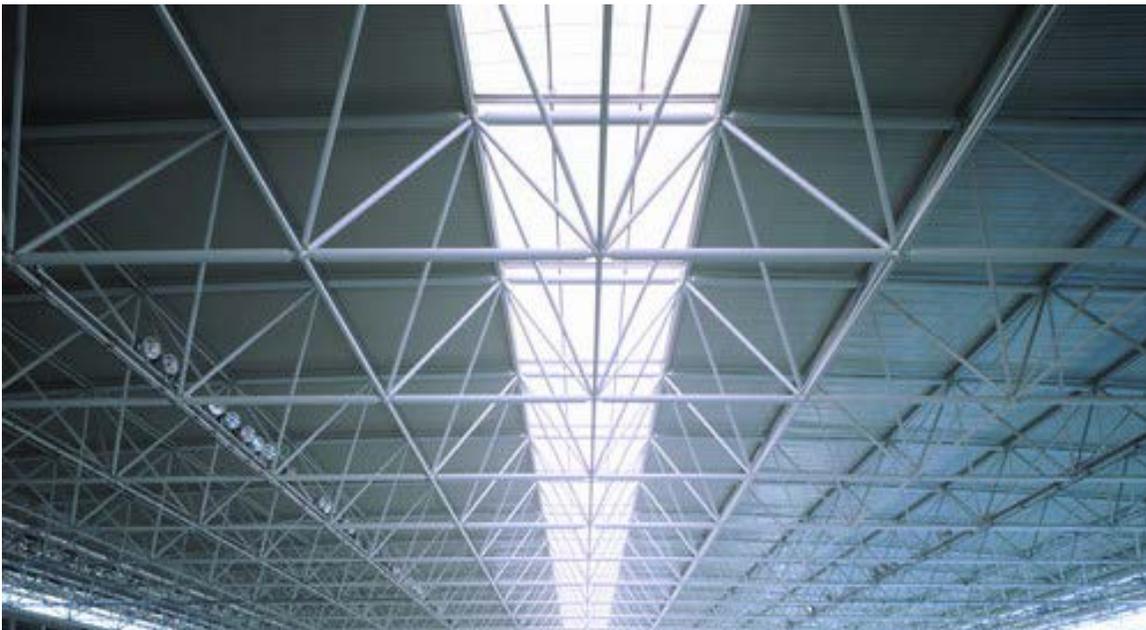
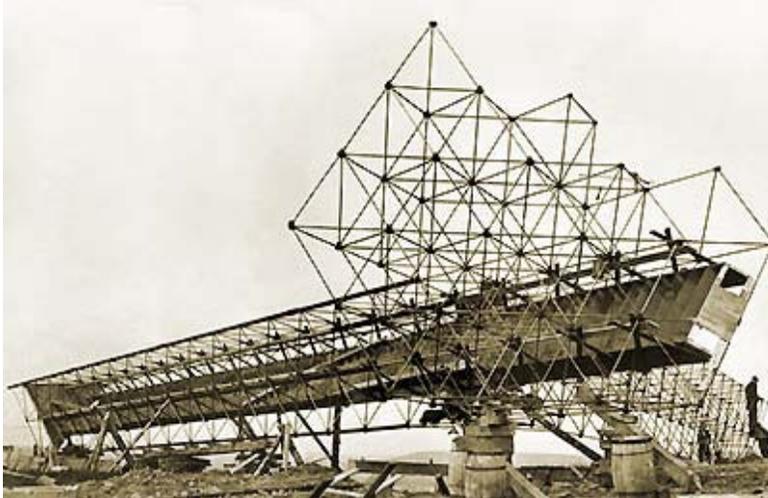


Imagen 2. Ejemplos de la “Ley de estabilidad de las armaduras espaciales” por August Föppl, proponiendo que el triángulo es la superficie estable más simple y el tetraedro el volumen. Ejemplo de aplicación, estructura reticulada tridimensional formada por tetraedros para sostener una cubierta plana, fabricada por Lanik.

A finales del siglo XIX, el inventor inglés Graham Bell, comenzó a trabajar con armaduras espaciales en tres dimensiones, aplicándolas en torres, donde ya se observa un orden geométrico definido; a pesar de no haberse utilizado con fines arquitectónicos, estas estructuras se reconocen como las primeras armaduras espaciales completamente desarrolladas (Fotografía 6). El ejemplo más conocido es la estructura "Tower Bell" en Nueva Escocia, Canadá, en 1907 (Fotografía 7).



Fotografía 7. Graham Bell. (1907). Armadura espacial experimental formada por células tetraédricas y nodos esféricos.



Fotografía 6. Graham Bell (1907). Estructura espacial "Torre Bell", formada por células tetraédricas de tubos de hierro de 4 ft de longitud, alcanzando una altura total de 75 metros. Nueva Escocia, Canadá.

Robert Le Ricolais, profesor del Instituto de Investigaciones Arquitectónicas en la Universidad de Pennsylvania, se especializó en los sistemas de redes tridimensionales creados a partir de objetos cotidianos; Le Ricolais tomaba de ejemplo la estructura de objetos cotidianos, en especial la creada por las cuerdas de tela y los tejidos de cualquier prenda, señalando la gran fuerza de resistencia existente entre los hilos y las oquedades. Su trabajo sobre los sistemas de redes introduciría a muchos arquitectos al concepto de las estructuras espaciales. Hacia 1934, Le Ricolais establece la resistencia de las estructuras espaciales retomando las formas de la naturaleza y analiza la segmentación de una esfera por medio de geodésicas; seis años más tarde da a conocer su teoría de la aplicación de las estructuras tridimensionales en la Arquitectura, desarrollando un sistema constructivo de armaduras espaciales llamado "Trihex", compuesto por triángulos y hexágonos, formulando la siguiente condición:  $E = 2C$ , donde E es el número de

segmentos y  $C$  el número de intersecciones, con este sistema se propone la construcción de domos formados por paraboloides en revolución (Mirafuentes, 1976, pág. 48).

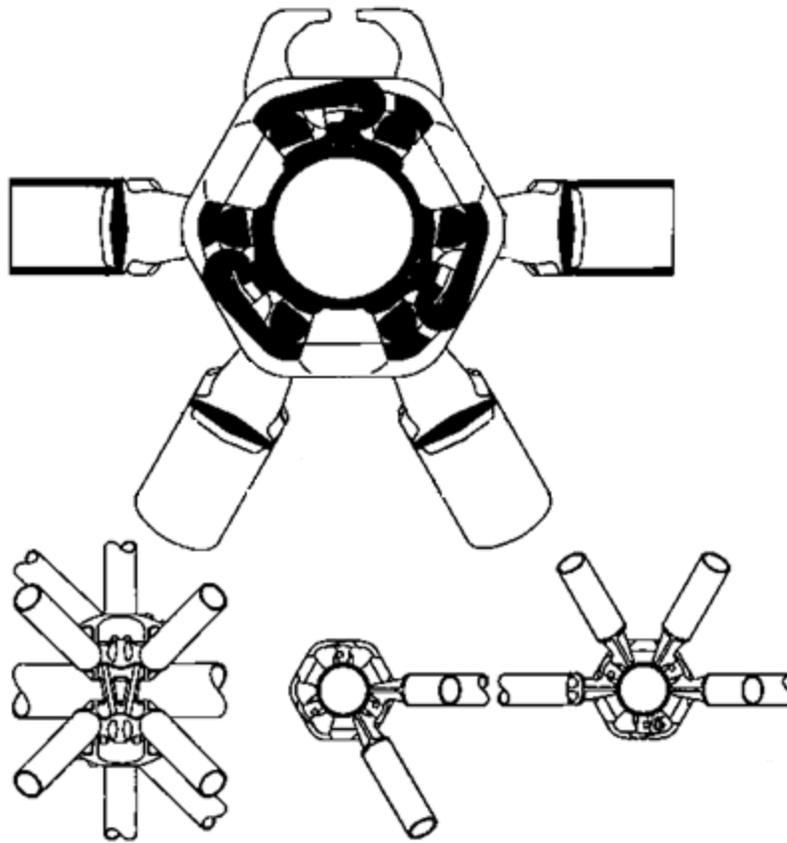


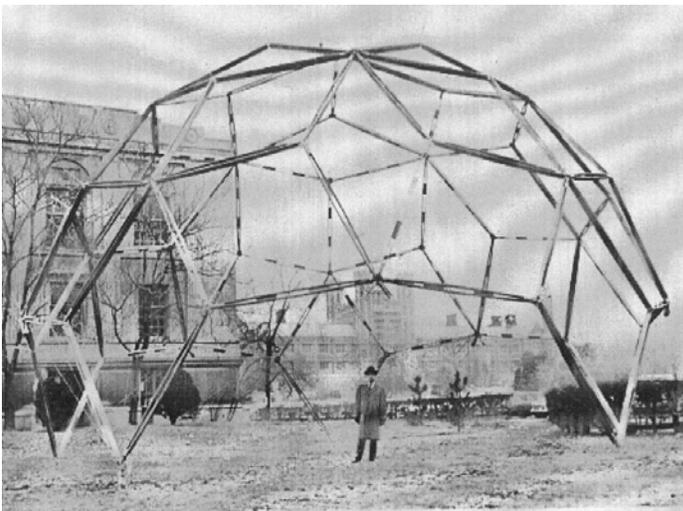
Imagen 3. Diagrama de nodo desarrollado por Konrad Wachsmann para la creación de estructuras en hangares de grandes dimensiones.

En 1946, el arquitecto norteamericano Konrad Wachsmann, realizó investigaciones sobre sistemas constructivos espaciales tridimensionales, con la elaboración de los elementos en serie. Su “coordinación modular”, se regulan todas las relaciones de los elementos del conjunto, tomando por principio la simplicidad y la capacidad de combinarse de manera diversa. Wachsmann aplicaría su estudio en la edificación de grandes hangares con cubiertas espaciales, diseñando específicamente los reticulados y sus conectores (Imagen 3).

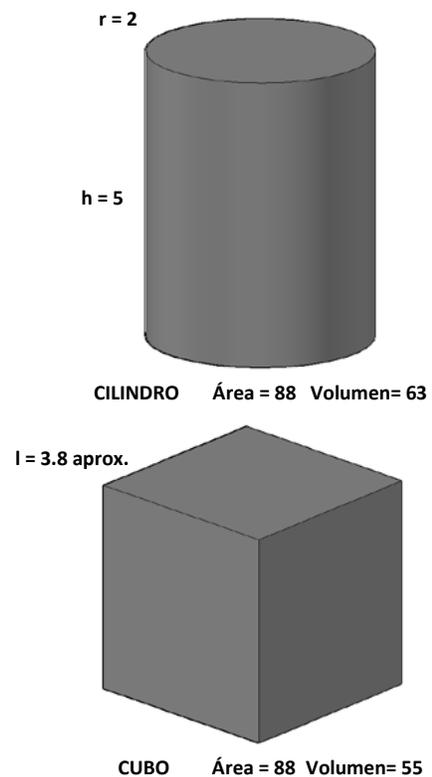
### c) DESCUBRIMIENTOS E INVENCIONES DE R. BUCKMINSTER FULLER

El inventor norteamericano Richard Buckminster Fuller logró varios avances en el campo de la Arquitectura e Ingeniería a través del análisis de las estructuras en la naturaleza, recopilando su investigación bajo el concepto de “Synergetics” (sinergia), el cual expresa que el trabajo de un sistema entero es mayor a la suma de sus partes por separado.

Uno de sus estudios más interesantes, fue al desarrollar el proyecto de la casa Dymaxion, basándose en simple geometría había observado que los volúmenes basados en circunferencias podían albergar mayor espacio interior comparado con un poliedro común como el cubo. Por medio de diagramas y cálculos describía lo siguiente: “Si se toma un cubo con sus seis caras cuadradas de igual tamaño y se le transforma en cilindro, la misma superficie de pared encierra mayor espacio”, esto sería un gran avance para el desarrollo de estructuras circulares años más tarde (Fotografía 8).



Fotografía 8. Fuller. Análisis: Un cilindro con la misma área de superficie que un cubo, encierra un volumen mayor. Aprovechando esta geometría, la cúpula geodésica, se encuentra en un equilibrio entre la cantidad de superficie externa y el volumen interno, aplicable a la construcción de estructuras en espacios reducidos (si la figura tiende a ser más esférica obtendrá la mayor cantidad de volumen con la menor superficie).



Quizá el experimento más importante de Fuller fue sobre la composición estructural de elementos de la naturaleza, él proponía retomar la forma geométrica de los elementos más simples, que se caracterizaban de una resistencia alta y liviandad. Fuller se

preguntaba qué hacía tan fuerte a la composición de moléculas por átomos, y para esto realizó un experimento con pequeñas esferas. Colocó una esfera al centro y la rodeó por la mayor cantidad de esferas posibles con la condición de que cada una tocará al centro, dando una capa exterior con doce esferas; siguió experimentando con otra capa y notó que ahora serían cuarenta y dos esferas y posteriormente noventa y dos, él describió a este fenómeno como “el más compacto paquete de esferas” (descubierto anteriormente por los científicos Barlow y Bragg, en la composición natural de los cristales). De esta manera Fuller enunció la siguiente fórmula para predecir la cantidad de esferas en cada capa:  $10 \times (n \text{ de capas})^2 + 2 = n \text{ total de esferas}$  (Rosen M. , 2005, págs. 116, 117), (Imagen 4).

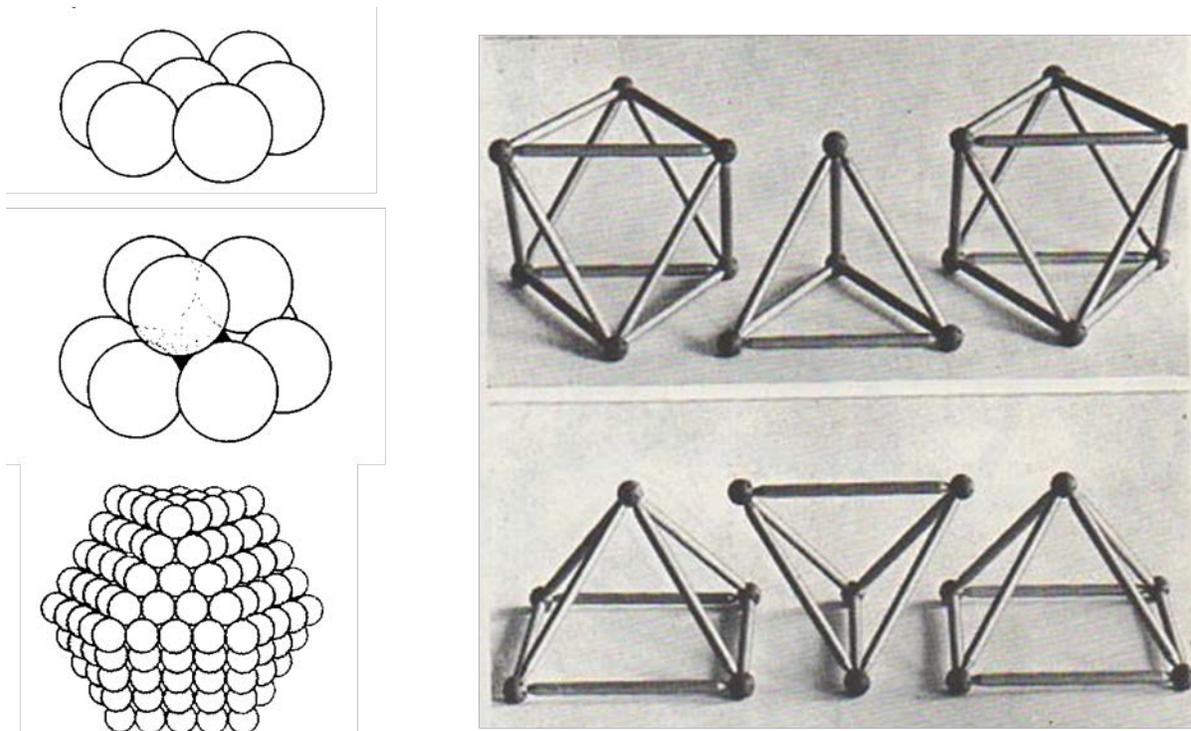


Imagen 4. Experimento del “el más compacto paquete de esferas”, siguiendo la fórmula  $10 \times (n \text{ de capas})^2 + 2 = n \text{ total de esferas}$ . Al unir los centroides de las esferas, las estructuras internas están formadas por poliedros como tetraedros, octaedros, etc.

La siguiente etapa del experimento consistió en cubrir la capa externa de esferas por planos, dando como resultado un poliedro de catorce caras (de ocho triángulos y seis cuadrados), al analizar los vértices de la figura observó que todas las líneas tenían la misma longitud, tanto las aristas como las líneas que unían el centro de la figura; esto lo

planteó en función de fuerzas, las cuales debían tener dos medidas, resistencia y dirección, lo que representaba un vector (Imagen 5).

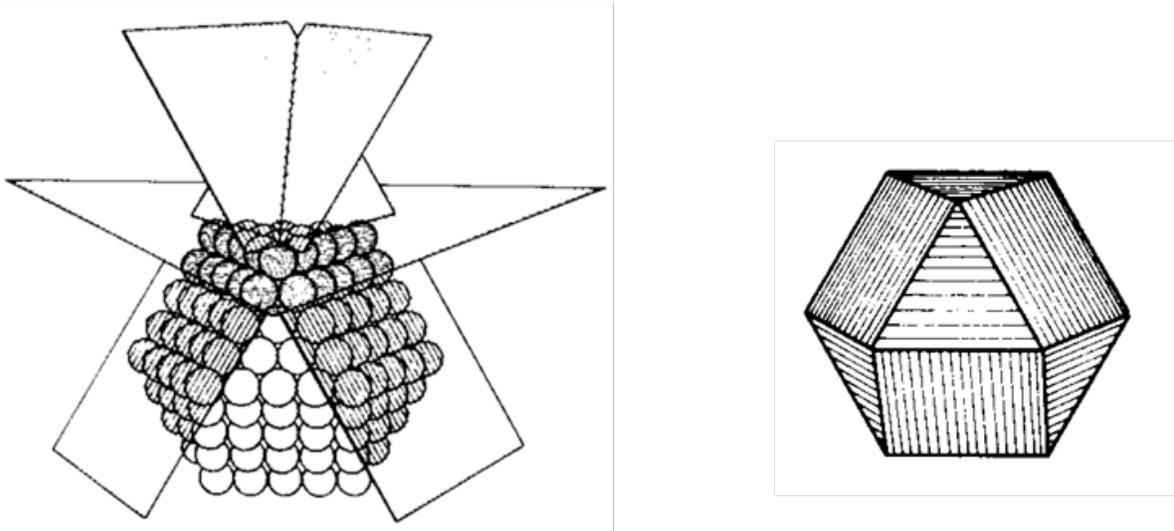


Imagen 5. Poliedro de catorce caras, resultado del paquete compacto de 42 esferas. El cruce de vértices da como resultado la creación de aristas para formar un rombododecaedro.

Después consideró que la figura tenía dos tipos de fuerzas, el primer tipo de fuerza se relacionaba con las líneas exteriores que unían los vértices, la otra fuerza era generada por las líneas internas que iban del centro hacia los vértices; dado que todas las líneas tenían la misma longitud, había un empate de fuerzas, por consiguiente el sistema estaba en equilibrio (Imagen 6).

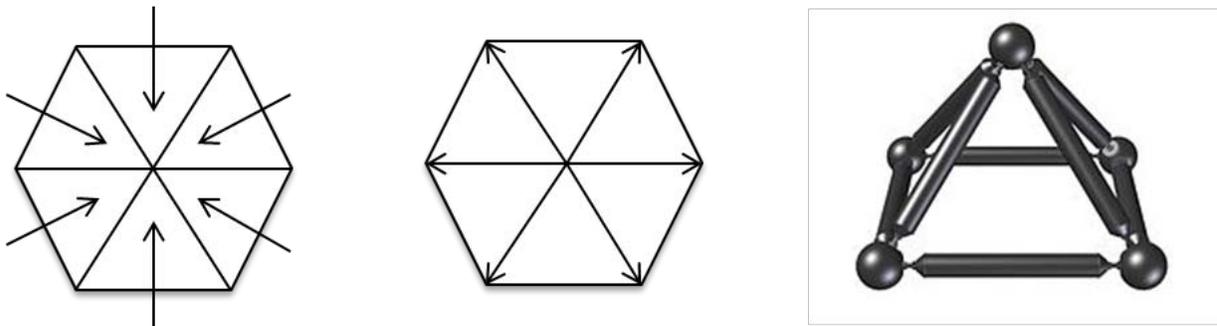


Imagen 6. Equilibrio de fuerzas propuesto dentro del sistema. Aplicado a una célula de una armadura espacial, los esfuerzos de compresión y tracción son equilibrados por las barras y los nodos.

El segundo experimento consistió en simplificar el objeto removiendo la esfera central, al hacerlo la figura había cambiado así como el equilibrio vectorial, ahora el volumen

constaba de veinte caras triangulares, formando un icosaedro. Posteriormente volvió a reducir el interior de la figura, obteniendo un octaedro y simplificando nuevamente resultó un sólido de cuatro caras o tetraedro. La figura no podía reducirse más, Fuller había descubierto la forma geométrica básica de un sistema en la naturaleza y tuvo por conclusión que las fuerzas de todo sistema existente se descomponían triangularmente, en piezas tetraédricas, incluso en un cubo donde proponía que las fuerzas se concentraban diagonalmente (Imagen 7).

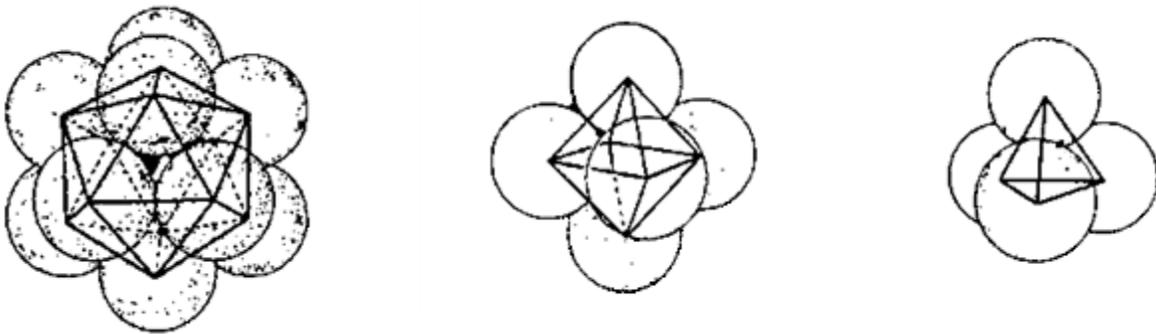


Imagen 7. Fuller. Poliedros resultantes de la geometría inscrita en los paquetes de esferas (Icosaedro, octaedro y tetraedro).

En aquella época los científicos comenzaban a estudiar la composición formada por los átomos para obtener moléculas, de esto concluyó que el tetraedro, el octaedro y el icosaedro, eran las formaciones fundamentales de una molécula (Imagen 7); poco después lo llevó a la práctica construyendo pequeños modelos con palillos de plástico y observó que estas figuras eran indeformables por lo que su conclusión era correcta.

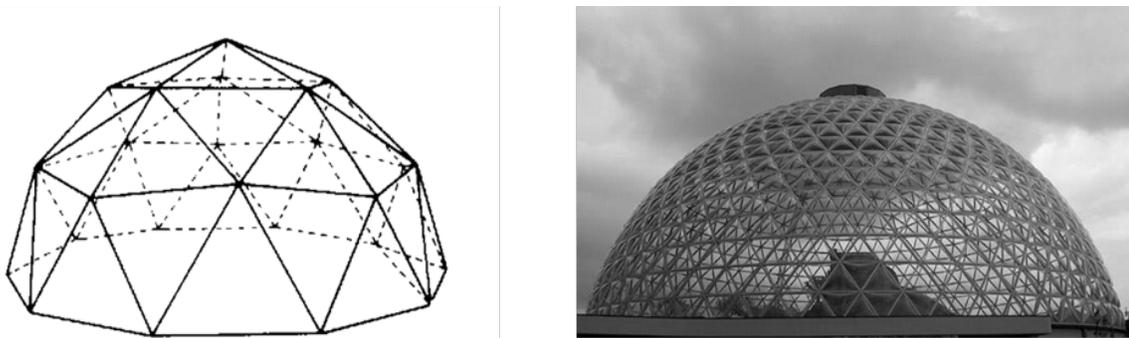


Imagen 8. Fuller. Segmentación del paquete compacto, dando por resultado la tendencia a formarse una esfera. Entre más fraccionados estén los miembros, la superficie general se mostrará más lisa.

Segmentando las figuras en más triángulos, descubrió que se tendía a formar una nueva figura sólida perfecta, la esfera; al unir los vértices de cada tetraedro en el sistema se formaban superficies trianguladas sobre la esfera (Imagen 8), de esta manera se podían formar “círculos máximos” (aquel cuyo radio es el radio de la esfera misma). Al traducir el cambio del poliedro a esfera, observó que las bandas del círculo entre los vértice representaban la cantidad mayor de empuje hacia afuera por los vectores internos del sistema, pero al dibujar líneas rectas entre esos vértices, resultaría la cantidad máxima de empuje hacia adentro por los vectores externos del sistema; retomando la investigación de la geometría de la casa Dymaxion, por consiguiente tenemos (Rosen M. , 2005, pág. 124), (Imagen 9):

- Si los vectores externos fuesen más grandes que los internos, la esfera sería empujada a recobrar la forma del tetraedro; obteniendo la mayor cantidad de superficie con la menor cantidad de espacio interior.
- Si los vectores internos fuesen más grandes, el tetraedro se inflaría hasta adoptar la forma esférica, teniendo el sólido con la mayor cantidad de volumen y con la menor cantidad de superficie.

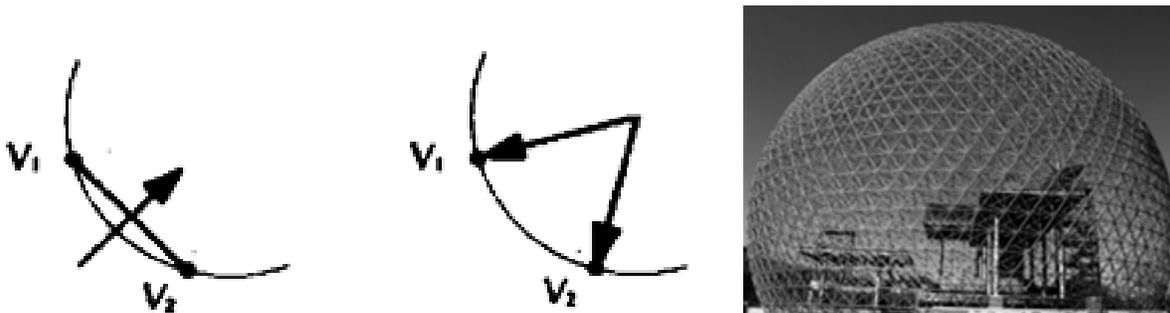


Imagen 9. Fuller. Equilibrio producido por las fuerzas concentradas en las barras y los nodos. En la cúpula de Montreal, Fuller utiliza la primera premisa, formando células tetraédricas, pero al estar repetidamente segmentadas se aprovecha mayor cantidad de volumen interno y se facilita así la estandarización de piezas.

Finalmente Fuller afirmó su conclusión de que los sistemas construidos por combinaciones triangulares simétricas, proporcionaban las mejores condiciones para la distribución de la energía (Imagen 10); dichos triángulos se forman uniendo los vértices por medio de cuerdas de círculo máximos sobre la superficie de la esfera, al subdividirlos en

triángulos más pequeños, el sistema tiende a ser más resistente. Designaría a las estructuras construidas por este procedimiento con el nombre de estructuras “geodésicas”. Lo más significativo fue que la geometría vectorial que él proponía no necesitaba del uso de números irracionales como  $\pi$  (pi), lo cual facilitaba su cálculo significativamente, ya que podía combinar unidades básicas para formar poliedros más complejos y todo se calculaba en un número entero de tetraedros utilizados.

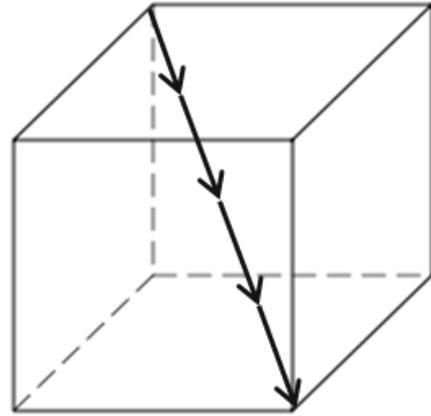


Imagen 10. Fuller. Distribución de las fuerzas de un sistema, a través de triángulos; en un cubo por sus diagonales.

En 1946 creó la Fuller Research Foundation (Fundación Fuller de Investigación), con el propósito de ampliar sus investigaciones y proteger sus inventos; el proyecto que buscaría desarrollar sería la estructura geodésica, se preguntaba cómo realizar una esfera dividida en triángulos, con unidades tetraédricas a una escala humana; para fines más útiles pensó la estructura como una cubierta, al partir la esfera obtendría una cúpula, pero al construirla buscaba que esta tuviera un peso mínimo, de manera que se enfocaría primeramente en los vértices y aristas de la figura, obteniendo una figura de gran resistencia, sólo que aún faltaba proponer el material ideal, para esto recurrió a uno de sus antiguos proyectos, la casa-dirigible, en la cual los niveles y la cubierta estaban sostenidas por fuerzas de compresión y tracción, a través de cables.

**COMPRESIÓN**

**TRACCIÓN**

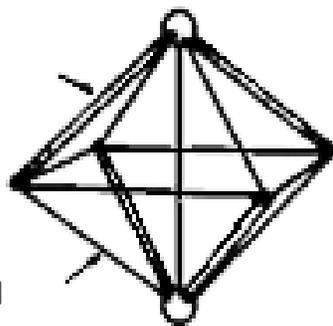
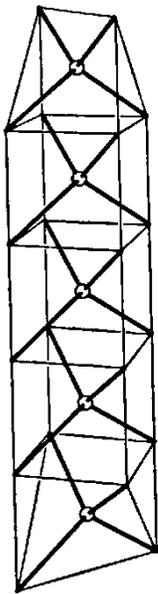


Imagen 11. Fuller. Célula piramidal con barras, tensores y nodos, trabajando a compresión y tracción.

Fuller tomó como base un cubo, dividido interiormente por diagonales formando tres tetraedros, la forma del cubo le otorgaba al conjunto el equilibrio en el centro de gravedad, desde ese punto enlazó dos vértices con barras, el punto se conformaría por una bola que permitiera el giro de la figura según se necesitase, de manera que unió dos cubos alternadamente, conectados por los puntos centrales por un tensor; las barras

servían a compresión, pero para evitar que se abriesen unió los vértices por cuerdas que trabajan a tracción, de manera que formaran dos pirámides articuladas por cuerdas y barras (Imagen 11); con esto obtuvo una célula que podía repetirse consecutivamente, al realizarlo en maquetas el resultado era impresionante, se podían formar estructuras en equilibrio muy resistentes en las cuales las barras parecían suspendidos en el aire por los delgados tensores, a esta geometría le llamó “tensegrity” (Rosen M. , 2005, pág. 132), (Imagen 12).



Buscaría un ejemplo común para la aplicación de este sistema, se basó en las naves industriales, las cuales eran sostenidas por armaduras que trabajaban independientemente; él propondría el sistema “octet truss” (viga armada octeta), la cual consistía en piezas tetraédricas u octaédricas combinadas en tirantes, donde cada tirante trabajaba en conjunto con los demás, así las cargas sobre las vigas se distribuían uniformemente en todas las direcciones (Imagen 13). Fuller buscó desarrollar su nuevo invento, junto con algunos estudiantes realizaría maquetas que podían ser desdobladas desde un ligero plano hasta una cúpula de dos metros; posteriormente buscaría patentar su invento como cúpula geodésica, refiriéndola a un armazón para encerrar espacios.

Imagen 12. Fuller. Estructura formada por varias células, ejemplo de un sistema de “tensegrity”.

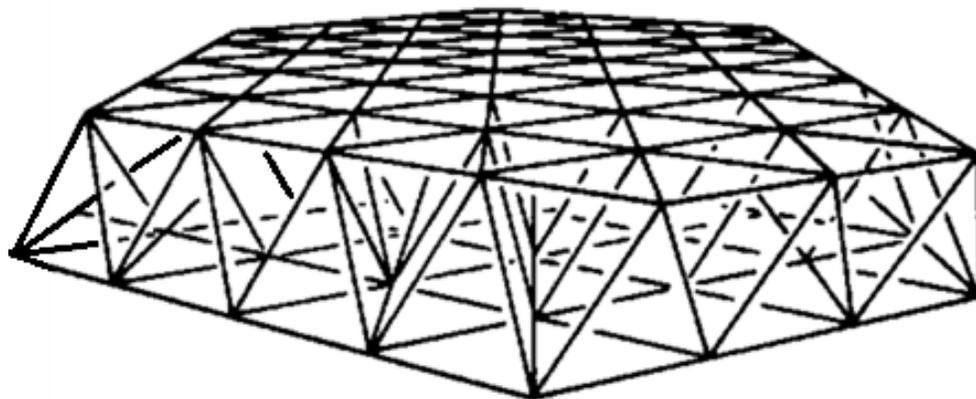
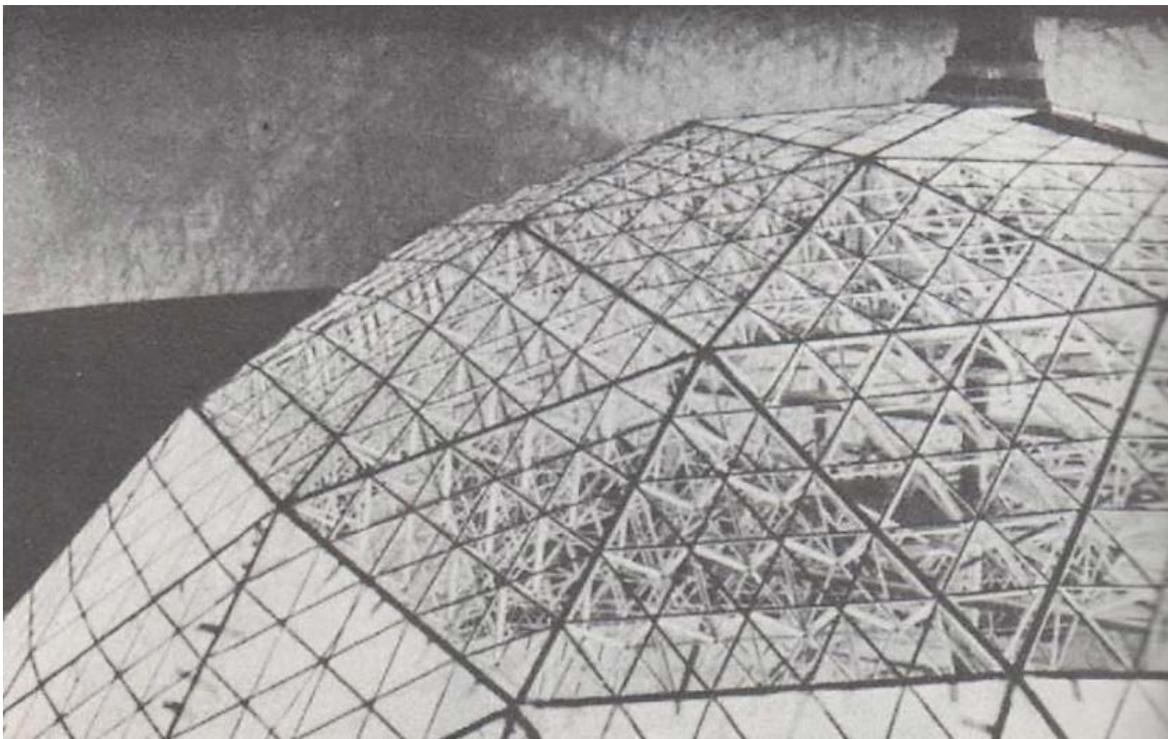


Imagen 13. Estructura espacial formada por el sistema “octet truss”. Donde las cargas se distribuyen uniformemente en el conjunto.

Finalmente en 1952, tendría la oportunidad de construir su idea, la Ford Motor Company proyectaba construir un edificio cilíndrico cubierto por una cúpula metálica de 28 metros de diámetro, pero el problema se hallaba en el peso y los pocos apoyos necesarios para un almacén de acero común; para ello lo contactaron, quien les resolvió el proyecto con una ligera cúpula geodésica de sólo ocho y media toneladas, comparada con una de acero de 160 toneladas. La construcción tardó solo cuatro meses constituyendo un récord para este tipo de edificaciones y con la patente adquirida Fuller crearía dos compañías Synergetics, Inc. y Geodesics, Inc., siendo las únicas con autorización para construir utilizando este sistema.

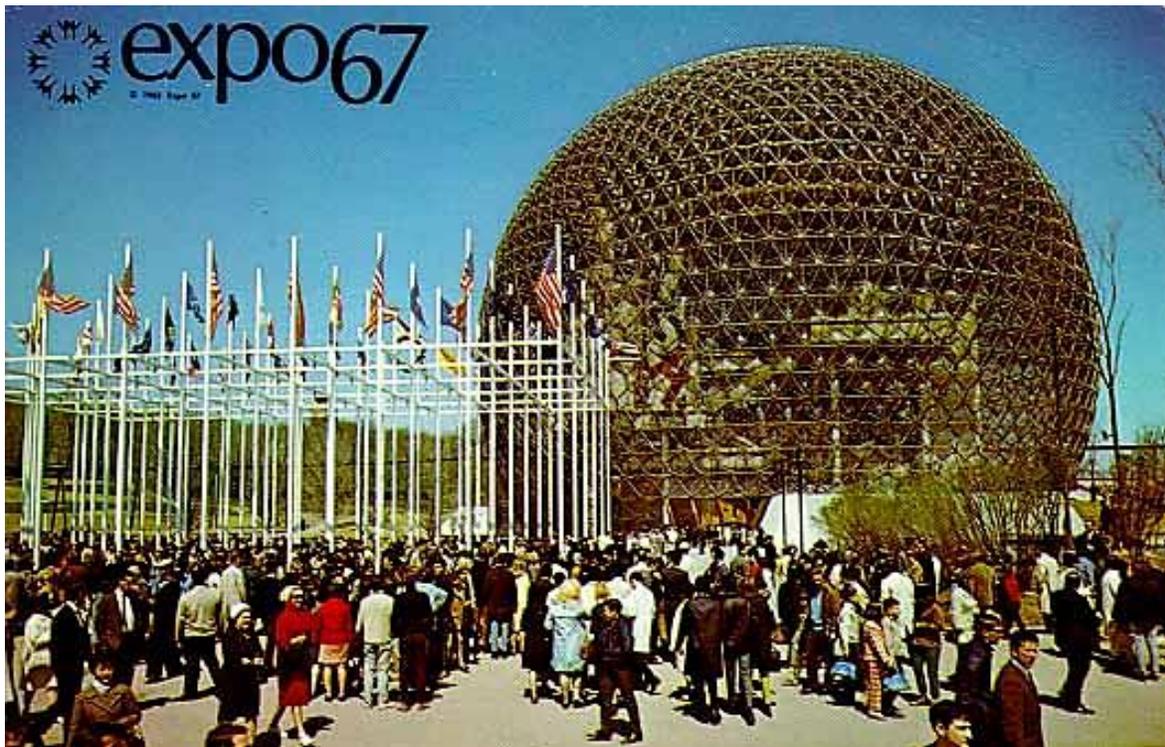


Fotografía 9. Fuller. Vista de la cúpula de la Rotonda Ford. De 28 metros de diámetro y ocho y media toneladas de peso.

Pronto realizaría varios proyectos, como el refugio militar para el gobierno norteamericano durante la Guerra Fría (cúpula de plástica llamada “radomo”), de doce metros de altura que podía armarse en catorce horas o la cúpula solicitada por la marina de nueve metros de diámetro, hecha de madera y forrada de plástico que podía trasladarse en helicóptero. Sus estructuras eran utilizadas como refugios militares, pabellones expositores e invernaderos; la ventaja de ser construcciones ligeras, rápidamente desmontables y

llamativas se presentaron en grandes proyectos como el pabellón de los Estados Unidos de la Feria Internacional de Comercio en Kabul, Afganistán y la cúpula del Kaiser en Honolulu, Hawái, los cuales llevaron a la fama a Buckminster Fuller, quien fue solicitado para construir alrededor del mundo. Hacia 1967 construiría su estructura más trascendental, la cúpula del pabellón norteamericano de la Feria Mundial Canadiense de 1967, de sesenta metros de altura, formada por hexágonos subdivididos en triángulos; en esta se colocó la más alta tecnología de la época para abrir y cerrar los vanos hexagonales, de manera que podían controlar la cantidad de aire y luz en el interior.

El inventor R. Buckminster Fuller había desarrollado un nuevo sistema estructural, con el concepto de cúpula geodésica, se buscaba envolver una cantidad máxima de espacio con un mínimo de material, segmentando los poliedros y repitiendo los núcleos tetraédricos (denominando esta división como frecuencia). Además redactaría un tratado muy completo sobre los sistemas topológicos de los poliedros, llamado “Synergetic Energetic Geometry”, el cual serviría de base en las siguientes generaciones para la proyección de estructuras espaciales.



Fotografía 10. Pabellón norteamericano de la Feria Mundial Canadiense de 1967. El edificio comprendía una estructura geodésica de acero de 76 metros de diámetro y 62 metros de altura, recubierta por células de polímeros.

#### d) LA SISTEMÁTICA DEL DR. MAX MENGERINGHAUSEN Y EL SISTEMA MERO

Uno de los pioneros en el desarrollo de las estructuras espaciales fue el ingeniero alemán Max Mengerlinghausen, el cual desarrollaría a mediados del siglo XX un compendio sobre las armaduras espaciales, basado en el principio del “paquete concentrado de esferas”, definiéndolo como: “Los puntos medios del paquete concentrado de esferas en el espacio forman un módulo espacial natural y son al mismo tiempo nudos en potencia para una armadura espacial de barras” (Mirafuentes, 1976, pág. 57). Mengerlinghausen inventaría uno de los sistemas estructurales espaciales más sobresalientes y utilizados en el mundo, el sistema MERO, aplicando los conocimientos del paquete concentrado de esferas junto con las leyes estructurales de las armaduras.

Para el diseño de sus armaduras, Mengerlinghausen hace un extenso análisis de las propiedades geométricas de los poliedros, la estructura básica que propone al igual que Fuller, es el triángulo rectángulo o equilátero de manera que unidos formen tetraedros y complementa el sistema al incluir formas sólidas como cubos, octaedros y cuboctaedros o partes de ellos. El arquitecto Mirafuentes se refiere a estas estructuras como más completas debido a que garantizan condiciones estáticas óptimas (en comparación con las construcciones irregulares, tienen un óptimo gasto de material), además las barras poseen el mismo tamaño y los conectores son uniformes (premisa para una producción industrial en serie), (Mirafuentes, 1976, pág. 57).

Mengerlinghausen establece una “progresión geométrica de crecimiento natural” para la longitud de las barras en los poliedros básicos, teniendo como referencia  $\sqrt{2}$ , descrita así: “si tomamos dos barras cortas como catetos con longitud 1, la hipotenusa tendrá que ser  $\sqrt{2}$ , el siguiente triángulo tendrá como catetos de longitud  $\sqrt{2}$  por lo que la hipotenusa será 2, o sea el doble de los primeros catetos y así progresivamente”; de esta manera se pueden predecir las dimensiones superficiales y volumétricas de los poliedros, ya que siempre tendrán una relación numérica y estructural ordenada con la misma base. Así se establecen las siguientes progresiones en los poliedros básicos (Mirafuentes, 1976, pág. 58), (Imagen 14):

- En las dimensiones de la superficie con el factor  $\sqrt{2}$
- En las dimensiones del volumen con el factor  $2\sqrt{2}$

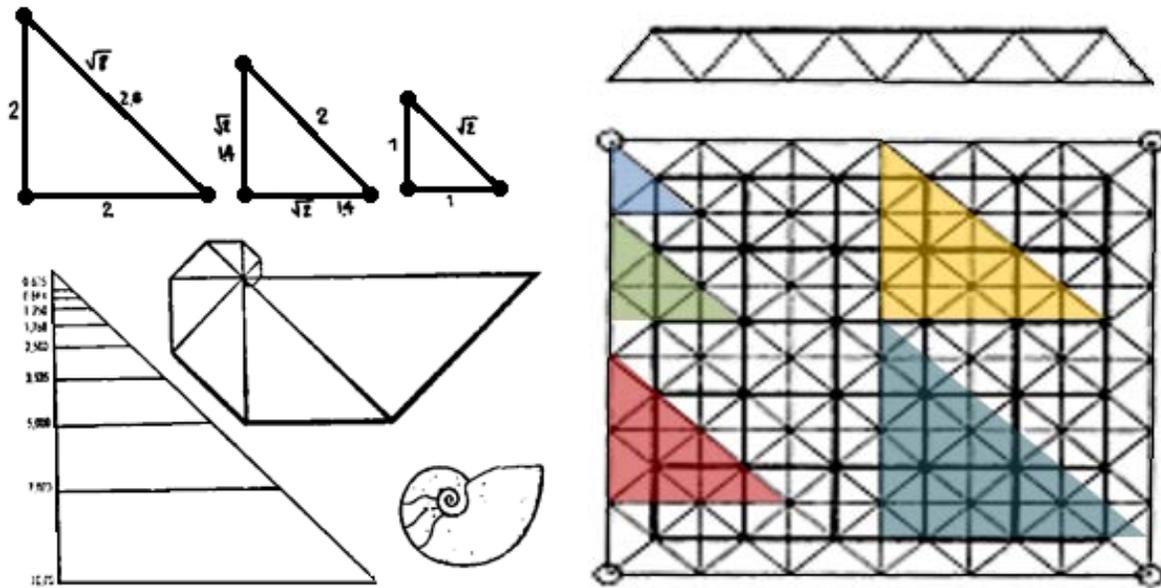


Imagen 14. 1 Mengeringhausen. “Progresión geométrica de crecimiento natural”, aplicada al triángulo rectángulo, para la predicción de superficies y volúmenes. Ejemplo del precepto mostrado para deducir las dimensiones proporcionadas de una armadura tridimensional (vista en planta y alzado).

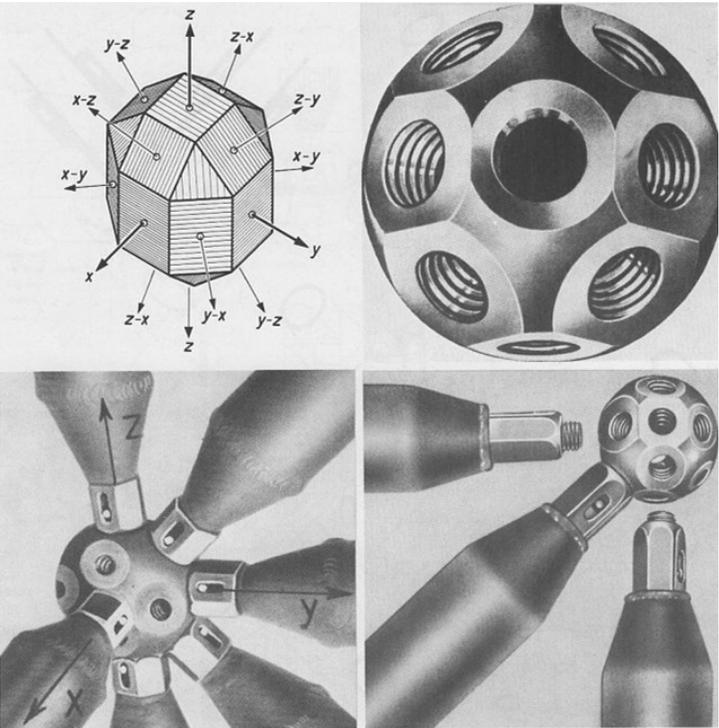


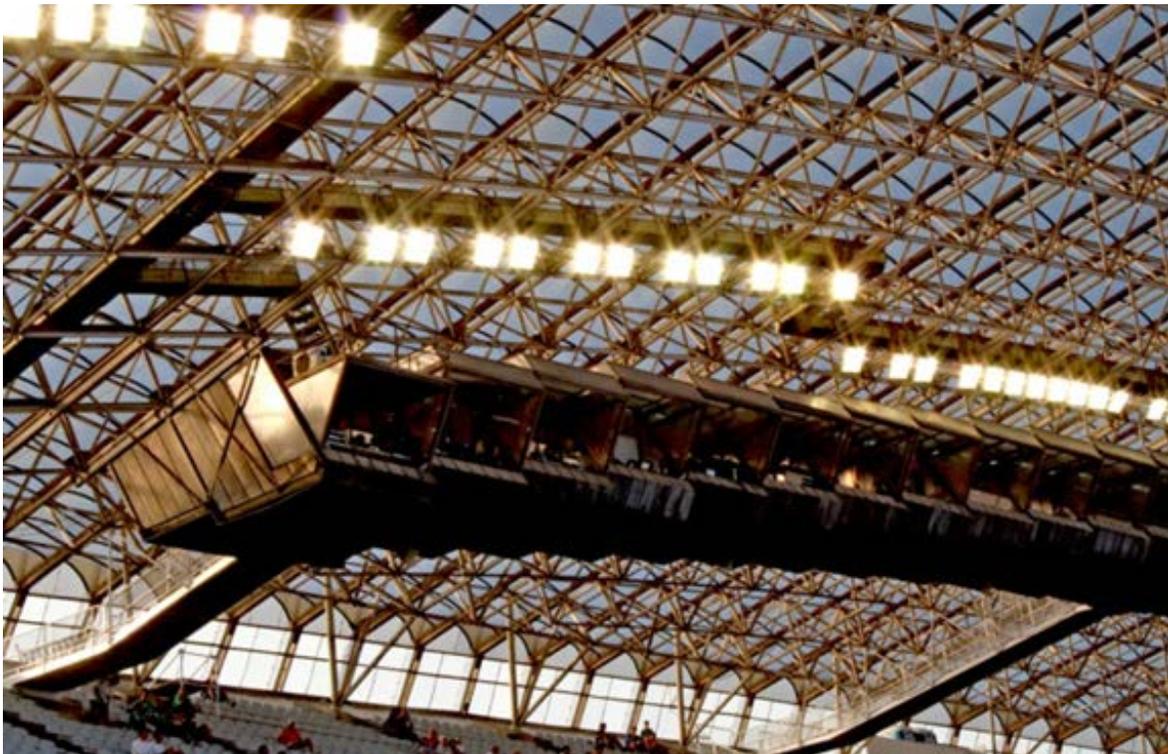
Imagen 15. MERO. Nodo MERO, obteniendo los ángulos a 45°, 60° y 90°, de las 18 conexiones en los nodos de la geometría de un poliedro con 26 caras.

Hacia 1942, Mengeringhausen ya había patentado el sistema MERO, a través del estudio de la geometría molecular de la cristalografía y del ensayo con estructuras naturales como tallos de trigo y cañas de bambú; MERO se consolidaría como el primer sistema reticulado espacial disponible en el mercado, el cual aún persiste en la actualidad. Este sistema consiste en la conexión barras de tubos circulares (barras) por articulaciones con forma de esfera (nodos). Generalmente las barras se componen de

tubos circulares huecos hechos de acero o aluminio, con secciones cónicas soldadas a los extremos; el nodo es fabricado en acero o aluminio y posee agujeros perforados donde se enroscan los extremos de los tubos (Imagen 15).

El triunfo de este sistema se basa en la estructura del nodo, que permite ser una pieza única, de sencillo desarme y con variedad de ángulos lo que permite que los nodos puedan ser iguales entre sí. Originalmente el sistema MERO tenía un solo tipo de unión estándar, de una esfera con 18 orificios roscados y ángulos a 45°, 60° y 90°, así como una serie de longitudes de barras estándar basadas con un factor de  $\sqrt{2}$ ; sin embargo con las técnicas actuales de perforación de control numérico, los agujeros pueden ubicarse en casi cualquier ángulo requerido y las barras son fabricadas según la longitud adecuada, lo que permite una gran diversidad formal geométrica.

Las estructuras más representativas de este sistema son la cubierta de 215 metros del estadio Poljud construido en 1979, Croacia, sobresaliendo las cabinas de periodistas suspendidas y la gran fachada-cubierta de cristal del edificio Presidential Circle Office en Hollywood, E.U.A (Fotografías 11, 12).



Fotografía 11. Boris Magaš. Cabina de periodistas del estadio Poljud, Croacia. (1979). Las 19 cabinas están suspendidas por la estructura de la cubierta utilizando el sistema MERO. Dimensiones de la cubierta en forma de concha de 215 metros de longitud.



Fotografía 12. Barreta & Associates. Fachada-cubierta de cristal con el sistema MERO, del Presidential Circle Office en Hollywood, E.U.A.

## e) EL DESARROLLO DE ESTRUCTURAS ESPACIALES A MITAD DEL SIGLO XX

A partir de 1950 numerosos sistemas estructurales espaciales fueron desarrollados alrededor del mundo; el arquitecto e ingeniero David G. Emmerich fue conocido por desarrollar numerosos trabajos sobre la constitución geométrica de las armaduras espaciales y su aplicación en la Arquitectura, en una declaración Emmerich comenta que: “por medio del análisis topológico es posible establecer las reglas de estabilidad de diferentes clases de entramados, teniendo una forma geométrica deformable, estática e incluso hiperestática”, con esto se concluía teóricamente que una estructura espacial tenía la capacidad de ser estable, aun cuando no haya sido construida monolíticamente, sino por fijación mecánica (Mirafuentes, 1976, págs. 49, 50).

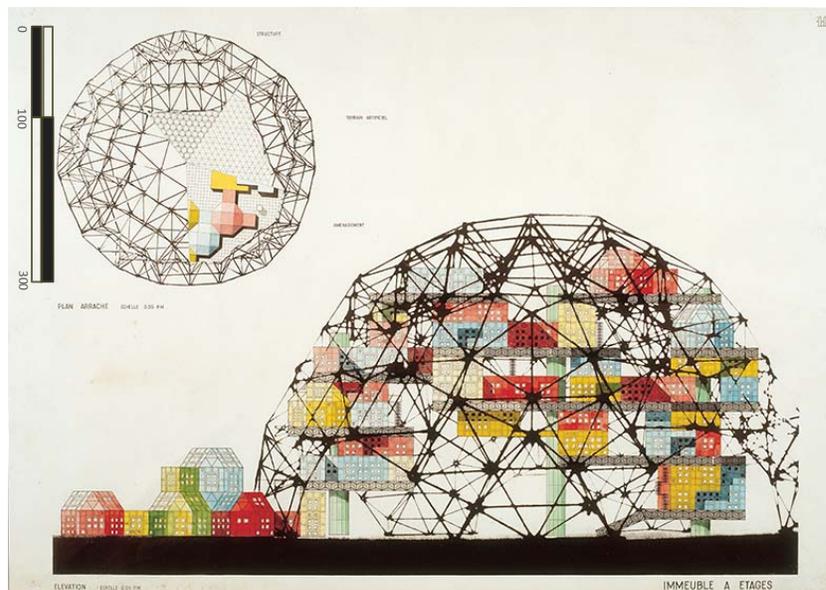
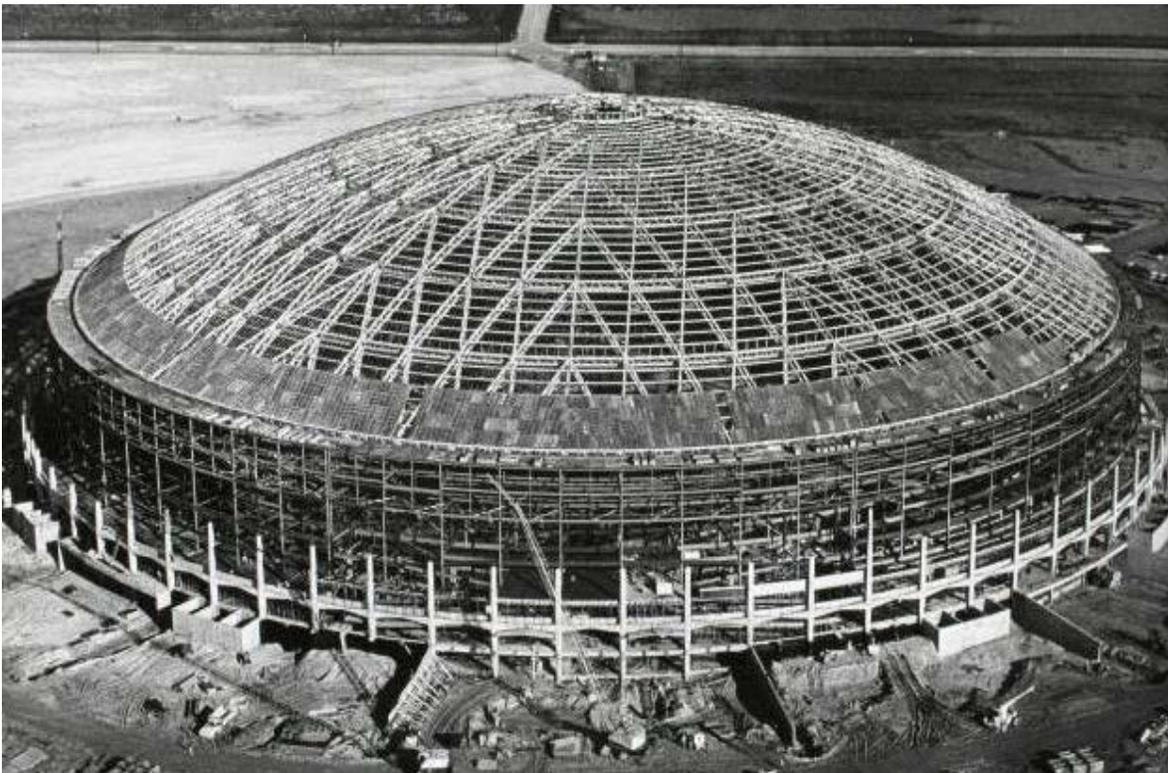


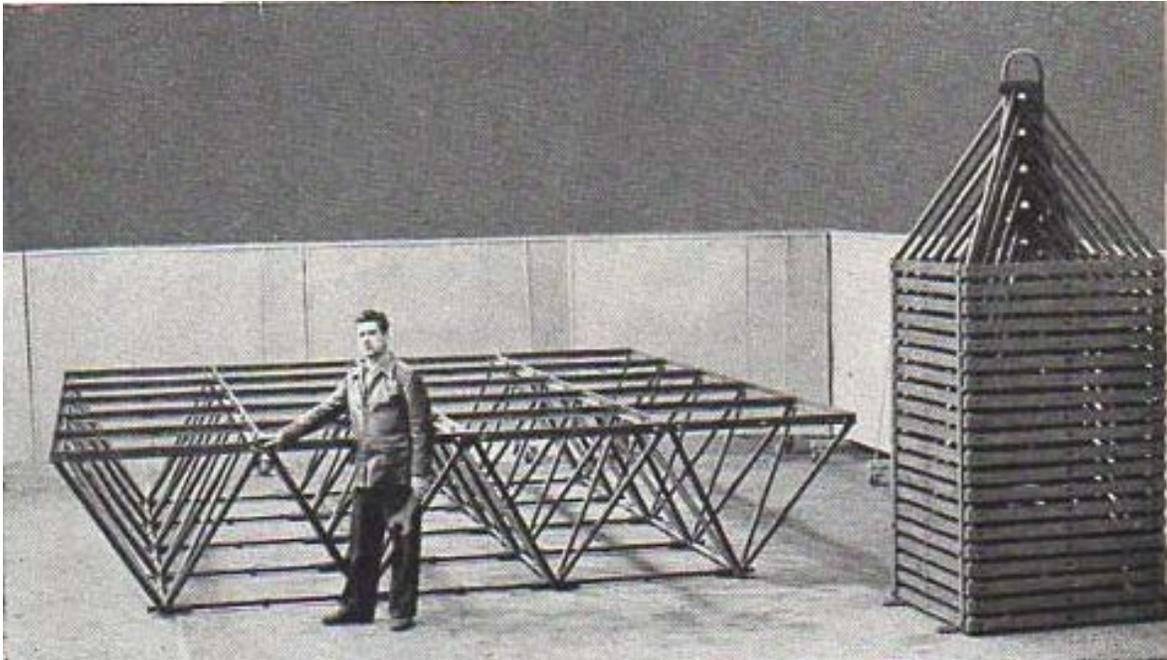
Imagen 16. Emmerich. Proyecto sobre cúpula estereométrica. Actuando como sistema estructural del conjunto, sosteniendo los niveles de las edificaciones internas, de aprox. 300 metros de diámetro.

Emmerich propone que es posible construir estos espacios, con el conocimiento de la estereometría y la ergonomía, que no sólo utilizándolas como cubiertas o estructuras esféricas, elípticas, poligonales, etc., sino que se pueden constituir estructuras de doble capa aglomerando poliedros; de tal manera que se aprovecha este sistema para la creación de espacios internos con la rigidez de la estructura externa (Imagen 16).

En 1965 el ingeniero Z. S. Makowski escribió “Las estructuras espaciales de acero”, donde hacía un extenso análisis sobre las estructuras reticuladas y su importancia al someterlas a fuertes cargas concentradas, en este libro describe los métodos de cálculo matemático y experimental para la creación de estas estructuras, principalmente enfocándose a cúpulas y bóvedas de cañón. Makowski expone que los reticulados de doble capa ofrecen una mayor resistencia a los tradicionales, al lograr una distribución más uniforme en el sistema; a través de sus investigaciones colaboró como asesor estructural en la creación de grandes estructuras metálicas, como el Astrodome de 1963, en Texas, convirtiéndose en la cúpula más grande del mundo con 205 metros de diámetro (Mirafuentes, 1976, pág. 51), (Fotografía 13). Hacia 1954 surgió en Inglaterra el sistema “Space Deck”, basado en las investigaciones de Makowski, se buscaba crear un sistema espacial práctico y económico que pudiera competir con la construcción tradicional; en este los elementos de montaje no son barras y conectores, sino pirámides de base cuadrada completas de 1.20 m por 1.20 m, formada por perfiles de ángulos (Fotografía 14). Posteriormente este sería perfeccionado, creando el sistema “Nenk”, muy similar sólo que se reduce el peralte de un metro a 60 cm.



Fotografía 13. Astrodome de Texas, E.U.A. (1963). Etapa de construcción de la cúpula de 205 metros de diámetro y 63 metros de altura, supervisada por el ingeniero Z. S. Makowski.



Fotografía 14. Módulos del sistema Space Deck apilados a la derecha, a la izquierda se observa el reticulado formado por las pirámides, ensambladas en un tiempo muy corto con la ayuda de una simple llave fija.

En 1955 se desarrolla en Canadá el sistema “Triodetic”, en el cual las uniones de las barras carecen de soldadura, pernos o remaches, uniéndolas al nodo con forma de prisma a presión (Fotografía 15); en la misma época aparece en E.U.A. el sistema “Unistrut Space Frame”, que consta de sencillas barras de perfiles laminados en forma de canal y nodos hechos de una pieza de lámina troquelada, al que se atornillan los canales; dichas placas sirven de refuerzo para el sistema y con la ventaja de poder utilizarse numerosas veces, un ejemplo es la cubierta del acuario de New Jersey, en E.U.A (Chargoy, 2006, pág. 3), (Fotografía 16).



Fotografía 16. Nodo del sistema Triodetic, donde las barras son unidas al nodo mediante presión.



Fotografía 15. Nodo del sistema Unistrut, nodo formado por placas dobladas a 45°, uniendo las barras por medio de tuercas y tornillos insertados en las aberturas.

En 1960 la British Steel Corporation, desarrolló el sistema “Nodus”, introduciéndolo en 1970; este fue desarrollado especialmente a través de pruebas y cargas para su construcción en diferentes escalas (Imagen 17). La unión se realiza por soldadura con la ayuda de pernos de ajuste de alta resistencia, con este garantizaba gran precisión geométrica, pero estaba limitada a la creación de estructuras complejas por la sencilla disposición de los ángulos del nodo a sólo 45° y 90° (Tata Steel, 2014, párr. 24).

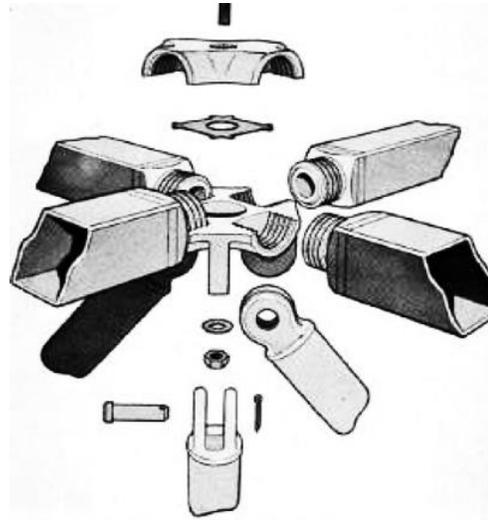
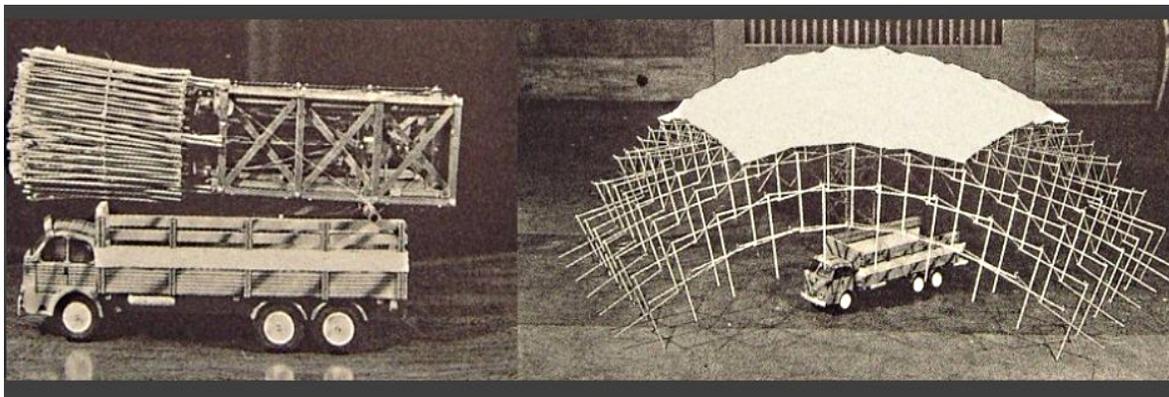


Imagen 17. Armado del nodo del sistema Nodus, con ángulos de 45° y 90°, uniendo las barras a pernos por soldadura

En 1961 el arquitecto español Emilio Pérez Piñero plantea una estructura ligera y desplegable, que le da fama internacional al sobresalir en el Concurso Internacional de la Unión Internacional de Arquitectos, compuesto el jurado por Félix Candela, Fuller y Ove Arup, destacando al proyecto por ser “una aportación técnica de primer orden”, Pérez Piñero hace una aportación destacada en el campo de la arquitectura móvil basándose fundamentalmente en los principios del tensegrity, su obra más reconocida fue la cúpula del Teatro-Museo Dalí en Figueras, España (Fotografía 17).



Fotografía 17. Pérez Piñero. Maqueta. Transporte y ensamble de un refugio compuesto por una bóveda compresible utilizando el sistema Tensegrity; sobre un camión de madera. La longitud de la cubierta al desplegarse casi cuadruplica la longitud del camión.

## f) LOS SISTEMAS DE STÉPHANE DU CHÂTEAU

El arquitecto de origen polaco Stéphane Du Château realiza investigaciones sobre la creación de nuevas armaduras espaciales, para 1956 desarrolla en Francia su primer sistema llamado "SDC", consistiendo de una armadura de tres direcciones, en donde cada barra de tubos metálicos es de diferente longitud y diámetro, las cuales son unidas al nodo por soldadura. Más tarde, en 1960 crea el sistema "Pyramitec", consistiendo igualmente en un reticulado prefabricado de tres direcciones, pero ahora formado por pirámides invertidas de base hexagonal, hechas de tubos metálicos, el nodo consistía de una placa cilíndrica uniendo diagonalmente las barras, podemos observar un ejemplo en el auditorio del sindicato británico de Londres. Uno de sus sistemas más importantes fue el "Tridimatec", inicialmente propuesto bidireccionalmente, lo que formaba armaduras planas entrelazadas, de manera que se disminuía el peralte y los momentos de flexión de la estructura; posteriormente se desarrolló el sistema Tridimatec tridireccional (Chargoy, 2006, pág. 4), (Imagen 18).

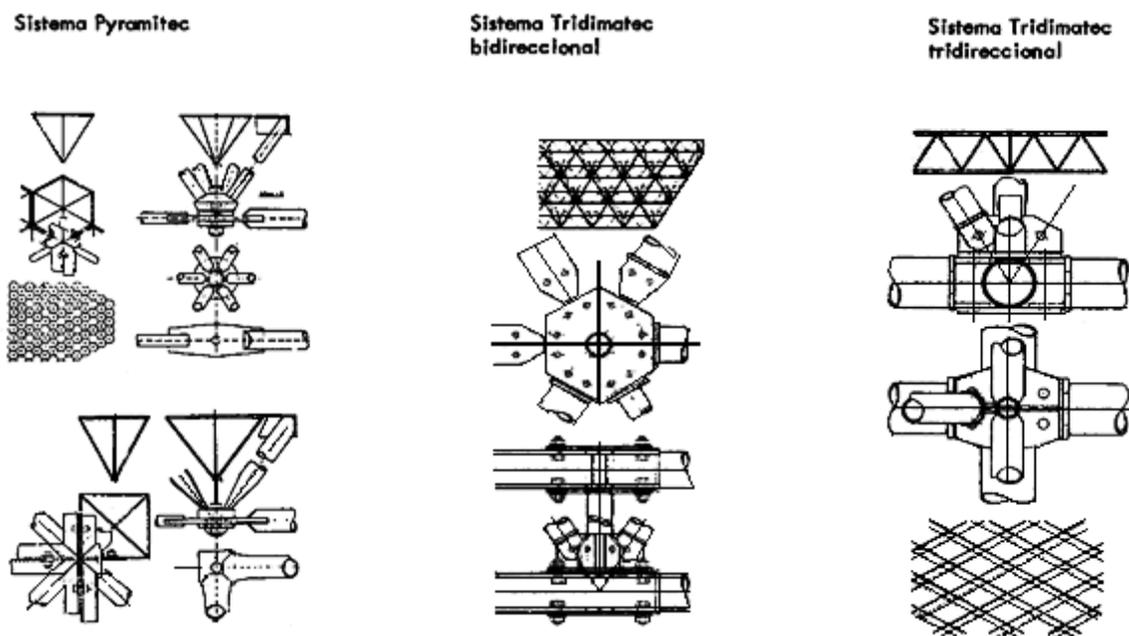


Imagen 18. Sistemas patentados por Stéphane Du Château. De izquierda a derecha, sistemas Pyramitec y Tridimatec bidireccional y tridireccional. Formados por barras de tubos metálicos unidas a placas (nodos) por tornillos.

Hacia 1968 des arrolla su sistema más reconocido, el “UNIBAT”, resultado de las investigaciones anteriores, cuyo objetivo fue la organización del espacio económicamente y un alto rendimiento del material empleado. La ventaja de este sistema fue la variedad de escalas en las que podía utilizarse, desde grandes cubiertas industriales hasta espacios de habitación; en dicho sistema cuatro pirámides de base cuadrada se unen en sus bases de dos en dos por uno de sus ángulos, y sus vértices se unen por una barra. Según la necesidad del claro la armadura se puede duplicar aumentando su capacidad de carga, con este sistema se utiliza la menor cantidad de barras, reduciendo la longitud de aquellas que trabajan a compresión y aumentando las que trabajan a tracción; otra ventaja es que fue planteada para ser utilizada a pequeña escala como estructura envolvente de un módulo habitable. Las armaduras se planeaban para ser ensambladas en la obra, atornillándose y con un promedio de 1.5 pernos por metro cuadrado (Mirafuentes, 1976, pág. 18), (Imágenes 19, 20).



Imagen 20. Du Château. Módulo del sistema UNIBAT, conformado por barras metálicas unidas a nodos de ensamble sencillo.

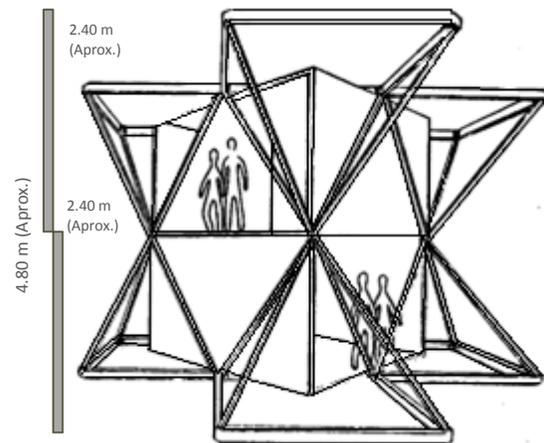


Imagen 19. Du Château. Proyecto de casa cúbica (5x5 m) estructurada por el sistema UNIBAT, cada nivel de aprox. 2.40 m de altura, con un total de casi 5 metros.

Posteriormente Du Château propone varios sistemas, en 1979 el “Spherobat”, consistiendo en un reticulado de pirámides de bases cuadrado, donde la parte superior se encuentra desfasada de la inferior a 45°, unidas por nodos compuestos por un tornillo de alta resistencia y una esfera interna; inicialmente el sistema se fabricó en acero pero al fabricarse con aluminio adquirió mayor resistencia estructural. Hacia 1985 destaca el

sistema “Bamboutec”, retomando los nodos del sistema Spherobat pero esta vez las barras eran fabricadas de bambú (Chargoy, 2006, pág. 5).

En la actualidad encontramos gran variedad de sistemas estructurales espaciales, cuyo origen se remonta a los ya presentados teniendo similitudes en sus características técnicas, materiales y geometría, presentando a veces mejoras o acondicionándolos según la geometría. Un sistema reciente es la armadura y nodo “Sarton”, que retoma las pirámides de base cuadrada pero los extremos de las barras, sean de acero o aluminio, son aplanados y perforados para su unión con los demás tubos, donde el nodo consiste en un pasador roscado al que convergen los tubos (Chargoy, 2006, pág. 5).

## **II. ANTECEDENTES EN MÉXICO**

- a) La influencia de la reciente Arquitectura Industrial
  - b) Los nuevos sistemas estructurales
  - c) Las estructuras espaciales en México
    - d) La tridilosa de Heberto Castillo
  - e) Compañías especializadas en México

## a) LA INFLUENCIA DE LA RECIENTE ARQUITECTURA INDUSTRIAL

A mediados del siglo XIX, el país se encontraba en una serie de conflictos políticos internos, lo que propició la demorada llegada de la industria del hierro; sería hasta finales del siglo que comenzaría a notarse la influencia de la reciente arquitectura industrial europea, principalmente durante el gobierno del presidente Porfirio Díaz. La primera estructura espacial metálica fue concebida en 1877 y levantada en 1883 en Tampico, Tamaulipas, ciudad que recientemente había tenido un desarrollo comercial importante por la construcción del puerto marítimo; la estructura se constituía por un faro marítimo de 42 metros de altura, de planta hexagonal y realizado en hierro, fue prefabricado en los talleres de la compañía norteamericana Keystone Bridge Company, en Pittsburgh y se edificó bajo la supervisión del ingeniero civil Ramón de Ibarrola, (Turistam, 2014, párr. 9), (Fotografía 18).



Fotografía 18. Faro de Tampico, Tamaulipas. (1883). Construido bajo la supervisión del ingeniero de Ibarrola, de planta hexagonal, con 42 metros de altura, construido con piezas de hierro reforzadas por contraventeos.

Más tarde, en 1896, Porfirio Díaz dictaría la construcción del edificio de la Aduana Marítima en Tampico, encargando los planos a la Compañía de Ferrocarriles Centrales Mexicanos, donde él mismo seleccionó el diseño y realizó la compra a través de un



Fotografía 19. Aduana de Tampico, Tamaulipas. (1896.) Posee elementos estructurales prefabricados en hierro fundido, como las armaduras de las cubiertas y las esbeltas columnas.

catálogo de una compañía inglesa. El edificio de características arquitectónicas inglesas, se construyó en base de elementos prefabricados de hierro fundido y ladrillos traídos de Inglaterra; las esbeltas columnas, barandales y enrejados de origen

francés, (Fotografía 19). El edificio manifestaría la naciente influencia de la arquitectura industrial europea que persistió durante décadas posteriores, así como el uso de metales como elementos principales arquitectónicos.

En 1891 en Orizaba, Veracruz, el Alcalde Julio Vélez presentaría la construcción de un Palacio Municipal, que consistiría en tener un diseño único y diferente a las usuales edificaciones de mampostería. Un año después en Bélgica, se inició la fabricación del edificio en los talleres de la Société Anonymé des Forges D'Aiseau Belgique en base al diseño de Gustave Eiffel; las piezas se forjaron en acero constituyendo postes y tornillos, y la ornamentación de hierro fundido, permitiendo a la estructura ser desmontable y fácilmente transportable. Las 600 toneladas de metal fueron enviadas por bultos a Veracruz en tres barcos de vapor, donde el edificio sería levantado sobre un terreno de 1,180 m<sup>2</sup> y serían utilizados más de 800 mil tornillos, finalmente fue inaugurado en septiembre de 1894, (Fotografía 20).



Fotografía 20. Antiguo Palacio Municipal de Orizaba, Veracruz. (1894). Construido fundamentalmente en acero y hierro fundido, bajo el diseño de Gustave Eiffel, con un peso total de 600 toneladas.

## b) LOS NUEVOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

Tras la “Gran Exposición” de 1851 celebrada en Londres, la estructura de Joseph Paxton, el “Crystal Palace”, originaria el desarrollo del estilo arquitectónico Jugendstil (alusivo a lo industrial), donde la combinación de materiales como el hierro y el cristal serían símbolos de la modernidad y el progreso. A partir de esto, fueron realizadas numerosas ferias mundiales en las ciudades europeas, trasladándose a esas calas menores en pequeñas ciudades como ferias regionales o cortes locales; una de ellas sería la “Exposición de Arte e Industria Textil” de 1902 en Düsseldorf, Alemania, donde se edificó una estructura modular al estilo Jugendstil, diseñada por el arquitecto Bruno Möhring, originalmente concebida como cuarto de máquinas de una sede metalúrgica. Esta morfología se caracterizaba por la simbiosis entre la fuerza del hierro y la delicadeza de los ornamentos demostrando ligereza, e incorporando al tabique como elemento de solidez.



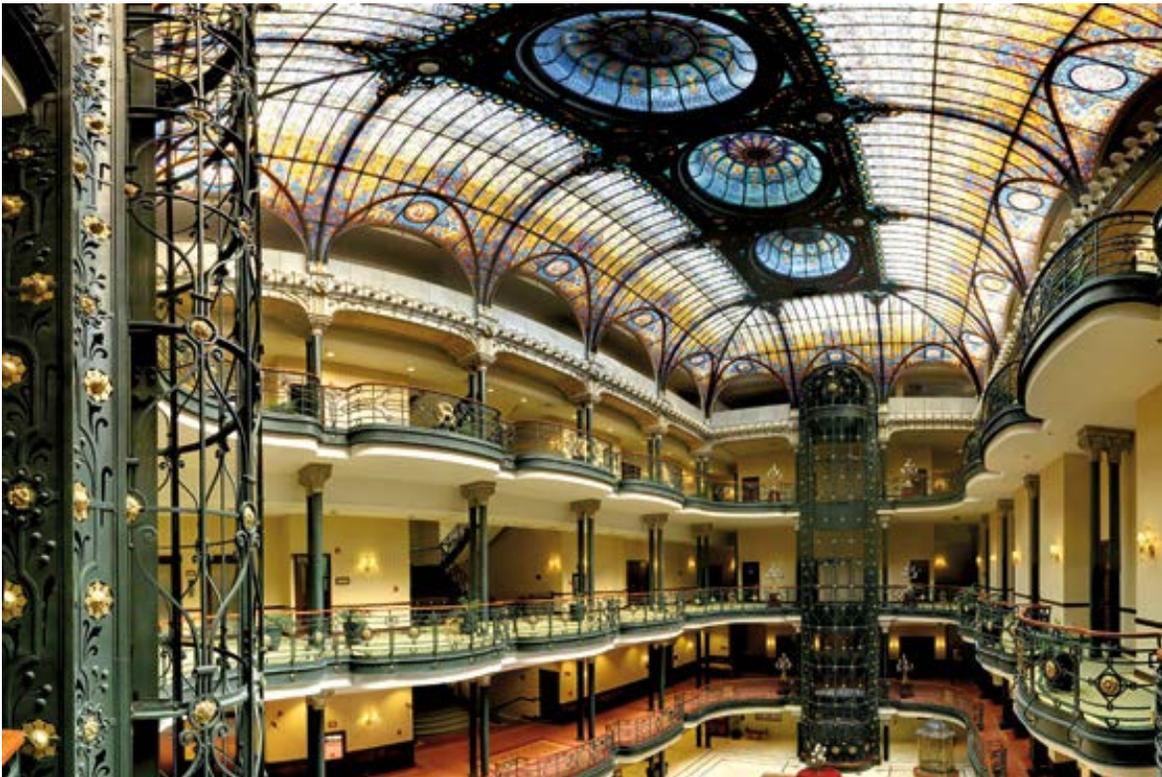
Fotografía 22. Fachada del “Palacio de Cristal”, en Santa María la Rivera, Ciudad de México. (1903). Las torres alcanzan una altura de 47 metros.



Fotografía 21. Interior, vista de la cubierta del “Palacio de Cristal”, en Santa María la Rivera, Ciudad de México. (1903). Con una superficie total cubierta de 1500 m<sup>2</sup>, las naves laterales tienen una altura de 19 m y la nave central de 32 m.

Al concluir la feria de Düsseldorf, la Compañía Mexicana de Exposición Permanente, S. A., dedicada a la exposición de productos comerciales, compró tres de las cuatro salas del edificio de Möhring; la estructura se desmontó en partes y fue trasladada a la Ciudad de México, cuyas piezas llegaron por tren a la antigua estación de Buenavista, cerca del sitio seleccionado para su edificación. La instalación de la estructura supervisada por el ingeniero Luis Bachmesiter culminaría en 1903, en la naciente colonia Santa María la Rivera, destacando por sus torres de 47 metros de altura, sus ventanales color violeta y el majestuoso pórtico, razón por la cual se le llamó frecuentemente como “El Palacio de Cristal”, hoy Museo Universitario del Chopo, (Fotografías 21, 22).

Entre 1895 y 1899 fue construido por el ingeniero Daniel Garza, el Centro Mercantil de la Ciudad de México, ubicado en el lado poniente de la Plaza de la Constitución, el edificio de morfología ecléctica, posee un vitral de tipo Tiffany, el cuarto más grande de su clase en el mundo. En su interior se observa la elaborada ornamentación de estilo Art Nouveau, ampliamente difundido por el gobierno del presidente Porfirio Díaz.



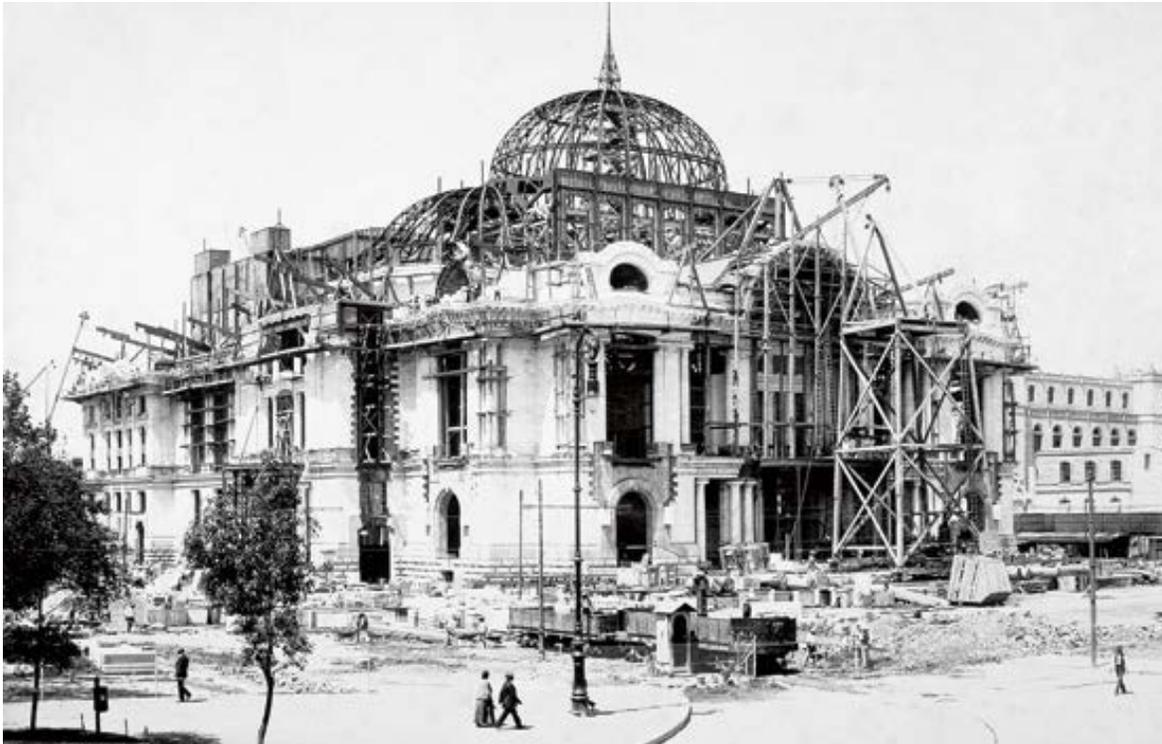
Fotografía 23. Interior del Gran Hotel de la Ciudad de México. Destaca la esbelta sección de la cubierta, la herrería y la cristalería tipo Tiffany, con dimensiones de 13 metros de ancho por 21 metros de largo.

El edificio fue uno de los primeros que tuvo una cubierta ligera construida con cristal y hierro, colocada en 1908, la ejecución estuvo a cargo del artista francés Jacques Gruber. Esta estructura cubre un patio con una dimensión de trece metros de ancho por veintiuno de largo, la superficie es cóncava con tres pequeñas cúpulas repartidas al centro; el 1968 tras diez años en desuso, el edificio se convirtió en un hotel, actualmente reformado como el Gran Hotel de la Ciudad de México, (Fotografía 23).

A principios del siglo XX, el auge económico del país se debió en parte a la construcción de vías ferroviarias sobre el territorio nacional, lo que incremento la transacción comercial entre ciudades, para esto se crearon grandes estaciones que pudieran satisfacer la demanda de la época. Dichas estaciones retomaban los recientes sistemas estructurales europeos industriales, realizados en hierro o a acero que pudieran librar claros de varios metros, destacando por esta tipología estructural la Estación Buenavista y la Estación del F. C. Mexicano (México México, 2014, párr. 10), (Fotografía 24).



Fotografía 24. Vista de la estructura de los andenes de la Estación del F. C. Mexicano. La cubierta inclinada en dos sentidos se conforma por armaduras metálicas revestidas por paneles y apoyadas sobre muros de piedra, librando un claro de aprox. 30 m.



Fotografía 25. Adamo Boari. Etapa de construcción del Palacio de Bellas Artes, Ciudad de México. (1910). Destaca la estructura metálica revestida por el mármol, con una altura al techo de 42.5 m y una altura total de 53 m.

Durante el gobierno porfirista se mandaron construir varios edificios de es cala monumental, con los más recientes sistemas estructurales e influencias morfológicas de Europa. Ejemplos de ello son el Palacio de Bellas Artes, el Palacio de Correos y el Palacio Legislativo (ahora Monumento a la Revolución), (Fotografía 25, 26). El proyecto del Palacio Legislativo se inició en 1897, cuando se emitió una convocatoria para su construcción, en la que se adjudicaría el proyecto al arquitecto francés Emile Bernard; la primera piedra se colocó en septiembre de 1910 por el presidente Díaz, pero tras el inicio de la Revolución Mexicana, la obra fue suspendida a pesar de tener un gran avance en la construcción de la estructura de acero. La edificación permaneció inutilizada por varios años, lo que provocó casi su desmonte total, el arquitecto mexicano Carlos Obregón Santacilia propuso al entonces Secretario de Hacienda, Alberto J. Pani, el aprovechamiento de la estructura restante, utilizando la cúpula para erigir un monumento a la recién concluida revolución; la propuesta sería aceptada y la construcción del inmueble se realizaría desde 1933 hasta 1938.

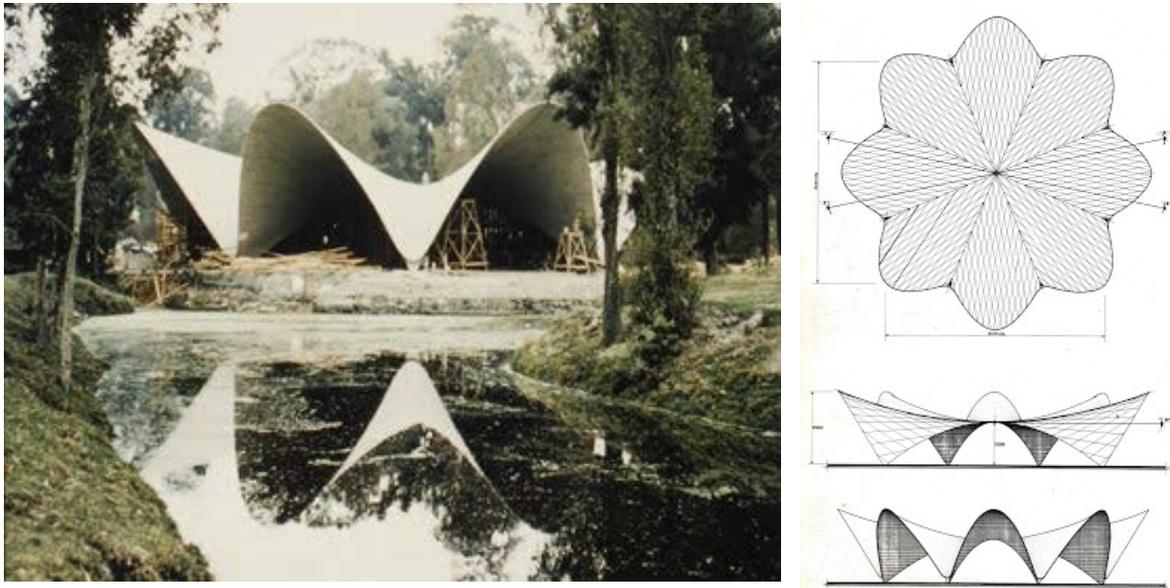


Fotografía 26. Emile Bernard. Etapa de construcción del Palacio Legislativo, Ciudad de México. Destaca el avance de la obra de la estructura de acero, con la cúpula de 67 metros actual Monumento a la Revolución.

A partir de 1932, tras la edificación del edificio de mayor altura en el país de ocho niveles, llamado La Nacional, realizado por el arquitecto Manuel Ortiz Monasterios y el edificio de la Lotería Nacional de 1933; surgiría una nueva etapa de la Arquitectura en México, con el uso del concreto armado, como nuevo sistema constructivo de gran resistencia estructural y la posibilidad de crear nuevas formas en la edificación.

### c) LAS ESTRUCTURAS ESPACIALES EN MÉXICO

A mitad del siglo XX la producción arquitectónica en México comenzó a incrementarse notablemente debido a las condiciones económicas favorables del “milagro mexicano”, permitiendo el arribo de nuevas tendencias y tecnologías desarrolladas principalmente en Europa y los Estados Unidos. En 1949 se inició la construcción de cascarones, resaltando el arquitecto de origen español Félix Candela, quien replantea el papel del arquitecto en relación a los problemas de las estructuras, en tres premisas: economía, sencillez de cálculo y flexibilidad. Junto con los hermanos arquitectos Fernando y Raúl Fernández Rangel, fundaría la empresa Cubiertas Ala, creando las estructuras laminares de concreto armado, que le otorgaron fama mundial; su principal aportación radica en el cálculo y construcción de cubiertas ligeras basadas geoméricamente en paraboloides e hipérbolas, (Fotografía 27).



Fotografía 27. Félix Candela. Restaurante Los Manantiales. Xochimilco, Ciudad de México. (1958). Imagen izq., en las últimas etapas de construcción, destaca las esbeltas secciones de los cascarones de concreto. Imagen der. Planta, sección y alzado de la estructura, con 42 m de diámetro, contando con una altura máxima de 8.25 m reducida a 5.90 m en el interior.

Arquitectos como Juan O’Gorman impulsarían la construcción de edificios de gran altura hechos de concreto armado y utilizando novedosos sistemas estructurales como las losas nervadas. En 1952 y 1957 el arquitecto Villagrán construiría los cines “Las Américas” y “Paseo”, utilizando armaduras metálicas para cubrir los grandes espacios de las salas. En

1962, cinco años después de la construcción de la torre Latinoamericana, se inaugura el edificio Insignia, ícono de la zona de Tlatelolco e imagen corporativa del Banco Nacional de Obras (Banobras), la torre, proyectada por el arquitecto Mario Pani, marcaría el inicio del aprovechamiento de la geometría estructural en edificios monumentales, teniendo 127 metros de altura, 26 niveles y conteniendo en la parte superior un carillón de 26 toneladas de peso, soportado por un entramado de vigas de concreto (Fotografía 28).



Fotografía 28. Mario Pani. Torre Insignia. Ciudad de México. (1962). Con 26 niveles y 127 metros de altura, destaca en la parte superior el carillón de 26 toneladas.

Otro ejemplo de la geometría estructural aplicada sería el complejo deportivo de la Alberca Olímpica Francisco Márquez y el Gimnasio Olímpico Juan de la Barrera, construidos por los arquitectos Manuel Rosen, Antonio Recamier, Javier Valverde y Edmundo Gutiérrez; donde destaca el diseño de las cubiertas en catenaria, sostenidas por tirantes de acero anclados en “muertos de concreto”, utilizando la gravedad para proporcionar la forma y resistencia, dando como resultado una capa topológica compleja. Para que ambos edificios resistieran el momento producido por las tensiones de los cables de carga, se preesforzaron los apoyos centrales, ocupando soportes metálicos en los cuatro lados del conjunto. La altura de los apoyos va desde 28 m en el gimnasio, 32 m en la alberca y 37 m al centro; la superficie de las cubiertas alcanzan en la alberca casi 14 mil metros cuadrados y en el gimnasio poco más de 11 mil, con una capacidad de original de 10 mil y 5 mil espectadores (Skyscrapercity, 2014, párr. 1), (Imagen 21, Fotografía 29).

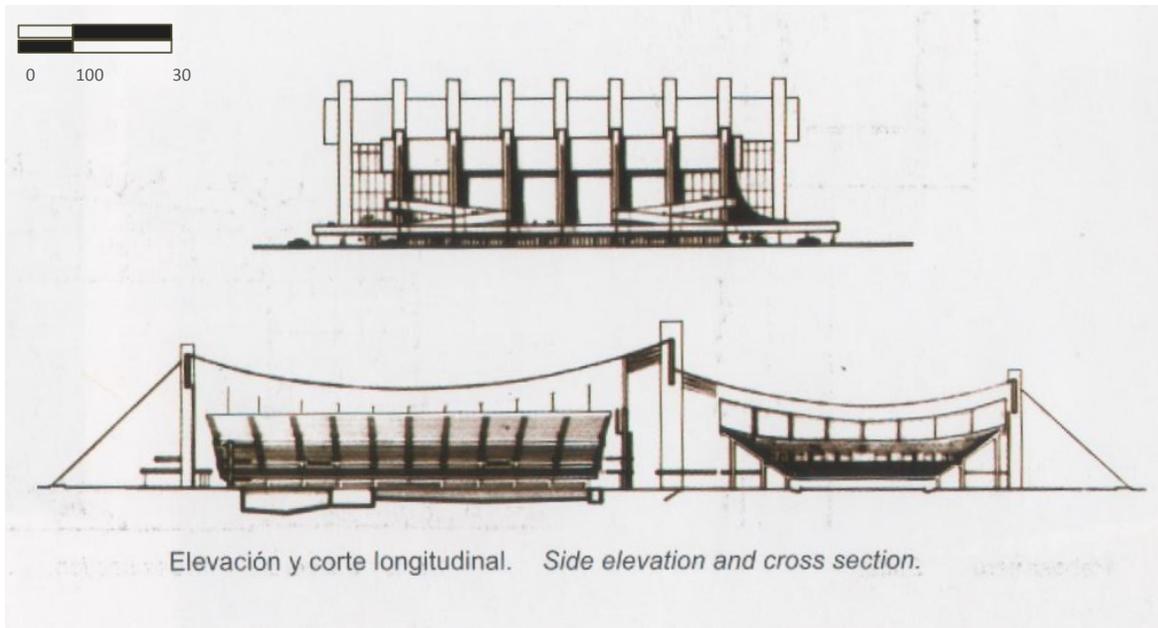


Imagen 21. Gimnasio y alberca olímpica. Elevación y corte longitudinal. Se observa la estructura en catenaria, con apoyos de 32 m, 37 m y 28 m, cubriendo una superficie de 14 y 11 mil metros cuadrados.



Fotografía 29. Alberca olímpica Francisco Márquez. Fotografía desde la avenida División del Norte. Se observa la estructura de catenaria sustentada por los apoyos de 32 y 37 m de altura.

Hacia 1966 se construye la primera cúpula geodésica en el país, siendo el Domo de las Fuentes Termales del Centro Vacacional Oaxtepec, Morelos, por el arquitecto Alejandro Prieto Posada, la estructura cubre una superficie de 3,850 m<sup>2</sup> y está constituida por una doble capa entramada de triángulos internos y hexágonos externos, (Fotografía 30). En 1968 se concluye la construcción de la obra más sobresaliente de Félix Candela, el Palacio de los Deportes, en colaboración con Antonio Peyrí y Enrique Castañeda Tamborell. La estructura resalta por su forma geodésica y la cubierta de cobre, siendo una obra representativa del movimiento racionalista. Inspirado en el Palacio de los Deportes de Roma, Candela ideó la cúpula estructuralmente por sus reconocidos cascarones de concreto (sustituyéndolos por cobre) y geométricamente por paraboloides.



Fotografía 30. Prieto Posada. Domo de las Fuentes Termales. Oaxtepec, Morelos. (1966). Destaca la estructura metálica de la cúpula de 35 metros de radio y 23 metros de altura (desde el suelo), compuesta por módulos hexagonales al exterior y triangulares al interior.

La planta del edificio es circular, compuesta por cuadros con un claro máximo de 160 metros y un área de 27 mil m<sup>2</sup>; la cúpula geodésica se compone de paraboloides hiperbólicos de aluminio tubular cubiertos por una subestructura de láminas de madera forradas de cobre resistente al agua, sustentadas en grandes arcos de acero. Los pilares

de concreto rellenos por ladrillos a cada lado, actúan como contrafuertes de la estructura de la cúpula, los pilares secundarios de mayor esbeltez e inclinados en forma de “v” fungen como soportes hacia la estructura externa (Archdaily, 2014, párr. 10), (Fotografías 31, 32).



Fotografía 31. Félix Candela. Palacio de los Deportes. Con un claro máximo de 160 m y una superficie cubierta de 27 mil m<sup>2</sup>, destaca la cubierta revestida en cobre y la estructura geodésica compuesta por paraboloides hiperbólicos.



Fotografía 32. Félix Candela. Palacio de los Deportes. Ensamble de la cubierta de paraboloides sobre la estructura espacial geodésica.

Debido a los Juegos Olímpicos de 1968, se realizó la mejora de las instalaciones deportivas existentes, como es el caso del Centro Deportivo Plan Sexenal en 1970, donde se cubrió la cancha de actividades múltiples con un domo tridimensional y la alberca con una estructura reticular tridimensional. A finales de los años setenta, la influencia norteamericana de los centros comerciales arriba a nuestro país, construyéndose el primer conjunto comercial, Plaza Universidad y poco después el Centro Comercial Plaza Satélite de 1971 ambos del arquitecto Juan Sordo Madaleno, donde se denota la aplicación de las estructuras espaciales tridimensionales como cubiertas (Chargoy, 2006, pág. 9).

A finales del siglo XX numerosos arquitectos mexicanos realizaron grandes obras arquitectónicas utilizando en cubiertas y fachadas las estructuras espaciales, sobresaliendo el CECUT (Centro Cultural Tijuana) de Manuel Rosen y Pedro Ramírez Vázquez y la remodelación del Auditorio Nacional de 1988 por Abraham Zabludovsky y Teodoro González de León; un proyecto no construido del arquitecto Rosen, el Centro de Convenciones de la Ciudad de México, muestra la propuesta del uso de geometría tridimensional compleja para la estructura de la torre, a través de un entramado circular cambiante a diferentes alturas (Rosen M. , 2005, pág. 195), (Imagen 22, 23).



Imagen 22. Manuel Rosen. Perspectiva del proyecto Centro de Convenciones. Ciudad de México. Siendo una estructura de casi 60 niveles, con una altura cercana a los 200 m.

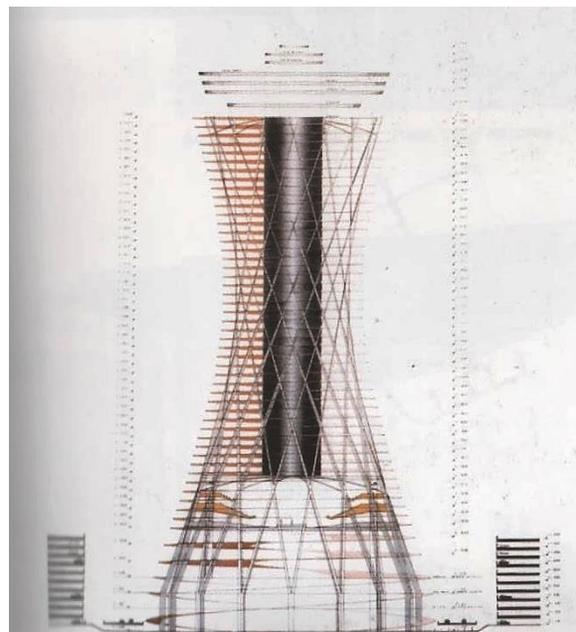
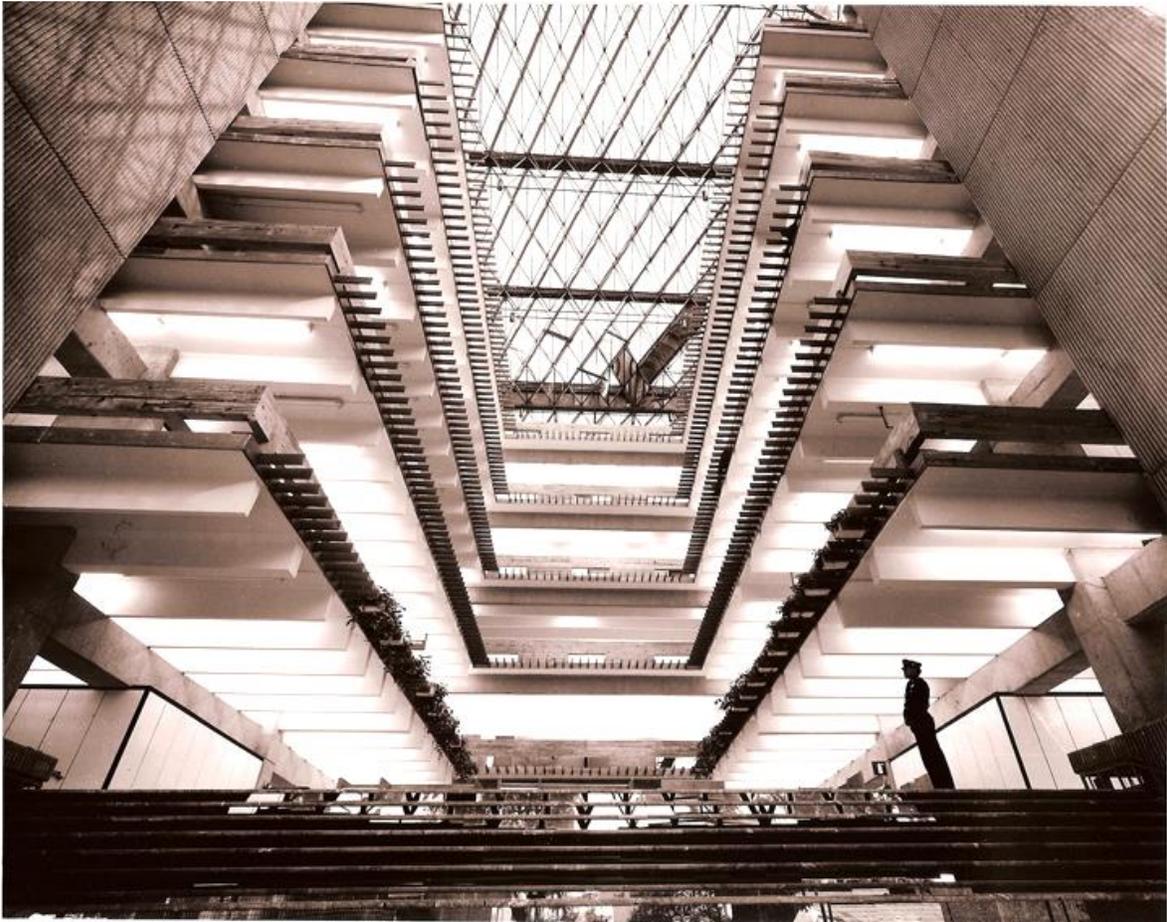


Imagen 23. Manuel Rosen. Sección del proyecto Centro de Convenciones. Ciudad de México. Se observa la estructura entramada espacial que junto al núcleo central soporta al edificio.

A partir de los años ochenta el arquitecto Juan José Díaz Infante comenzaría a utilizar sistemas estructurales espaciales, destacando la amplia fachada-cubierta del Bufete Industrial y el Centro Ecológico Asturiano de Cuautla de 1993, que consta de una estructura espacial de 150 m de largo y 60 m de ancho, forrada por una cortina de cristal sin marcos de aluminio, sostenida únicamente por ocho apoyos perimetrales, (Fotografía 33). En 1990 proyectaría su obra más reconocida, la Bolsa Mexicana de Valores (BMV), ubicada sobre la avenida Paseo de la Reforma, inspirada en el edificio de la Pennzoil de Phillip Johnson; en este edificio se muestra la combinación de varios sistemas estructurales, a través de una cimentación de pilotes, se sostiene una edificación compuesta de tres partes, la primera de concreto armado, la segunda de vigas y columnas metálicas, y la tercera con una estructura espacial con una altura superior a los cien metros.

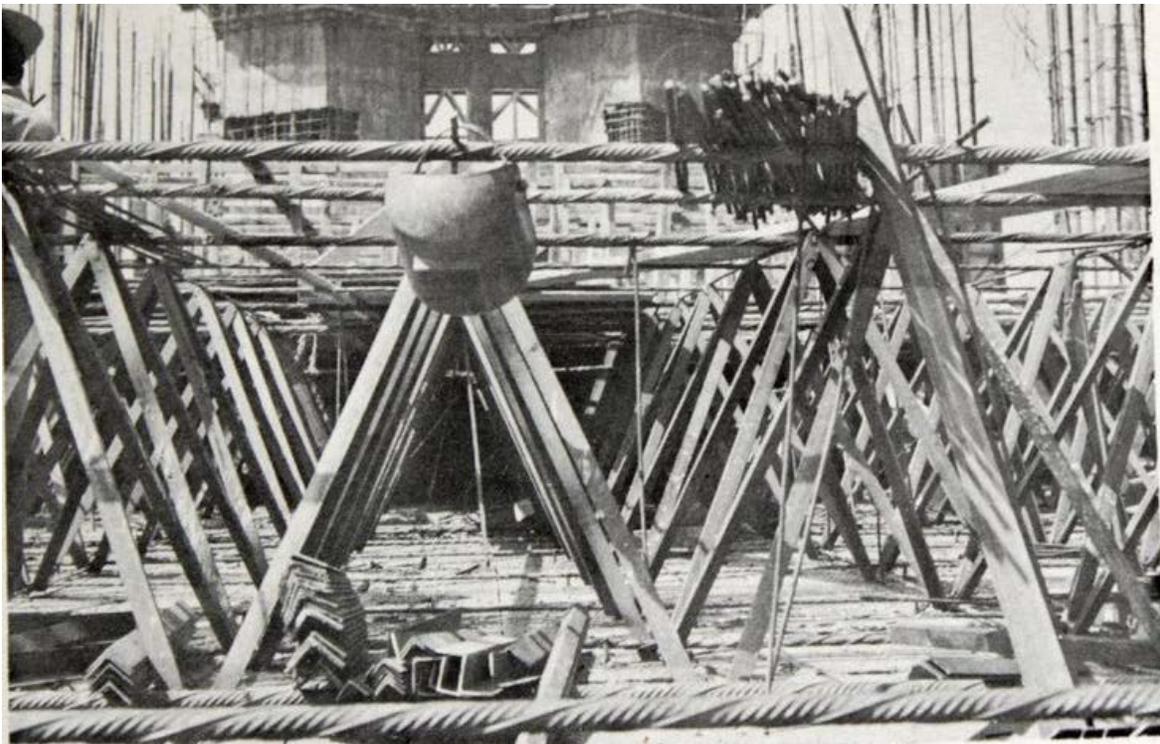


Fotografía 33. Díaz Infante. Bufete Industrial. Destaca la cubierta sostenida por la armadura espacial tridimensional, compuesta geoméricamente por módulos de rombos desfasados.

Díaz Infante concibe el término Kalikosmia para sus estructuras ligeras tubulares a prueba de sismos, en sus obras se mostró la aplicación de la ingeniería estructural más novedosa, combinada con la estricta estandarización de materiales, generando una arquitectura racionalizada; él propone que los edificios deben ser reciclables, transparentes y prefabricados, exponiéndolo de la siguiente manera: “menos materia a más velocidad igual a más espacio en menos tiempo” (Villasana, 2012, párr. 2).

#### d) LA TRIDILOSA DE HEBERTO CASTILLO

En 1966 el ingeniero civil Heberto Castillo Martínez desarrolló un sistema estructural de entrepiso tridimensional mixto de acero y concreto, al que denominó “Tridilosa”, cuya finalidad fue racionalizar la cantidad de materiales y optimizar el diseño y construcción de sistemas convencionales de concreto armado (Fotografía 34). Aprovechando la estabilidad de los tetraedros, el sistema consiste en un reticulado en dos direcciones, formado por pirámides de base cuadrada en donde los nodos son placas de acero al que convergen las barras horizontales y diagonales unidas con soldadura, y en la parte superior se tiene una delgada capa de concreto de aproximadamente 7 cm de espesor.



Fotografía 34. Armado de la estructura de una tridilosa, para los entrepisos del Hotel de México., se observan los miembros estructurales armados y conectados entre por medio de soldadura sobre la cimbra para su posterior izamiento y colado de concreto.

Los esfuerzos presentados en esta estructura son principalmente de flexión (compresión-tracción), la torsión (de manera secundaria) y el cortante. La capa de concreto retoma los esfuerzos de compresión, mientras que el acero resiste los esfuerzos de tracción (compuesta por los elementos tubulares soldados o atornillados a placas o nodos de conexión); la torsión se absorbe por el armado transversal, mientras que el cortante con

las diagonales espaciales. Físicamente la diferencia de este sistema con las losas tradicionales de concreto armado, es que la Tridilosa no contiene concreto de relleno, la fina capa de concreto trabaja a un esfuerzo constante en una sección rectangular; a diferencia del concreto en una losa o trabe donde este varía linealmente, dependiendo esto de la profundidad del punto donde se mide el esfuerzo. Gracias a esto, se ahorra aproximadamente un 66 % de concreto y hasta un 40 % de acero, lo que permite la construcción de estructuras mucho más ligeras, resistentes, económicas y de grandes claros, en menor tiempo de ejecución que los sistemas convencionales (Colegio de Ingenieros Arquitectos de Estado de Hidalgo, A. C., 2014, párr. 2).

La primera obra en utilizar este sistema, fue en 1966 en un inmueble ubicado en San Antonio Abad, México, D.F.; posteriormente se utilizaría en edificios de gran escala como el Hotel de México (hoy World Trade Center México) de 54 niveles (Fotografía 35), la Torre Chapultepec de 30 niveles, las cubiertas de los vestíbulos del Centro Médico Siglo XXI, la Plaza Cuauhtémoc, etc., además de más de 200 puentes en el país, puentes desde 20 hasta 100 metros de claro en Cuba y un ejemplo destacado de un puente en Nicaragua que puede ser levantado por dos personas sobre el que transitan camiones; la flexibilidad del sistema también permitió emplearlo en muelles flotantes y pangas (embarcaciones pequeñas).



Fotografía 35. Vista aérea de las últimas etapas de construcción del Hotel de México (hoy WTC México), se observa la estructura original con el acabado de concreto de 54 niveles.

## e) COMPAÑÍAS ESPECIALIZADAS EN MÉXICO

En nuestro país han existido varias empresas especializadas dedicadas a la construcción de estructuras espaciales, que utilizan sistemas internacionales patentados o diseños desarrollados por ingeniería mexicana. Durante varias décadas Space Frame Technology (anteriormente Adriann's de México), desarrolló diversos sistemas de armado de estructuras espaciales, basándose en los conceptos de tipo de cubierta, geometría, costo y acabado; sus sistemas son ensamblados por tornillos y tienen la capacidad de ser desmontables, permitiendo gran variedad de uso, como cubiertas, losas de entrepiso y fachadas. Sus sistemas más utilizados son (Chargoy, 2006, págs. 10, 11):

- Space-Beam, empleado para cubrir espacios de 20 a 100 metros de largo, con la capacidad de utilizarse como losa de entrepiso ya que posee la capacidad de soportar la carga del concreto y a la lámina modulada Lami-crete.
- El sistema Tri-Beam, es una variante del Space-Beam, integrado por nodos y perfiles de acero de longitud variable. El sistema es desmontable, con módulos triangulares de dimensiones variables (90 cm mínimo), llegando a cubrir claros desde 40 metros en una capa, hasta 50 metros o más en estructuras de dos capas. Formalmente puede ser utilizado de manera vertical, horizontal, a dos y cuatro aguas, inclinado y como bóveda de cañón; utilizando como revestimiento, el concreto, cristal o diversos materiales ligeros.
- Sphere-Beam, es un sistema conformado por perfiles tubulares de acero de longitud variables y con nodos esféricos de acero de diferentes diámetros llamados Spheres-nodes. Igualmente a los anteriores, es unido con tornillos, es desmontable y tiene gran variedad formal (hasta estructuras geodésicas); utilizando un reticulado similar al sistema internacional Mero, permitiendo claros de hasta 100 metros.
- Screw-Beam es un sistema basado en perfiles tubulares de acero de longitudes y diámetros variables; el nodo consiste en un tornillo, presentando módulos cuadrados, rectangulares y triangulares según los ángulos requeridos. El claro logrado en superficies planas es de 20 m y en superficies curvas de 30 m.

Entre los proyectos más destacados desarrollados por Space Frame Technology, se encuentran la Catedral de Ecatepec, en el Estado de México, la cual posee una cubierta curva con un claro de 70 metros; el Teatro de San Benito Abad del Colegio Centro Escolar del Lago, donde la cubierta y las fachadas del edificio comprenden la estructura tridimensional; la gran cubierta del acceso principal del Hospital 20 de Noviembre con la estructura inclinada (Fotografía 36).



Fotografía 36. Hospital 20 de Noviembre, destaca la gran cubierta colocada en 1994 tras la rehabilitación del inmueble; la estructura espacial de la cubierta se halla suspendida librando el patio del acceso principal.

Geometrica es una de las empresas mexicanas con más reconocimiento a nivel internacional en la creación de estructuras tridimensionales de alta complejidad, cuya sede se localiza en Monterrey, Nuevo León. Sus estructuras se desarrollan con base en formas elípticas, parabólicas y circulares, retomando los sistemas espaciales para distribuir las cargas. La fabricación de estas estructuras es principalmente de acero galvanizado, teniendo nodos diversos según las dimensiones del proyecto con diámetros de 1.5 hasta 3.5 pulgadas. Su aplicación principalmente es en cubiertas, plantas industriales y grandes almacenes que poseen claros desde 45 hasta 300 metros, libres de

apoyos verticales intermedios, lo que permite mayor libertad de diseño y flexibilidad de los espacios según las actividades a desarrollar (Geometrica, 2007, párr. 1).

Su sistema más reconocido llamado, Freedom, puede resolver claros hasta de 300 metros, con la capacidad de cubrir plantas irregulares con formas geométricas de doble curvatura, teniendo como ejemplo la estructura para la Planta Nemark de Monterrey, con una longitud de 224 metros. El revestimiento utilizado se realiza con materiales transparentes, translúcidos y opacos, permitiendo la creación de patrones de luz natural y



Fotografía 37. Estructura en voladizo de la cubierta de acceso del Auto Show de Monterrey, con 30 m de armaduras en voladizo.

reducir el consumo energético; otros recubrimientos pueden ser láminas de acero y concreto. Debido a la ligereza del sistema, el montaje se realiza manualmente sin mano de obra especializada, el levantamiento y al colocación de la estructura requieren de una grúa o torre central. Entre sus obras más destacadas se encuentra la cubierta del Auto Show de Monterrey, Nuevo León (Fotografía 37).

Tridiacero es una empresa mexicana dedicada a difundir varios sistemas espaciales patentados, que pueden ser soldados, atornillados o con uniones. Destaca la construcción del sistema Tridilosa del ingeniero Heberto Castillo, el cual se aplica en medianas y grandes construcciones de entrepisos, como el estacionamiento del Centro Cultural Telmex de la Ciudad de México y los entrepisos del Centro Comercial Plaza Cuauhtémoc (Trimetika, 2014, párr. 4). Entre los sistemas más utilizados de la empresa encontramos:

- Nodo de tipo laminar soldado, cuyo uso principal es de uso industrial, el cual emplea barras cuadradas unidas al nodo con soldadura, generando un reticulado de pirámides de base cuadrada, un ejemplo, la Agencia de Autos Interlomas.

- Otro sistema se basa en el Nodo Triodetic (canadiense), de forma cilíndrica, cuyas barras circulares se unen a presión formando un reticulado de tetraedros.
- Un sistema similar al Mero, uniendo las barras circulares atornillándolas a un nodo esférico, con acabado cromado, formando pirámides de base rectangular dispuestas en un reticulado de dos direcciones. Su uso principal es en interiores de oficinas y restaurantes o grandes edificios como una Estación de Servicio de Tlalpan en la Ciudad de México.
- Un sistema formado por un nodo cilíndrico con un orificio al centro, al cual se atornillan las barras circulares con los extremos aplanados. Ejemplos: la cubierta del acceso principal de la Escuela Secundaria Justo Sierra en San Juan de Aragón y la entrada principal a las Instalaciones Deportivas del Club de Fútbol Cruz Azul.

La empresa mexicana Trimetika ha desarrollado nuevos sistemas espaciales que ofrecen ensambles a corto plazo y estructuras de gran variedad estética mediante el análisis de formas geométricas; compuestos por un nodo conector y barras de acero de alta resistencia. El proceso de diseño se basa en estrictas normas de construcción, considerando el cálculo de la tensión, fatiga, momento de inercia y módulo de elasticidad de cada uno de los componentes, para especificar el tipo de nodos a utilizar, así como de barras, tornillos y apoyos que integran la estructura; al terminar, ésta es revestida por un acabado de pintura horneada en fábrica y posteriormente retocada con pintura de esmalte (Trimetika, 2014, párr. 4).

Dependiendo del tipo de la cubierta, se realiza el armado manualmente siguiendo un programa de montaje o se arman módulos previamente para ser izados y colocados. Ejemplos de estos sistemas son el puente peatonal para el acceso al Foro Sol en la Ciudad de México, la cubierta de la Iglesia de Nuestra Señora de la Esperanza (Fotografía 38), la entrada principal del Aeropuerto de Toluca en el Estado de México y la cubierta del Salón Principal de Exposiciones del World Trade Center de Veracruz.



Fotografía 38. Interior de la Iglesia de Nuestra Señora de la Esperanza, Ciudad de México. Destaca la cubierta formada geoméricamente por paraboloides hiperbólicos y construida por una armadura tridimensional de barras y nodos recubiertos en pintura de esmalte.

El sistema utilizado por GMI, es una red tridimensional de estructuras espaciales basada en el sistema Mero, con perfiles y conectores armados diseñados para cubrir grandes claros sin necesidad de apoyos intermedios. Los elementos son prefabricados en acero y galvanizados para regiones que presentan condiciones climáticas corrosivas; entre los recubrimientos utilizados están los paneles de poliuretano, cristal, policarbonato, acrílico, lámina rolada y fibrocemento. Otro sistema de GMI, es el Quick Space, similar al americano Unistrut, formado por un reticulado de tetraedros en dos direcciones y de gran ligereza lo que permite la colocación de una cimentación superficial, además de poder instalarse de manera vertical, horizontal o inclinada. Como ejemplo del sistema Quick Space se encuentra la cubierta de la Estación del Metro Viaducto en la Ciudad de México, el cual presenta grandes claros, con cubiertas en diferentes niveles y apoyos verticales formados por la misma estructura (Grupo GMI, 2010, párr. 1).

Existen además corporaciones extranjeras especializadas que construyen de manera constante en nuestro país, como es el caso de la empresa española Lanik y la compañía francesa Doval Building.

### **III. ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS GEOMÉTRICAS ESPACIALES**

a) Definición

b) Clasificación

c) Composición geométrica

d) Retículas en armaduras espaciales tridimensionales y sistemas estructurales de nodos

## a) DEFINICIÓN

Una estructura espacial se define como una extensión del mismo espacio, donde las fuerzas se propagan en el vacío, con los que se logran campos de fuerzas homogéneos y sin puntos de sobrecarga grandes, lo que provoca que las secciones de los elementos (trabajando a tracción y compresión) disminuyan traduciéndose en una disminución de material. Las retículas o mallas tridimensionales (ejemplo de estructura espacial) son sistemas estructurales compuestos por elementos lineales unidos de tal modo que las fuerzas son transferidas de forma tridimensional.

Además de la reducción de peso, estas estructuras se ven favorecidas por la prefabricación y estandarización de sus elementos, y no precisan para el montaje de medios de unión distintos de los puramente mecánicos, permitiendo menor uso de mano de obra y equipo. Entre sus cualidades diferenciadas respecto de otro tipo de estructuras tenemos (Chargoy, 2006, págs. 15, 16):

- Alto grado de hiperestaticidad, que provoca gran facilidad para la disposición de puntos de apoyo, la secuencia de montaje y desmontaje, y un buen comportamiento ante incendios y eventos sísmicos.
- Mayor ligereza de peso respecto a las estructuras tradicionales, gracias a la disminución de secciones.
- Posibilidad de grandes claros y distancias entre apoyos.
- Gran estética según el diseño proyectado.
- Transportabilidad, por ser elementos fácilmente apilables.

Estos sistemas pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones, aunque la principal es la de estructura de cubierta, siendo la solución más competitiva cuanto mayores son las cargas a soportar y el claro a lograr, por este motivo su uso es ideal en espacios donde no se pueden colocar apoyos intermedios; son construidas principalmente en acero y aluminio, pero hay ejemplos de elementos formados de madera e inclusive plástico (Chargoy, 2006, págs. 15, 16).

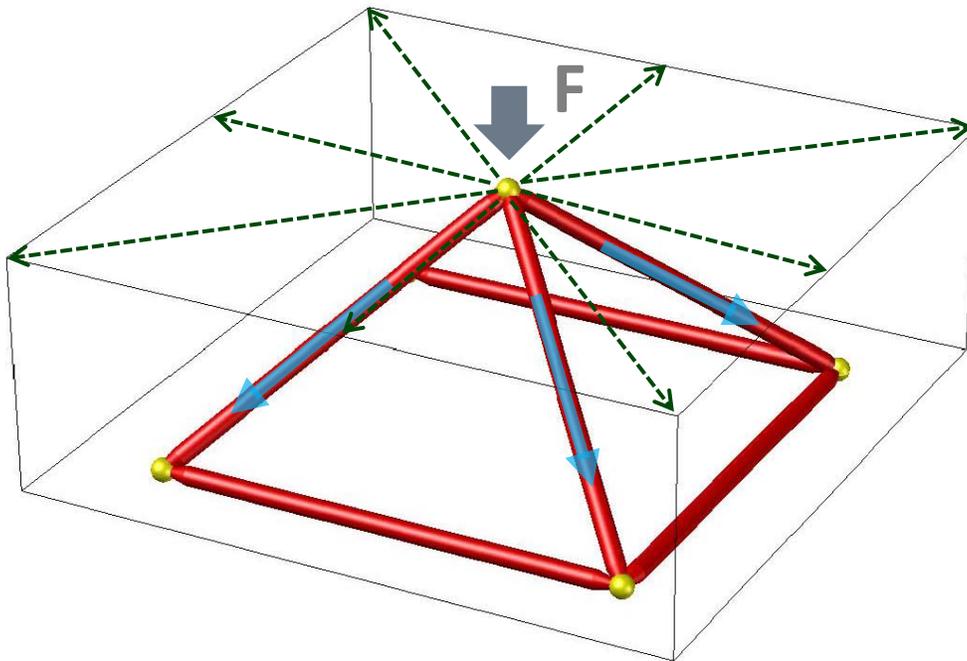


Imagen 24. Descomposición de fuerzas en el espacio, aplicado al nodo de un módulo geométrico estructural. Reinterpretación personal del Arq. Chargoy Rodríguez.

Las retículas espaciales están formadas por un conjunto de barras unidas entre sí por nodos, formando un todo estructural que actúa en tres dimensiones (espacio), en consecuencia la trayectoria de los esfuerzos en toda la estructura es tridimensional (Imagen 24). También se definen como una versión en tres dimensiones de una armadura plana, cuya disposición estructural está formada por un gran número de barras, unidas entre sí a través de sus extremos, creando así una red tridimensional. Entre otras definiciones y características encontramos (Chargoy, 2006, págs. 15, 16):

- El arquitecto e ingeniero David G. Emmerich, expone entre sus propiedades que “... las estructuras de formas geométricas, estáticas e hiperestáticas son estables incluso con juntas articuladas, en consecuencia, las estructuras mencionadas son capaces de ensamblarse sin haber sido construidas monolíticamente, pudiendo hacerlo únicamente por fijación mecánica”.
- Z. S. Makowski precisa que estas estructuras “Son líneas de acción de las fuerzas actuantes en tres dimensiones”.

- Recordando a Fuller, nos menciona que “... teniendo en cuenta la tendencia automática de la energía reticular a triangularse, se supone que la red estructural de energía más económica sería la derivada de la fusión del tetraedro y la esfera. La esfera encierra la mayor cantidad de espacio con la menor superficie posible y es más fuerte con las presiones internas, el tetraedro encierra el menor espacio con la mayor superficie y es más fuerte con las presiones externas”.
- Igualmente Fuller, acuña el término tensegrity: originado de la reducción del concepto de “integridad tensional”. Se describe como un principio de relación estructural en la que la forma estructural trabaja conjunta y continuamente a esfuerzos de tensión, manteniendo un equilibrio en el sistema.
- Los arquitectos españoles J. Margarit y C. Buxadé, mencionan que las mallas espaciales se basan en la triangulación, con la cual se logra la célula más rígida que se pueda obtener.
- Según Heinrich Schmitt las estructuras tridimensionales basan su forma en la geometría del cubo y sus secciones regulares o segmentos de cubo.
- El arquitecto E. Sanabria Atilano establece que “... el componente básico de una estructura espacial es el triángulo; la belleza y flexibilidad de su geometría es un producto de la tecnología”.
- Los ingenieros mexicanos Heinen y Gutiérrez definen una retícula espacial como un sistema estructural formado por un gran número de barras que unidas por sus extremos dan como resultado una red que puede considerarse bidimensional o tridimensional, cuando es de una o dos capas respectivamente.
- El arquitecto José Mirafuentes dice que “Las estructuras reticuladas son construcciones que en su totalidad o en sus elementos separados, actúan no en uno o dos planos, sino en el espacio, es decir, en tres direcciones”.
- Juan José Díaz Infante ubica estas estructuras en la teoría de “Kalikosmia”, modelo arquitectónico basado en perfiles geométricos que dan lugar a

construcciones de en tramados esféricos y planos, cuya edificación resulta más económica, rápida y segura ante desastres naturales, pues el tipo de materiales que se utiliza en las estructuras es más resistente y ligero, condición que a su vez acelera el proceso e ensamblaje.

Conjuntamente podemos definir una estructura espacial tridimensional como un sistema compuesto por líneas de acción de fuerzas unidas comúnmente en sus extremos por nodos ya sean fijos o articulados (en ciertas ocasiones prescinden de estos), basados en la constitución de formas geométricas tridimensionales (poliédricas), que generan módulos rígidos triangulares que al multiplicarse constituyen una red o retícula espacial (Chargoy, 2006, pág. 16).

## b) CLASIFICACIÓN

El propósito final de un sistema estructural es la integración del trabajo de sus partes para el correcto funcionamiento del conjunto, en este caso, la transmisión de fuerzas hacia los apoyos y posteriormente al suelo (cargas vivas, muertas y accidentales); con esto podemos concluir que una estructura trabaja bajo un flujo de fuerzas compuesto de tres etapas consecutivas (Chargoy, 2006, pág. 20):

**Recepción de cargas → Flujo → Transmisión de cargas**

A través de la sistematización de las estructuras (esencia del tema, siendo la transmisión de cargas), el arquitecto Heino Engel realiza una clasificación de los sistemas estructurales, en función de que existen cuatro mecanismos típicos en la naturaleza y en la técnica, para la transmisión de las cargas actuantes a través de elementos materiales, (Tabla 1), siendo (Engel, 2001, pág. 39):

- Adaptación a las fuerzas – Acción de la **FORMA**
  
- Subdivisión de las fuerzas – Acción **VECTORIAL** (Imagen 25)
  
- Confinamiento de las fuerzas – Acción de la **SECCIÓN** (transversal)
  
- Dispersión de las fuerzas – Acción de las superficies

Y en el caso de una edificación se añade un mecanismo atípico de orden superior: Recoger y transmitir las cargas al suelo – Acción en **ALTURA**.

Sistematización de las estructuras			
1	acción de la FORMA		5 acción en ALTURA
2	acción VECTORIAL		
3	acción de la SECCIÓN		
4	acción de las SUPERFICIES		

Tabla 1. Tabla de la sistematización de las estructuras por Heino Engel, clasificándolo los sistemas según cómo interactúan bajo el flujo de las cargas y las fuerzas internas, en cinco: forma, vector, sección, superficie y altura.

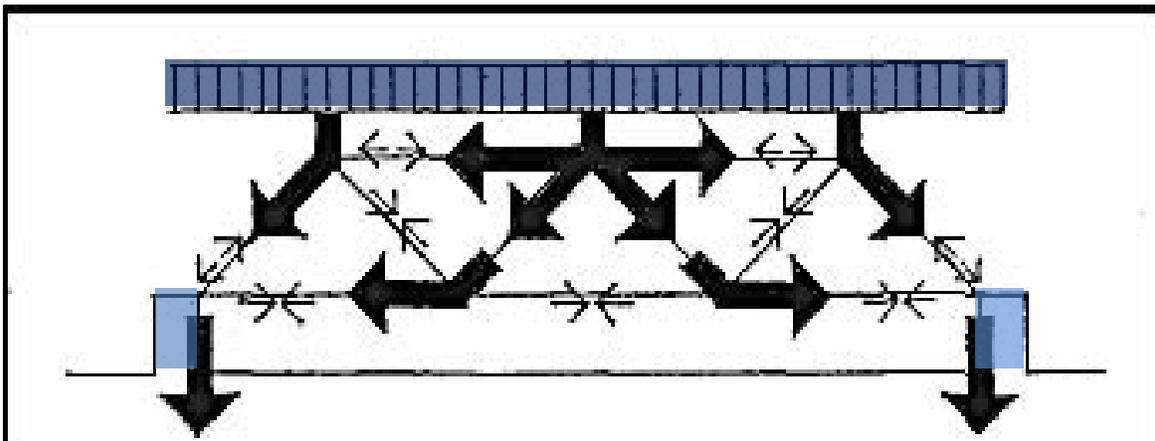
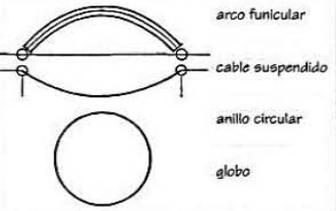
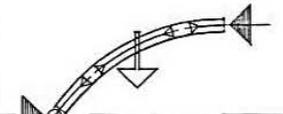
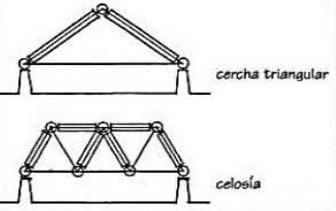
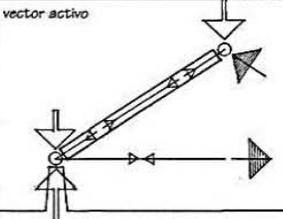
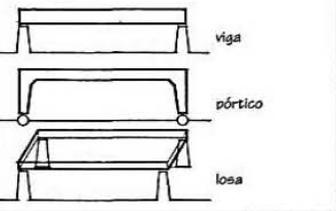
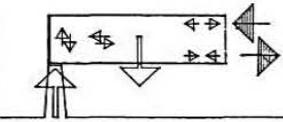
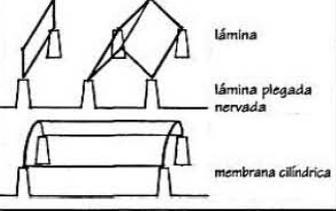
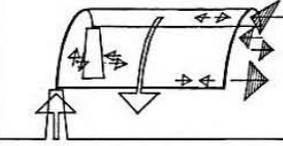
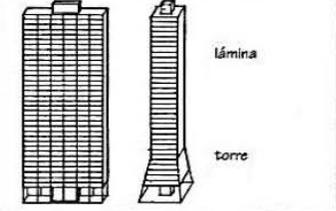
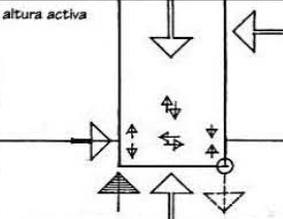


Imagen 25. Esquema de la sistematización de un elemento que trabaja por acción vectorial, como las estructuras espaciales; en las cuales la transmisión de fuerzas se realiza mediante descomposición vectorial (teniendo esfuerzos de tracción o compresión).

Resultado de la acción de esfuerzos en una edificación, Engel obtiene una clasificación general para todos los sistemas estructurales, (Tabla 2), clasificándolos en cinco criterios (forma, vector, sección, superficie y altura).

Tabla 2. Clasificación de todos los sistemas de estructuras en la edificación por Heino Engel, teniendo como criterio: forma, vector, sección transversal, superficie y altura.

Criterio	Prototipo	Fuerzas	Característica	Mecánica de la transmisión de cargas	Familia estructural	Definición
1	<b>FORMA</b> 	compresión o tracción	línea de apoyo catenaria círculo	forma activa 	1	... son sistemas de material flexible, no rígido, en los que la transmisión de cargas se realiza a través del diseño de una FORMA adecuada y una estabilización característica de la FORMA
2	<b>VECTOR</b> 	compresión y tracción	triangulación	vector activo 	2	... son sistemas de elementos lineales cortos, sólidos y rectos (barras), en los que la transmisión de fuerzas se realiza mediante descomposición VECTORIAL, es decir, a través de una subdivisión en fuerzas unidireccionales (compresiones o tracciones)
3	<b>SECCIÓN TRANSVERSAL</b> 	flexión fuerzas cortantes	perfil seccional	sección activa 	3	... son sistemas de elementos lineales rígidos y macizos—incluida su compactación como losa—en los que la transmisión de cargas se efectúa a través de la movilización de fuerzas SECCIONALES
4	<b>SUPERFICIE</b> 	fuerzas de membrana	forma bidimensional	superficie activa 	4	... son sistemas de superficies flexibles, pero resistentes a tracciones, compresiones y esfuerzos cortantes, en los que la transmisión de fuerzas se realiza a través de la resistencia de las SUPERFICIES y una determinada forma de las SUPERFICIES
5	<b>ALTURA</b> 	(condiciones complejas)	transmisión de las cargas al suelo	altura activa 	5	... son sistemas en los que la transmisión de fuerzas debidas a su extensión en altura, es decir, el conjunto de las cargas de las plantas y el viento junto con la reacción del suelo, se realiza mediante las adecuadas estructuras EN ALTURA: RASCACIELOS

Las estructuras híbridas son sistemas en los que la desviación de las fuerzas se efectúa a través de la acción conjunta de dos o más sistemas diferentes (equiparables en cuanto a su función portante) de distintas familias estructurales. La acción conjunta es lograda mediante dos maneras de unión de sistemas: superposición o acoplamiento (Engel, 2001, pág. 43), (Imagen 26, 28). Una estructura híbrida no puede considerarse como una familia estructural independiente como un tipo estructural específico debido a los siguientes puntos:

- No poseen mecanismos típicos para la desviación de cargas.
- No desarrollan un estado específico de fuerzas actuantes o tensiones.
- No presentan propiedades estructurales características.

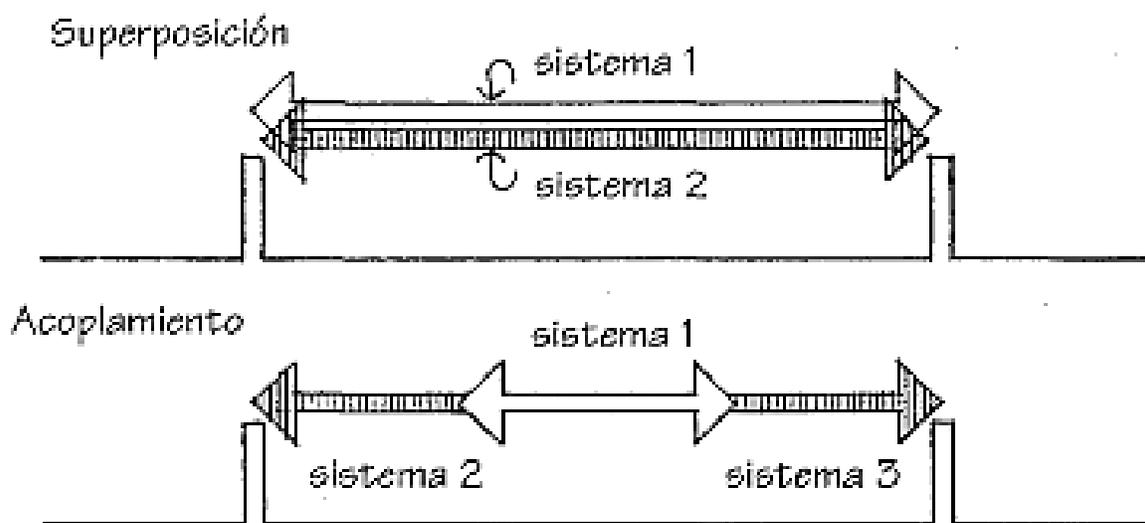


Imagen 26. Estructura híbrida. La desviación de fuerzas es realizada mediante la acción conjunta de dos o más sistemas diferentes; la acción conjunta es lograda por superposición (arriba) o acoplamiento (abajo).

Engel refiere otra combinación de sistemas estructurales, aquellas incorrectamente denominadas híbridas, que son aquellos sistemas en los que cada una de las funciones de la estructura como recepción de cargas, transmisión de cargas, etc., las realizan diferentes familias de estructuras (Engel, 2001, pág. 43), (Imagen 27). Existen además sistemas que poseen algunas cualidades de las estructuras híbridas, por lo que son

denominadas “potencialmente híbridas”, en las cuales los elementos trabajan para compensar o reducir la acción de las fuerzas críticas o para aumentar el grado de estática en el conjunto.

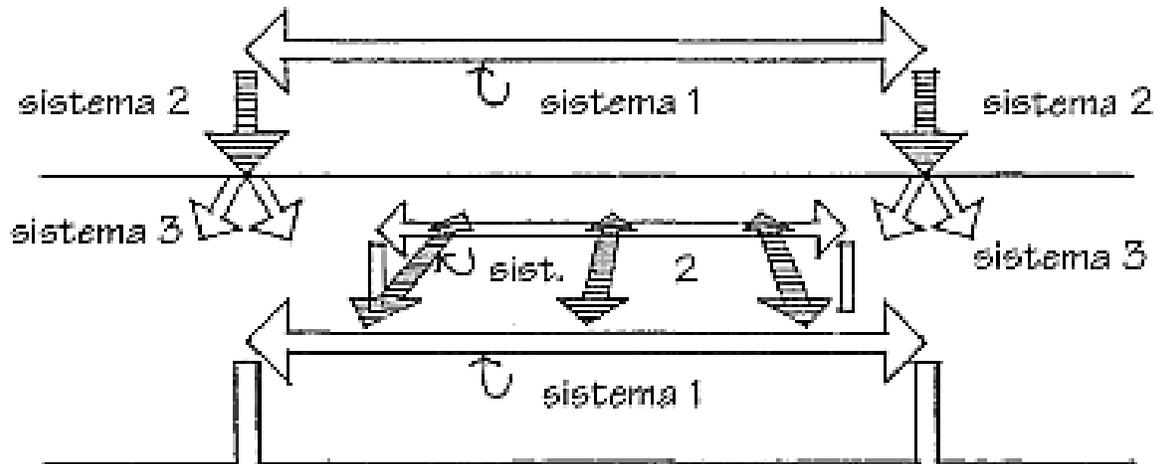


Imagen 27. Ejemplo de estructura incorrectamente denominada híbrida; en estas diferentes familias de estructuras realizan cada una de las funciones.

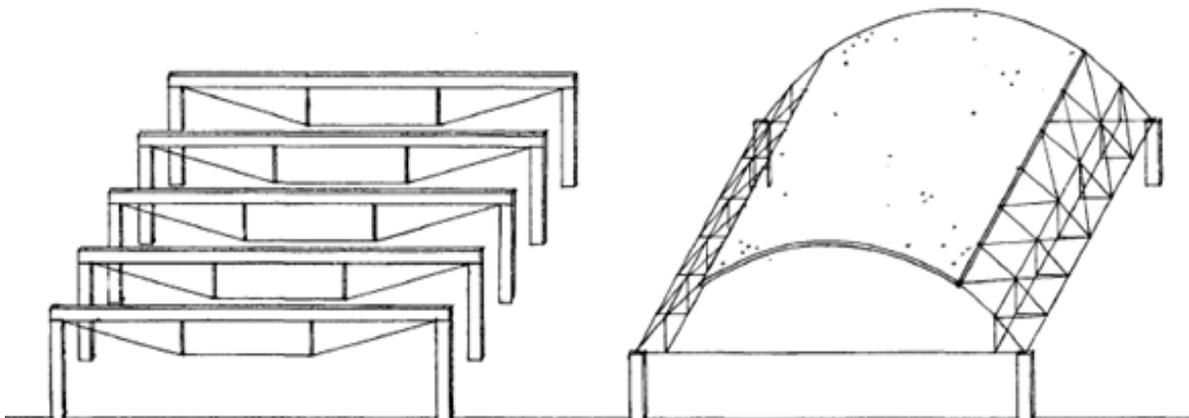


Imagen 28. Ejemplos de estructuras híbridas. A la izquierda, una viga atirantada, la cual es unida por la superposición de sistemas de sección y forma activa. A la derecha, una membrana con celosía, por acoplamiento son unidos los sistemas de superficie y vector activo.

Debido a la acción de las fuerzas y la geometría de las estructuras espaciales tridimensionales, estas se encuentran clasificadas como “Sistemas de estructuras de vector activo”, cuyos prototipos pueden ser cerchas triangulares o celosías; donde los componentes se descomponen triangularmente, trabajando a compresión y tracción. Estos son definidos como: Sistemas de elementos lineales cortos, sólidos y rectos (barras), en los que la transmisión de fuerzas se realiza mediante descomposición vectorial, es decir, a través de una subdivisión en fuerzas unidireccionales (compresiones o tracciones), (Engel, 2001, pág. 41).

Los tipos de estructuras que encontramos en los sistemas de vector activo, se ordenan en los siguientes cuatro grupos (Engel, 2001, pág. 48), (Tabla 3):

## 1. Cerchas planas o armaduras planas (Imagen 29)

### 1.1. De cordón superior

- 1.1.1. Triangulares
- 1.1.2. De (segmentos de) arcos
- 1.1.3. De cordones paralelos

### 1.2. De cordón inferior

- 1.2.1. Triangulares
- 1.2.2. (De segmentos) suspendida
- 1.2.3. De cordones paralelos

### 1.3. De dos cordones

- 1.3.1. Romboidal
- 1.3.2. Cóncava
- 1.3.3. De cordones paralelos

### 1.4. Sobre-elevadas

- 1.4.1. Triangular
- 1.4.2. En forma de hoz
- 1.4.3. Amansardada

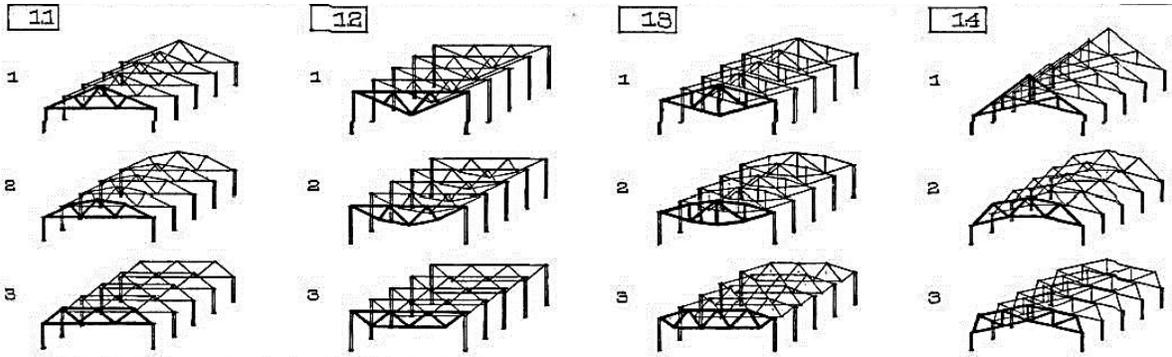


Imagen 29. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Cerchas planas.

## 2. Cerchas planas combinadas o armaduras combinadas (Imagen 30)

### 2.1. Lineales

- 2.1.1. En forma de viga
- 2.1.2. En forma de pórtico
- 2.1.3. En forma de arco
- 2.1.4. De forma irregular

### 2.2. Plegadas

- 2.2.1. Pliegue paralelo
- 2.2.2. Pliegue poliédrico
- 2.2.3. Pliegue cónico

### 2.3. Cruzadas

- 2.3.1. Intersección biaxial
- 2.3.2. Intersección triaxial

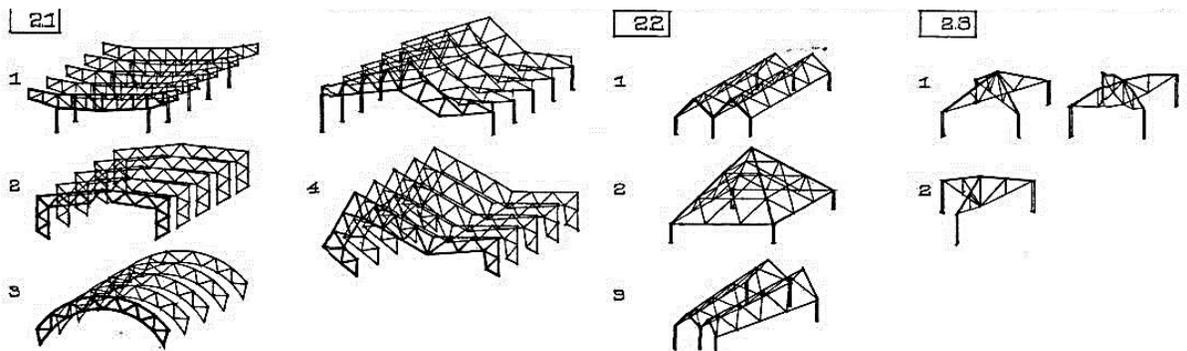


Imagen 30. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Cerchas combinadas.

### 3. Cerchas curvas o armaduras curvas (Imagen 31)

#### 3.1. De curvatura simple

3.1.1. Forma uniaxial

3.1.2. Forma interseccionada

#### 3.2. En forma de silla de montar

3.2.1. Arcos de apoyo perimetrales

3.2.2. Viga perimetral recta

#### 3.3. En forma de cúpula

#### 3.4. De forma esférica

3.4.1. Cúpula Schwedler

3.4.2. Cúpula reticular

3.4.3. Cúpula de retícula paralela

3.4.4. Cúpula de lamas

3.4.5. Cúpula geodésica

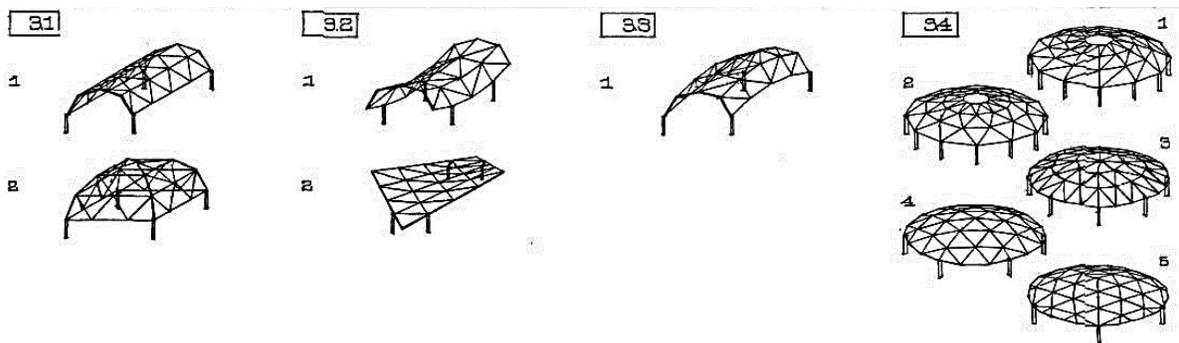


Imagen 31. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Cerchas Curvas.

### 4. Mallas espaciales (Imagen 32)

#### 4.1. Planas ( )

4.1.1. Envoltente semioctaédrica

4.1.2. Envoltente tetraédrica

4.1.3. Envoltente prismática

#### 4.2. Plegadas

4.2.1. Pliegue paralelo

### 4.3. Curvadas

4.3.1. Curvatura sencilla

4.3.2. Doble curvatura

4.3.3. Curvatura esférica

### 4.4. Lineales

4.4.1. Viga espacial

4.4.2. Pórtico espacial

4.4.3. Arco espacial

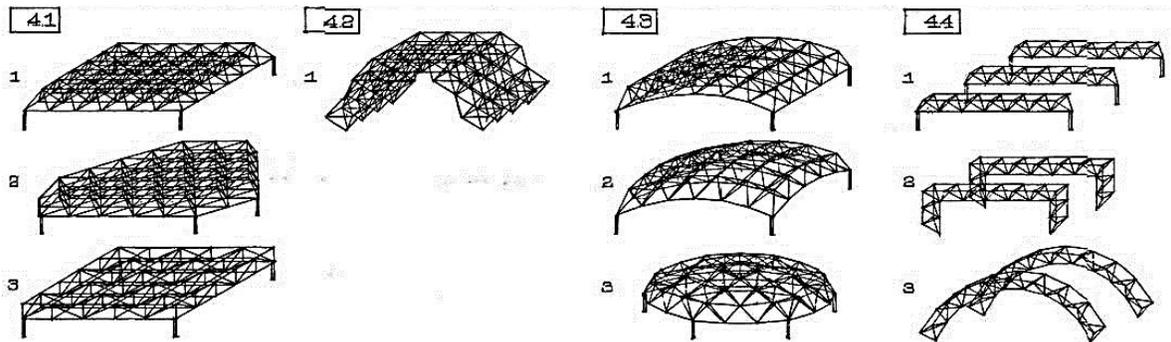


Imagen 32. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Mallas espaciales.

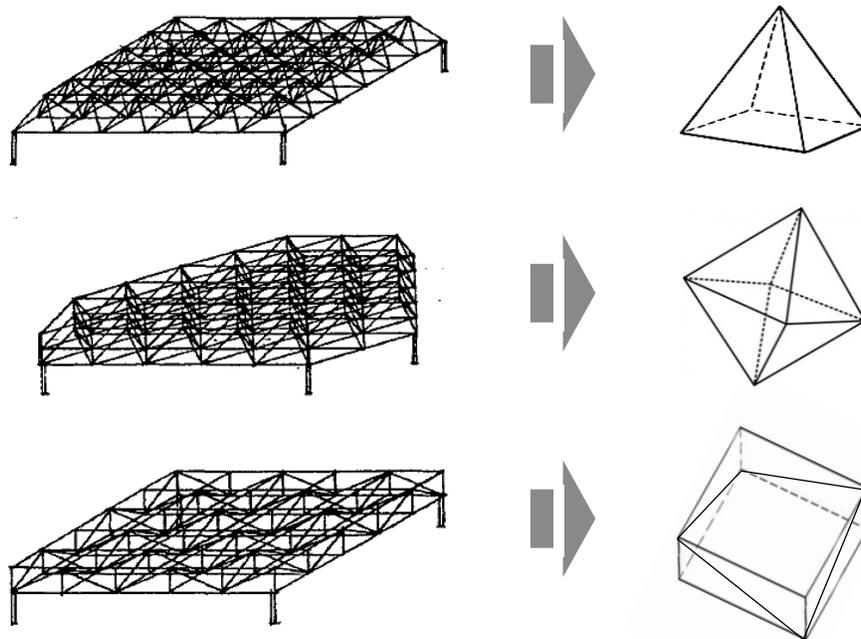


Imagen 33. Mallas espaciales planas, retomadas de la Fig. 69. Estructuras formadas por figuras geométricas: semioctaedro, octaedro y prisma rectangular triangulado.

Sistema estructural / Sistema de estruturas		Material principal	Matéria prima	Luz en metros / Vão em metros																	
				0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	300	400	500	
Cerchas planas		madera	madeira			8		15		20		30		40							
		metal (acero)	metal (aço)			10		15		20		30		40		50					
Trellças planas		madera	madeira			10		20		30		40		60		100					
		metal (acero)	metal (aço)					20		30		60		100							
Cerchas planas combinadas		madera	madeira			8		10		20		25		40		60					
		metal (acero)	metal (aço)			10		12		25		30		40		100		120			
		madera	madeira			8		15		25		35		45							
Trellças planas combinadas		metal (acero)	metal (aço)			10		20		30		40		60		80					
		madera	madeira			8		15		25		35		45		60		80			
		metal (acero)	metal (aço)			10		20		30		40		60		80					
Cerchas curvas		madera	madeira			8		12		25		30		40		60		80			
		metal (acero)	metal (aço)			10		20		30		40		60		80					
		madera	madeira			8		12		25		30		40		60		80			
Trellças curvas		metal (acero)	metal (aço)			10		20		30		40		60		80					
		madera	madeira			20		40		60		100		200							
		metal (acero)	metal (aço)			20		50		100		150		500							
Mallas espaciales		madera	madeira			8		15		30		40		60		100		150			
		metal (acero)	metal (aço)			6		25		100		150									
		madera	madeira			8		15		30		40		60		100		150			
Trellças espaciais		metal (acero)	metal (aço)			6		25		100		150									
		madera	madeira			15		20		40		70		100		150					

Tabla 3. Esquema de claros librados por materiales según la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo, divididos en: cerchas planas, cerchas combinadas, cerchas curvas y mallas espaciales.

### c) COMPOSICIÓN GEOMÉTRICA

Los sistemas de estructuras de vector activo se encuentran formados por un conjunto de elementos lineales (cordones, barras), que están sometidos a esfuerzos de compresión o tracción, unidos entre sí por nodos y formados geoméricamente por triangulaciones, dando como resultado un sistema mixto de compresión y tracción.

Retomando la premisa de Fuller, un sistema geoméricamente estable se logra a partir de la triangulación de la forma, en el caso de las estructuras de vector activo, como mallas espaciales, esta es necesaria para evitar la deformación de la estructura y entre más seccionada por triángulos se encuentre, mayor estabilidad poseerá el conjunto ().

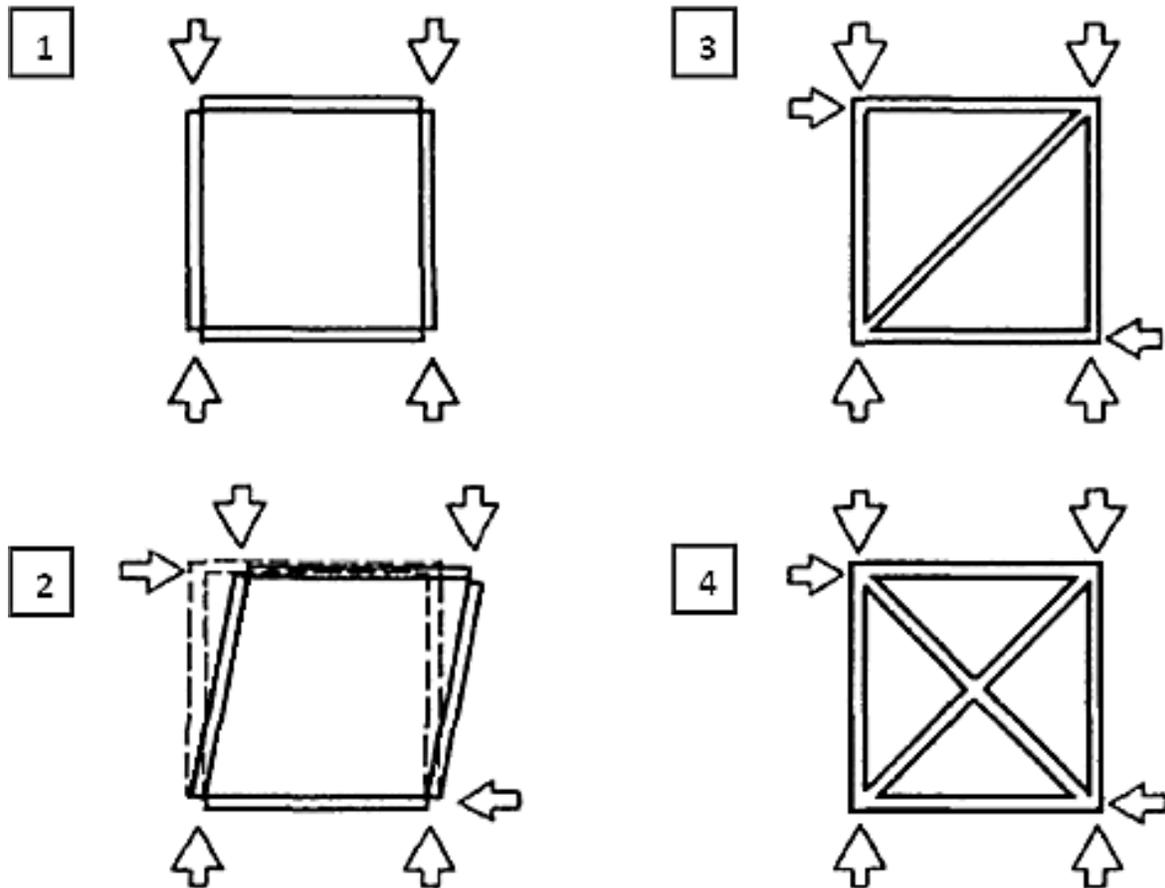


Imagen 34. Esquema de arriostramiento de cercha, mediante triangulación, según Heino Engel. 1. Un bastidor con cuatro articulaciones en las esquinas sólo está en equilibrio en teoría. 2. Con una carga asimétrica, el sistema no funciona si las esquinas no se rigidizan. 3. Las barras diagonales impiden la deformación. El bastidor se convierte en cercha. 4. Una segunda barra diagonal aumenta el arriostramiento, pero no es imprescindible para el efecto vectorial.

Por medio de la unión de sus componentes, las estructuras de vector activo se clasifican como estructuras hiperestáticas, permitiendo la distribución de los esfuerzos por todo el sistema (Imagen 35).

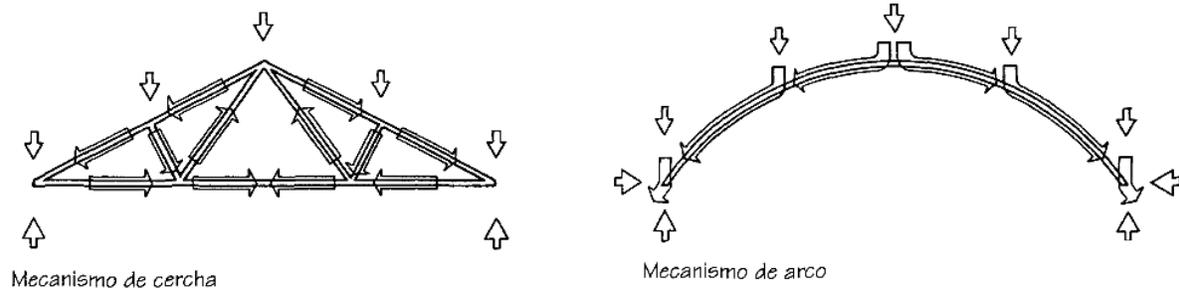


Imagen 35. Esquemas de distribución de fuerzas por Heino Engel. A la izquierda se muestra la reconducción de las fuerzas por medio de las barras, en comparación, a la derecha la distribución lograda, mediante la forma material adecuada.

A través de los elementos que componen un sistema estructural de vector activo y la disposición geométrica general de estos, podemos organizar las partes de la siguiente manera (Tabla 4):

Por elementos del sistema que se pueden presentar:	Por los puntos topográficos en la estructura:	Dimensiones del sistema:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cordón superior</li> <li>2. Cordón inferior</li> <li>3. Cordón exterior</li> <li>4. Cordón interior</li> <li>5. Cordón perimetral</li> <li>6. Cordón transversal</li> <li>7. Cordón longitudinal</li> <li>8. Barra</li> <li>9. Barra diagonal, jabalcón</li> <li>10. Barra a compresión</li> <li>11. Barra a tracción</li> <li>12. Nudo, unión puntual</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>A. Cumbre</li> <li>B. Base</li> <li>C. Apoyo</li> <li>D. Empotramiento</li> <li>E. Alero</li> <li>F. Nudo</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>a. Luz</li> <li>b. Separación entre pórticos</li> <li>c. Separación entre pilares</li> <li>d. Altura de la estructura</li> <li>e. Altura de las cerchas</li> <li>f. Pendiente</li> <li>g. Altura del alero</li> <li>h. Altura libre</li> <li>i. Altura pilares, longitud pilares</li> <li>j. Longitud de las barras</li> </ol>

13. Articulación 14. Articulación de cumbrera 15. Articulación de base 16. Tirante 17. Pilar 18. Cimentación 19. Estribo / contrafuerte 20. Apoyo 21. Empotramiento		
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

Tabla 4. Clasificación de los elementos estructurales de un sistema estructural de vector activo.

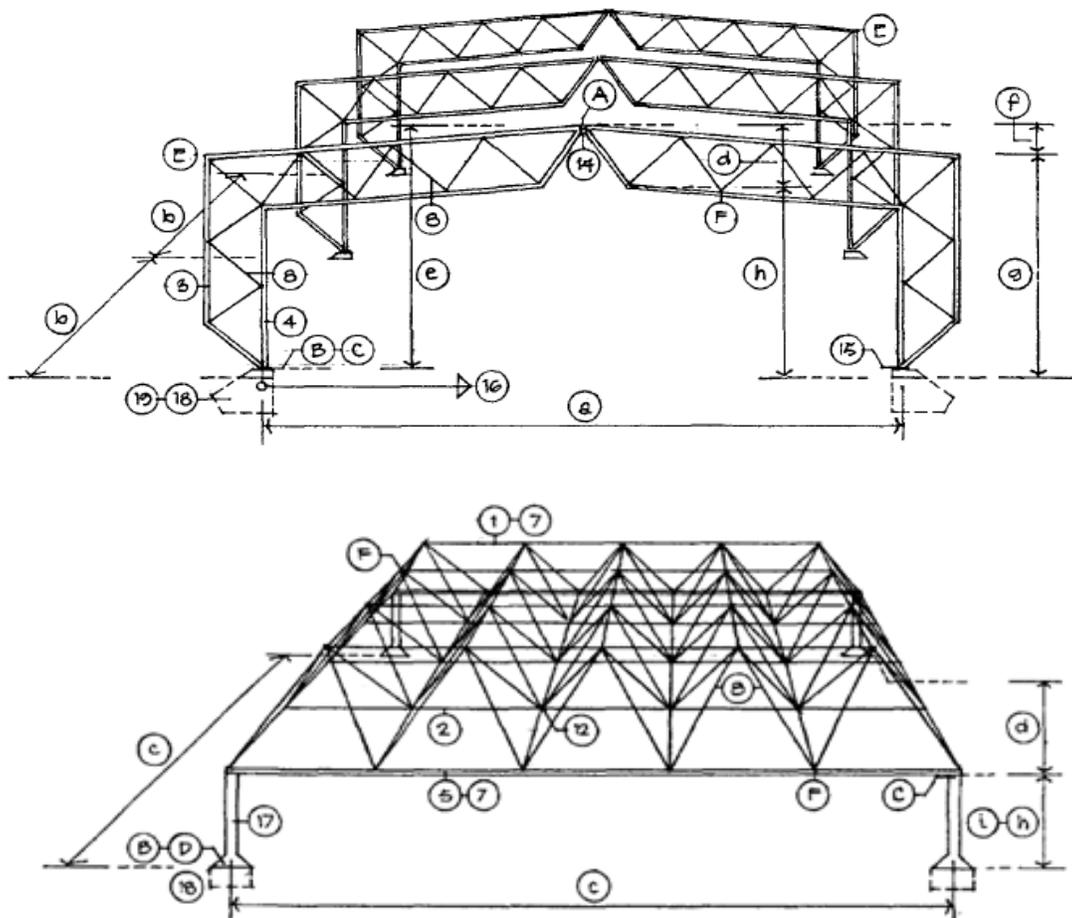


Imagen 36. Componentes y denominaciones de un sistema de vector activo, por Heino Engel. Arriba, cerchas (armaduras) combinadas; abajo, mallas espaciales.

La relación entre la longitud de las barras en el sistema modifica sustancialmente los esfuerzos presentados en estas, incrementando o disminuyendo la efectividad de la estructura. Engel nos presenta diagramas sobre el sistema de separación de vectores, teniendo como finalidad proponer un equilibrio entre el canto de las barras y sus esfuerzos, al plantear una estructura (Imagen 37).

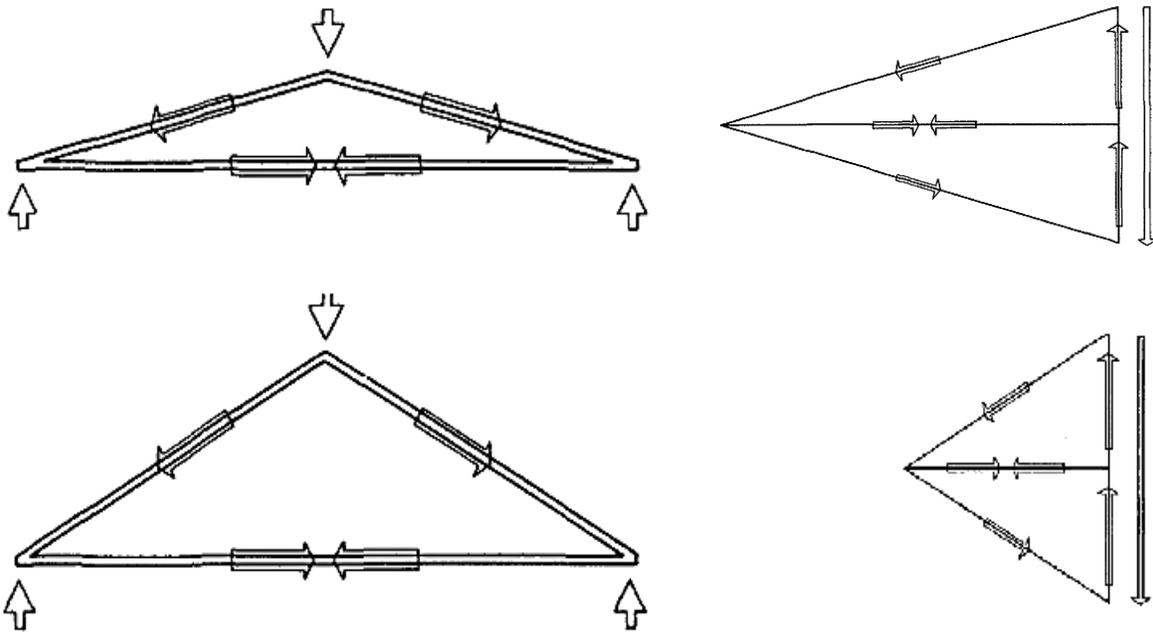


Imagen 37. Sistema de separación de vectores por Heino Engel. A la izquierda, cada fuerza exterior se conserva en equilibrio mediante dos o más fuerzas vectoriales. A la derecha, al reducir el canto, los esfuerzos en las barras aumentan, porque su componente en dirección de la acción exterior se reduce, perdiendo así efectividad (arriba). Al aumentar el canto, los esfuerzos en las barras se reducen, porque su componente en dirección de la acción exterior aumenta, resultando más efectiva (abajo).

Asimismo, la configuración geométrica dada en un sistema estructural espacial, determinará la distribución de los esfuerzos de tensión en las barras, dando por resultado configuraciones más adecuadas según las cargas y puntos de apoyo presentados (Imagen 38).

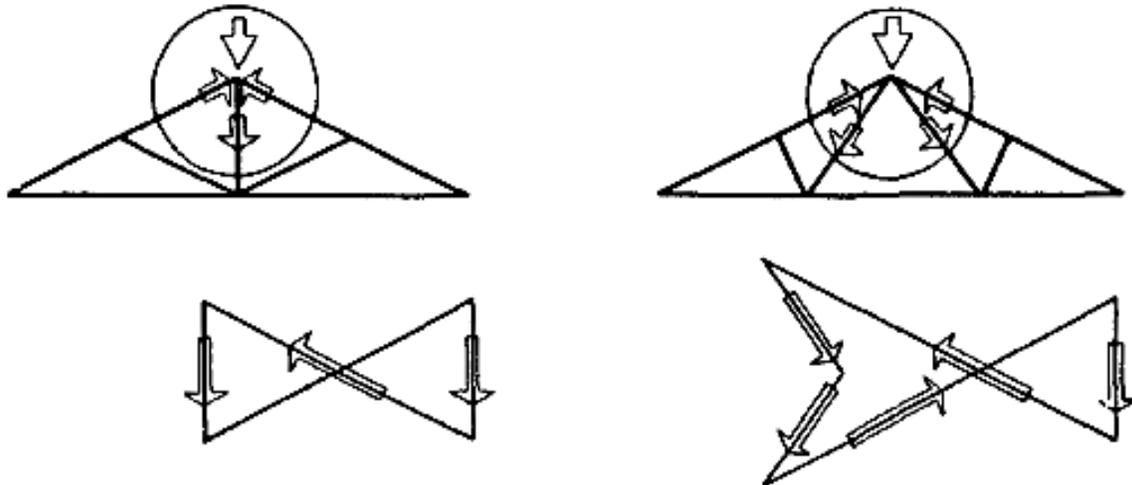


Imagen 38. Influencia de la distribución de las barras, en la distribución de tensiones en los nodos. Heino Engel. En comparativa, a pesar de la introducción de una barra adicional, las tensiones, aumentan en las barras del vértice por la disposición poco efectiva de los ángulos en las barras intermedias.

En el caso de las armaduras planas, la influencia de los perfiles, modifica notoriamente los esfuerzos de tensión en las barras; Heino Engel describe una manera sencilla para ver la efectividad de cada tipo de armadura: “Análogamente a la catenaria, la línea funicular dibuja el camino natural de las fuerzas de compresión hacia los apoyos dentro de una materia homogénea. Mediante la comparación el perfil de la cercha se pueden sacar conclusiones sobre los esfuerzos dentro de la cercha. La norma general es que cuanto mayor es la distancia de la materia estructural de la línea funicular, menos efectiva es la reconducción de los esfuerzos y la economía”, (Imagen 39).

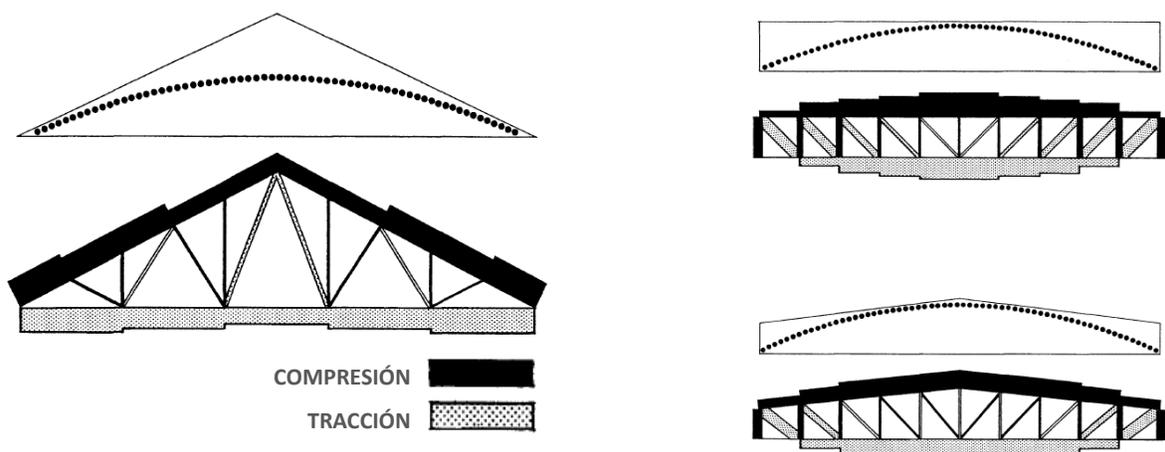


Imagen 39. Influencia del perfil de la cercha sobre los cordones y las barras. Cercha triangular, de cordones paralelos y trapezoidal. Heino Engel. Ejemplo en cercha triangular: El perfil de la cercha sólo se acerca a la línea funicular en los puntos de apoyo. Aquí se aprovecha la capacidad de los cordones en su totalidad, produciéndose los esfuerzos máximos. Concentración crítica en el área de los apoyos.

Las estructuras formadas por cerchas curvas como las geodésicas, tienen una derivación geométrica de figuras poliédricas, planteado desde hace décadas por teóricos como Buckminster Fuller y Mengeringhausen, donde la combinación de células geométricas sencillas son divididas y/o ensambladas de tal manera que formen una cúpula geodésica (Imagen 40); así mismo, retomando una cúpula geodésica, se forman reticulados modelo, que han sido los más utilizados debido a su fácil construcción y eficiencia estructural (Imagen 41).

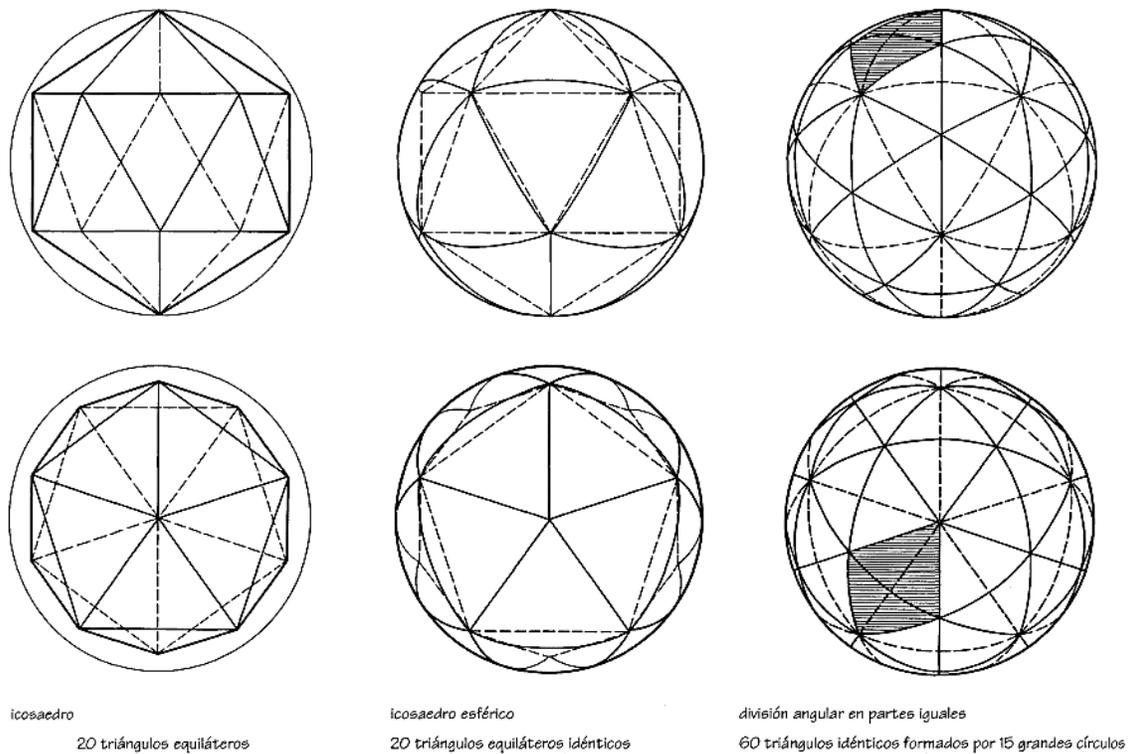


Imagen 40. División geométrica de la cúpula geodésica. Heino Engel. Composición de cúpulas por medio de la fragmentación de poliedros o formas geométricas: por icosaedro, icosaedro esférico y división angular en partes iguales (bisectriz).

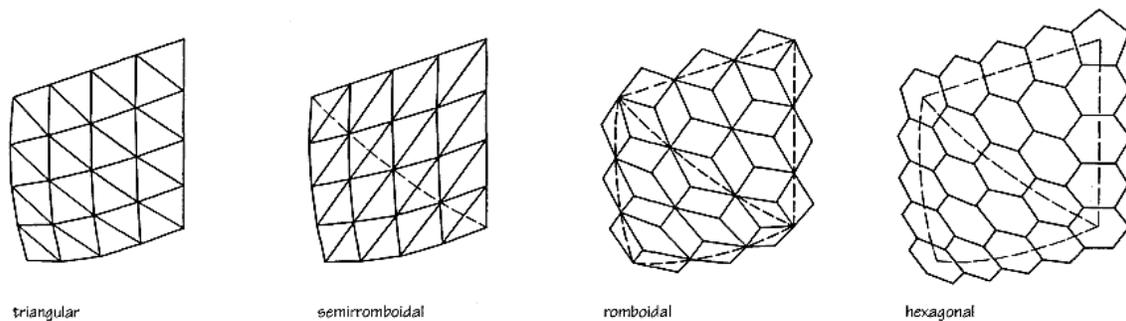


Imagen 41. Parte sustraída de una cúpula geodésica en la Fig. 77, siendo dos módulos triangulares equiláteros unidos. Malla modelo para cúpulas geodésicas, resultado de la composición y descomposición de poliedros y superficies geométricas, teniendo como ejemplo: triangular, semirromboidal, romboidal y hexagonal.

Los sistemas de vector activo aumentan su eficiencia, al descomponer la transmisión de fuerzas en estructuras espaciales tridimensionales o mallas espaciales, ya que permite la recepción de cargas en diversos componentes (barras), en tres direcciones; concediendo así a la estructura mayor liviandad y por lo tanto cubrir mayores superficies, (Imagen 42).

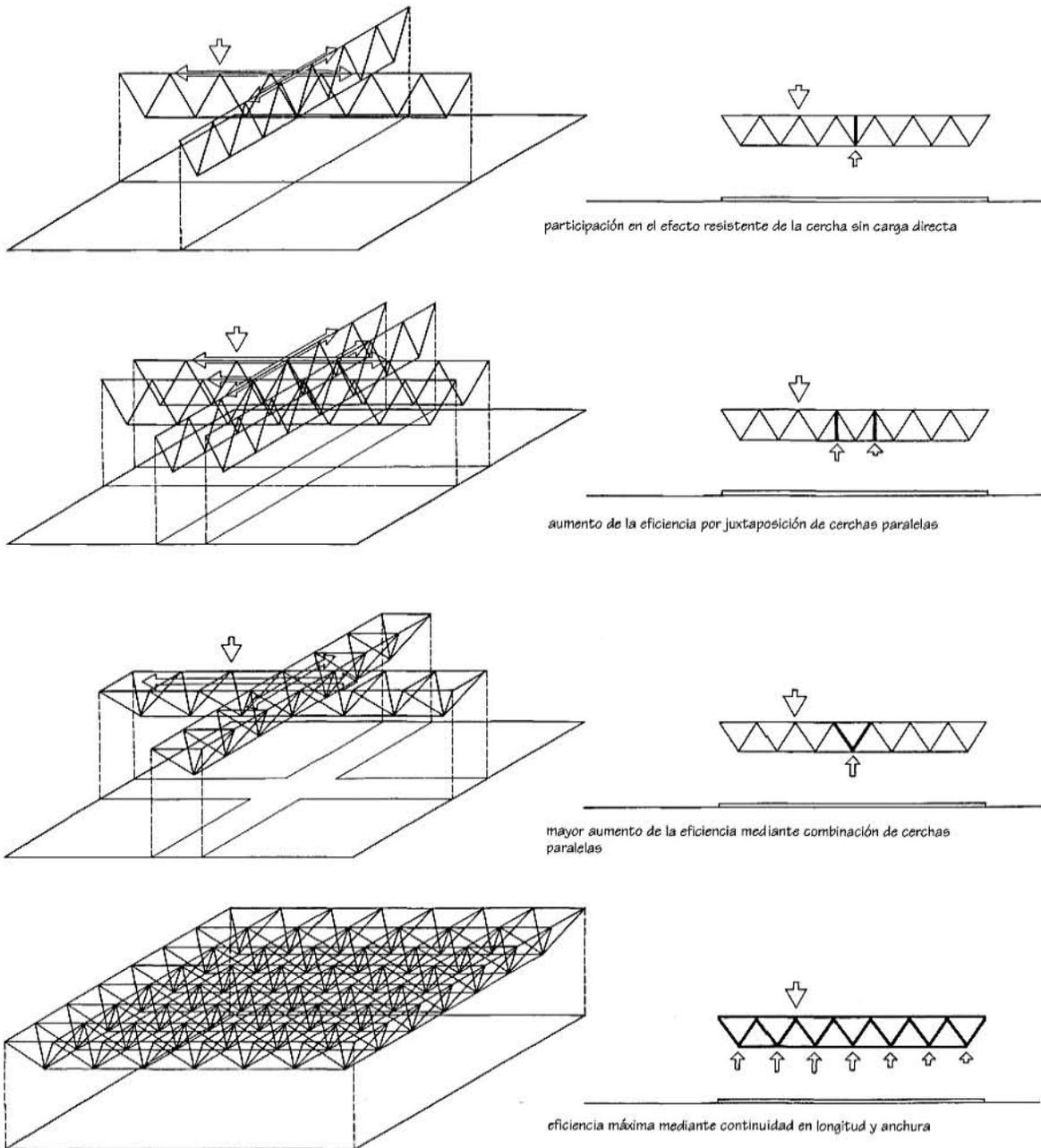


Imagen 42. Sistema de sustentación de una estructura espacial. En sistemas de vector activo, al convertir una armadura plana en una malla espacial, la eficiencia de distribución de cargas aumenta, ya que distribuye las fuerzas en más componentes y en tres dimensiones.

#### d) RETÍCULAS EN ARMADURAS ESPACIALES TRIDIMENSIONALES Y SISTEMAS ESTRUCTURALES DE NODOS

Una malla espacial se define como una retícula tridimensional, compuesta básicamente en tres partes: capa (malla o cordón) superior, capa (malla o cordón) inferior y el elemento que une a ambas, llamada diagonal (Chargoy, 2006, pág. 21), (Imagen 43).

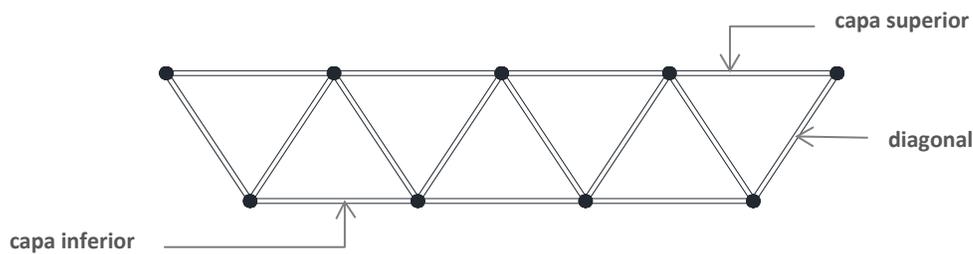


Imagen 43. Componentes de una armadura espacial tridimensional: capa superior, capa inferior y diagonal.

Según la disposición geométrica de los componentes de una malla espacial, se obtienen diferentes tipos de retículas, de esta geometría dependerá la distribución de fuerzas en el sistema; con la longitud y variedad de barras dependerá la estandarización y prefabricación de los elementos que a su vez influyen en la factibilidad económica del proyecto, la cantidad de barras conectadas a nodos es un factor importante que además del económico contribuye a la sencillez de ensamble de la estructura (Engel, 2001, págs. 156-162).

Los principales tipos de retículas son originadas en base a la geometría de prismas rectangulares y sus partes regulares y de la combinación de octaedros y semioctaedros con tetraedros, lo cual resulta en capas superiores e inferiores con retículas rectangulares, triangulares y hexagonales comúnmente. Hegel da una clasificación general de estas retículas en base a la combinación de los poliedros mencionados; para simplificar esta ordenación, he seleccionado y comparado sólo un tipo de arriostramiento (siendo los más utilizados por su sencillez y eficacia) en cada tipo de malla espacial, basándome en el método de análisis realizado por el Arq. Chargoy:

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas rectangulares, (Imagen 44). Están formadas por núcleos de prismas rectangulares, los cuales al no ser estables geoméricamente, se estabilizan por medio de diagonales.

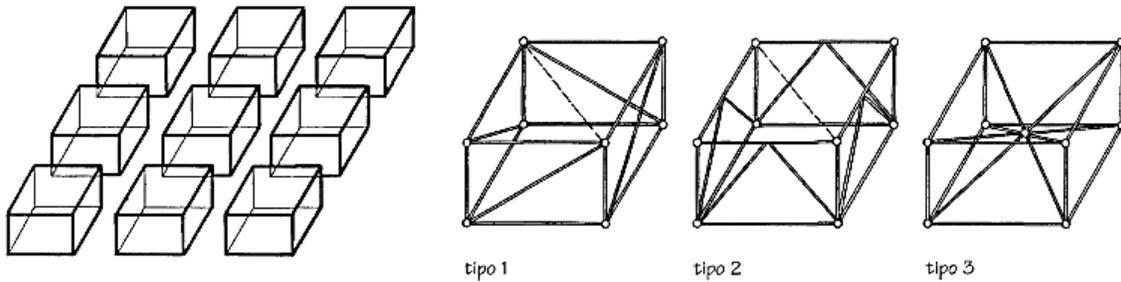


Imagen 44. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas rectangulares. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha, los tres distintos tipos de módulos de prismas rectangulares

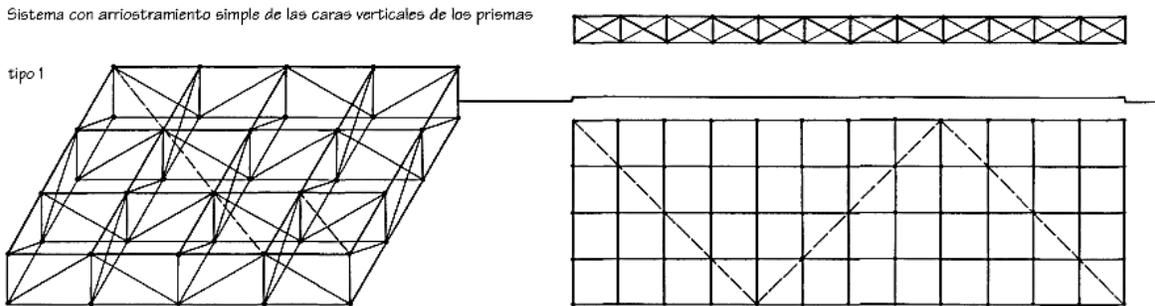


Imagen 45. Malla espacial coplanaria compuesta por prismas rectangulares, Tipo 1: Sistema con arriostramiento simple de las caras verticales de los prismas. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por prismas rectangulares. Ejemplo Tipo 1. (Imagen 45)
Poliedro	Prisma rectangular
Capa superior	Rectangular ( $a \times a$ )
Capa inferior	Rectangular ( $a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 6 (4 horizontal, 1 vertical, 1 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	3
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 20

Tabla 5. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por prismas rectangulares.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares, (Imagen 46).  
Retícula formada por prismas triangulares (comúnmente triángulos equiláteros),  
donde las bases forman las capas superior e inferior.

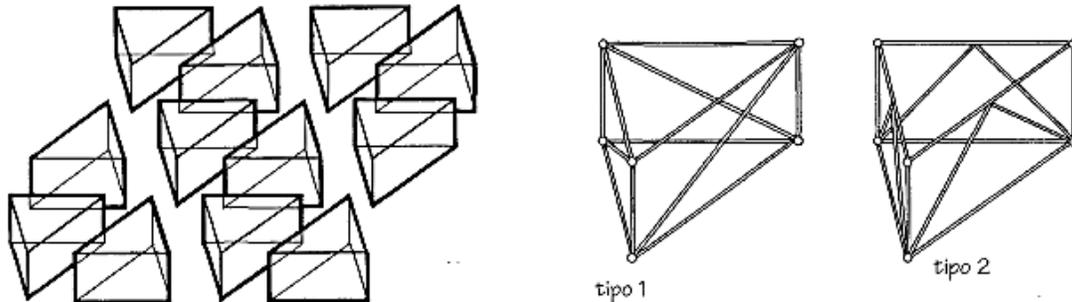


Imagen 46. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha, los dos distintos tipos de módulos de prismas triangulares.

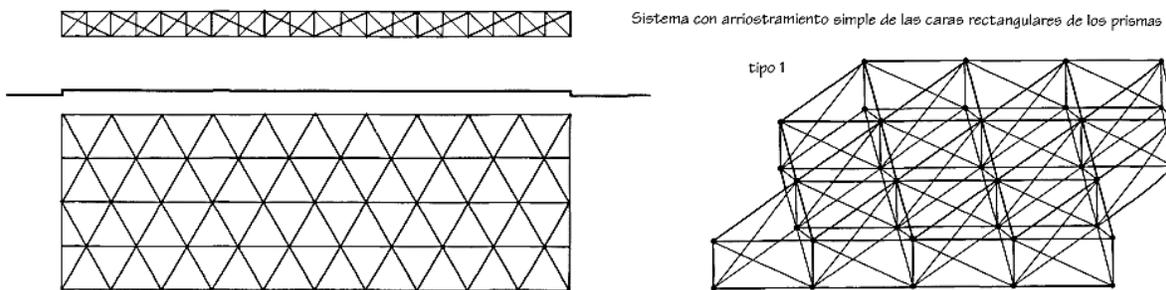


Imagen 47. Malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares, Tipo 1: Sistema con arriostramiento simple de las caras rectangulares de los prismas. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares. Ejemplo Tipo 1. (Imagen 47)
Poliedro	Prisma triangular
Capa superior	Triángulo ( $a \times a \times a$ )
Capa inferior	Triángulo ( $a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 7 (6 horizontal, 1 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	2
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 25

Tabla 6. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares.

- Cerchas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares, (Imagen 48).  
Compuesta por prismas triangulares, donde los rectángulos forman las capa superior e inferior.

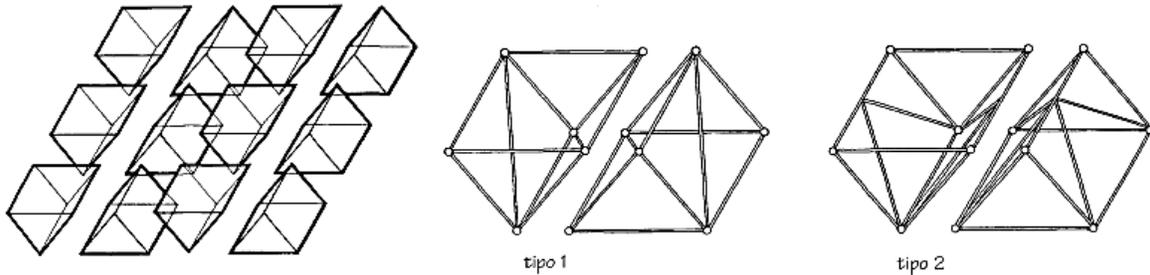


Imagen 48. Diagramas de las cerchas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha, los dos distintos tipos de módulos de prismas triangulares.

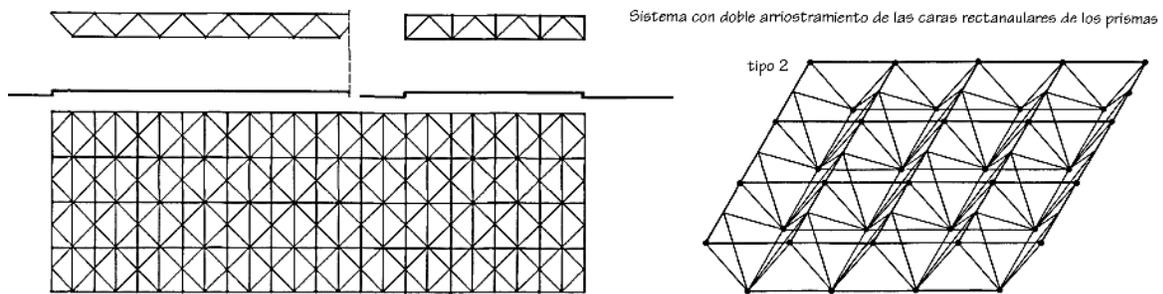


Imagen 49. Cercha espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares, Tipo 2: Sistema con doble arriostramiento de las caras rectangulares de los primas. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Cercha espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares. Ejemplo Tipo 2. (Imagen 49)
Poliedro	Prisma triangular
Capa superior	Rectángulo ( $a \times a$ )
Capa inferior	Rectángulo ( $a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 8 (4 horizontal, 4 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	5
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 25

Tabla 7. Características de una cercha espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y semioctaedros, (Imagen 50). Está compuesta por pirámides de base cuadrada y tetraedros; este sistema tiene la característica de que todas las barras poseen la misma longitud y gran facilidad para adaptarse a espacios rectangulares.

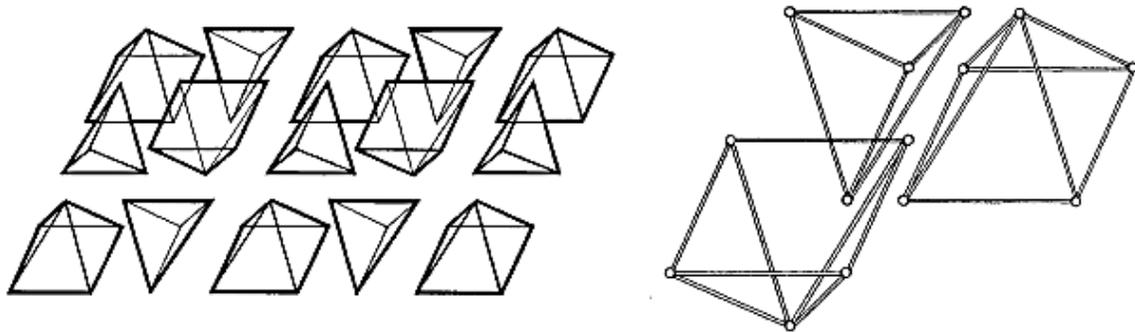


Imagen 50. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y semioctaedros. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha el tipo de módulo de tetraedros y semioctaedros.

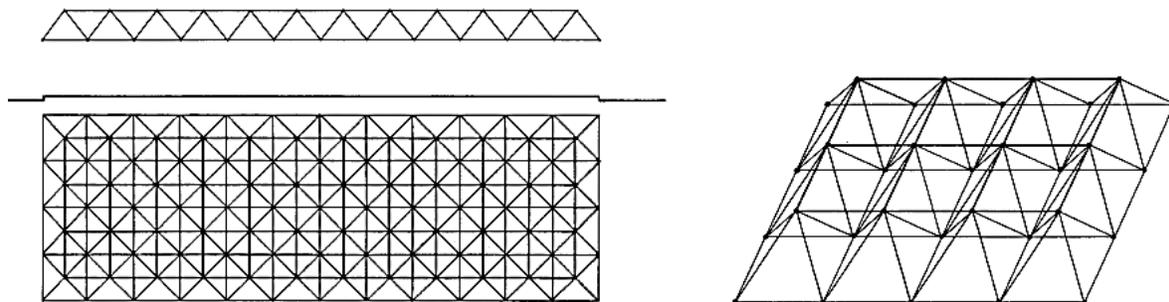


Imagen 51. Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y semioctaedros. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y semioctaedros. (Imagen 51)
Poliedro	Tetraedro y semioctaedro (pirámide cuadrangular)
Capa superior	Cuadrada ( $a \times a$ )
Capa inferior	Cuadrada ( $a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 8 (4 horizontal, 4 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	1
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

Tabla 8. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y semioctaedros.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y octaedros, (Imagen 53). Compuesto por tetraedros y octaedros, con barras de una sola longitud. Al estar compuesto en las tres dimensiones de manera triangular, se conforma como el sistema de mayor rigidez y capacidad estructural.

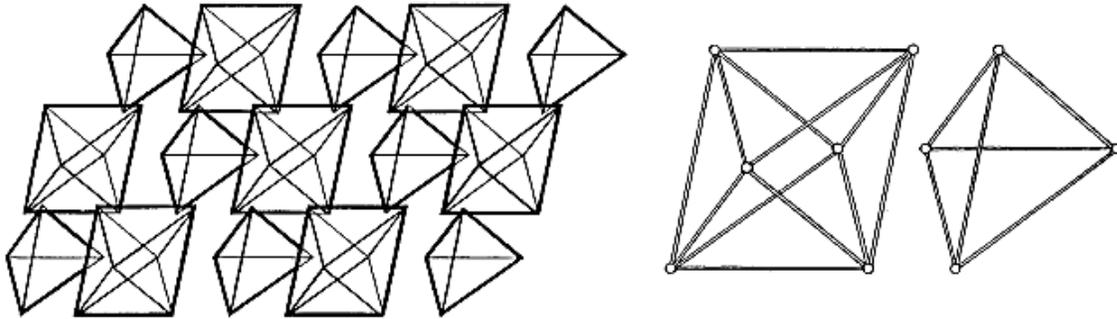


Imagen 52. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y octaedros. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha el tipo de módulo de tetraedros y octaedros.

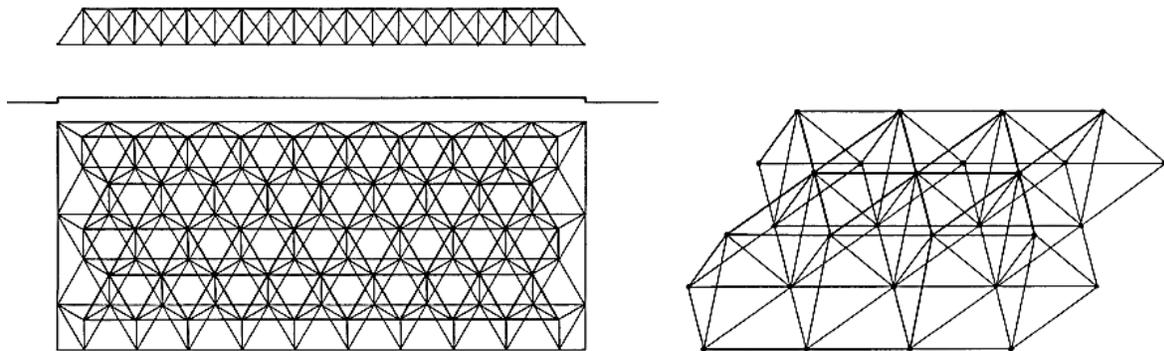


Imagen 53. Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros. (Imagen 53)
Poliedro	Tetraedro
Capa superior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Capa inferior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 9 (6 horizontal, 3 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	1
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 40

Tabla 9. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros.

- Mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal, (Imagen 54). Estructura compuesta por pirámides de base hexagonal, formada por barras de la misma longitud.

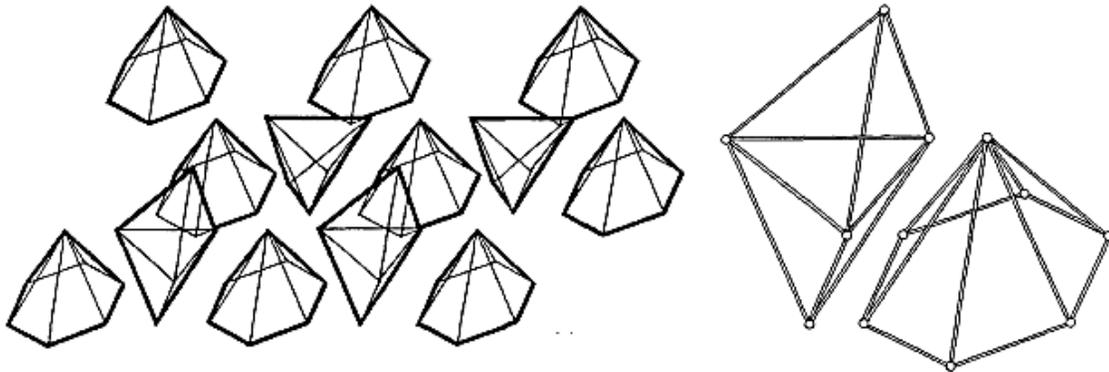


Imagen 54. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha el tipo de módulo con base de pirámide hexagonal.

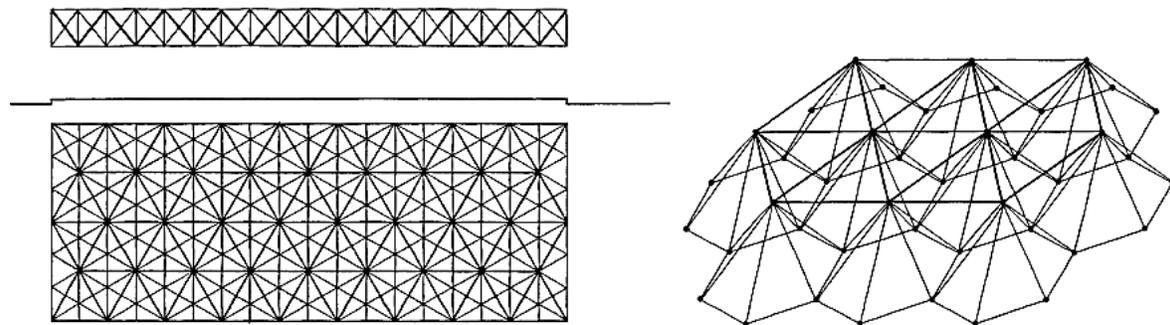


Imagen 55. Malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal (Imagen 55)
Poliedro	Pirámide hexagonal
Capa superior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Capa inferior	Hexágono ( $a \times a \times a \times a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 12 (6 horizontal, 6 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	1
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

Tabla 10. Características de una malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas con coordenadas diferentes, (Imagen 56). Compuesta por un poliedro de 10 caras y una pirámide cuadrangular invertida, posee dos longitudes de barras.

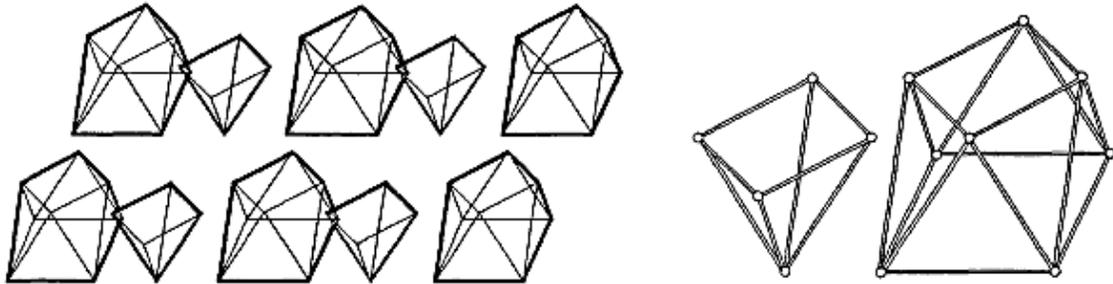


Imagen 56. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas con coordenadas diferentes. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha los módulos con base de pirámide cuadrangular invertida y un poliedro de 10 caras.

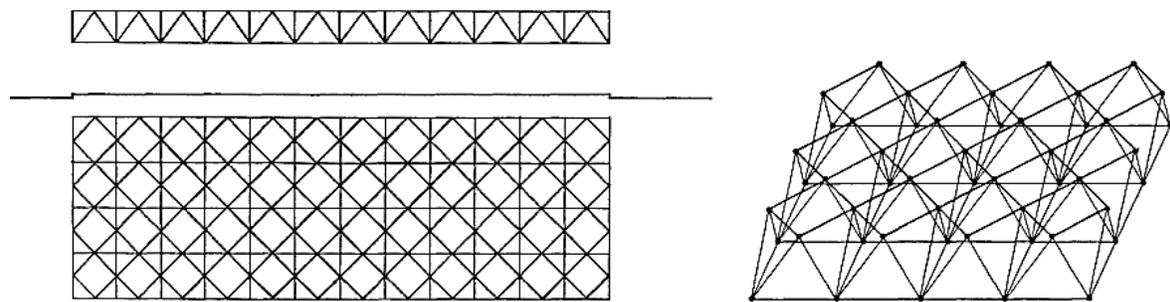


Imagen 57. Malla espacial coplanaria compuesta por retículas con coordenadas diferentes. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por retículas con coordenadas diferentes (Imagen 57)
Poliedro	Poliedro de 10 caras
Capa superior	Cuadrado ( $a \times a$ )
Capa inferior	Cuadrado ( $a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 6 (4 horizontal, 2 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	2
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 25

Tabla 11. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por retículas con coordenadas diferentes.

- Mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal invertida, (Imagen 58). Compuestas por pirámides hexagonales invertidas y octaedros; comúnmente posee una longitud de barra.

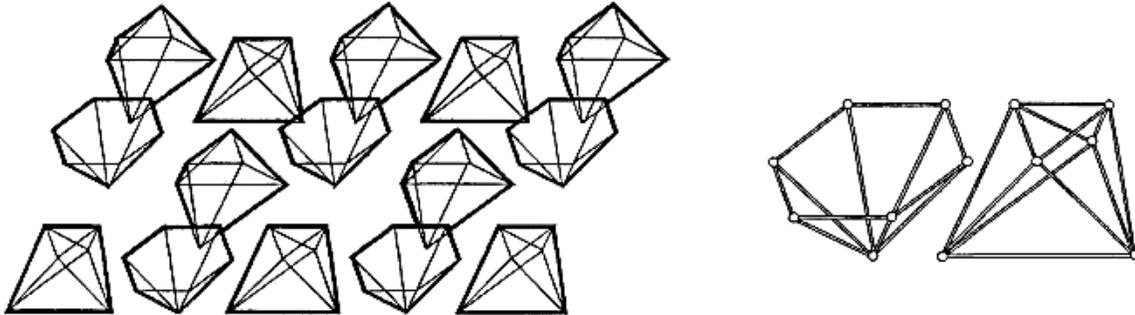


Imagen 58. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal invertida. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha los módulos de pirámide hexagonal invertida y el octaedro.

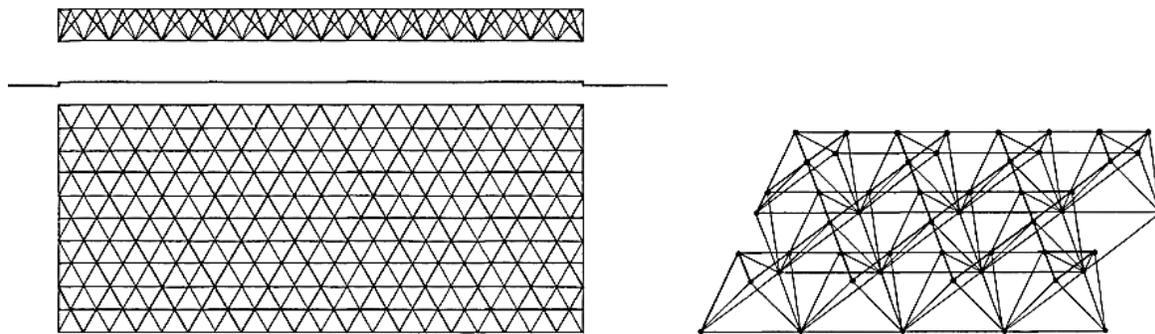


Imagen 59. Malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal invertida. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal invertida (Imagen 59)
Poliedro	Pirámide hexagonal invertida
Capa superior	Hexágono ( $a \times a \times a \times a \times a \times a$ )
Capa inferior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 12 (6 horizontal, 6 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	1
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

Tabla 12. Características de una malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal invertida.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas hexagonales diferentes, (Imagen 60). Estructura compuesta por una pirámide hexagonal y un poliedro irregular de base hexagonal.

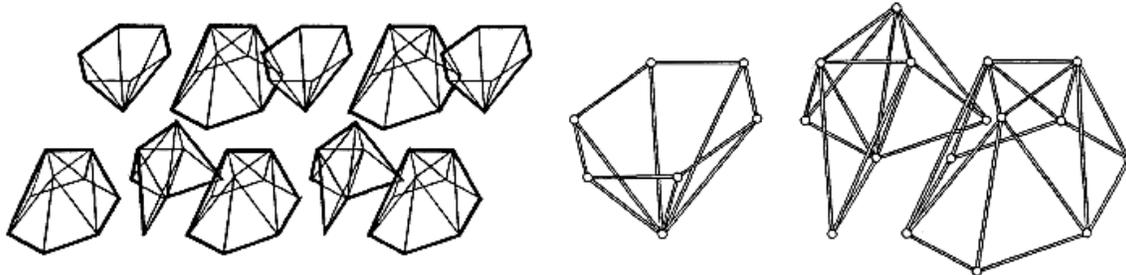


Imagen 60. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas hexagonales diferentes. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha los módulos de pirámide hexagonal y el poliedro irregular de base hexagonal.

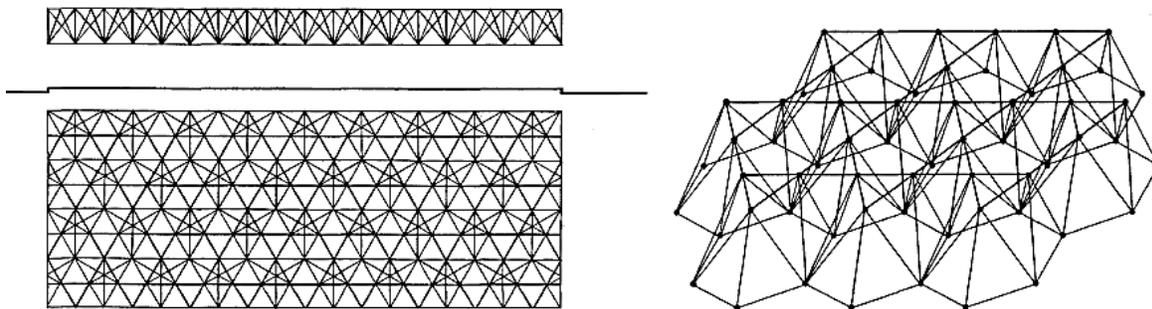


Imagen 61. Malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas hexagonales diferentes. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas hexagonales diferentes (Imagen 61)
Poliedro	Pirámide hexagonal
Capa superior	Hexágono ( $a \times a \times a \times a \times a \times a$ ) y triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Capa inferior	Hexágono ( $a \times a \times a \times a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 7 (4 horizontal, 3 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	3
Dirección de barras por capa	En tres direcciones

Tabla 13. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas hexagonales diferentes.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas triangulares contrapuestas, (Imagen 62). Compuestas por octaedros y tetraedros irregulares, con dos longitudes en sus barras.

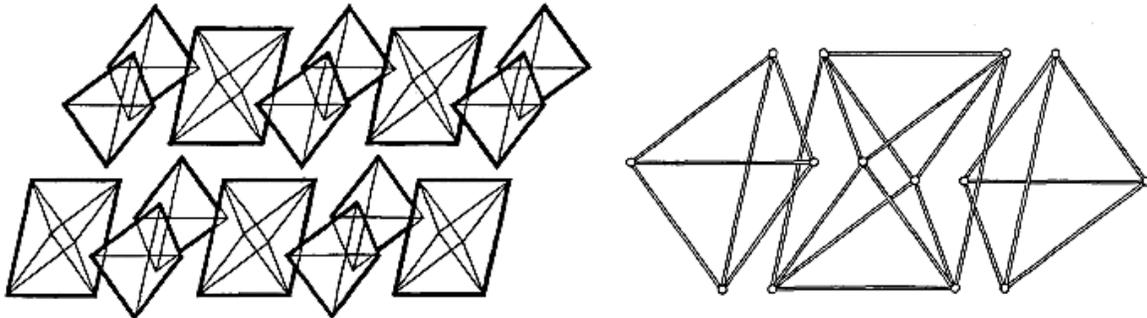


Imagen 62. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas triangulares contrapuestas. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha los módulos de tetraedros y octaedros.

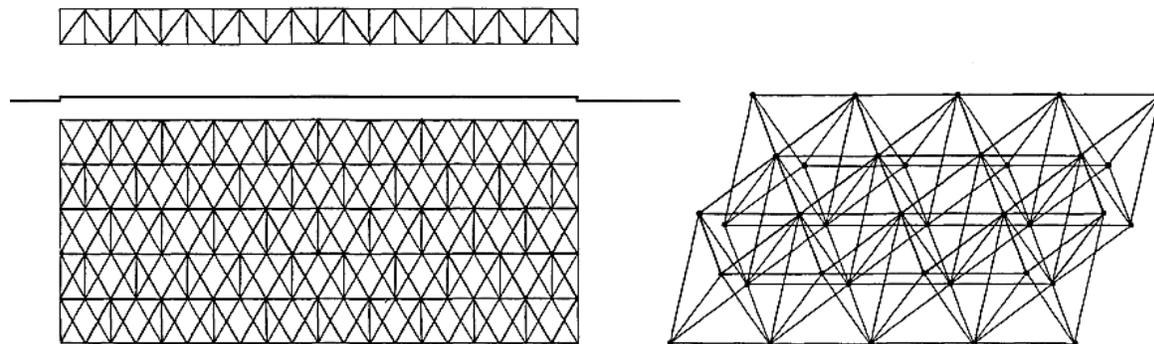


Imagen 63. Malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas triangulares contrapuestas. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas triangulares contrapuestas (Imagen 63)
Poliedro	Tetraedro y octaedro irregulares
Capa superior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Capa inferior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 9 (6 horizontal, 3 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	2
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 35

Tabla 14. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas triangulares contrapuestas.

- Mallas espaciales coplanarias compuestas por una retícula hexagonal y una triangular, respectivamente, (Imagen 64). Compuesta por poliedros irregulares de once caras y tetraedros irregulares; con dos longitudes de barras.

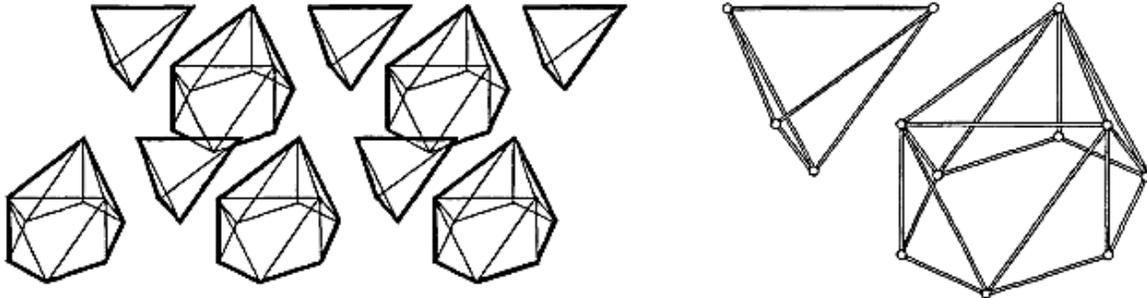


Imagen 64. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por una retícula hexagonal y una triangular. A la izquierda, el sistema de agregación de unidades. A la derecha los módulos de tetraedros y de poliedros irregulares de once caras.

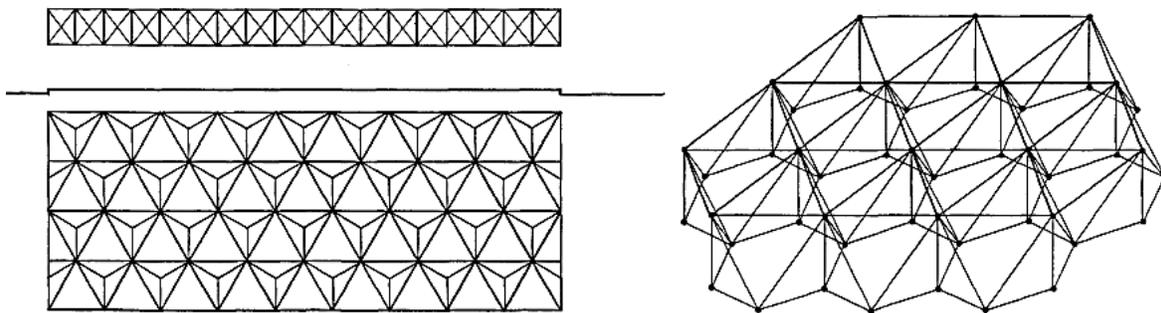


Imagen 65. Malla espacial coplanaria compuesta por una retícula hexagonal y una triangular. Planta, alzado e isométrico.

Reticulado	Malla espacial coplanaria compuesta por una retícula hexagonal y una triangular (Imagen 65)
Poliedro	Tetraedro y poliedro irregular de 11 caras
Capa superior	Triángulo equilátero ( $a \times a \times a$ )
Capa inferior	Hexágono regular ( $a \times a \times a \times a \times a \times a$ )
Número de barras por nodo	Total = 12 (6 horizontal, 6 diagonal)
Tipos de barras (en base a su longitud)	2
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

Tabla 15. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por una retícula hexagonal y una triangular.

Siguiendo con el análisis propuesto previamente, he realizado una tabla de los principales tipos de reticulado (interpretación del análisis realizado por el Arq. Chargoy), para su comparación y selección según las necesidades del proyecto a realizar, el criterio se basa en el análisis de:

- Mayor número de barras que convergen en un nodo.
- La cantidad de longitud de las barras.
- La resistencia a ser indeformables y a ser estables (según las formas geométricas logradas por las capas superior e inferior y la diagonal).
- Peralte máximo aproximado.

Las características ya mencionadas son las consideradas para determinar la factibilidad constructiva, economía y resistencia estructural (Chargoy, 2006, pág. 28). Los valores asignados a las características van de 1 a 3 puntos, de manera que los sistemas que obtengan mayor calificación, serán los más adecuados para el desarrollo del proyecto.

Tabla 16. Tabla comparativa de retículas para sistemas estructurales espaciales tridimensionales.

Tipo de malla	Figura geométrica que compone la capa		Mayor número de barras en un nodo		Cantidad de longitud de las barras			Indeformabilidad en sus capas y diagonales (según Chargoy)			Peralte		Total Valor
	Superior	Inferior	8 o más	7 o menos	3 o más	2	1	Superior	Inferior	Diagonal	Igual o menor de 1 / 30	Mayor de 1 / 30	
			1	2	1	2	3	1	1	1	1	2	Valor
Mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas rectangulares	Rectángulo	Rectángulo		2	1					1	1		5
Mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares	Triángulo	Triángulo		2		2		1	1			1	7
Cerchas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares	Rectángulo	Rectángulo	1		1			1		1		1	5
Mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y semioctaedros	Cuadrado	Cuadrado	1				3			1		1	6
Mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y octaedros	Triángulo	Triángulo	1				3	1	1	1		2	9
Mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal	Triángulo	Hexágono	1				3	1		1		1	7
Mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas con coordenadas diferentes	Cuadrado	Cuadrado		2		2				1		1	6
Mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal Invertida	Hexágono	Triángulo	1				3	1		1		1	7
Mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas hexagonales diferentes	Hexágono	Hexágono		2	1					1		1	5
Mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas triangulares contrapuestas	Triángulo	Triángulo	1			2		1	1	1		2	8
Mallas espaciales coplanarias compuestas por una retícula hexagonal y una triangular	Triángulo	Hexágono	1			2		1		1		1	6
Promedio por columna			0.70	0.80	0.30	0.80	1.20	0.70	0.30	1.00	0.90	0.40	7.10
Promedio por partida			1.50		2.30			2.00			1.30		7.10
Porcentaje de participación por columna			9.86%	11.27%	4.23%	11.27%	16.90%	9.86%	4.23%	14.08%	12.68%	5.63%	100%
Porcentaje de participación por partida			21.13%		32.39%			28.17%			18.31%		100%

Los resultados obtenidos en el análisis, mostraron que las mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros, con nueve puntos y las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas triangulares contrapuestas con ocho puntos, son las más eficaces si tomamos en cuenta, la facilidad constructiva, la economía, en base a número de piezas y forma de ensamble, y sobre todo la resistencia estructural y estabilidad que otorgan, lo que permite librar mayores claros, con una estructura más ligera y con un trabajo de fuerzas más eficaz.

Podemos observar que la cantidad de longitud de barras, fue el parámetro más sobresaliente (con 32%), ya que está enfocado principalmente a la estandarización de piezas y ahorro de tiempo de ensamble, traduciéndose como un factor económico importante; las estructuras que mejor lograron satisfacer este punto, fueron las mallas compuestas geoméricamente por triángulos y hexágonos, permitiendo el uso de una barra universal para todas las capas y diagonales.

El siguiente factor que fue analizado fue la rigidez que posee cada sistema estructural, en base a su composición geométrica tridimensional (28%); las estructuras originadas por poliedros de forma triangular, como el tetraedro y el octaedro, son aquellas que poseen mayor grado de resistencia a la indeformabilidad por fuerzas actuantes; de esto se obtuvo que las mallas compuestas por tetraedros y octaedros, y las mallas compuestas por retículas triangulares contrapuestas, poseen mayor rigidez e igualmente menor peralte, permitiendo mayor aprovechamiento del espacio y capacidad de proyectar claros de grandes dimensiones. Finalmente es importante mencionar, la mayor cantidad de barras que son unidas por un nodo, ya que este será el más sometido a grandes esfuerzos, aunado al número de barras que lo interceptan; recordando que entre mayor cantidad de barras se incrementará el peso de la estructura y habrá mayor dificultad de ensamble.

Para la selección del sistema adecuado, es primordial la selección del sistema de nodo; como hemos revisado, existen numerosos tipos de nodos en la actualidad, muchos de ellos variaciones o mejoras de los ya mencionados. Para esto, se analizará en una tabla comparativa, las características principales de los sistemas más sobresalientes, tomando como referencia los criterios del Arq. Chargoy (Chargoy, 2006, pág. 29):

- Tipo de unión entre nodo y barra.
- Grado de dificultad de ensamblaje.
- Peso del nodo.
- Costo de su fabricación.
- Herramienta necesaria para su colocación.
- Tipo de mano de obra requerida para su armado y colocación.
- Desmontaje y reutilización.
- Grado de complejidad y variedad de diseño.

Estas características son consideradas para determinar principalmente la factibilidad constructiva y económica que ofrece cada sistema. Los valores para calificar van de 1 a 4 puntos, de manera que aquellos sistemas que obtengan mayor calificación, serán los aptos para el desarrollo del proyecto.

Tabla 17. Tabla comparativa de sistemas de nodos para estructuras espaciales tridimensionales.

Sistema de nodos		Tipo de unión				Grado de dificultad de ensamblaje			Peso del nodo			Costo de fabricación			Herramienta necesaria		Mano de obra requerida		Desmontaje y reutilización			Grado y variedad de diseño			Total				
																										Nombre	Descripción	Soldadura	Atornillado
Makowski	Nodo laminado con forma de casquete		2				2				3	1					2				2			1					15
MERO	Nodo sólido macizo, compuesto por una esfera formada por octágonos con orificios		2				2					1				1		1					3				3	15	
Oktaplatte	Nodo hueco integrado por dos semiesferas unidas por una placa circular	1					1					2				1		1				2			2			11	
Pyramitec	Nodo formado por un cilindro	1					1					1				1		1			1				2			9	
Pletinas	Nodo tubular a base de placas dobladas, unidas a un tubo central de mayor diámetro	1					1					1				1		1			1			1				8	
Sarton	Nodo formado por tornillo central		2				1					3	1			1				2		2		1				13	
Tridimatec	Nodo tubular formado por dos tubos unidos en forma de cruz	1						2					2			1		1			2			1				11	
Triodetic	Nodo cilíndrico macizo, con ranuras en circunferencia				4			3	1				1			1		2		1			1					14	
Unistrut	Nodo laminado integrado por una placa doblada con orificios		2										3	2						2		2		1				15	
Promedio por columna		0,44	0,89	0,00	0,44	0,44	0,67	0,67	0,33	0,89	0,67	1,00	0,00	0,00	1,00	0,22	0,56	0,89	0,33	1,11	0,33	0,67	0,44	0,33				12,33	
Promedio por partida		1,78				1,78			1,89			1,00			1,22		1,44		1,78			1,44				12,33			
Porcentaje de participación por columna		3,60%	7,21%	0,00%	3,60%	3,60%	5,41%	5,41%	2,70%	7,21%	5,41%	8,11%	0,00%	0,00%	8,11%	1,80%	4,51%	7,21%	2,70%	9,01%	2,70%	5,41%	3,60%	2,70%				100%	
Porcentaje de participación por partida		14,42%				14,42%			15,32%			8,11%			9,91%		11,71%		14,42%			11,71%				100%			

Teniendo como mayor calificación posible 23, los sistemas que más se acercaron fueron el sistema de nodos del ingeniero Makowski, el reconocido nodo MERO y el popular sistema Unistrut, los tres con un total de 15 puntos, poseen características propias que los sobrepone a los demás. Los factores más importantes a tomar en cuenta para la selección de un sistema fueron el tipo de ensamble, costo de fabricación y sobre todo el grado de complejidad-variedad de diseño junto con la factibilidad de reutilización.

Para la selección particular de un nodo, debe observarse claramente la intención del proyecto a desarrollar, junto con el vínculo físico y estructural del tipo de retícula seleccionado; siguiendo los siguientes parámetros (Chargoy, 2006, págs. 34, 35):

- Costo de fabricación bajo.
- Tipo de unión atornillado o a presión.
- Peso ligero.
- Bajo grado de dificultad de ensamblaje.
- Herramienta y mano de obra simple.
- Gran variedad de diseño.
- Alto grado de reutilización.

Los tipos de apoyo para un sistema espacial tridimensional, son fundamentales para su realización, en este tipo de estructuras, la conexión a los apoyos siempre se realiza a través de los nodos, ya sean de la capa inferior, superior o uno intermedio en la diagonal, igualmente a la colocación de cargas. Los tipos de apoyos se clasifican en tres (Chargoy, 2006, págs. 34, 35):

Apoyos aislados:

- Cuatro puntos perimetrales
- Tres puntos perimetrales
- Dos puntos perimetrales
- Un punto central
- Tres o más puntos centrales
- Un punto central y otro perimetral, etc.

Apoyos continuos:

- Cuatro lados perimetralmente
- Dos lados opuestos perimetrales
- Dos lados continuos contiguos
- Un lado perimetral, etc.

Mixto (combinación de aislado y continuo):

- Un lado continuo y dos puntos perimetrales
- Un lado continuo y un punto perimetral
- Dos lados contiguos y un apoyo perimetral, etc.

Según las necesidades estructurales y formales del proyecto, se seleccionará los tipos de apoyo, en combinación con los sistemas estructurales de nodos y los tipos de retícula más eficaces.

En conclusión, resultado del análisis de los tipos de sistemas estructurales existentes y las necesidades del proyecto, “Cubierta del nuevo edificio – Unidad de Posgrado”, los sistemas propuestos son en:

- Tipo de retícula: **Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros** (sistema octa-tetra), la **malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas triangulares contrapuestas** o la **malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares**.

En base a la factibilidad constructiva del sistema (baja dificultad de ensamble, menor peralte facilitando claros mayores y menor peso), el aspecto económico (estandarización de barras, cantidad de elementos y tiempo de ensamble) y la rigidez geométrica estructural (seguridad, resistencia a esfuerzos y estabilidad).

- Sistema estructural del nodo: Primordialmente el **sistema MERO**, **sistema Unistrut** o **sistema Triodetic**.

En base al alto grado de reutilización y desmontabilidad, la gran variedad de diseño, el bajo grado de dificultad de ensamblaje, herramienta y mano de obra simple, el económico costo de fabricación y en particular, la compatibilidad con gran variedad de diseños y tipos de retículas.

#### **IV. ANÁLISIS DEL SISTEMA Y CONSTRUCCIONES ANÁLOGAS**

- a) Nodo esférico
- b) Retícula: malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros, sistema octa-tetra
- c) Diseño y precálculo estructural del sistema
- d) Construcciones análogas

## a) NODO ESFÉRICO

### SISTEMA KK – MERO



Imagen 66. Modelo tridimensional del sistema KK de MERO, se observan las nueve barras conectadas a los orificios del nodo esférico a través de tornillos fijados por tuercas.

El nodo de l sistema MERO, patentado por Mengerinhausen en 1942, se conoce como el primer sistema modular prefabricado para la construcción de e estructuras espaciales, compuestas básicamente por barras y nodos, y siendo montadas en el sitio con equipo simple. En la actualidad, MERO, establecida en Alemania, desarrolla gran variedad de sistemas para la creación de es tructuras espaciales con formas geométricas sencillas y complejas, además de muros acristalados de grandes dimensiones con tecnologías de ahor ro

energético como el aprovechamiento solar y la ventilación natural. Además, estas estructuras se caracterizan por ser extremadamente ligeras, comprendiendo una tercera o cuarta parte del peso de los sistemas tradicionales de concreto y acero; ofreciendo así ventajas en zonas sísmicas y terrenos inconsistentes donde la carga estructural es vital para el proyecto (MERO, 2014, párr. 1).

En el sistema KK, conocido como el nodo esférico de MERO, los materiales son galvanizados en caliente para evitar la oxidación y corrosión del metal, (Imágenes 66, 67). Estructuralmente el sistema trabaja únicamente con las cargas a los nodos, permitiendo a las barras la transmisión de esfuerzos de compresión y tracción (MERO, 2014, párr. 2). Un cambio importante desde su creación ha sido la actual posibilidad de colocar las conexiones para las barras a cualquier ángulo, manteniendo una distancia mínima entre ellas para su ensamble (anteriormente sólo era posible con los ángulos adquiridos de un rombicuboctaedro con 18 orificios a 45°, 60° y 90°).

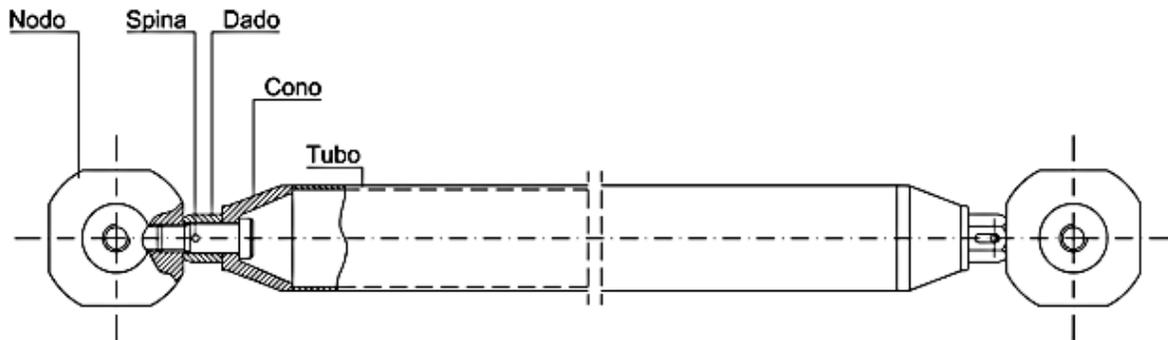


Imagen 67. Esquema de elementos que componen al sistema KK: nodo esférico, tubo metálico de acero, casquillo cónico, tuerca (dado) y el tornillo de conexión (spina).

Especificaciones técnicas (MERO, 2014, párr. 6)

- Tubos de acero de sección circular S235 – S355, con diámetros estándar desde 30 mm hasta 355 mm, de espesor variable según las necesidades específicas de cada elemento estructural.
- Nodos esféricos de acero C45 forjados en caliente, con diámetros estándar entre 49.5 mm y 350 mm.
- A los extremos de los tubos se sueldan conos, disminuyendo el diámetro de las conexiones, permitiendo así el uso de nodos más pequeños, (Imagen 68).
- El cono de la barra se conecta al nodo esférico a través de un perno de alta resistencia que transmite las fuerzas de tracción; las fuerzas de compresión son transmitidas por una tuerca hexagonal especial, que mediante una conexión transversal, permite una mejor sujeción del perno.
- El sistema KK permite la creación de una estructura para una, dos o tres capas de cualquier geometría, dimensión, posición y número de apoyos.



Imagen 68. Modelo tridimensional de la composición y ensamblaje de la barra del sistema KK de MERO.

## Tratamientos protectores

Todos los componentes son galvanizados en caliente a 450 °C a excepción de los nodos, sin orificios adicionales a los necesarios que puedan comprometer la estabilidad de la estructura. Los tubos y los conos de acero son galvanizados previamente para asegurar la continuidad de la capa protectora. En condiciones climáticas especiales o en necesidad de gran formalidad estética, se pueden recubrir los elementos con una capa adicional protectora de pintura en polvo llamada RAL standard o con colores seleccionados por el diseñador (MERO, 2014, párr. 11).

Para situaciones exigentes y numerosas, el sistema KK, los elementos pueden ser elaborados en aleaciones de aluminio o de acero inoxidable.

## Conexión con revestimientos

Las cargas resultantes de la cubierta o provocadas por elementos sujetos internamente, son siempre aplicadas a los nodos. En el caso de revestimientos textiles, estos son directamente unidos a los nodos mediante cáncamos (anillas) especiales. Si la cubierta es sólida o de vidrio es necesaria la colocación de un sistema secundario que permita la redistribución de las cargas a los nodos, a través de elementos de conexión llamados “separadores” (MERO, 2014, párr. 15).

Derivado de investigaciones al sistema KK de MERO, se han creado nuevas versiones del nodo esférico utilizadas por distintas compañías internacionales, como es el caso de la empresa española LANIK, con gran cobertura mundial y una sede establecida en México, la cual ha hecho modificaciones al enrosque de la tuerca y el tornillo; de esto obtenemos dos sistemas similares al nodo MERO: el sistema “Ortz” y el sistema “Seo”.

## SISTEMA "ORTZ" DE LANIK

Consiste en un sistema para la construcción de estructuras espaciales, constituido por nodos esféricos y barras. Al igual que MERO, el nodo consiste en una esfera con orificios roscados para la conexión de las barras, la disposición de ángulos posibles es total, quedando sólo limitada por el ángulo mínimo que deben mantener dos barras contiguas para evitar interferencias entre ellas.



Fotografía 39. Detalle del nodo del sistema Ortz de Lanik, se observa la conexión de las barras al nodo a través del tornillo con el doble cuerpo roscado (tuercas).

LANIK basó su sistema Ortz en la proporción más conveniente de los elementos de la estructura, el tornillo y la esfera. Tras varios ensayos prácticos y teóricos han definido una dimensión determinada de cada esfera para cada tornillo, logrando la mayor profundización de este y dando un ángulo mínimo de  $45^\circ$  para evitar interferencias entre tornillos y tuercas de las barras contiguas (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 2), (Fotografía 39).

Especificaciones (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 3)

- Las barras se componen por tubos de sección circular, conformados en frío con soldadura longitudinal, siendo de fácil soldabilidad.
- Los nodos se caracterizan por ser monopiezas sólidas esféricas, fabricadas en acero al carbono (Fotografía 40).

- Los casquillos cónicos obtenidos del forjado de acero soldable, son dotados de orificios axiales y soldados a los extremos de las barras; estos casquillos son atravesados por tornillos especiales, los cuales presentan dos cuerpos roscados (tuercas) con sentidos inversos de rosca, esto permite que con un solo sentido de accionamiento, se consigan dos aprietes, el de la esfera con el tornillo y el de éste con la barra; evitando así el afloje de la unión por futuras vibraciones (Fotografía 41).
- La retracción del tornillo hacia el interior de la barra, proporciona un ensamble y desensamble sencillo sin modificar la posición de los demás elementos; logrando un eficiente proceso de montaje y facilita la reposición de un elemento dañado.
- Tornillos obtenidos a partir de acero; templados con revenido alto para garantizar mayor tenacidad del material.



Fotografía 40. Proceso de fabricación del nodo esférico del sistema Ortiz de Lanik: elaboración de pieza esférica de acero al carbono, proceso de taladro de orificios, protección superficial (pintura).



Fotografía 41. Casquillos cónicos de las barras del sistema Ortiz de Lanik, se observa en uno de ellos, la sección interna del casquillo.

## SISTEMA "SEO" DE LANIK

Diseñado para la construcción de estructuras espaciales, consta de barras y nodos, unidos entre sí mediante tornillos de alta resistencia. Al igual que el sistema Ortiz, el nodo está constituido por una esfera metálica forjada, con orificios roscados dependiendo de la geometría designada por las barras de la malla espacial.

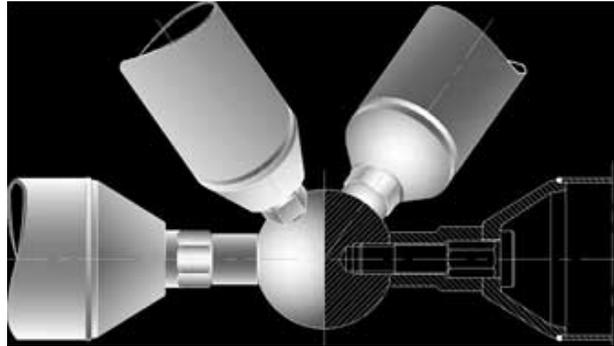


Imagen 69. Detalle del nodo del sistema Seo de Lanik, se observa la conexión interna del nodo con la barra, por medio del tornillo.

A las barras de acero estructural, son soldados dos elementos troncocónicos que alojan los tornillos; estos presentan un doble cuerpo: hexagonal y roscado (a diferencia del sistema Ortiz que presenta dos roscas). La parte roscada se atornilla en la esfera y la unión es realizada exteriormente mediante una llave. De esta manera se consigue un apriete en el nodo que garantiza no se afloje el extremo opuesto de la barra. Al igual que Ortiz, el tornillo puede retraerse hacia el interior de la barra, logrando un ensamble sencillo sin comprometer otro elemento (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 2), (Imagen 69).

Especificaciones (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 3)

- Las barras se componen por tubos de sección circular, conformados en frío con soldadura longitudinal, siendo de fácil soldabilidad.
- Los nodos se caracterizan por ser monopiezas sólidas esféricas, fabricadas en acero tipo C45E.
- Platillos cónicos obtenidos por la forja de acero soldable tipo C25E.
- Tornillos y casquillos de acero de alta resistencia; templados con revenido alto para garantizar mayor resistencia del material.

## Proceso de fabricación del sistema “Ortz” y el sistema “Seo”

El proceso de fabricación para los sistemas de LANIK, puede simplificarse en dos elementos, las barras y las esferas de los nodos (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 6):

- Fabricación de barras:
  - Mecanización de los platillos cónicos.
  - Montaje de los platillos a los extremos de la barra.
  - Corte del tubo según la longitud requerida.
  - Soldadura automática o semiautomática de los platillos a la barra.
  - Preparación de la superficie de los elementos y pintado con polimeración en horno.
  - Marcado, clasificación y preparación para envío a obra.
  
- Fabricación de esferas:
  - Mecanización: taladrado y roscado de los orificios con sistemas programables de CAD-CAM.
  - Preparación de superficie y pintado.
  - Marcado, clasificación y preparación para envío a obra.

## Protección superficial del sistema “Ortz” y el sistema “Seo”

LANIK ofrece diversas opciones de protección para las estructuras, siendo la más habitual para ambientes secos e interiores, la pintura a base de resinas polyester, aplicadas en polvo electrostáticamente y polimerizadas en horno con depósito de capa sólida no menor a las 60 micras; previo a realizar este procedimiento se prepara la superficie para el desengrase e incluso granallado por óxido (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 1).

En caso de estructuras al exterior y ambientes húmedos, se puede proceder a una protección previa de electrogalvanizado, que ofrece mayor resistencia. Si el ambiente es muy agresivo como el marino o en presencia de sustancias químicas, se puede proceder a la aplicación previa de sistemas alternativos como la metalización por proyección

térmica de zinc o el galvanizado en caliente por inmersión (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 2).

El procedimiento de lacado polyester consiste en:

- Preparación de superficie:
  - Desengrase ácido por aspersion.
  - Enjuague.
  - Fosfatado de hierro amorfo por aspersion.
  - Enjuague de hierro amorfo.
  - Pasivado crómico por aspersion.
  - Enjuague crómico por aspersion.
  - Lavado con agua desionizada por aspersion.
  - Secado al aire a 100 °C.
  
- Pintura:
  - Pintado con polvo polyester electroestático con un espesor mínimo de 70 micras.
  
- Polimerizado:
  - Colocación de elementos en horno a 210 °C durante 20 minutos.

Como resultado se obtiene una superficie de gran resistencia al rayado y a los golpes, con aspecto lacado. En el caso de las esferas el procedimiento es similar, a excepción de esferas de grandes dimensiones, donde el proceso de pintura es manual, con una capa de imprimación y dos de acabo con pinturas al clorocaucho o ep óxicas (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 2).

## b) RETÍCULA: MALLA ESPACIAL COPLANARIA COMPUESTA POR TETRAEDROS Y OCTAEDROS, SISTEMA OCTA-TETRA

La resistencia a los esfuerzos compresión-tracción y la capacidad de carga de una estructura espacial tridimensional, va en función de la indeformabilidad y transmisión de fuerzas de su forma geométrica (Chargoy, 2006, pág. 36). En la primera mitad del siglo XX, tanto Fuller por métodos prácticos, como Mengerinhausen por métodos analíticos, determinaron que la figura geométrica más estable es el tetraedro, la cual conformaba la unidad básica molecular de todo elemento; además de establecer que todo volumen realiza la transmisión de fuerzas por combinaciones triangulares. De esta manera se propone junto con el análisis previamente realizado (tabla comparativa de retículas para sistemas estructuras espaciales tridimensionales), que la retícula más adecuada para el proyecto se basa en el sistema Octa-tetra, dado la estabilidad y resistencia derivada de los poliedros: el tetraedro y el octaedro.

Este análisis se basa en la geometría compuesta por el tetraedro y el octaedro aplicada a la estructura tridimensional, para determinar un proceso de diseño, las dimensiones y proporción de sus elementos, y el acoplamiento de los núcleos tetraédricos para la creación de un sistema colectivo.

El triángulo equilátero conforma la base geométrica de la retícula espacial octa-tetra, siendo un polígono regular de tres lados iguales (barras) y tres vértices (nodos), cuya superficie es indeformable (Imagen 70). Es el más estable de los triángulos debido a que las alturas, medianas, mediatrices y bisectrices coinciden en la misma posición, y la intersección de estas: ortocentro (alturas), baricentro (medianas), circuncentro (mediatrices) e incentro (bisectrices) se ubican en el mismo punto, el centro de gravedad.

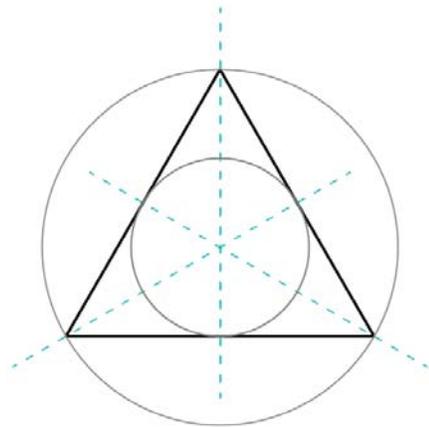


Imagen 70. Triángulo equilátero. Polígono regular compuesto por tres vértices y tres aristas, su ortocentro, baricentro, circuncentro e incentro se ubica en el mismo punto.

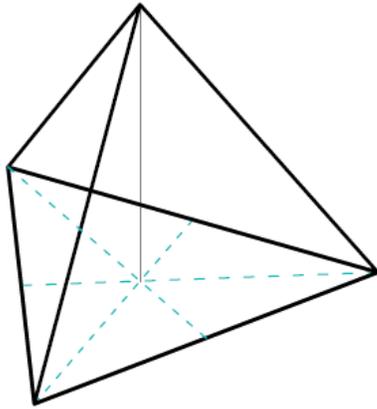


Imagen 71. Tetraedro regular. Polígono formado por la unión de cuatro triángulos equiláteros. Se considera como el sólido más simple con mayor estabilidad.

La unión de cuatro triángulos equiláteros por sus aristas conforma un tetraedro, polígono regular de cuatro caras; compuesto por seis aristas y cuatro vértices, formando ángulos diedros de  $70^{\circ} 32'$ , (Imagen 71). El tetraedro se posiciona como el sólido más simple con mayor estabilidad, rigidez e indeformable por excelencia. A su vez, la unión de tres tetraedros forma el segundo volumen más estable, el octaedro, poliedro regular de ocho caras, de doce aristas y seis vértices, (Imagen 72).

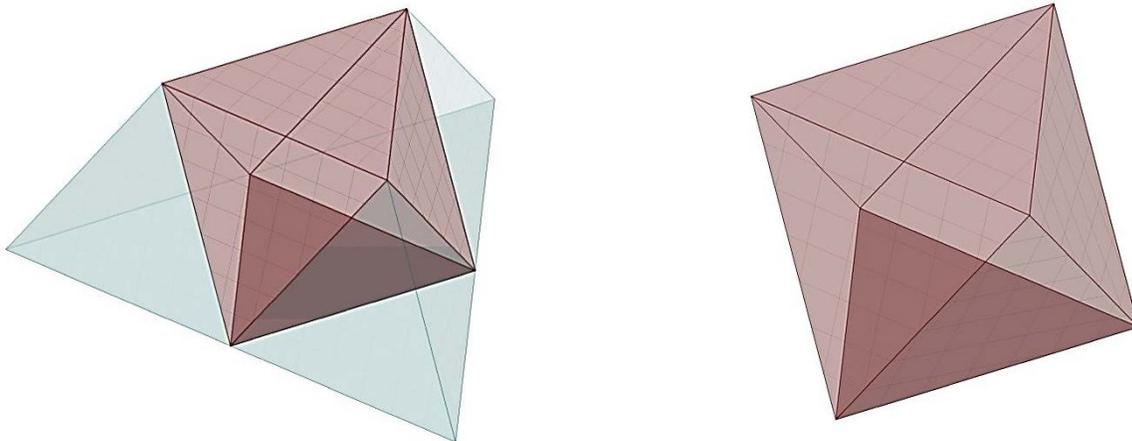


Imagen 72. Unión de tres tetraedros regulares por sus vértices sobre un plano, el espacio resultante forma un octaedro.

La retícula se origina a partir de la formación de núcleos tetraédricos articulados por sus vértices sobre un plano, cuyo resultado es la creación de una malla espacial de doble capa con cuerdas inferiores, cuerdas superiores y diagonales; que dan por resultado concavidades, que al completarlas uniendo los vértices superiores constituyen los volúmenes octaédricos. La construcción de retícula se puede observar fácilmente a través de la alineación de los elementos en planta, ordenándose en los ejes "x" y "y", (Fig. 117, 118, 119):

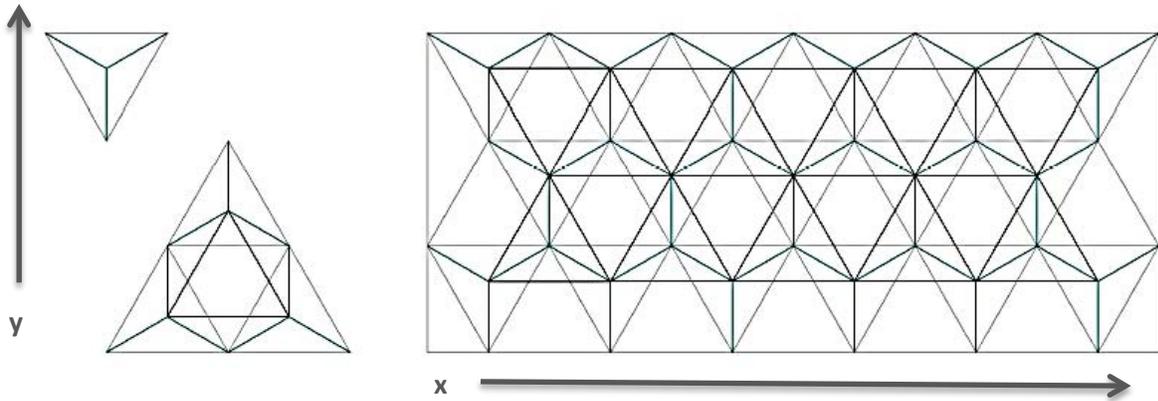


Imagen 73. Retícula formada por la unión de células tetraédricas en los ejes x, y. Se observa de izquierda a derecha: tetraedro regular, la unión de tres tetraedros resultando un octaedro, la formación de una retícula de doble capa por células tetraédricas, vista en planta.

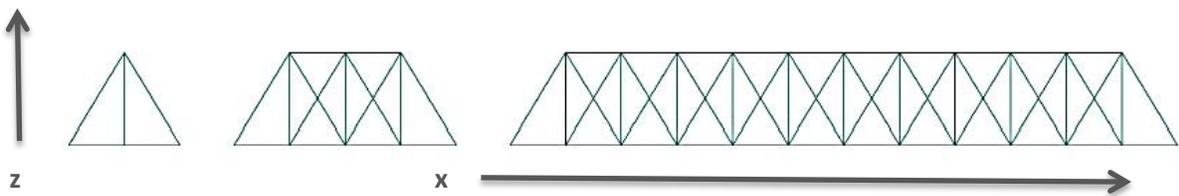


Imagen 74. Retícula formada por la unión de células tetraédricas en los ejes x, z. Se observa de izquierda a derecha: tetraedro regular, la unión de tres tetraedros resultando un octaedro, la formación de una retícula de doble capa por células tetraédricas, vista en alzado (eje x).

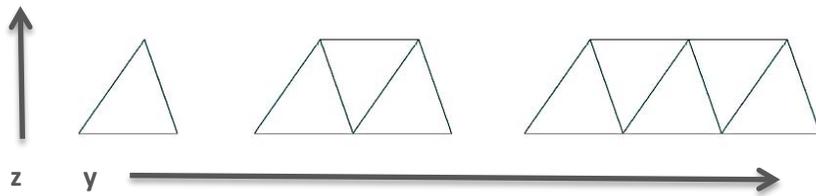


Imagen 75. Retícula formada por la unión de células tetraédricas en los ejes y, z. Se observa de izquierda a derecha: tetraedro regular, la unión de tres tetraedros resultando un octaedro, la formación de una retícula de doble capa por células tetraédricas, vista en alzado (eje y).

## c) DISEÑO Y PRECÁLCULO ESTRUCTURAL DEL SISTEMA

### NORMATIVA

El diseño de la estructura sigue las especificaciones generales para acero establecidas en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras metálicas.

En base al Artículo 174 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, la estructura se clasifica de Tipo A, para la seguridad del proyecto ubicado en zona escolar (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2004, pág. 49). Así mismo, la estructura se especifica de tipo 2 (Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras metálicas, 2015, pág. 14), siendo estructuras metálicas formadas por miembros unidos entre sí por medio de conexiones que permiten rotaciones relativas, y que son capaces de transmitir la totalidad de las fuerzas normales y cortantes.

Para determinar las dimensiones de la retícula, se distinguen dos elementos básicos: las barras y los nodos, (Fig. 120); los cuales deber mantener una proporción entre sí para el mejor funcionamiento estructural del sistema (distribución de fuerzas), economizar material y obtener alta resistencia de los elementos.

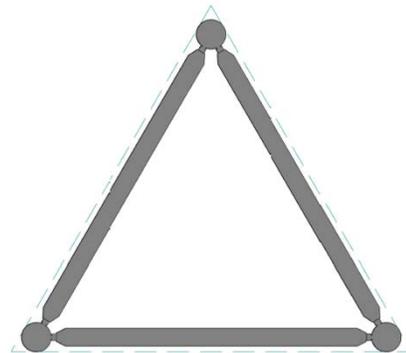


Imagen 76. Diseño geométrico de una célula estructural compuesta por barras y nodos, generada por un triángulo equilátero.

### BARRAS

En base al sistema Ortz de Lanik, las barras se componen de cuatro elementos:

- Tubos de sección circular, acabado en frío.
- Casquillos cónicos forjados de acero soldable.
- Tornillos de acero templado con revenido alto.
- Dos tuercas de acero inoxidable.

Las dimensiones y peso de los casquillos cónicos, tornillos y tuercas dependen directamente del tipo de tubo seleccionado (en base a la norma H-124 (ASTM A325), tornillos de alta resistencia para conexiones entre elementos de acero estructural), (Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras metálicas, 2015, pág. 13) y son creados de manera estándar según el diseño patentado del sistema Ortiz, por lo que es necesario realizar un breve cálculo de las medidas de los tubos para establecer la proporción y peso de un núcleo tetraédrico de la retícula octa-tetra.

La Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO) da a conocer en su catálogo de fabricación de tubería, las compañías productoras de acero en el país, entre ellas, Ternium de México, la cual ofrece un amplio inventario de tubería soldada a partir de lámina rolada en caliente o frío, como tubería estructural de diversas dimensiones, que ofrecen las especificaciones técnicas necesarias para el cálculo planteado.

Tubo acabado en frío

Con la información obtenida por el catálogo de tubería en frío de Ternium de México (según la norma NOM-B-252 (ASTM A366)), se procede a realizar el cálculo de la barra para determinar la longitud máxima permisible y la carga máxima admisible a compresión (Tabla 18).

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL TUBO ACABADO EN FRÍO (Ternium México, 2009, pág. 6)		
DIÁMETRO NOMINAL	½"	
DIÁMETRO EXTERIOR	0.840 in	21.3 mm
ESPESOR	0.060 in	1.5 mm
MASA LINEAL	0.732 kg/m	
ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	0.933 cm <sup>2</sup>	
MOMENTO DE INERCIA	0.46 cm <sup>4</sup>	
RADIO DE GIRO	0.702 cm	

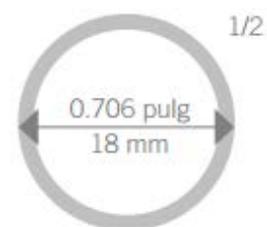


Tabla 18. Características estructurales del tubo de acero estructural, acabado en frío (Ternium).

### Cálculo de longitud máxima permisible

$l$  (longitud de barra)

$k$  (factor de arriostamiento) = 1 (se presenta traslación restringida)

$R$  (radio de giro) = 0.702 cm

$$\frac{l \times k}{R} = 120$$

$$l \text{ (longitud de barra)} = \frac{120 \times R}{k} = 120$$

$$l \text{ (longitud de barra)} = \frac{120 \times (0.702 \text{ cm})}{1} = 120$$

$$l \text{ (longitud máxima permisible de barra)} = \frac{120 \times 0.702 \text{ cm}}{1} = 84.24 \text{ cm}$$

### Cálculo de carga máxima admisible a compresión

Para obtener la carga máxima admisible a compresión es necesario obtener los datos del coeficiente de esbeltez (obteniendo como máximo una relación de esbeltez  $K L/r$  de 200 en miembros de compresión) y el esfuerzo admisible a compresión (Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras metálicas, 2015, pág. 19):

Coeficiente de esbeltez

$C_c$  (coeficiente de esbeltez)

$E$  (módulo de elasticidad del material) = 2100000 kg/cm<sup>2</sup>

$F_y$  (valor de esfuerzo de fluencia) = 2530 kg/cm<sup>2</sup>

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

$$Cc = \sqrt{\frac{(19.74 \times 2100000 \text{ kg/cm}^2)}{2530 \text{ kg/cm}^2}}$$

$$Cc \text{ (coeficiente de esbeltez)} = 128$$

Esfuerzo admisible a compresión

Fa (esfuerzo admisible a compresión)

l (longitud de barra) = 75.5 cm (por proyecto arquitectónico, máx. 84.24 cm)

k (factor de arriostramiento) = 1 (se presenta traslación restringida)

R (radio de giro) = 0.702 cm

Cc (coeficiente de esbeltez) = 128

F<sub>γ</sub> (valor de esfuerzo de fluencia) = 2530 kg/cm<sup>2</sup>

$$Fa = \frac{[1 - (\frac{l}{2Cc})^2]F_{\gamma}}{\frac{5}{3} + \frac{3lk}{8Cc} - (\frac{l}{8Cc})^3}$$

$$Fa = \frac{[1 - 0.176]2530 \text{ kg/cm}^2}{1.667 + \frac{322.64}{1024} - 0.001158}$$

$$Fa = \frac{2084.72 \text{ kg/cm}^2}{1.98}$$

$$Fa \text{ (esfuerzo admisible a compresión)} = \frac{2084.72 \text{ kg/cm}^2}{1.98} = 1052.88 \text{ kg/cm}^2$$

Carga máxima admisible a compresión ( $a$ )

$$a = Fa \text{ (área de la sección transversal)}$$

$$a = 1052.88 \text{ kg/cm}^2 (0.933 \text{ cm}^2)$$

$$a = 982.34 \text{ kg}$$

En conclusión, según las propiedades del tubo metálico de ½ pulgada de acabado en frío, se puede utilizar como elemento estructural con dimensiones de hasta 84.24 cm; para el proyecto planteado de la cubierta se seleccionó por cuestiones funcionales, una dimensión máxima de la barra de 75.5 cm, la cual permite una carga máxima admisible a compresión de 982.34 kg.

## NODOS

Los nodos son producidos a partir de monopiezas sólidas, de acero al carbono F-1140, incrementando con este proceso la resistencia del elemento a los esfuerzos de tracción. El nodo se caracteriza por tener forma esférica, con cuerpos roscados a los que se introducen los casquillos cónicos con tornillos que permiten su unión con las barras, la posición de estos orificios se designan según el diseño geométrico estructural de la retícula espacial. Las dimensiones y resistencia del nodo son designadas por el cálculo de la carga admisible a compresión de la barra, de esta manera, por el sistema Ortz, Lanik ofrece una relación del área de la sección de la barra con el diámetro del nodo, estableciendo medidas estándar de 49.5 mm a 350 mm aproximadamente (Estructuras espaciales Lanik, 2014, párr. 1), (Imagen 77).

Relación del diámetro del nodo con la sección de la barra:

1 : 1 (mín. - por orificios para enrosque del tornillo) a 1 : 2.5 (máx. – por eficiencia y peso de la estructura)

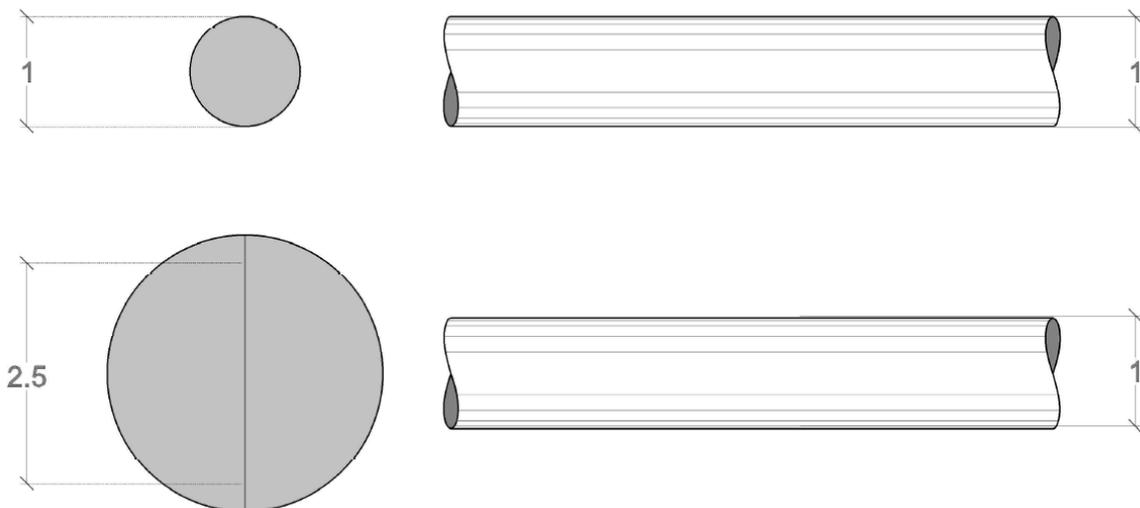
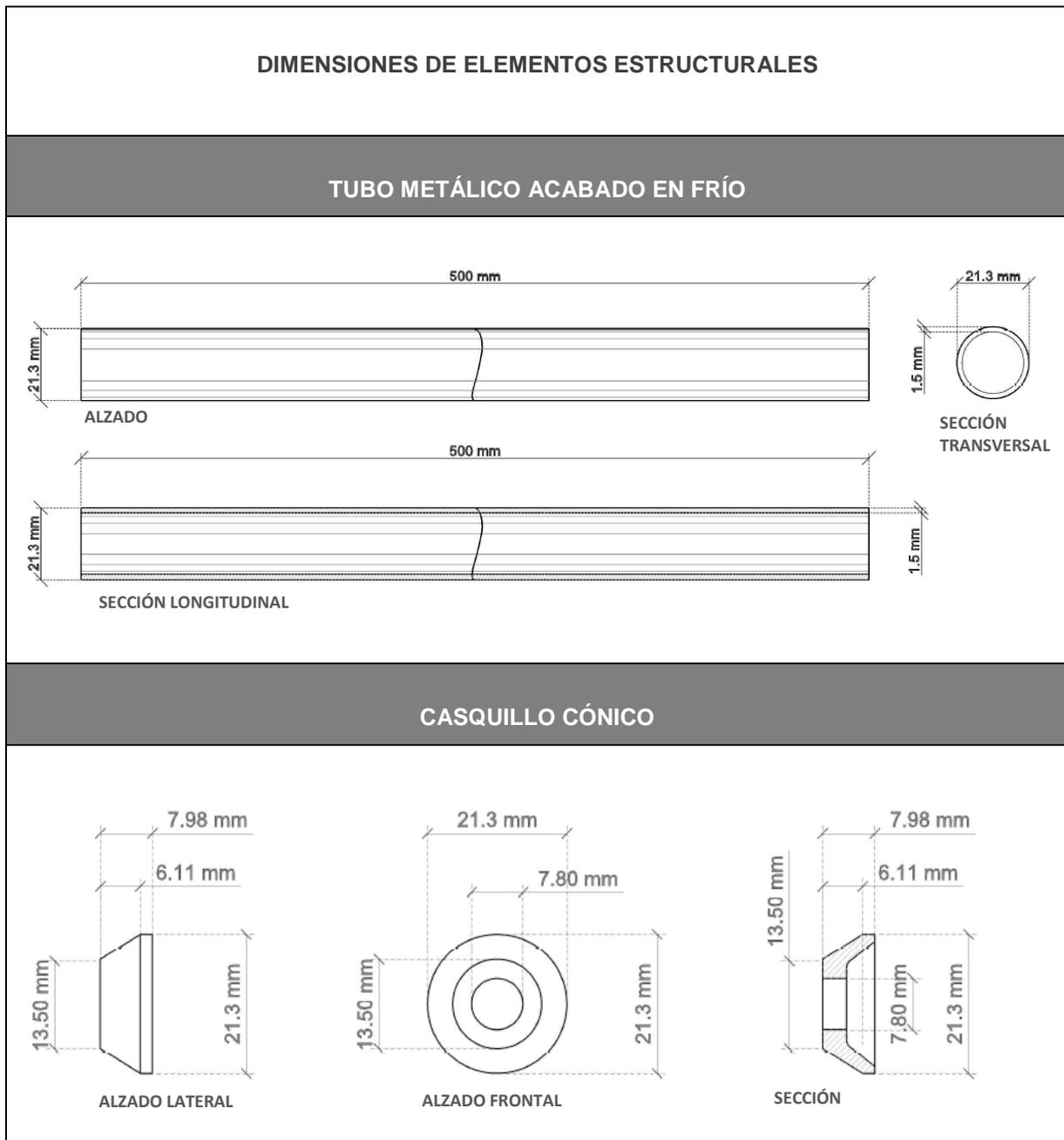


Imagen 77. Relación de proporción de dimensiones del nodo esférico con la barra del sistema Ortz de Lanik.

## DIMENSIÓN GEOMÉTRICA Y PESO DEL NÚCLEO TETRAÉDRICO EN BASE AL SISTEMA ORTZ

Seleccionando las medidas de la barra, y el nodo esférico, se procede a dimensionar el núcleo tetraédrico para conocer el espacio que comprende y su peso aproximado (Tablas 19, 20), (Imágenes 78- 81).

Dimensiones de elementos del núcleo tetraédrico



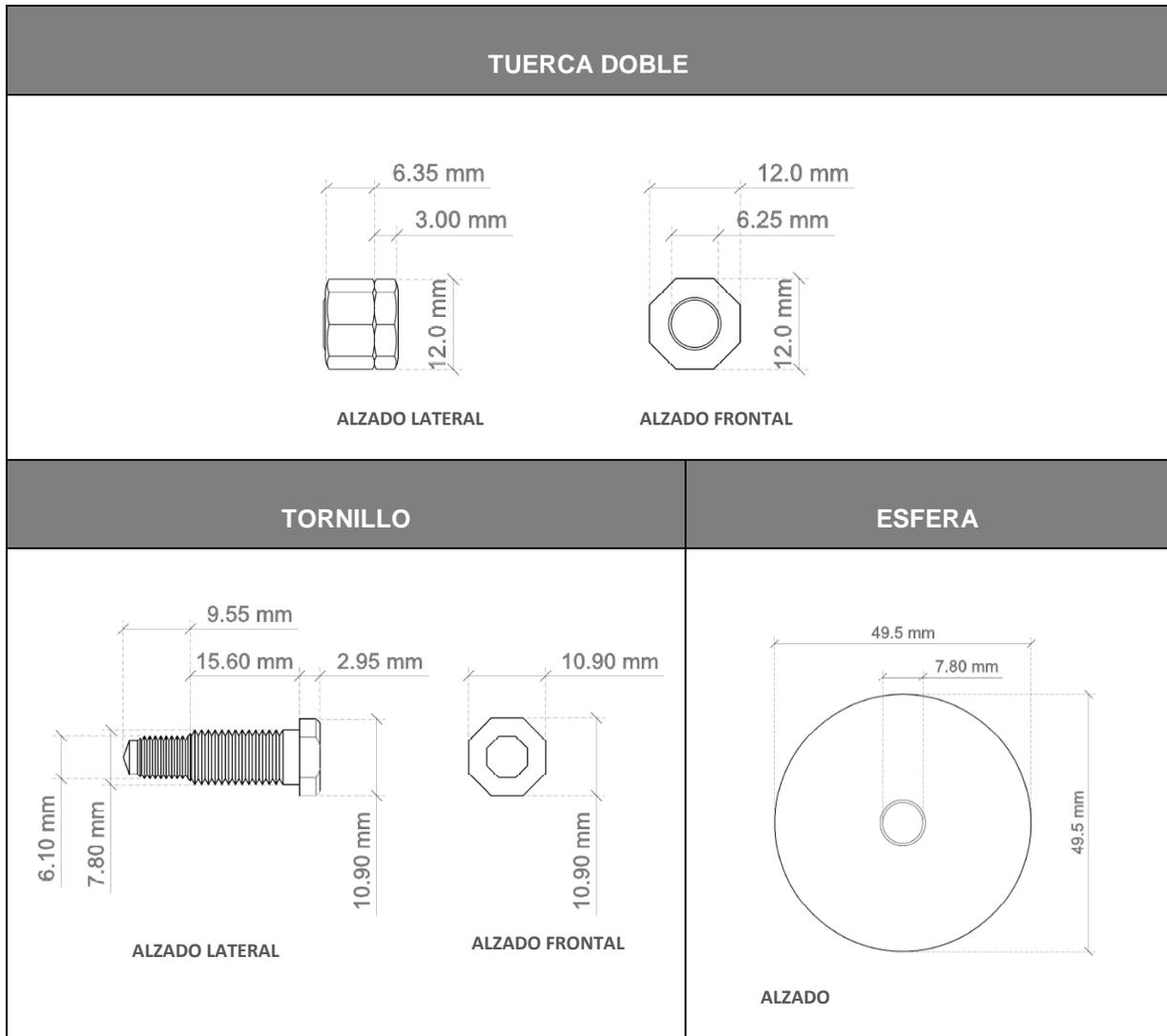


Tabla 19. Dimensiones gráficas de los elementos estructurales del núcleo tetraédrico en base al sistema Ortiz.

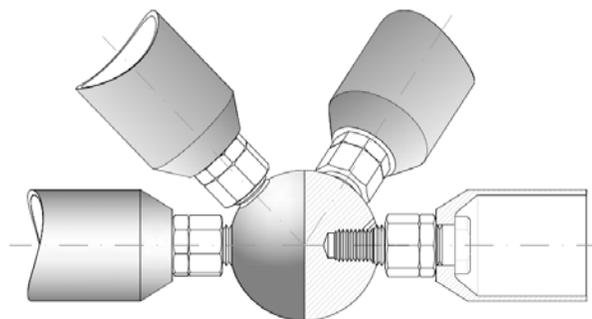


Imagen 78. Detalle en alzado y sección de la conexión de las barras al nodo esférico, sistema Ortiz de Lanik.

ELEMENTOS ESTRUCTURALES	
BARRA	
LONGITUD TOTAL (INCLUYENDO UNIONES: CASQUILLOS, TUERCAS, TORNILLOS)	75.5 cm
PESO (INCLUYENDO UNIONES – APROXIMADO)	0.53 kg + 0.048 kg = 0.578 kg
DIÁMETRO DE LA SECCIÓN	2.13 cm (21.3 mm)
NODO	
DIÁMETRO (PROPORCIÓN APROX. 1 : 2 – RESPECTO A LA SECCIÓN DE LA BARRA, <u>DIMENSIÓN MÍNIMA</u> <u>EXISTENTE DE LA ESFERA</u> )	4.95 cm
PESO MÁXIMO POR UNIDAD (APROXIMADO MATERIAL – ACERO AL CARBONO)	0.498 kg

Tabla 20. Dimensión y peso de los elementos estructurales del núcleo tetraédrico en base al sistema Ortiz.



Imagen 79. Conexión de la barra a los nodos esféricos con las dimensiones establecidas para el proyecto, según el cálculo de barras de 75.5 cm de longitud.

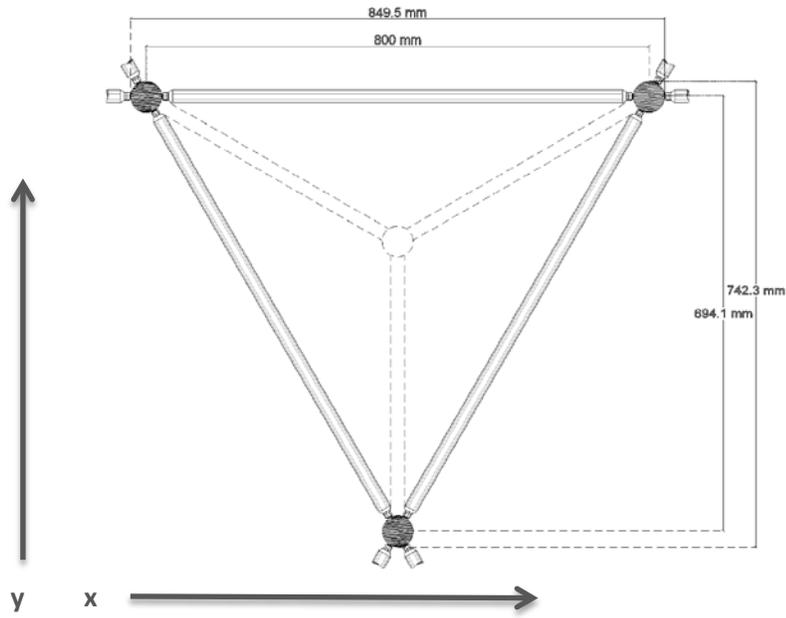


Imagen 80. Vista en planta del núcleo tetraédrico con las dimensiones establecidas para el proyecto, según el cálculo de barras de 75.5 cm de longitud.

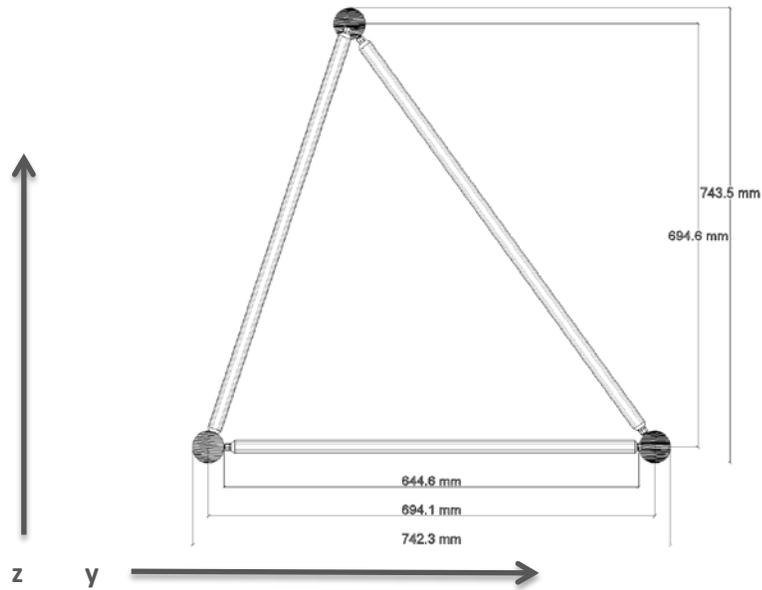


Imagen 81. Vista en alzado (eje y) del núcleo tetraédrico con las dimensiones establecidas para el proyecto, según el cálculo de barras de 50 cm de longitud.

De la geometría analizada obtenemos los siguientes resultados necesarios para el diseño estructural y formal de la cubierta del proyecto (Tabla 21):

<b>DIMENSIONES DEL NÚCLEO TETRAÉDRICO CON BARRAS A EJES DE 80 cm</b>	
<b>TETRAEDRO EN PLANTA ( x, y)</b>	
LONGITUD DE ESFERA	4.95 cm
LONGITUD DE TUERCA - TORNILLO	1.089 cm
LONGITUD DE CASQUILLO CÓNICO	0.610 cm
LONGITUD DE TUBO METÁLICO	71.65 cm
LONGITUD DE BARRA (COMPLETA)	75.5 cm
LONGITUD DE BARRA Y NODO	80 cm
LONGITUD DE EJE DEL NODO 1 A EJE DEL NODO 2 (EJE X)	80 cm
LONGITUD DE BARRA Y DOS NODOS (EJE X)	84.95 cm
LONGITUD DE EJE DEL NODO 1 o 2 A EJE DEL NODO 3	69.40 cm
LONGITUD DE BARRA Y DOS NODOS (EJE Y)	74.25 cm
<b>TETRAEDRO EN ALZADO (y, z)</b>	
LONGITUD DE BARRA (INTERNA)	61.65 cm
LONGITUD DE EJE DEL NODO 1, 2 o 3 A EJE DEL NODO 4	64.96 cm
LONGITUD DE BARRA Y DOS NODOS (EJE X)	74.35 cm
<b>PESO NÚCLEO TETRAÉDRICO (0.333 m<sup>2</sup>)</b>	<b>5.46 kg</b>
<b>PESO TOTAL NÚCLEO TETRAÉDRICO (CUBIERTA- ADICIÓN 3 BARRAS SUPERIORES)</b>	<b>7.194 kg</b>
<b>PESO TOTAL POR m<sup>2</sup></b>	<b>21.60 kg</b>

Tabla 21. Dimensiones generales del núcleo tetraédrico con barras a ejes de 80 cm.

## d) CONSTRUCCIONES ANÁLOGAS

### MARQUESINA EN DILLARD HIGH SCHOOL

Ubicada en Florida, Estados Unidos, la Dillard High School, escuela de educación básica y secundaria, especializada en la enseñanza del arte, solicitó la cubierta de un patio exterior ubicado entre dos edificios, espacio destinado a comedor al aire libre. Se optó por una marquesina abovedada que se apoya sobre ocho columnas circulares, cuatro columnas alineadas de aproximadamente tres metros y de altura, y cuatro columnas de casi cuatro metros y medio. El sistema



Fotografía 42. Lanik I. Patio exterior de Dillard High School. Se observa la cubierta espacial curva apoyada sobre ocho columnas circulares.

utilizado fue el Ortz de Lanik, formando una estructura con un área cubierta de 50 metros por 20 metros (Fotografía 42), con una retícula compuesta por células tetraédricas y semioctaédricas de un metro de altura (Fotografía 43); la malla fue recubierta por paneles de polímeros, que permiten el traspaso semidirecto de luz solar (Estructuras espaciales Lanik, 2014).



Fotografía 43. Lanik I. Cubierta del patio exterior de Dillard High School. Con 50 metros de longitud por 20 metros de anchura, utiliza el sistema Ortz de Lanik, formada por una retícula espacial de semioctaedros.

## PLAZA DE TOROS DE ILLUMBE (DONOSTIA ARENA)



Fotografía 44. Lanik I. Interior de la plaza de toros de Illumbe (Donostia Arena), se observan dos partes diferentes de la cubierta, la estática con paneles opacos y la retráctil con paneles translúcidos.

Ubicada en San Sebastián, País Vasco, fue construida en 1888, utilizándose como plaza de toros hasta finales del siglo XX; en 1998 fue rehabilitada para convertirla en centro deportivo y sede del equipo de basquetbol de Gipuzkoa, tiene una capacidad para 11 mil espectadores. La cubierta de casi 100 metros de diámetro, se caracteriza por tener al centro una parte retráctil, que es utilizada para

cerrar el recinto para conciertos musicales y juegos deportivos. La estructura (sistema Ortz) consta de una malla compuesta por tetraedros y semioctaedros de diferentes dimensiones según el eje radial. La forma de la cubierta se muestra como una cúpula rebajada y en la parte central esta se alza para la colocación de la armadura retráctil, esta parte consta de dos grandes rieles que permiten la apertura y cierre de dos cubiertas móviles de forma esférica. La estructura estática posee paneles opacos que no permiten el paso de la luz, mientras que en la parte central los paneles son translúcidos (Estructuras espaciales Lanik, 2014), (Fotografías 44, 45).



Fotografía 45. Lanik I. Vista aérea de la plaza de toros de Illumbe (Donostia Arena). A la izquierda el edificio con la cubierta retráctil cerrada, a la derecha con la cubierta retráctil abierta.

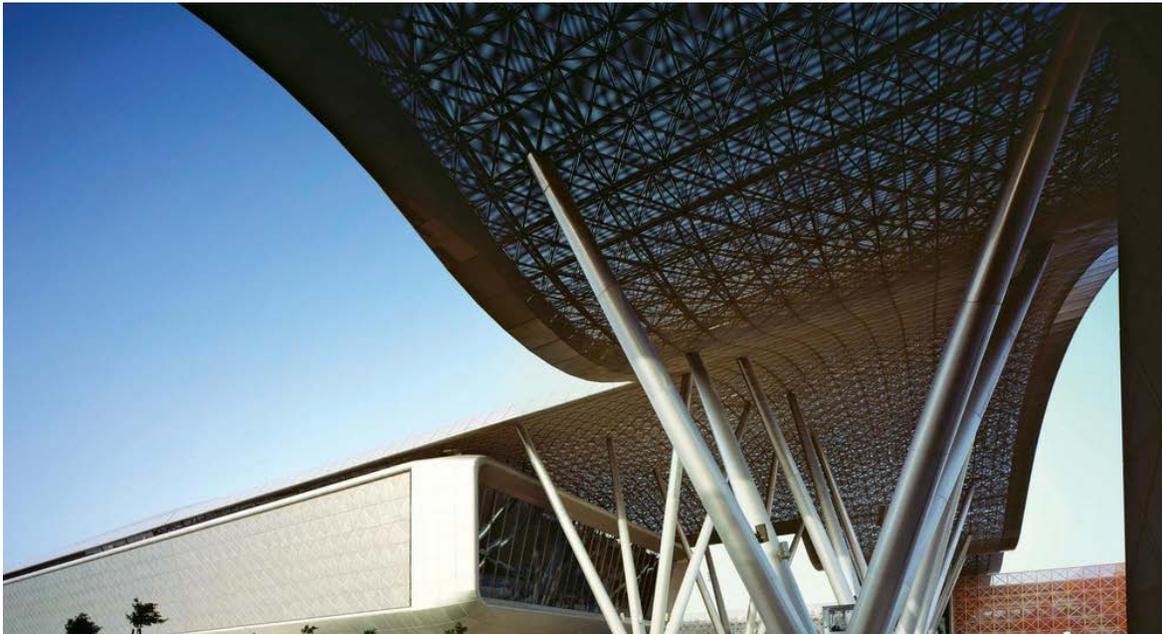
## COMPLEJO URBANO “EDUCATION CITY”, DOHA

Este nuevo centro urbano de Doha en Qatar, consta de un par que científico y tecnológico, compuesto por un núcleo de edificios que albergan las oficinas de la compañía, salas de edición, instalaciones para estudio e investigación. Utilizando el sistema del nodo esférico KK de MERO, las cubiertas están construidas por una estructura reticular de doble capa, revestida por placas metálicas triangulares perforadas en la parte



Fotografía 46. MERO. Cubierta de la terraza externa del complejo urbano “Education City”, Doha. Se observa la cubierta topológica formada por una retícula espacial apoyada sobre pilares diagonales de acero.

superior e inferior (Fotografía 46). La cubierta de la terraza exterior posee una forma ondulada geométrica, donde cada núcleo semioctaédrico tiene las mismas dimensiones, variando ligeramente los ángulos de las barras, dando como resultado una superficie topológica (MERO, 2014), (Fotografía 47).



Fotografía 47. MERO. Complejo urbano “Education City”. Vista inferior de la cubierta exterior formada por núcleos semioctaédricos iguales, con diferentes ángulos de las barras hacia los nodos para crear superficies curvas.

## NUEVA CUBIERTA DEL SHEIKH KHALIFA STADIUM

Proyectada por el arquitecto Rice Perry Ellis, para la rehabilitación e incremento de espectadores a 16 mil, la cubierta del estadio de fútbol tiene una superficie de 7500 m<sup>2</sup>, formada por una retícula espacial de semioctaedros; consta de tres partes, dos laterales y una al centro, lo que crea una abertura que permite la entrada de iluminación natural,



(Fotografía 48). La estructura de acero, utiliza el sistema del nodo esférico KK de MERO, formando una

Fotografía 49. Perry Ellis, Rice / MERO. Tribunas del estadio Sheikh Khalifa. Se observa la malla de fibra de vidrio y la cubierta espacial tridimensional curva con la abertura central.

cubierta curva que se apoya en dos grandes pilares a los extremos (Fotografía 49); apoyados en la parte superior se encuentran los paneles de fibra de vidrio recubiertos en teflón (PFTE), (MERO, 2014).



Fotografía 48. Perry Ellis, Rice / MERO. Vista desde el campo del estadio Sheikh Khalifa. La cubierta curva se apoya sobre dos grandes pilares a los extremos.

## **V. CASO DE ESTUDIO. NUEVO EDIFICIO “UNIDAD DE POSGRADO”**

- a) Antecedentes
- b) Planos arquitectónicos
- c) Planos estructurales
- d) Acabados
- e) Instalaciones
- f) Análisis estructural de cubierta por método de  $F=0$
- g) Análisis de cubierta por efectos de viento

## a) ANTECEDENTES

El proyecto se encuentra ubicado en la Unidad de Posgrado de la UNAM en Ciudad Universitaria. Las grandes dimensiones del complejo educativo crean numerosos espacios libres para desarrollar diversas actividades, dentro de los cuales se ubican los patios exteriores de las azoteas, cinco en total. Localizados en el primer conjunto de edificios en el cuarto nivel, cuentan con un área aproximada de 220 m<sup>2</sup> cada uno, conectados directamente a las aulas del segundo conjunto. Estos espacios se caracterizan por ser altamente aprovechables, ofreciendo grandes áreas libres, ventilación e iluminación natural, y buena localización dentro del complejo, haciéndolos ideales para reuniones sociales y/o académicas. La disposición de estos espacios ante los factores climáticos como la radiación solar directa y las lluvias, provoca que sean poco utilizables durante periodos prolongados de tiempo, lo que da la necesidad de resguardarlos por medio de una cubierta.

La propuesta de cubierta se realiza por medio de una estructura espacial tridimensional, compuesta por una malla espacial coplanaria de tetraedros y octaedros, la cual abarca un área de 262.40 m<sup>2</sup>, cubriendo satisfactoriamente el área de intervención. La cubierta se conforma por módulos tetraédricos formados por nodos esféricos y barras de tubos circulares de 75.50 cm de longitud, con una inclinación de 1° en los ejes secundarios.

Se propone una estructura aislada, para evitar cargas adicionales al edificio existente, dando como resultado seis apoyos aislados (cartelas-columnas) ubicados de manera simétrica respecto al área de intervención, para distribuir las cargas proporcionalmente hacia la cimentación. Para la protección del espacio se plantea utilizar láminas de vidrio templado, acopladas a los nodos esféricos por medio de uniones tipo araña, especiales para la protección solar y el máximo aprovechamiento de luz natural. Igualmente dada la ubicación del proyecto es necesario colocar un sistema efectivo de canalización del agua pluvial, para evitar filtraciones en el espacio intervenido. La iluminación artificial se propone colocar en la parte interna del patio, exenta de la cubierta, para lograr efectos visuales, aunados a la forma curva de la cubierta, para originar un proyecto atractivo.

## b) PLANOS ARQUITECTÓNICOS

La cubierta espacial cubre un área de 262.40 m<sup>2</sup>, formada por una retícula tridimensional de tetraedros y octaedros, la estructura está formada por barras de tubos de sección circular de acero de acabado en frío con una dimensión estándar de 0.80 m y nodos esféricos de acero al carbono de 49.5 mm de diámetro. La cubierta se encuentra apoyada sobre dieciocho postes de acero acoplados a seis columnas de concreto armado de 13.50 m de altura, aisladas de la estructura del edificio existente.

La forma de la cubierta se basa en el área necesaria a cubrir del patio, resultando un trapecio con una abertura en la parte posterior para el área libre de las jardineras, por lo cual es necesario realizar ajustes laterales, que modifican las dimensiones de las barras perimetralmente, de lo cual se obtiene un patrón repetitivo de cinco núcleos tetraédricos que se repite siete veces en cada lado de la cubierta.

### PRECÁLCULO DE PESO DE LA ESTRUCTURA

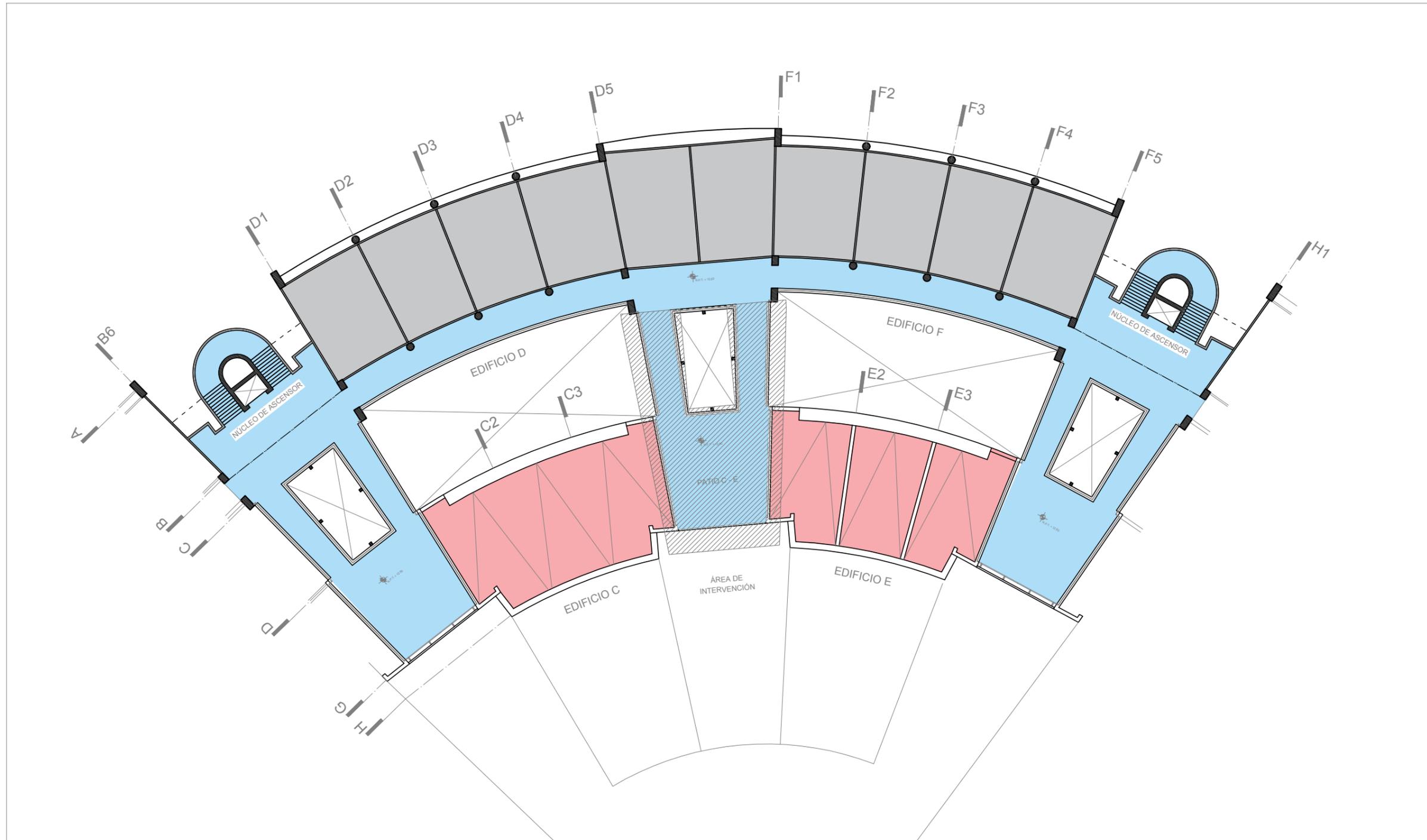
Para obtener el peso total de la estructura es necesario poseer el peso de los elementos estructurales como barras, nodos y accesorios, y el área de las láminas de vidrio.

PRECÁLCULO CUBIERTA CON BARRAS A EJES DE 80 cm	
ÁREA TOTAL CUBIERTA	262.40 m <sup>2</sup>
PESO POR m <sup>2</sup> (BARRAS, NODOS Y ACCESORIOS)	21.60 kg
PESO ESTRUCTURA - CUBIERTA	5667.84 kg = 5.67 toneladas
PESO POR m <sup>2</sup> (LÁMINAS DE VIDRIO TEMPLADO DE 6 mm)	15 kg
PESO CUBIERTA DE VIDRIO	3936 kg = 3.97 toneladas
<b>PESO TOTAL DE CUBIERTA</b>	<b>9603.84 kg = 9.7 toneladas</b>

Tabla 22. Precálculo de cubierta con barras a ejes de 80 cm.

<b>PREDIMENSIONAMIENTO CUBIERTA</b>	
<b>RELACIÓN CLARO/PERALTE DE MALLA ESPACIAL COPLANARIA COMPUESTA POR TETRAEDROS Y OCTAEDROS</b>	<b>MAYOR DE 1/30</b>
<b>MAYOR CLARO DE CUBIERTA = 24.95 m</b>	<b>PERALTE MÍN. NECESARIO = 0.715 m</b>
<b>PERALTE PROPUESTO (SEGÚN RETICULA)= 0.7435 m</b>	

Tabla 23. Predimensionamiento de cubierta.



cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO  
 ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA  
 DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

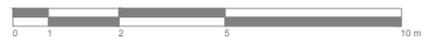
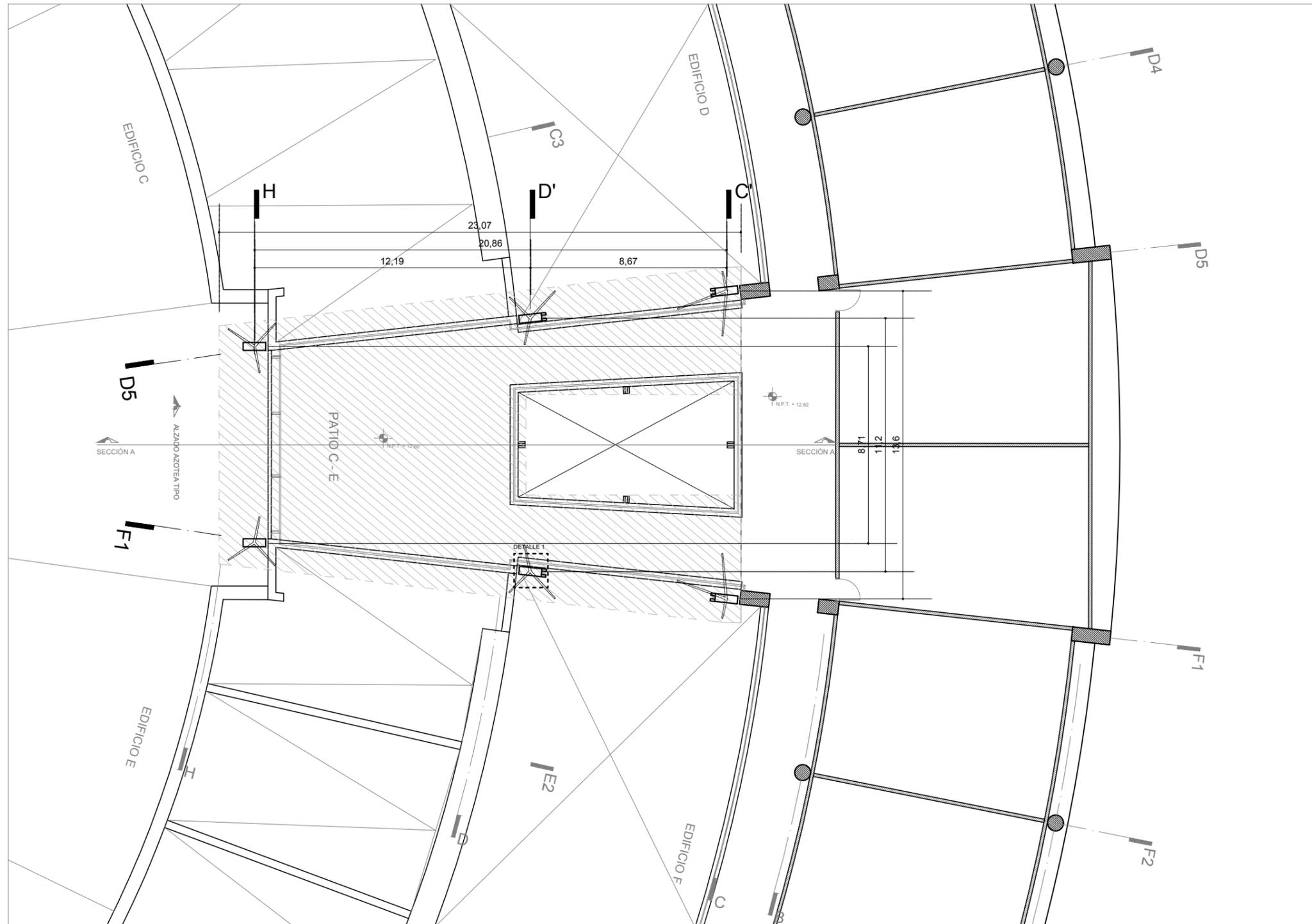
PLANO  
 PLANO DE UBICACIÓN

ESCALA  
 1: 400

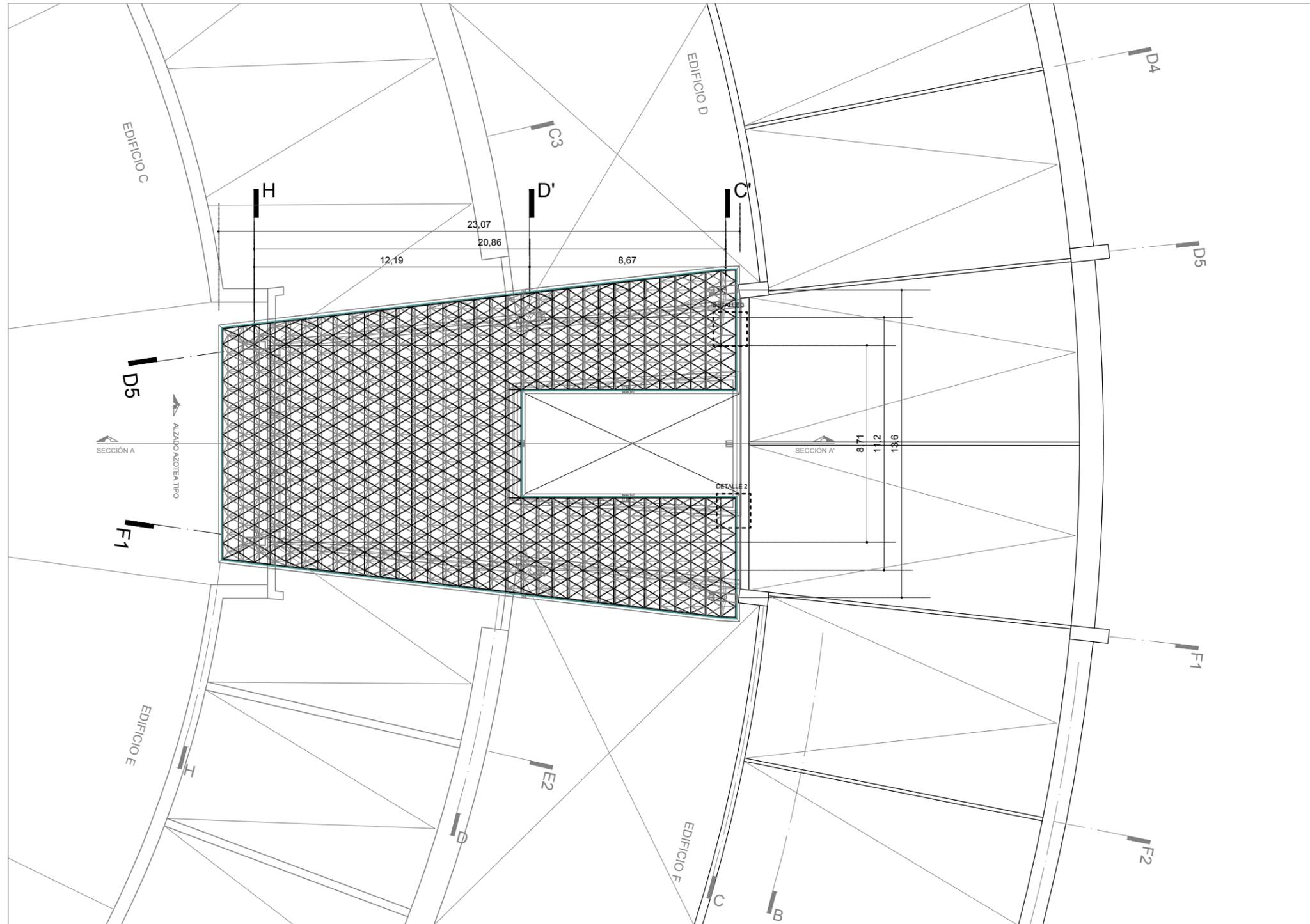
FECHA  
 25/08/2015



CLAVE  
**A1**



<b>cubierta</b> NUEVO EDIFICIO "UNIDAD DE POSGRADO"	UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA	ALUMNO ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA	PLANO PLANTA ARQUITECTÓNICA DE AZOTEA		CLAVE <b>A2</b>
	TALLER LUIS BARRAGÁN	ASESORA DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO	ESCALA <b>1: 200</b>	FECHA 25/08/2015	

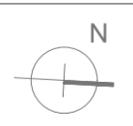


cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

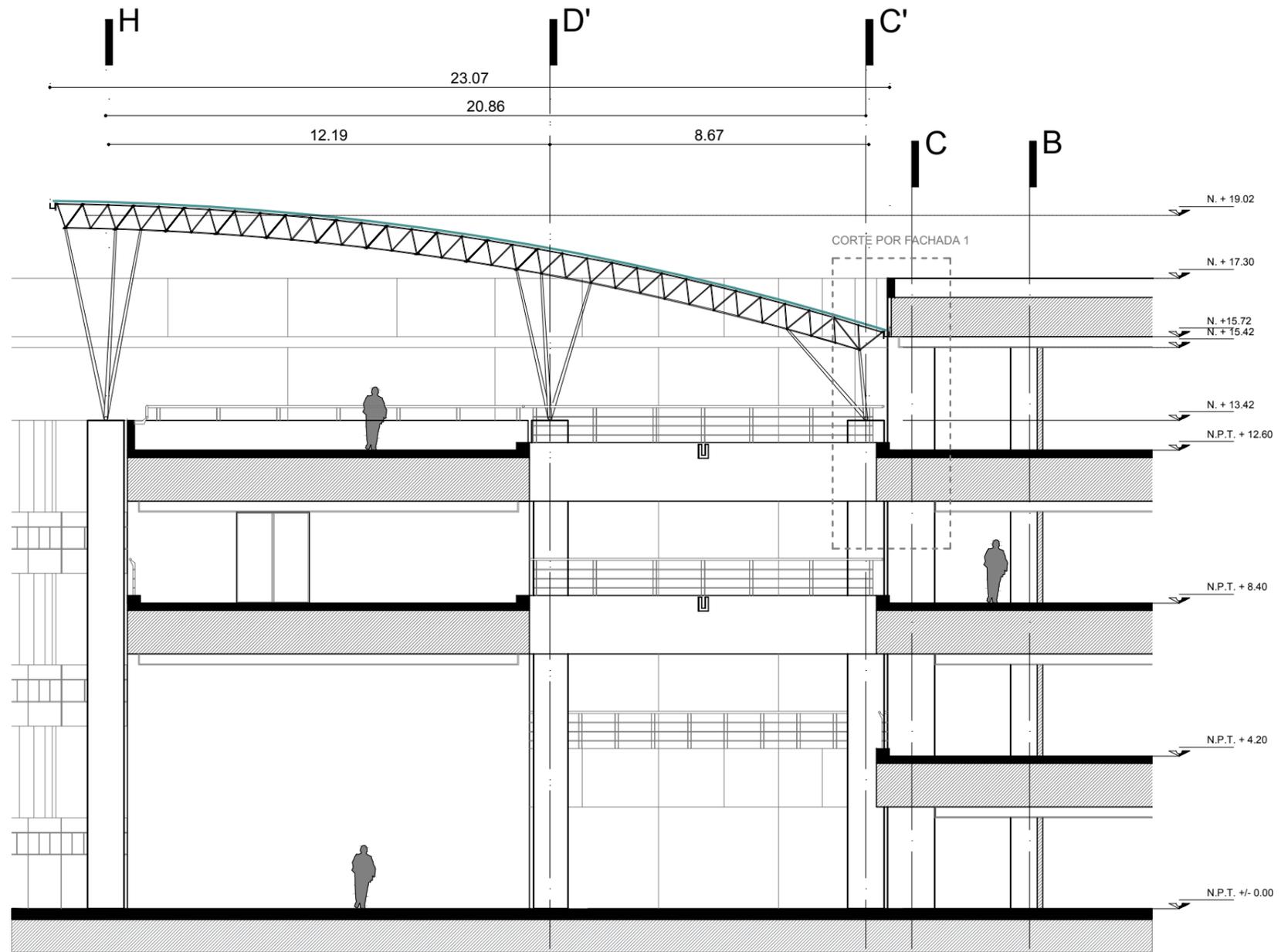
UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA  
 TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO  
 ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA  
 ASESORA  
 DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO  
 PLANTA ARQUITECTÓNICA DE CUBIERTA  
 ESCALA  
 1: 200  
 FECHA  
 25/08/2015



CLAVE  
**A3**



cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO

ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA

DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO

SECCIÓN A - A'

ESCALA

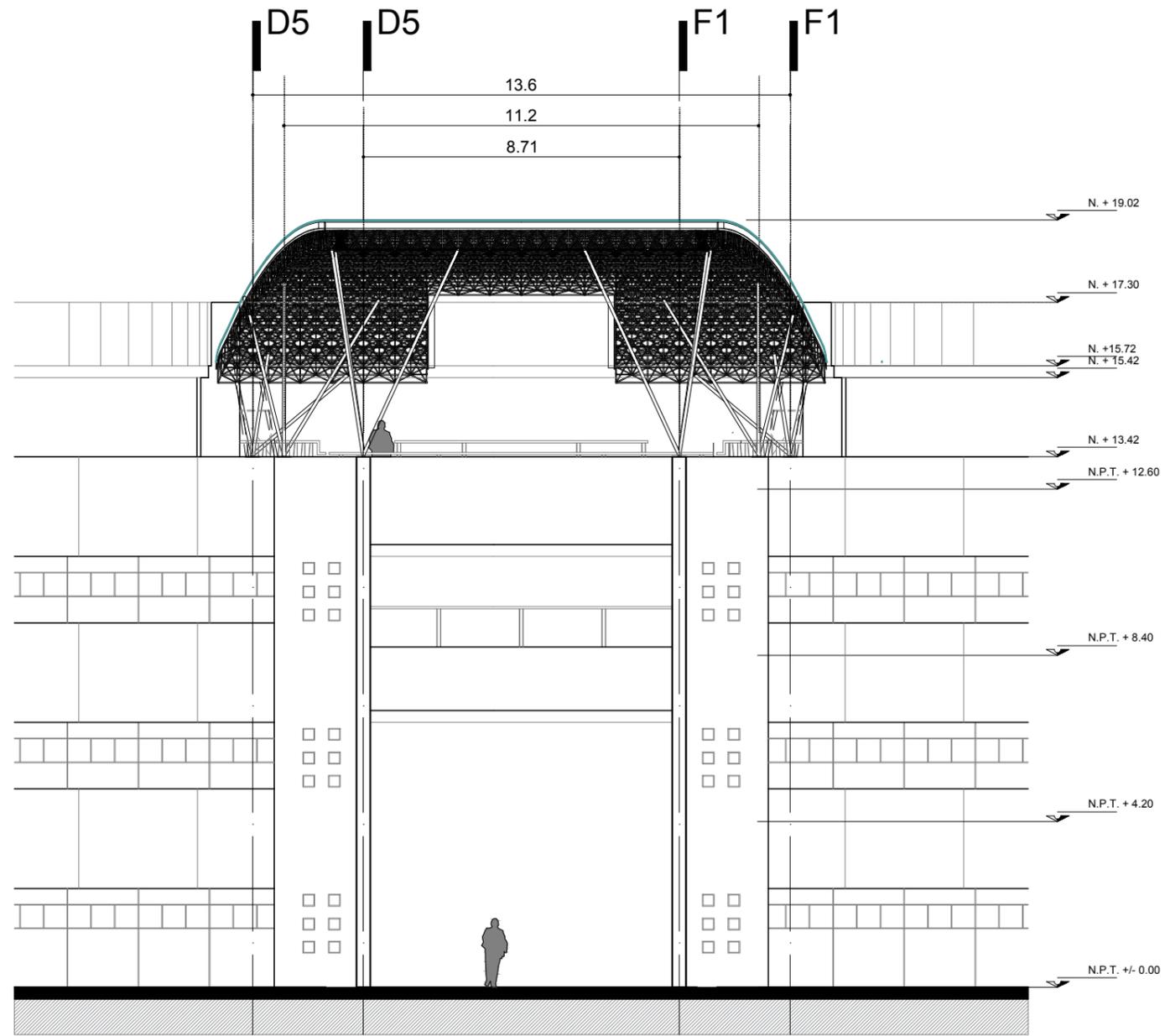
1: 150

FECHA

25/08/2015

CLAVE

A4



cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO

ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA

DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO

ALZADO AZOTEA

ESCALA

1: 150

FECHA

25/08/2015

CLAVE

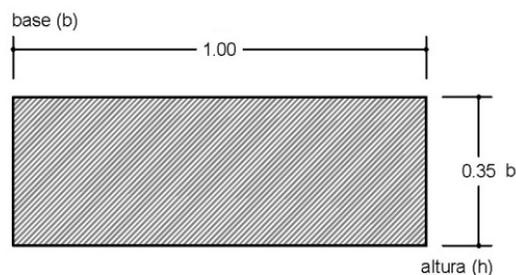
A5

### c) PLANOS ESTRUCTURALES

La estructura consta de cinco ejes principales sobre los cuales se apoyan los postes de la cubierta en las columnas, dentro de la malla espacial formada por núcleos tetraédricos, se proceden a numerar los nodos en ejes secundarios, teniendo por resultado 34 ejes longitudinales y 39 ejes transversales. Para una mejor distribución de cargas a la cimentación, se colocan tres postes por columna para ampliar el número de acoplamientos, permitiendo igualmente mayor resistencia a las cargas sísmicas y por viento.

La ubicación de las columnas depende del espacio libre determinado por el edificio existente, localizándolas lo más cerca posible al patio a cubrir y respetando el aspecto formal del entorno. Cada columna recibe una carga diferente, según el área de distribución recibida de la cubierta, pero dada la ubicación elevada en altura del proyecto es necesario realizar el precálculo de las columnas por la relación de esbeltez y posteriormente un predimensionamiento de la cimentación.

#### PRECÁLCULO COLUMNA POR RELACIÓN DE ESBELTEZ



COLUMNA T-1 (1.00 m x 0.35 m)

Área de la sección transversal

$$A = a b = 1 * 0.35 = 0.35 \text{ m}^2$$

Imagen 82. Propuesta columna T-1.

Momento de inercia

$$I_{x'} = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} (1)(0.35)^3 = 0.00357 = 357291 \text{ cm}^4$$

$$I_{y'} = \frac{1}{12} b^3 h = \frac{1}{12} (1)^3 (0.35) = 0.0291 = 2916666 \text{ cm}^4$$

Radio de giro

$$rx' = \sqrt{\frac{Ix'}{A}} = \sqrt{\frac{357291 \text{ cm}^4}{3500 \text{ cm}^2}} = 10.10 \text{ cm}$$

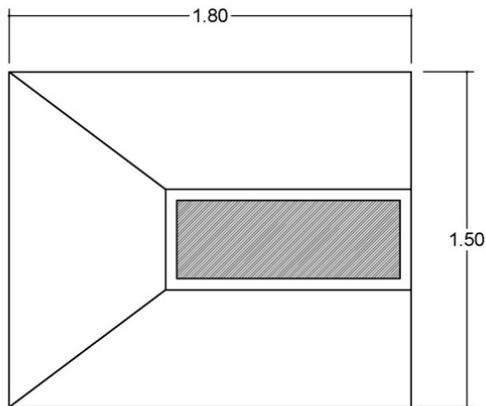
$$ry' = \sqrt{\frac{Iy}{A}} = \sqrt{\frac{2916666 \text{ cm}^4}{3500 \text{ cm}^2}} = 28.86 \text{ cm}$$

Longitud máxima permisible

$$l = \frac{120 * R}{k} = \frac{120 * \frac{10.10 + 28.86}{2}}{1} = 2337.6 \text{ cm} = 23.40 \text{ m}$$

(13.50 m utilizado en proyecto)

## PRECÁLCULO DE CIMENTACIÓN



ZAPATA T-1 (1.50 m x 1.80 m)

Imagen 83. Propuesta zapata T-1.

Carga sobre entre eje H-F1

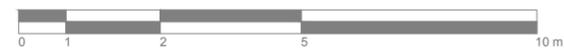
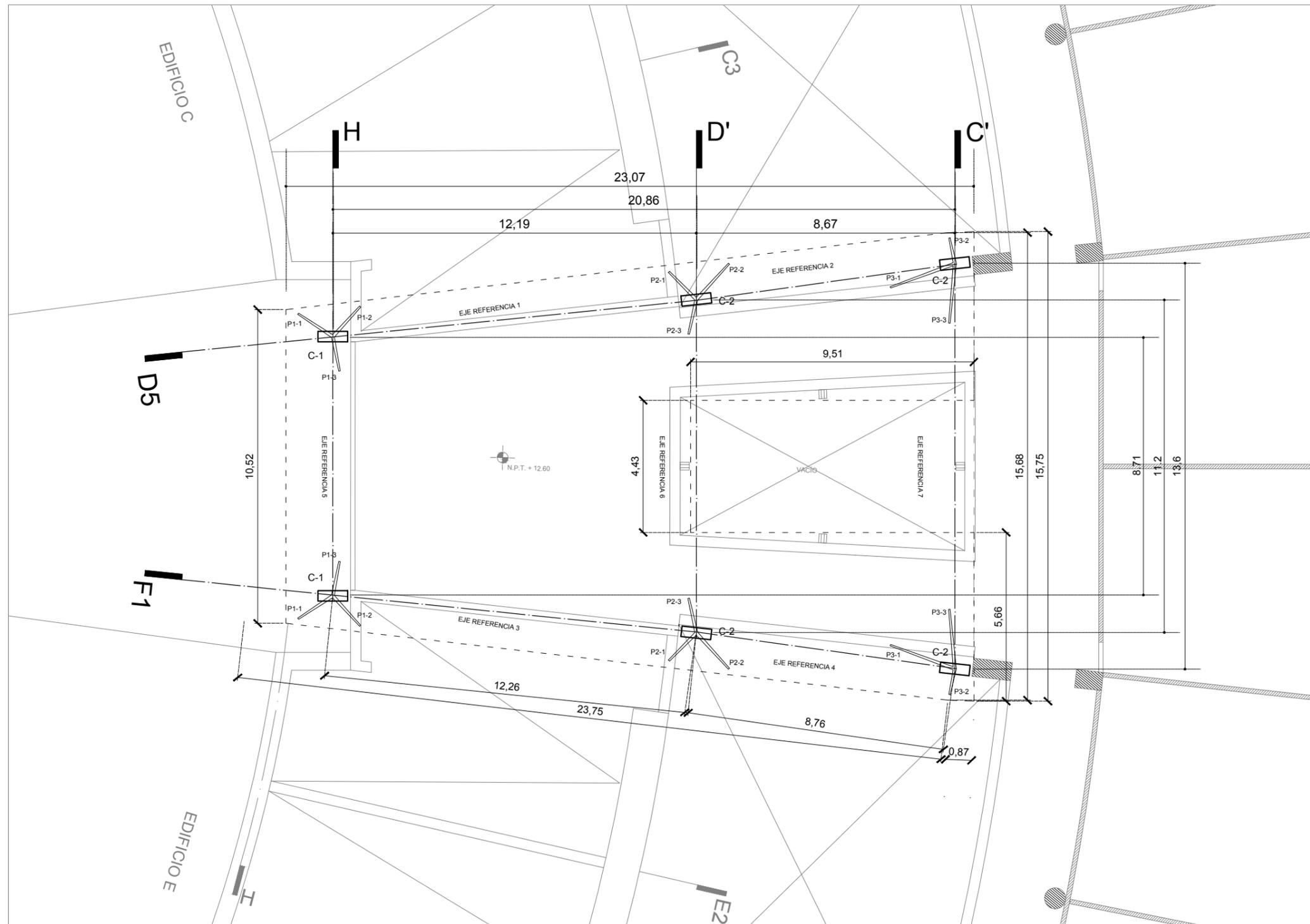
- A1 (área 1) - cubierta:  $43.76 \text{ m}^3 \times 36.60 \text{ kg/m}^3 = 1601.61 \text{ kg}$
- Columna de concreto:  $4.725 \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 11340 \text{ kg}$
- Dado de concreto:  $0.297 \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/cm}^3 = 712.8 \text{ kg}$
- Zapata aislada:  $2.25 \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/cm}^3 = 5400 \text{ kg}$

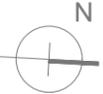
Carga total (Pu)= 19054.42 kg = 19.06

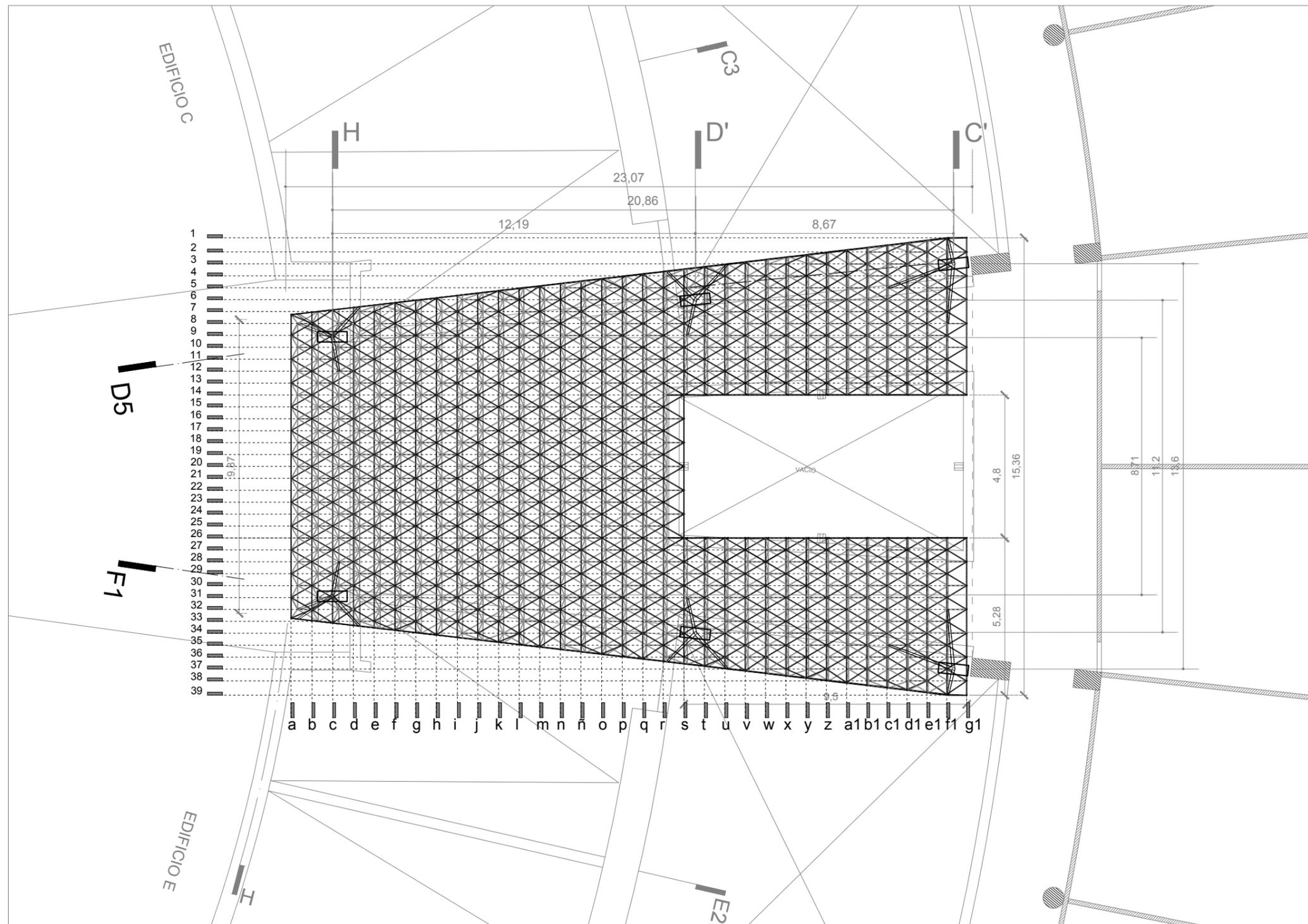
toneladas

$$Ac = \frac{Pu}{Rt} = \frac{19.06 T}{10 \frac{T}{m}} = 1.9 \text{ m}^2 (\text{área mínima de desplante})$$

Propuesta de zapata: 1.50 m x 1.80 = 2.70 m<sup>2</sup>



<b>cubierta</b> NUEVO EDIFICIO "UNIDAD DE POSGRADO"	UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA	ALUMNO ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA	PLANO PLANTA ESTRUCTURAL DE AZOTEA		 CLAVE <b>E1</b>
	TALLER LUIS BARRAGÁN	ASESORA DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO	ESCALA <b>1: 150</b>	FECHA 25/08/2015	



cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO  
 ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA  
 DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

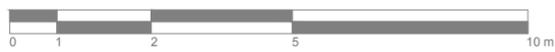
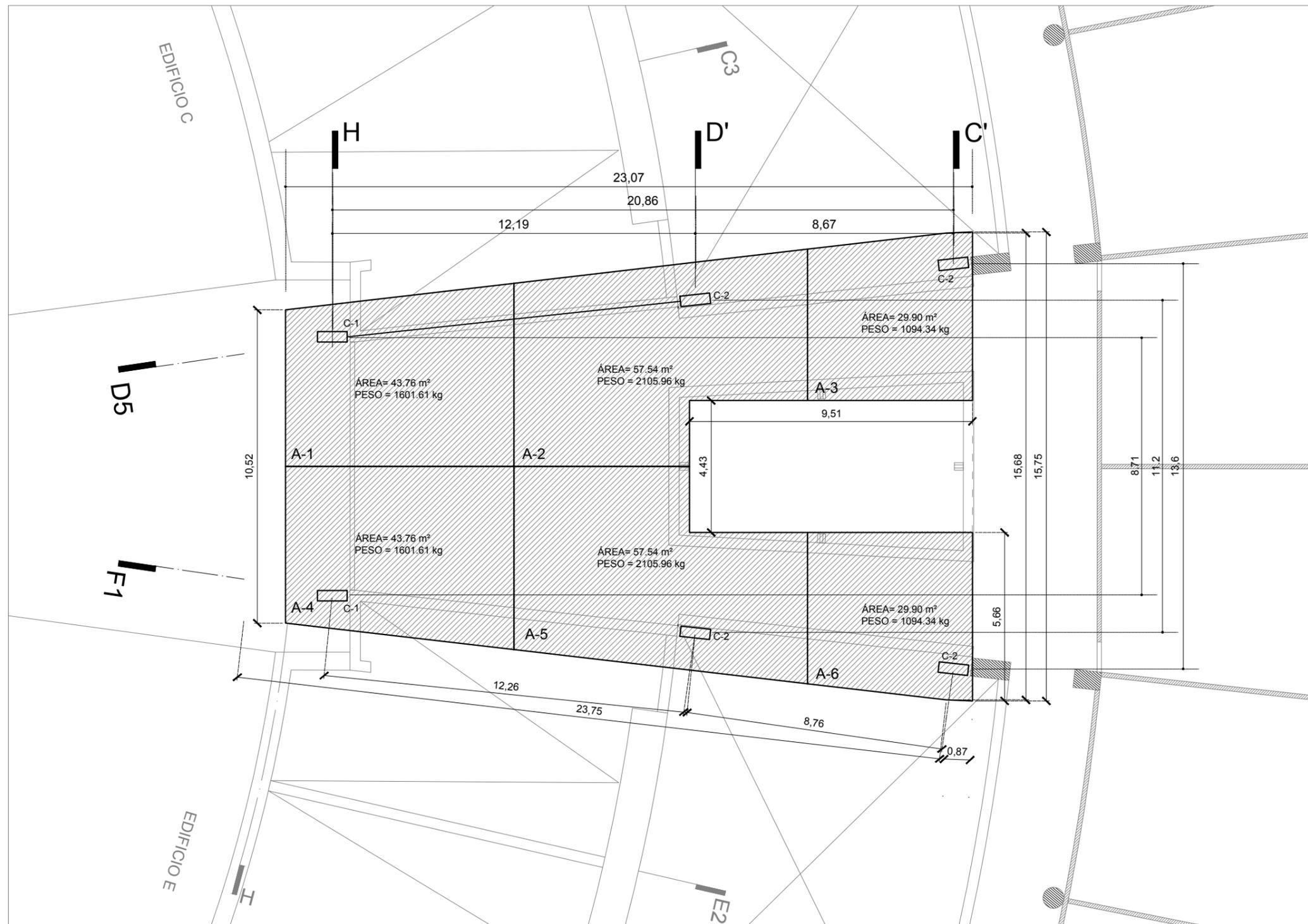
PLANO  
 PLANTA ESTRUCTURAL DE CUBIERTA

ESCALA  
 1: 150

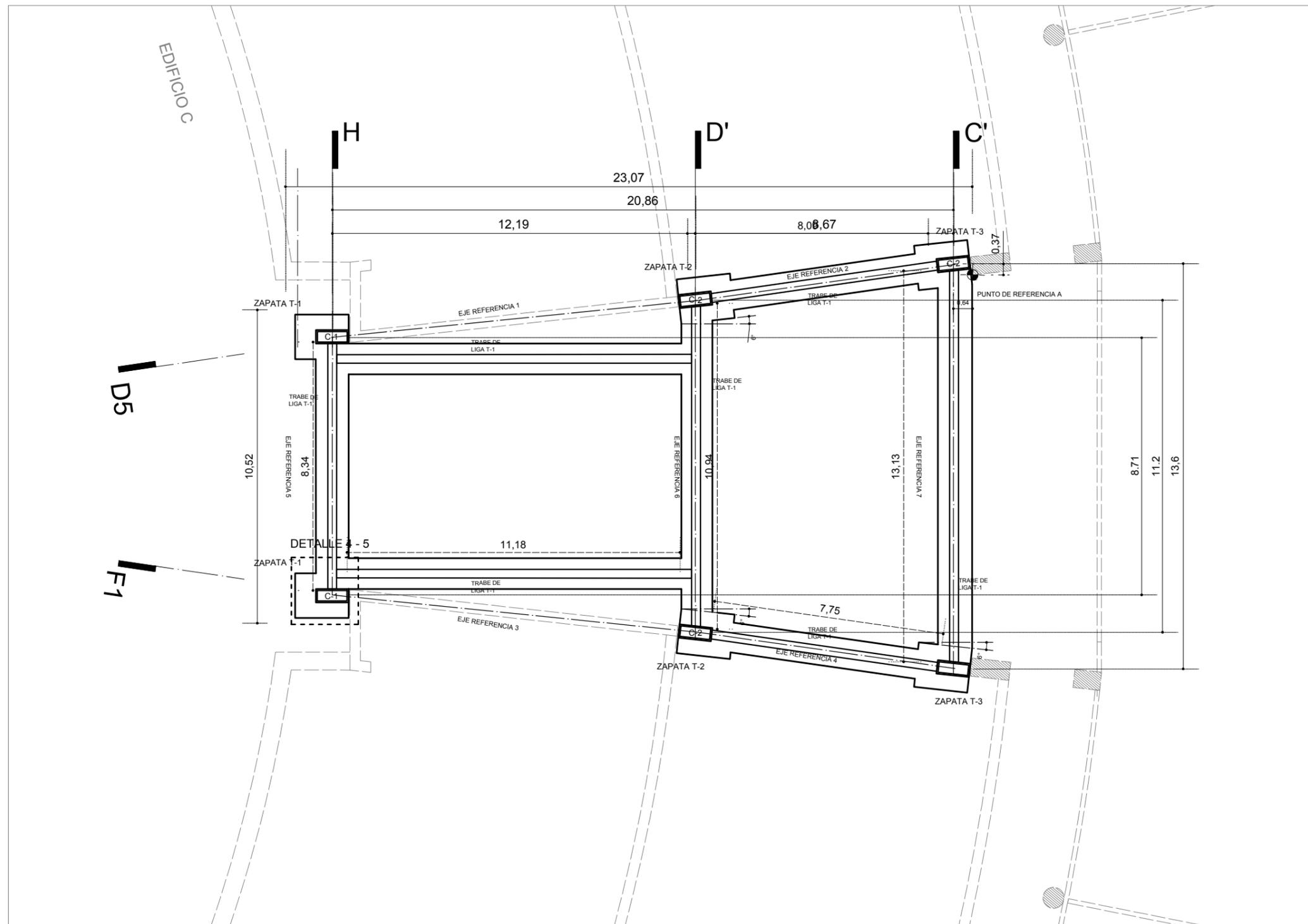
FECHA  
 25/08/2015



CLAVE  
**E2**



<b>cubierta</b> NUEVO EDIFICIO "UNIDAD DE POSGRADO"	UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA	ALUMNO ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA	PLANO PLANO DE TABLEROS DE CARGAS		CLAVE <b>E3</b>
	TALLER LUIS BARRAGÁN	ASESORA DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO	ESCALA <b>1: 150</b>		



cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA  
 TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO  
 ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA  
 ASESORA  
 DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO  
 PLANTA DE CIMENTACIÓN  
 ESCALA  
 1: 150  
 FECHA  
 25/08/2015

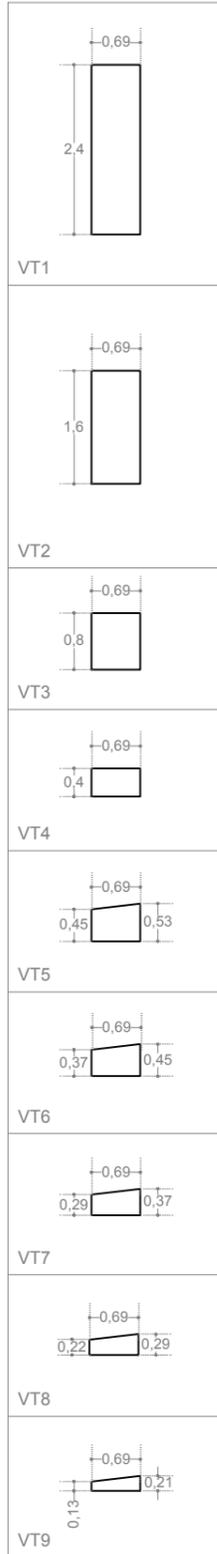


CLAVE  
**E4**

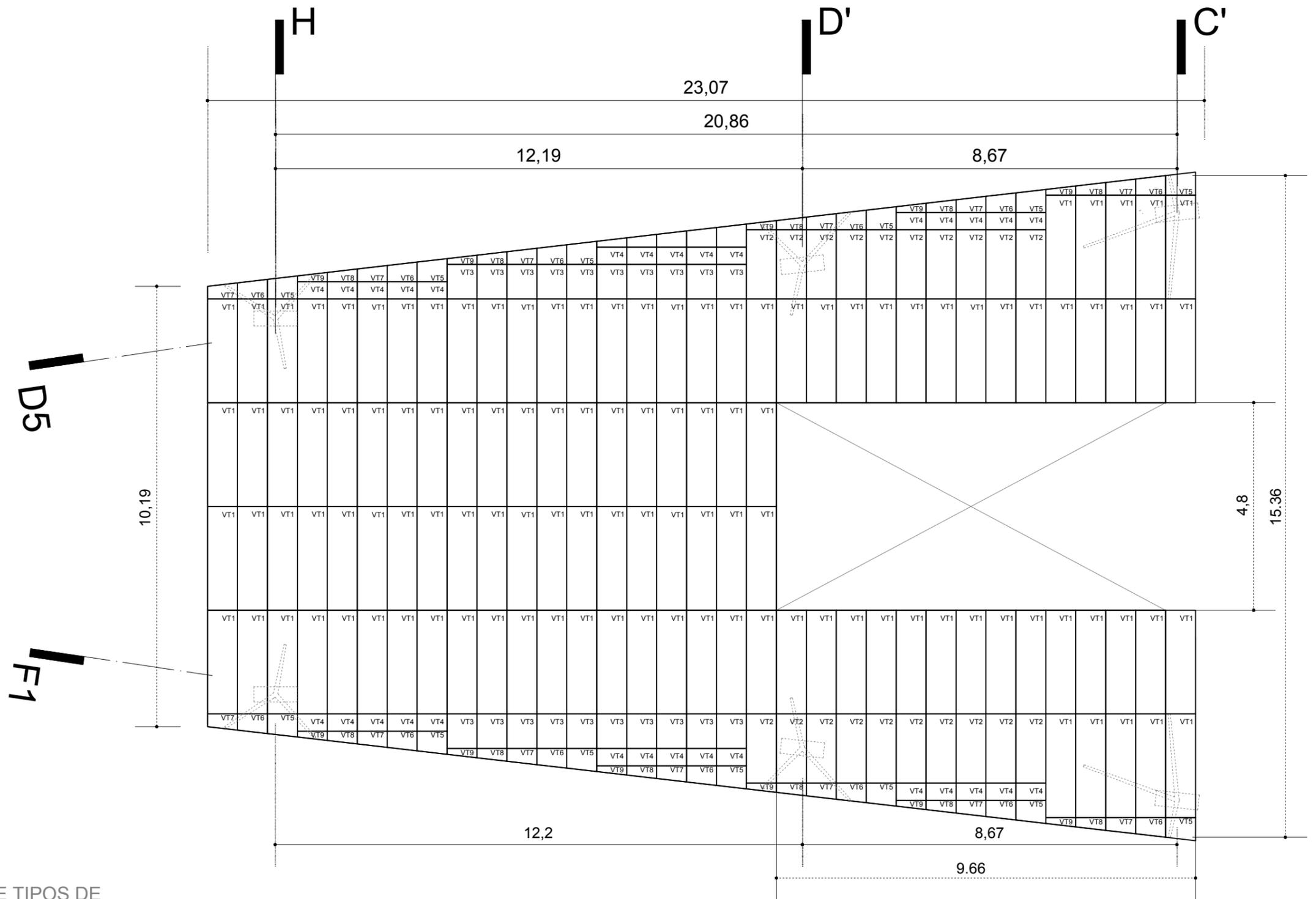
#### d) ACABADOS

La estructura espacial se encuentra recubierta por láminas de vidrio templado de 6 mm de grosor, de la marca Tecnovidrio, modelo Low-E Capa Dura, especial para el control solar, para ahorro en el consumo de energía eléctrica, que permite la reducción considerable del calor transmitido. Debido a la forma de la cubierta, se realiza un despiece para abarcar el área total a cubrir, siguiendo el mismo patrón de la estructura tridimensional, por consiguiente obtenemos nueve tipos de placas de vidrio:

- VT1 – 2.40 m x 0.69 m
- VT2 – 1.60 m x 0.69 m
- VT3 – 0.80 m x 0.69 m
- VT4 – 0.40 m x 0.69 m
- VT5 – 0.45 m-0.53 m x 0.69 m
- VT6 – 0.37 m-0.45 m x 0.69 m
- VT7 – 0.29 m-0.37 m x 0.69 m
- VT8 – 0.22 m-0.29 m x 0.69 m
- VT9 – 0.13 m-0.21 m x 0.69 m



DESPIECE TIPOS DE VIDRIO PARA CUBIERTA



cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO

ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA

DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO

PLANO DE DESPIECE DE CUBIERTA DE VIDRIO

ESCALA

1: 100

FECHA

25/08/2015

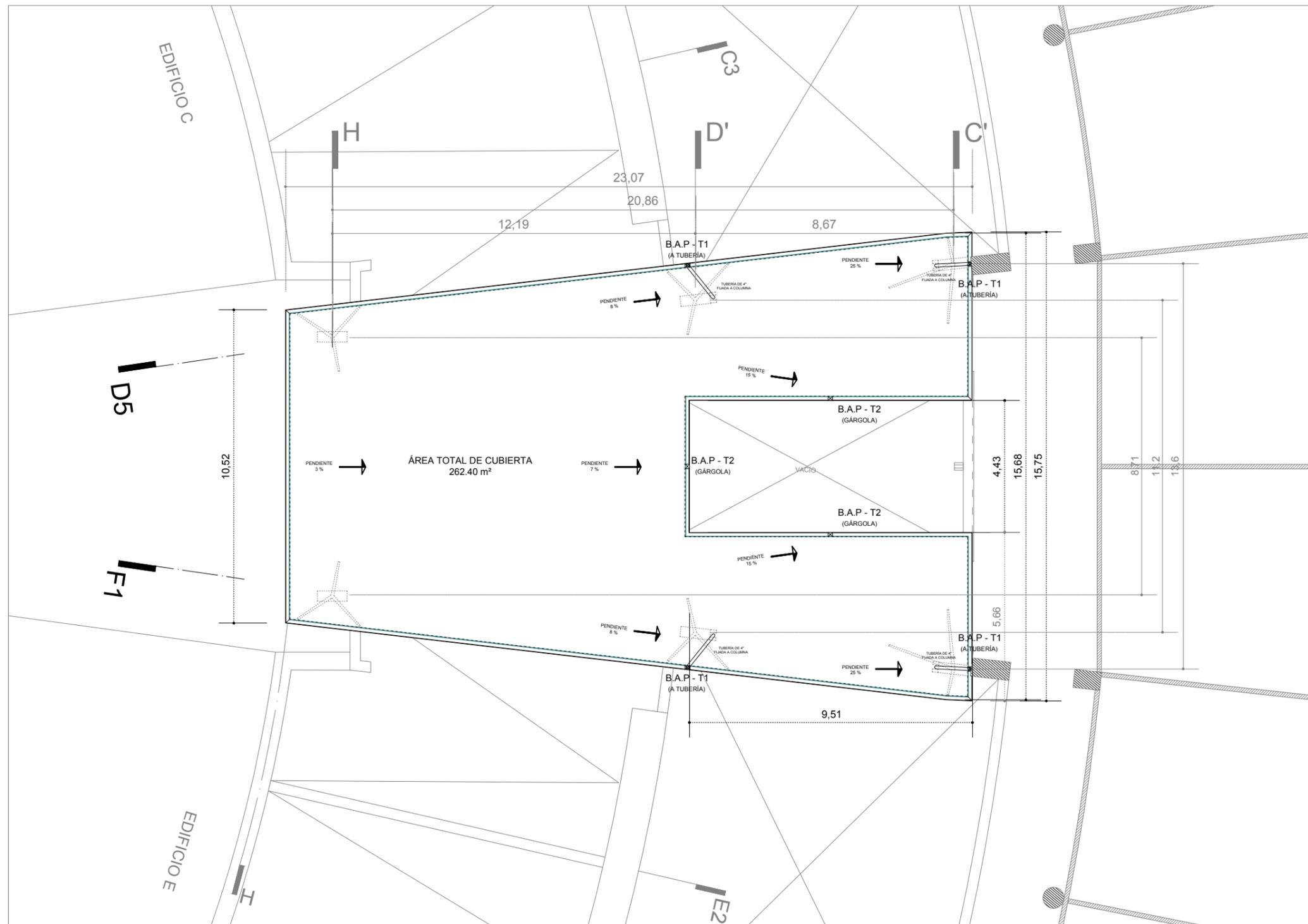


CLAVE

AC1

### **e) INSTALACIONES**

A través del perfil curvo de la cubierta obtenido por la inclinación de  $1^\circ$  de los ejes secundarios; el recorrido de agua pluvial se conduce a la parte posterior. Perimetralmente la cubierta posee un canalón industrial de aluminio sujeto a la estructura que realiza la bajada de agua pluvial de dos maneras, por medio de gárgolas (originalmente) para el área de jardineras y por tubería bajante de agua de 100 mm, hacia las columnas centrales y posteriores.

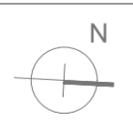


cubierta  
 NUEVO EDIFICIO  
 "UNIDAD DE POSGRADO"

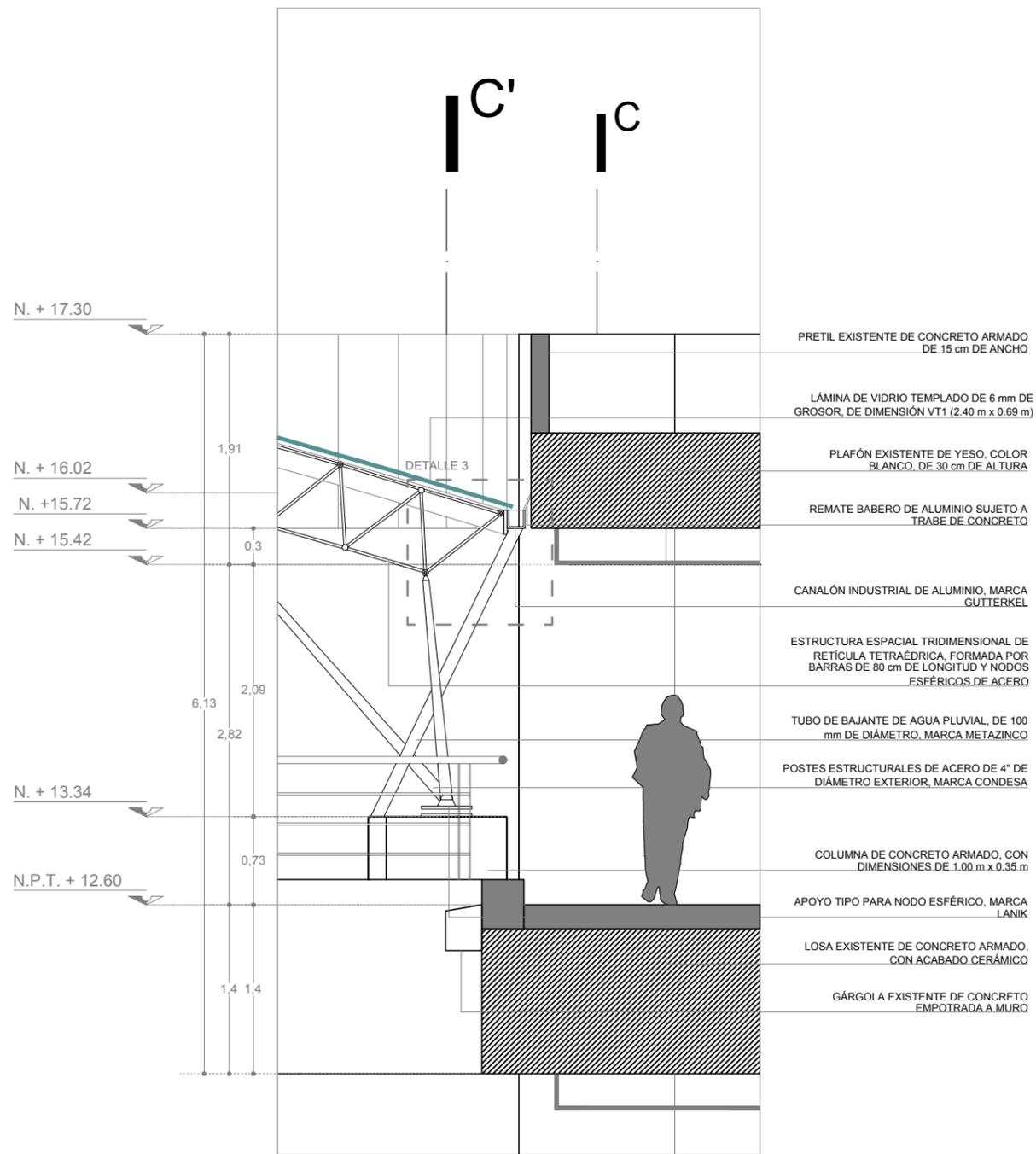
UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA  
 TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO  
 ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA  
 ASESORA  
 DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

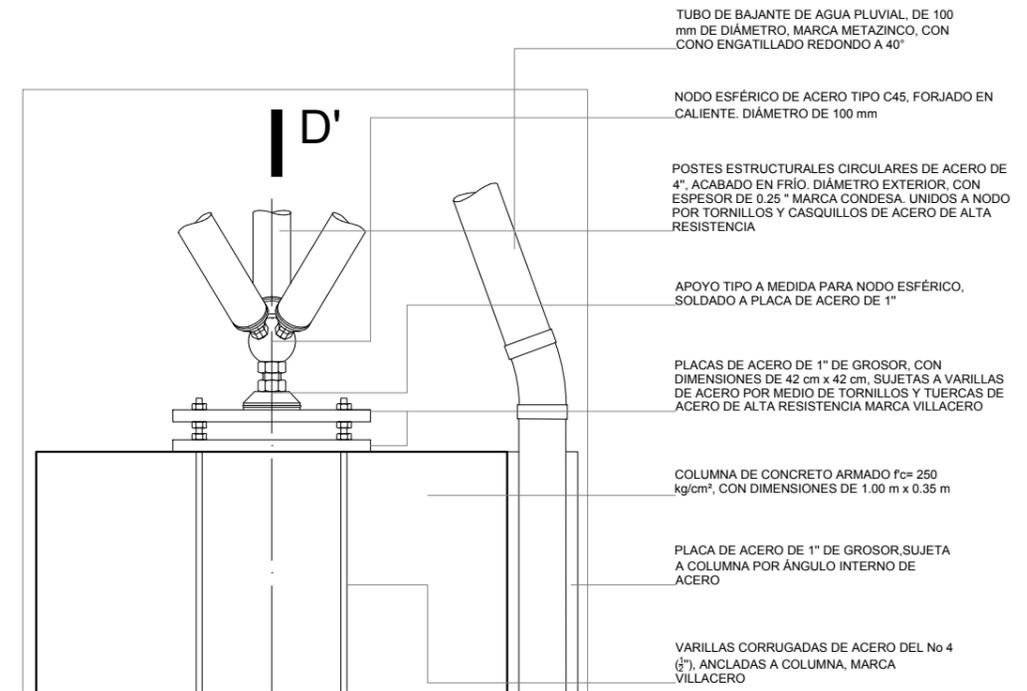
PLANO  
 PLANTA DE TECHOS (B.A.P.)  
 ESCALA  
 1: 150  
 FECHA  
 25/08/2015



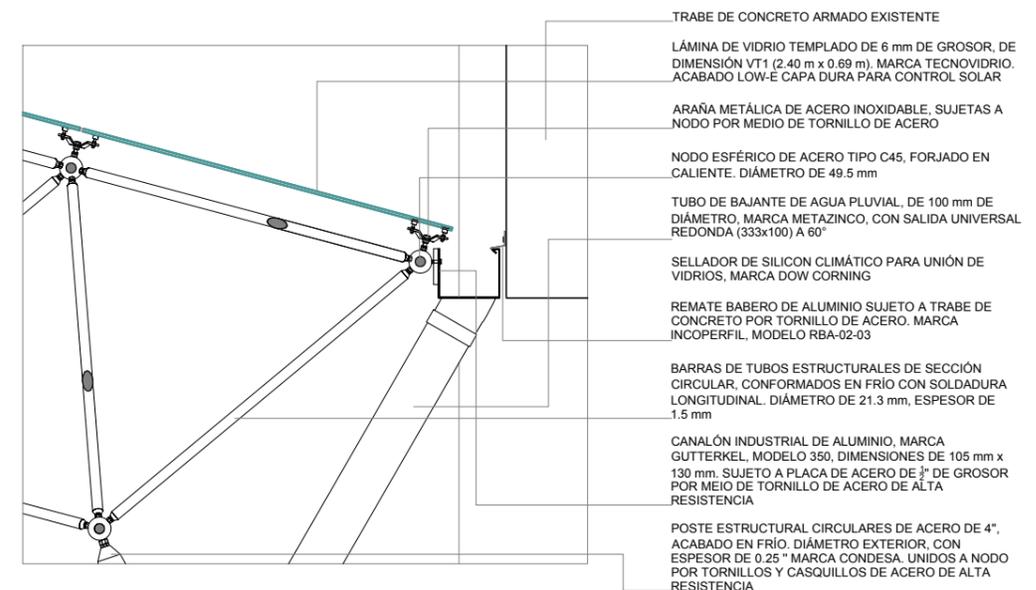
CLAVE  
**IN1**



CORTE POR FACHADA 1, EJE C' (ESCALA 1 : 50)



DETALLE 1 - UNIÓN DE NODO ESTRUCTURAL PRINCIPAL A COLUMNA DE APOYO (ESCALA 1 : 15)



DETALLE 2 - UNIÓN DE ESTRUCTURA ESPACIAL TRIDIMENSIONAL A MURO (ESCALA 1 : 15)

cubierta  
NUEVO EDIFICIO  
"UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO

ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA

DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO

CORTE POR FACHADA - DETALLES

FECHA

25/08/2015

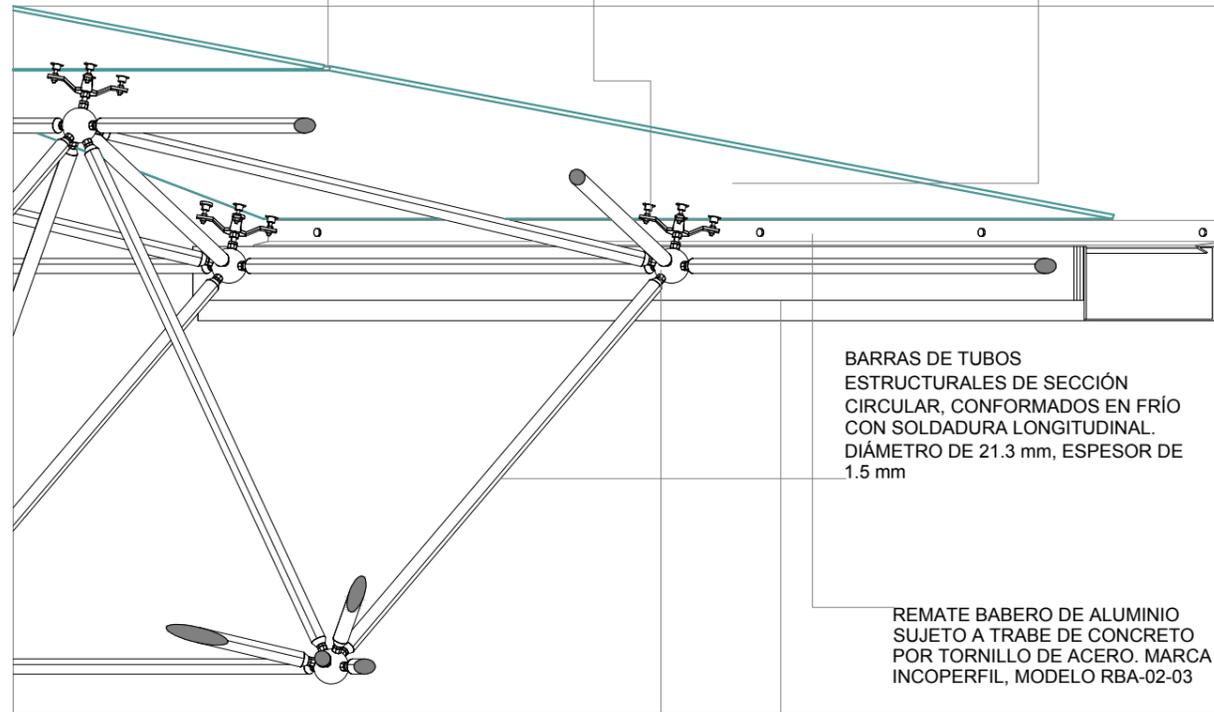
CLAVE

D1

SELLADOR DE SILICON CLIMÁTICO PARA UNIÓN DE VIDRIOS, MARCA DOW CORNING

ARAÑA METÁLICA DE ACERO INOXIDABLE, SUJETAS A NODO POR MEDIO DE TORNILLO DE ACERO

LÁMINA DE VIDRIO TEMPLADO DE 6 mm DE GROSOR, DE DIMENSIÓN VT1 (2.40 m x 0.69 m). MARCA TECNOVIDRIO. ACABADO LOW-E CAPA DURA PARA CONTROL SOLAR



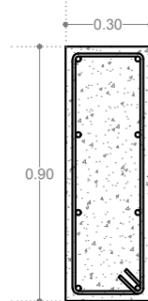
BARRAS DE TUBOS ESTRUCTURALES DE SECCIÓN CIRCULAR, CONFORMADOS EN FRÍO CON SOLDADURA LONGITUDINAL. DIÁMETRO DE 21.3 mm, ESPESOR DE 1.5 mm

REMATE BABERO DE ALUMINIO SUJETO A TRABE DE CONCRETO POR TORNILLO DE ACERO. MARCA INCOPERFIL, MODELO RBA-02-03

DETALLE 3 - SECCIÓN TRIDIMENSIONAL DE ESTRUCTURA ESPACIAL (ESCALA 1 : 10)

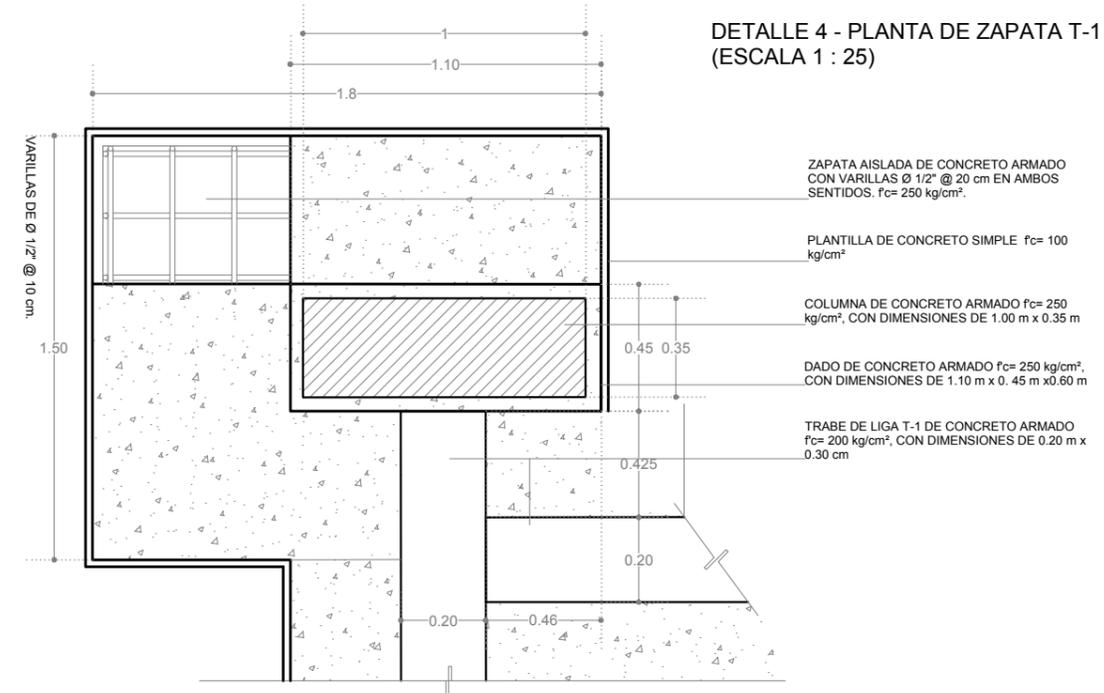
NODO ESFÉRICO DE ACERO TIPO C45, FORJADO EN CALIENTE. DIÁMETRO DE 49.5 mm

CANALÓN INDUSTRIAL DE ALUMINIO, MARCA GUTTERKEL, MODELO 350. DIMENSIONES DE 105 mm x 130 mm. SUJETO A PLACA DE ACERO DE 1/2" DE GROSOR POR MEIO DE TORNILLO DE ACERO DE ALTA RESISTENCIA



DETALLE DE TRABE DE LIGA T-1 DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 0.30 m x 0.90 cm. ARMADO DE 8 VARILLAS DE ACERO DE 1"

DETALLE 4 - PLANTA DE ZAPATA T-1 (ESCALA 1 : 25)



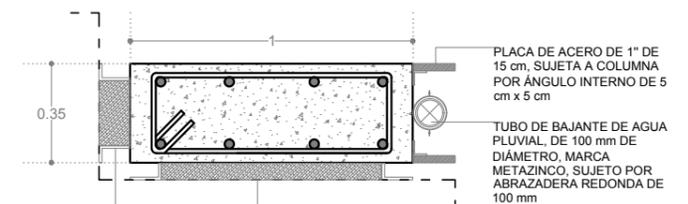
ZAPATA AISLADA DE CONCRETO ARMADO CON VARILLAS  $\phi 1/2" @ 20 \text{ cm}$  EN AMBOS SENTIDOS.  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ .

PLANTILLA DE CONCRETO SIMPLE  $f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$

COLUMNA DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 1.00 m x 0.35 m

DADO DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 1.10 m x 0.45 m x 0.60 m

TRABE DE LIGA T-1 DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 0.20 m x 0.30 cm

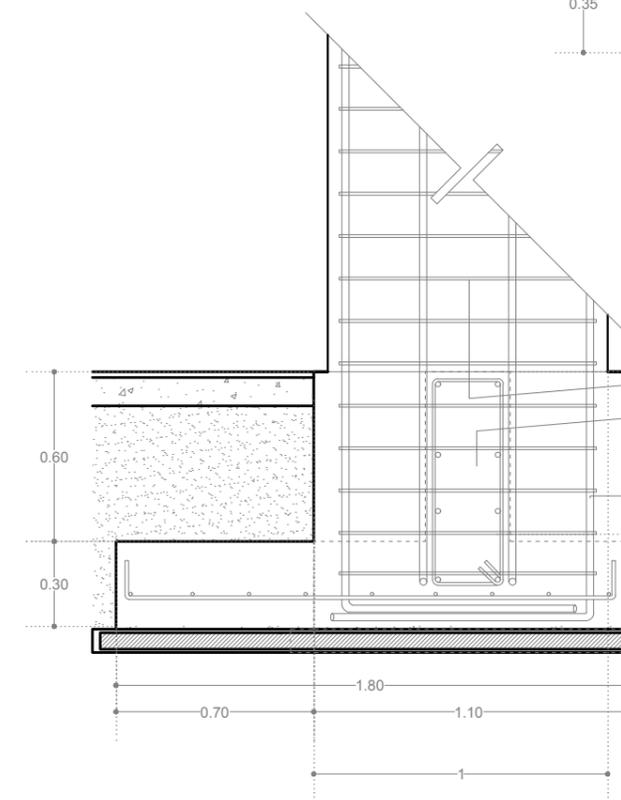


DETALLE DE COLUMNA DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 1.00 m x 0.35 m. ARMADO DE 8 VARILLAS DE ACERO DE 1"

PLACA DE ACERO DE 1" DE 15 cm. SUJETA A COLUMNA POR ÁNGULO INTERNO DE 5 cm x 5 cm

TUBO DE BAJANTE DE AGUA PLUVIAL, DE 100 mm DE DIÁMETRO, MARCA METAZINCO, SUJETO POR ABRAZADERA REDONDA DE 100 mm

JUNTA DE DILATACIÓN SÍSMICA CON ÁNGULOS DE ALUMINIO DE 3 mm, RELLENA CON ESPUMA SELLANTE MARCA PROMAFOAM



COLUMNA DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 1.00 m x 0.35 m. ARMADO CON VARILLAS DE  $\phi 1" @ 25 \text{ cm}$ , EST. No 3 @ 15 cm

TRABE DE LIGA T-1 DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 0.30 m x 0.90 cm

DADO DE CONCRETO ARMADO  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , CON DIMENSIONES DE 1.10 m x 0.45 m x 0.60 m.

ZAPATA AISLADA DE CONCRETO ARMADO CON VARILLAS  $\phi 1/2" @ 20 \text{ cm}$  EN AMBOS SENTIDOS.  $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ .

PLANTILLA DE CONCRETO SIMPLE  $f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$ , DE 5 cm DE ALTURA

DETALLE 5 - SECCIÓN DE ZAPATA T-1 (ESCALA 1 : 25)

cubierta  
NUEVO EDIFICIO  
"UNIDAD DE POSGRADO"

UNAM - FACULTAD DE ARQUITECTURA

TALLER LUIS BARRAGÁN

ALUMNO

ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA

ASESORA

DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO

PLANO

DETALLES

FECHA

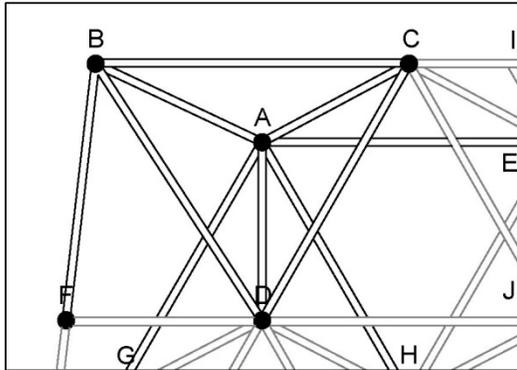
25/08/2015

CLAVE

D2

## f) ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CUBIERTA POR MÉTODO DE F = 0

Se plantea analizar un módulo tetraédrico de la estructura para observar el comportamiento de los esfuerzos en las barras, el método a utilizar se basa en el equilibrio estático de la estructura, teniendo como  $\Sigma F = 0$ .



MÓDULO TETRAÉDRICO 1

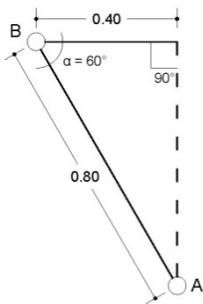
Imagen 84. Módulo tetraédrico 1, para análisis individual.

### CÁLCULO DE ESFUERZOS EN BARRAS

- Condición de equilibrio:  $\Sigma F = 0$
- Propuesta de simplificación por simetría.
- Análisis individual por módulo.

Área de cubierta A-4 = 49.27 m<sup>2</sup>

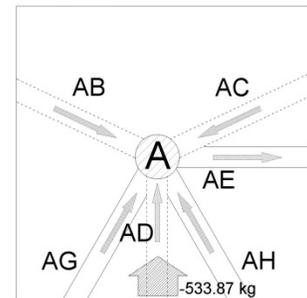
Peso A-4 = 1601.61 kg / 3 = 533.87 kg



$$\cos \alpha = \frac{ca}{h} = \frac{0.40 \text{ m}}{0.80 \text{ m}} = 0.50$$

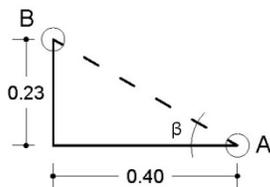
$$\alpha = 60^\circ$$

NODO A



C-1 (A-4): 1601.61 kg / (3 postes) = 533.87 kg

Imagen 85. Diagrama nodo A.



$$\tan \beta = \frac{co}{ca} = \frac{0.23 \text{ m}}{0.40 \text{ m}} = 0.575$$

$$\beta = 30^\circ$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$\Sigma F_z = -533.87 \text{ kg} + AC \text{ sen } 60^\circ + AD \text{ sen } 60^\circ + AB \text{ sen } 60^\circ = 0$$

$$\Sigma F_z = -533.87 \text{ kg} + \text{sen } 60^\circ (AC + AD + AB) = 0$$

Estableciendo (simplificación por simetría)  $AC = AD = AB$

$$AC + AD + AB = \frac{533.87 \text{ kg}}{\text{sen } 60^\circ} = 616.46 \text{ kg}$$

$$\frac{616.46 \text{ kg}}{3} = 205.48 \text{ kg} = AC, AD, AB$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = AD \text{ sen } 60^\circ + AB \text{ sen } 60^\circ \text{ sen } 30^\circ - AC \text{ sen } 60^\circ \text{ sen } 30^\circ - AG \cos 30^\circ - AH \cos 30^\circ = 0$$

$$\Sigma F_y = 177.95 \text{ kg} + 88.97 \text{ kg} - 88.97 \text{ kg} - AG \cos 30^\circ - AH \cos 30^\circ = 0$$

$$\Sigma F_y = 177.95 \text{ kg} - AG \cos 30^\circ - AH \cos 30^\circ = 0$$

$$\Sigma F_y = 177.95 \text{ kg} - \cos 30^\circ (AH + AG) = 0$$

Estableciendo  $AH = AG$

$$AH + AG = \frac{-177.95 \text{ kg}}{-\cos 30^\circ} = 203.17 \text{ kg}$$

$$\frac{203.17 \text{ kg}}{2} = 101.58 \text{ kg} = AH, AG$$

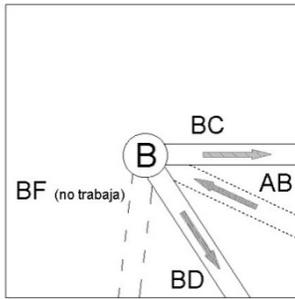
$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_x = AB \text{ sen } 60^\circ \cos 30^\circ - AC \text{ sen } 60^\circ \cos 30^\circ + AG \cos 60^\circ - AH \cos 60^\circ + AE = 0$$

$$\Sigma F_x = 154.11 \text{ kg} - 154.11 \text{ kg} + 50.79 \text{ kg} - 50.79 \text{ kg} - AE = 0$$

$$AE = 0 \text{ (no trabaja a esfuerzo)}$$

NODO B



$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = -AB \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{sen} 30^\circ + BD \operatorname{cos} 30^\circ = 0$$

$$BD = \frac{205.48 \operatorname{kg} \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{sen} 30^\circ}{\operatorname{cos} 30^\circ} = 102.74 \operatorname{kg}$$

$$BD = CD = 102.74 \operatorname{kg}$$

Imagen 86. Diagrama nodo B.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_x = BC + BD \operatorname{cos} 60^\circ - AB \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{cos} 30^\circ = 0$$

$$\Sigma F_x = BC + BD \operatorname{cos} 60^\circ - AB \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{cos} 30^\circ = 0$$

$$BC = -102.74 \operatorname{kg} \operatorname{cos} 60^\circ + 205.48 \operatorname{kg} \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{cos} 30^\circ$$

$$BC = 102.74 \operatorname{kg}$$

TABLA DE ESFUERZOS EN BARRAS	
AC	205.48 kg
AD	205.48 kg
AB	205.48 kg
AG	101.58 kg
AH	101.58 kg
BD	102.74 kg
CD	102.74 kg
BC	102.74 kg
AE	0

Tabla 24. Tabla de esfuerzos en barras.

Conclusión: A través del análisis del módulo tetraédrico, podemos deducir que las cargas aplicadas sobre los nodos se distribuyen de manera homogénea sobre la estructura.

## **g) ANÁLISIS DE CUBIERTA POR EFECTOS DE VIENTO**

Dada la ubicación en altura de la cubierta del proyecto, es necesario realizar un breve análisis por efectos de viento para observar el comportamiento de la estructura y evitar cargas accidentales que deterioren y/o fracturen la cubierta de láminas de vidrio. Utilizando un software basado en hojas de cálculo (Excel), proporcionado por la compañía Protekt (especializada en distribución de láminas de vidrio), se procede a realizar un cálculo de las cargas presentadas sobre la estructura, obteniendo como resultado parámetros que sigan la normativa establecida por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y las Normas técnicas complementarias para diseño por Viento.

El programa posee dos métodos de cálculo, el método estático según el Reglamento de Construcciones para el D.F. y el método analítico según ASCE 7-05 (E.U.A capítulo 6 - cargas de viento).

## Programa para calcular Cargas de Viento y Espesores de Vidrios

proporcionado gratuitamente por [www.protekt.com.mx](http://www.protekt.com.mx) (versión 2.2)

PROYECTO DE CUBIERTA NUEVO EDIFICIO "UNIDAD DE POSGRADO"
ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA
Estudio preliminar

### Método analítico según ASCE 7-05

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Desnivel H (m) <b>20</b></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Inclinación (grados) <b>5°</b></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Largo L (m) <b>229</b></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Ubicación del Edificio (X en % de L) <b>70%</b></td> </tr> </table>	Desnivel H (m) <b>20</b>	Inclinación (grados) <b>5°</b>	Largo L (m) <b>229</b>	Ubicación del Edificio (X en % de L) <b>70%</b>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Importancia de la Construcción <b>Cat. III</b></td> <td style="padding: 2px;">Altitud regional (m) <b>2,200</b></td> <td style="padding: 2px;">Rugosidad del Terreno <b>C</b></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Tipo de Topografía <b>Tipo 4</b></td> <td style="padding: 2px;">Altura de la Instalación del Vidrio (m) <b>18</b></td> <td style="padding: 2px;">Velocidad regional (km/h) <b>130</b></td> </tr> </table>	Importancia de la Construcción <b>Cat. III</b>	Altitud regional (m) <b>2,200</b>	Rugosidad del Terreno <b>C</b>	Tipo de Topografía <b>Tipo 4</b>	Altura de la Instalación del Vidrio (m) <b>18</b>	Velocidad regional (km/h) <b>130</b>																														
Desnivel H (m) <b>20</b>																																											
Inclinación (grados) <b>5°</b>																																											
Largo L (m) <b>229</b>																																											
Ubicación del Edificio (X en % de L) <b>70%</b>																																											
Importancia de la Construcción <b>Cat. III</b>	Altitud regional (m) <b>2,200</b>	Rugosidad del Terreno <b>C</b>																																									
Tipo de Topografía <b>Tipo 4</b>	Altura de la Instalación del Vidrio (m) <b>18</b>	Velocidad regional (km/h) <b>130</b>																																									
<b>Presión nominal en kg/m<sup>2</sup> (para un Coeficiente de Presión de 1.00)    87.0</b>																																											
todas las franjas de los bordes tienen un ancho de b/10 excepto indicado diferente																																											
<p><b>Edificios con H ≤ 18.3 m</b></p>	<p><b>Edificios con H &gt; 18.3 m</b></p>																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Inclinación <math>\theta</math> del Techo (grados) <b>8° a 27°</b></td> </tr> </table>	Inclinación $\theta$ del Techo (grados) <b>8° a 27°</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Edificio A ... abierto PC ... parc. cerrado C ... cerrado <b>A</b></td> </tr> </table>	Edificio A ... abierto PC ... parc. cerrado C ... cerrado <b>A</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Relación a/b para Arcos <b>0.07</b></td> </tr> </table>	Relación a/b para Arcos <b>0.07</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Tamaño del Vidrio (m<sup>2</sup>) <b>1.7</b></td> </tr> </table>	Tamaño del Vidrio (m <sup>2</sup> ) <b>1.7</b>																																				
Inclinación $\theta$ del Techo (grados) <b>8° a 27°</b>																																											
Edificio A ... abierto PC ... parc. cerrado C ... cerrado <b>A</b>																																											
Relación a/b para Arcos <b>0.07</b>																																											
Tamaño del Vidrio (m <sup>2</sup> ) <b>1.7</b>																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Presión de Diseño en kg/m<sup>2</sup></th> <th style="width: 15%;">Zona A</th> <th style="width: 15%;">Zona B</th> <th style="width: 15%;">Zona C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3" style="text-align: center;"><b>H ≤ 18.3 m</b></td> <td style="text-align: center;">Paredes</td> <td style="text-align: center;">- 91.0</td> <td style="text-align: center;">- 113.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cubierta inclinada</td> <td style="text-align: center;">- 76.0</td> <td style="text-align: center;">- 136.0</td> <td style="text-align: center;">- 212.0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cubierta en Arco</td> <td style="text-align: center;">- 68.0</td> <td style="text-align: center;">- 136.0</td> <td style="text-align: center;">- 212.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;"><b>H &gt; 18.3 m</b></td> <td style="text-align: center;">Paredes</td> <td style="text-align: center;">± 78.0</td> <td style="text-align: center;">- 156.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cubierta</td> <td style="text-align: center;">- 115.0</td> <td style="text-align: center;">- 190.0</td> <td style="text-align: center;">- 265.0</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">Muros Rompevientos Barandales</td> <td style="text-align: center;">en Techos y Balcones</td> <td style="text-align: center;">± 268.0</td> <td style="text-align: center;">± 344.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">sobre el suelo, máx. 4.5 m de Altura</td> <td style="text-align: center;">± 118.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><b>Presión mínima a utilizar</b></td> <td style="text-align: center;">± 49.0</td> <td style="text-align: center;">± 49.0</td> <td style="text-align: center;">± 49.0</td> </tr> </tbody> </table>				Presión de Diseño en kg/m <sup>2</sup>	Zona A	Zona B	Zona C	<b>H ≤ 18.3 m</b>	Paredes	- 91.0	- 113.0	-----	Cubierta inclinada	- 76.0	- 136.0	- 212.0	Cubierta en Arco	- 68.0	- 136.0	- 212.0	<b>H &gt; 18.3 m</b>	Paredes	± 78.0	- 156.0	-----	Cubierta	- 115.0	- 190.0	- 265.0	Muros Rompevientos Barandales	en Techos y Balcones	± 268.0	± 344.0	-----	sobre el suelo, máx. 4.5 m de Altura	± 118.0	-----	-----	<b>Presión mínima a utilizar</b>		± 49.0	± 49.0	± 49.0
Presión de Diseño en kg/m <sup>2</sup>	Zona A	Zona B	Zona C																																								
<b>H ≤ 18.3 m</b>	Paredes	- 91.0	- 113.0	-----																																							
	Cubierta inclinada	- 76.0	- 136.0	- 212.0																																							
	Cubierta en Arco	- 68.0	- 136.0	- 212.0																																							
<b>H &gt; 18.3 m</b>	Paredes	± 78.0	- 156.0	-----																																							
	Cubierta	- 115.0	- 190.0	- 265.0																																							
Muros Rompevientos Barandales	en Techos y Balcones	± 268.0	± 344.0	-----																																							
	sobre el suelo, máx. 4.5 m de Altura	± 118.0	-----	-----																																							
<b>Presión mínima a utilizar</b>		± 49.0	± 49.0	± 49.0																																							

27-abr-2015

Tabla 25. Protekt. Programa para calcular cargas de viento y espesores de vidrio. Método analítico según ASCE 7-05.

## Programa para calcular Cargas de Viento y Espesores de Vidrios

proporcionado gratuitamente por [www.protekt.com.mx](http://www.protekt.com.mx) (versión 2.2)

PROYECTO DE CUBIERTA NUEVO EDIFICIO "UNIDAD DE POSGRADO"
ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA
Estudio preliminar

### Método estático según el Reglamento de Construcciones para el D.F.

<b>Importancia de la Construcción</b> Tipo A	<b>Altitud regional</b> (m) 2,200	<b>Topografía del Terreno</b> T3																																						
<b>Rugosidad del Terreno</b> R2	<b>Altura de la Instalación del Vidrio</b> (m) 18	<b>Velocidad regional</b> (km/h) 130																																						
<b>Presión nominal en kg/m<sup>2</sup> (para un Coeficiente de Presión de 1.00)</b> 91.0																																								
todas las franjas de los bordes tienen un ancho de $b/10$ excepto indicado diferente																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><b>Inclinación <math>\theta</math> del Techo</b> (grados) 0° a 30°</td> <td style="text-align: center;"><b>Cantidad de Paredes con Aberturas &gt; 30%</b> 3</td> <td style="text-align: center;"><b>Relación a/b para Arcos</b> 0.07</td> <td style="text-align: center;"><b>Tamaño del Vidrio</b> (m<sup>2</sup>) 1.7</td> </tr> </table>			<b>Inclinación <math>\theta</math> del Techo</b> (grados) 0° a 30°	<b>Cantidad de Paredes con Aberturas &gt; 30%</b> 3	<b>Relación a/b para Arcos</b> 0.07	<b>Tamaño del Vidrio</b> (m <sup>2</sup> ) 1.7																																		
<b>Inclinación <math>\theta</math> del Techo</b> (grados) 0° a 30°	<b>Cantidad de Paredes con Aberturas &gt; 30%</b> 3	<b>Relación a/b para Arcos</b> 0.07	<b>Tamaño del Vidrio</b> (m <sup>2</sup> ) 1.7																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Presión de Diseño en kg/m<sup>2</sup></th> <th style="text-align: center;">Zona A</th> <th style="text-align: center;">Zona B</th> <th style="text-align: center;">Zona C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">H &lt; 20 m</td> <td style="text-align: center;">Paredes</td> <td style="text-align: center;">- 201.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cubierta inclinada</td> <td style="text-align: center;">- 147.0</td> <td style="text-align: center;">- 279.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cubierta en Arco</td> <td style="text-align: center;">- 121.0</td> <td style="text-align: center;">- 137.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center; vertical-align: middle;">H ≥ 20 m</td> <td style="text-align: center;">Paredes</td> <td style="text-align: center;">+ 126.0</td> <td style="text-align: center;">- 204.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Cubierta</td> <td style="text-align: center;">- 192.0</td> <td style="text-align: center;">- 242.0</td> <td style="text-align: center;">- 366.0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Muros Rompevientos Barandales</td> <td style="text-align: center;">en Techos y Balcones sobre el suelo, máx. 5 m de Altura</td> <td style="text-align: center;">± 270.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">± 187.0</td> <td style="text-align: center;">-----</td> <td style="text-align: center;">-----</td> </tr> </tbody> </table>				Presión de Diseño en kg/m <sup>2</sup>		Zona A	Zona B	Zona C	H < 20 m	Paredes	- 201.0	-----	-----	Cubierta inclinada	- 147.0	- 279.0	-----	Cubierta en Arco	- 121.0	- 137.0	-----	H ≥ 20 m	Paredes	+ 126.0	- 204.0	-----	Cubierta	- 192.0	- 242.0	- 366.0	Muros Rompevientos Barandales	en Techos y Balcones sobre el suelo, máx. 5 m de Altura	± 270.0	-----	-----			± 187.0	-----	-----
Presión de Diseño en kg/m <sup>2</sup>		Zona A	Zona B	Zona C																																				
H < 20 m	Paredes	- 201.0	-----	-----																																				
	Cubierta inclinada	- 147.0	- 279.0	-----																																				
	Cubierta en Arco	- 121.0	- 137.0	-----																																				
H ≥ 20 m	Paredes	+ 126.0	- 204.0	-----																																				
	Cubierta	- 192.0	- 242.0	- 366.0																																				
Muros Rompevientos Barandales	en Techos y Balcones sobre el suelo, máx. 5 m de Altura	± 270.0	-----	-----																																				
		± 187.0	-----	-----																																				

27-abr-2015

Tabla 26. Protekt. Programa para calcular cargas de viento y espesores de vidrio. Método estático según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

## Programa para calcular Cargas de Viento y Espesores de Vidrios

proporcionado gratuitamente por [www.protekt.com.mx](http://www.protekt.com.mx) (versión 2.2)

PROYECTO DE CUBIERTA NUEVO EDIFICIO "UNIDAD DE POSGRADO"
ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA
Estudio preliminar

<b>Variables</b>	<table border="1"> <tr> <td>Ancho del Vidrio (m)</td> <td>Alto del Vidrio (m)</td> <td>Presión de Diseño (kg/m<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>0.7</td> <td>2.4</td> <td>130.0</td> </tr> </table>	Ancho del Vidrio (m)	Alto del Vidrio (m)	Presión de Diseño (kg/m <sup>2</sup> )	0.7	2.4	130.0
Ancho del Vidrio (m)	Alto del Vidrio (m)	Presión de Diseño (kg/m <sup>2</sup> )					
0.7	2.4	130.0					

	<table border="1"> <tr> <td>Tamaño del Vidrio</td> <td>1.68</td> <td>m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Carga total al Vidrio</td> <td>218</td> <td>kg</td> </tr> </table>	Tamaño del Vidrio	1.68	m <sup>2</sup>	Carga total al Vidrio	218	kg																														
Tamaño del Vidrio	1.68	m <sup>2</sup>																																			
Carga total al Vidrio	218	kg																																			
<b>Espesores y su Flexión (ambos en mm)</b>	<table border="1"> <tr> <td></td> <td colspan="2"><b>monolítico</b></td> <td colspan="2"><b>laminado</b></td> </tr> <tr> <td><b>Mínimos para evitar Fracturas</b></td> <td><b>Espesor</b></td> <td><b>Flexión</b></td> <td><b>Espesor</b></td> <td><b>Flexión</b></td> </tr> <tr> <td>Vidrio recocido</td> <td>5.0</td> <td>6.3</td> <td>3 + 3</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td>Vidrio semi templado</td> <td>3.0</td> <td>19.8</td> <td>3 + 3</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td>Vidrio templado</td> <td>3.0</td> <td>19.8</td> <td>3 + 3</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td><b>Mínimo para Flexión ≤ 1% del lado corto</b></td> <td>5.0</td> <td>6.3</td> <td>3 + 3</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td><b>Flexión para Espesor específico</b></td> <td>10.0</td> <td>0.6</td> <td>3 + 3</td> <td>3.6</td> </tr> </table>		<b>monolítico</b>		<b>laminado</b>		<b>Mínimos para evitar Fracturas</b>	<b>Espesor</b>	<b>Flexión</b>	<b>Espesor</b>	<b>Flexión</b>	Vidrio recocido	5.0	6.3	3 + 3	3.6	Vidrio semi templado	3.0	19.8	3 + 3	3.6	Vidrio templado	3.0	19.8	3 + 3	3.6	<b>Mínimo para Flexión ≤ 1% del lado corto</b>	5.0	6.3	3 + 3	3.6	<b>Flexión para Espesor específico</b>	10.0	0.6	3 + 3	3.6	<p>Flexión monolítico</p> <p>&gt; 1%</p> <p>&gt; 1%</p>
	<b>monolítico</b>		<b>laminado</b>																																		
<b>Mínimos para evitar Fracturas</b>	<b>Espesor</b>	<b>Flexión</b>	<b>Espesor</b>	<b>Flexión</b>																																	
Vidrio recocido	5.0	6.3	3 + 3	3.6																																	
Vidrio semi templado	3.0	19.8	3 + 3	3.6																																	
Vidrio templado	3.0	19.8	3 + 3	3.6																																	
<b>Mínimo para Flexión ≤ 1% del lado corto</b>	5.0	6.3	3 + 3	3.6																																	
<b>Flexión para Espesor específico</b>	10.0	0.6	3 + 3	3.6																																	

los cálculos de los Espesores y Flexiones están basados en la Norma Canadiense CGSB-12.20-M89

los resultados son prácticamente idénticos a ASTM E 1300-07

Tabla 27. Programa para calcular cargas de viento y espesores de vidrio. Espesores y flexión del vidrio.

### MÉTODO ANALÍTICO SEGÚN ASCE 7-05 (parámetros)

- Importancia de la construcción: Categoría III (construcciones con mayores riesgos por alta ocupación de gente).
- Altitud regional: 2200 msnm
- Rugosidad del terreno: C
- Tipo de topografía: Tipo 4

- Altura de la instalación del vidrio: 18 m
- Velocidad regional: 130 km/h (máx. México, D.F.)

Presión nominal en  $\text{kg/m}^2 = 87.0$

- Inclinación del techo:  $8^\circ$  a  $27^\circ$
- Edificio: A – abierto
- Tamaño del vidrio:  $1.7 \text{ m}^2$

**Presión de diseño en  $\text{kg/m}^2 = -136 \text{ kg/m}^2$  (succión). Zona B, cubierta en arco.**

MÉTODO ESTÁTICO SEGÚN EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL D.F. (parámetros)

- Importancia de la construcción: A
- Altitud regional: 2200 msnm
- Topografía del terreno: T3
- Rugosidad del terreno: R2
- Altura de la instalación del vidrio: 18 m
- Velocidad regional: 130 km/h (máx. México, D.F.)

Presión nominal en  $\text{kg/m}^2 = 91.0$

- Inclinación del techo: 0 a  $30^\circ$
- Cantidad de paredes con aberturas > 30%: 3
- Tamaño del vidrio:  $1.7 \text{ m}^2$

**Presión de diseño en  $\text{kg/m}^2 = -137 \text{ kg/m}^2$  (succión). Zona B, cubierta en arco.**

## CÁLCULO DE CARGA DE VIENTO Y ESPESOR DE VIDRIO (parámetros)

- Área del vidrio: 1.68 m<sup>2</sup>
- Presión de diseño (nominal): 130 km/h (máx. México, D.F.)

**Carga total al vidrio = 218 kg**

- Espesor mínimo para evitar fracturas:
  - **Monolítico de 3 mm**
  - **Laminado de 3 + 3 mm**

## VI. CONCLUSIONES

Los sistemas estructurales espaciales tridimensionales ofrecen numerosos beneficios aplicables a la Arquitectura Contemporánea. La evolución de estos sistemas ha permitido la creación de edificaciones de grandes dimensiones a bajo costo y de rápida construcción, teniendo como ejemplo precursor la torre Eiffel en altura con 324 metros, edificada en poco más de dos años, y en la actualidad el Astrodome de Texas con un claro superior a los 200 metros.

La posibilidad de utilizar la geometría como base estructural de un edificio permite amplia diversidad de usos, desde refugios temporales y desmontables, hasta grandes estructuras como puentes o estadios, así mismo de garantizar gran rigidez utilizando formas como el triángulo o núcleos tetraédricos con gran capacidad de carga. Dado que los elementos de estos sistemas trabajan de manera conjunta, estas estructuras permiten una distribución de cargas de manera uniforme, otorgando gran estabilidad; al ser estructuras hiperestáticas aunado al bajo peso de sus componentes (aproximadamente 1/10 parte del peso de un sistema estructural de concreto armado) se asegura un buen comportamiento ante efectos sísmicos y/o por viento.

El bajo número de componentes con dimensiones y formas similares, permite la estandarización, dando como resultado la reducción del costo económico de producción y ensamble. La capacidad de desmontabilidad de estas estructuras da la posibilidad de crear edificaciones efímeras y fácilmente transportables, haciéndolas ideales para utilizarse como refugios en zonas de desastre.

Basadas en la estabilidad de las figuras geométricas (principalmente trianguladas, como el tetraedro, octaedro e icosaedro), dan la posibilidad de variedad de diseños, utilizando únicamente los recursos necesarios para su construcción (softwares especializados, herramienta sencilla y mano de obra capacitada, que al ser un proceso de armado iterativo se obtiene ahorro económico y de tiempo); sin comprometer estructuralmente el conjunto y ofreciendo gran capacidad de composición formal.

A través del método de investigación desarrollado se logró el cumplimiento de los objetivos planteados: investigando el origen de estos sistemas (aspecto económico, como ahorro de material y tiempo de ejecución de la obra) y su proceso de desarrollo por investigadores y especialistas en estructuras y matemáticas, originando mayor grado de perfección técnica para la construcción en serie de estos sistemas estructurales.

Al analizar la geometría, composición y función de los elementos de una estructura espacial, se concluyó de qué manera trabajan y cómo se reparten los esfuerzos de compresión y tracción, y cuál es el proceso de diseño y los aspectos funcionales, estructurales y económicos a considerar para su construcción.

Se analizaron edificios análogos para observar el uso de estas estructuras en el aspecto funcional y estético, para el desarrollo y la propuesta del proyecto de la cubierta espacial tridimensional para la Unidad de Posgrado de la UNAM.

Durante el siglo XX la cantidad de sistemas estructurales se multiplicó notablemente, diversificando las estructuras según el uso del edificio por sus características técnicas, procurando a las estructuras espaciales para librar grandes claros, reducción de peso y menor tiempo de construcción. La investigación dio como resultado para el proyecto, la propuesta de una cubierta espacial con la retícula: malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros (sistema octa-tetra), en base a la facilidad constructiva del sistema, el aspecto económico y la rigidez geométrica estructural (tetraedro); y el uso del sistema de nodo MERO, por el alto grado de reutilización y desmontabilidad, gran variedad de diseño, bajo grado de dificultad de ensamblaje, herramienta y mano de obra simple, y el ahorro económico en el costo de fabricación.

## REFERENCIAS

- Alacero. (2014). *Historia*. Recuperado el 01 de septiembre de 2014, de Arquitectura en acero: [www.arquitecturaenacero.org/historia](http://www.arquitecturaenacero.org/historia)
- Archdaily. (2014). *¡Feliz cumpleaños Félix Candela!* Recuperado el 06 de octubre de 2014, de [www.archdaily.mx/mx/626588/feliz-cumpleanos-felix-candela](http://www.archdaily.mx/mx/626588/feliz-cumpleanos-felix-candela)
- Archdaily. (2014). *Clásicos de Arquitectura: Palacio de los Deportes / Félix Candela*. Recuperado el 06 de octubre de 2014, de [www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela](http://www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela)
- Buckminster Fuller Institute. (s.f.). *About Fuller*. Recuperado el 21 de septiembre de 2014, de bfi: [bfi.org/about-fuller](http://bfi.org/about-fuller)
- CANACERO. (08 de 2014). *Productores de tubería de acero en México*. Recuperado el 05 de 02 de 2015, de [www.canacero.org.mx/Es/assets/catalogo\\_de\\_tuberia\\_web\\_agosto\\_2014.pdf](http://www.canacero.org.mx/Es/assets/catalogo_de_tuberia_web_agosto_2014.pdf)
- Chargoy, M. (2006). *Sistema celular espacial octa-tetra. Una opción para cubiertas ligeras con estructura tridimensional*. México.: Tesis de maestría, Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Ciudad México. (s.f.). *Monumento a la Revolución*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de [www.ciudadmexico.com.mx/atractivos/revolucion.htm](http://www.ciudadmexico.com.mx/atractivos/revolucion.htm)
- Colegio de Ingenieros Arquitectos de Estado de Hidalgo, A. C. (2014). *Tridilosa, una aportación a la Ingeniería Mexicana*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de CIAEH: [www.ciaeh.org.mx/arquitextos/31-tridilosa-una-aportacion-de-la-ingenieria-mexicana](http://www.ciaeh.org.mx/arquitextos/31-tridilosa-una-aportacion-de-la-ingenieria-mexicana)
- Doval Building. (s.f.). *Estructura metálica. Estructuras espaciales*. Recuperado el 20 de octubre de 2014, de [www.dovalbuilding.com/sistemas/estructura-metalica/espacial](http://www.dovalbuilding.com/sistemas/estructura-metalica/espacial)

- Edificios de México. (s.f.). *Palacio de Hierro. Antiguo Palacio Municipal*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de [www.edemx.com/Vcrz/Orizaba/Edificios/P\\_Hierro.html](http://www.edemx.com/Vcrz/Orizaba/Edificios/P_Hierro.html)
- Engel, H. (2001). *Sistemas de estructuras*. Gustavo Gili.
- Estructuras de acero. (16 de junio de 2007). *Ventajas y Desventajas del Uso de Acero en la Construcción*. Recuperado el 26 de octubre de 2014, de [estructurasacero.blogspot.mx/2007/06/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-acero.html](http://estructurasacero.blogspot.mx/2007/06/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-acero.html)
- Estructuras espaciales Lanik. (2014). *Sistema Ortz y sistema Seo*. Recuperado el 05 de 02 de 2014, de [www.lanik.com/lanik/dm/estructuras-espaciales.asp?cod=1387&nombre=1387&prt=1&sesion=1](http://www.lanik.com/lanik/dm/estructuras-espaciales.asp?cod=1387&nombre=1387&prt=1&sesion=1)
- Fundación Emilio Pérez Piñero. (s.f.). *Fundación Emilio Pérez Piñero*. Recuperado el 14 de septiembre de 2014, de [www.perezpinero.org/](http://www.perezpinero.org/)
- Geometrica. (2007). *Arquitectónico*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de [www.geometrica.com/es/exhibit-and-hospitality](http://www.geometrica.com/es/exhibit-and-hospitality)
- Grupo GMI. (2010). *Industrial*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de GMI: [www.gmi.com.mx/](http://www.gmi.com.mx/)
- Iturriaga, J. (s.f.). *La Aduana Marítima de Tampico, Tamaulipas*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de México Desconocido: [www.mexicodesconocido.com.mx/la-aduana-maritima-de-tampico-tamaulipas.html](http://www.mexicodesconocido.com.mx/la-aduana-maritima-de-tampico-tamaulipas.html)
- Lanik. (s.f.). *Estructuras espaciales*. Recuperado el 20 de octubre de 2014, de [www.lanik.com/lanik/dm/estructuras-espaciales.asp?Cod=1387&Nombre=1387](http://www.lanik.com/lanik/dm/estructuras-espaciales.asp?Cod=1387&Nombre=1387)
- Makowski. (s.f.). *Estructuras espaciales de acero*. Gustavo Gili.
- Melvin, J. H. (2005). *...ismos para entender la Arquitectura*. Madrid: Turner.
- MERO. (06 de marzo de 2014). *Sistema KK*. Recuperado el 05 de febrero de 2015, de [/www.meroitaliana.it/it\\_IT/prodotti/2/sistemicostruttivi](http://www.meroitaliana.it/it_IT/prodotti/2/sistemicostruttivi)
- México Máximo. (2014). *Las cinco estaciones. Las estaciones de ferrocarril en la Ciudad de México*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de [www.mexicomaxico.org/Tranvias/ESTACIONES%20FC/Estaciones.htm](http://www.mexicomaxico.org/Tranvias/ESTACIONES%20FC/Estaciones.htm)

- Mirafuentes, J. (1976). *Estructuras espaciales en Arquitectura*. México, D.F.: División de Estudios Superiores, Escuela Nacional de Arquitectura, UNAM.
- Museo Universitario del Chopo. (s.f.). *Historia del Museo*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de chopo: [www.chopo.unam.mx/historia.html](http://www.chopo.unam.mx/historia.html)
- Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras metálicas*. (2015). México, D.F.
- Obrasweb. (s.f.). *La torre de Banobras vuelve a la vida en Tlatelolco*. Recuperado el 06 de octubre de 2014, de [www.obrasweb.mx/arquitectura/2013/12/13/la-torre-de-banobras-vuelve-a-la-vida-en-tlatelolco](http://www.obrasweb.mx/arquitectura/2013/12/13/la-torre-de-banobras-vuelve-a-la-vida-en-tlatelolco)
- Pastor, M. (2007). *Historia Universal*. México, D.F.: Santillana.
- Peralta, L. (17 de septiembre de 2011). *10 grandes contribuciones mexicanas a la ciencia*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de CNN México: [mexico.cnn.com/tecnologia/2011/09/17/10-tridilosa](http://mexico.cnn.com/tecnologia/2011/09/17/10-tridilosa)
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. (2004). México, D.F.
- Rodríguez Llera, R. (2006). *Breve Historia de la Arquitectura*. Madrid: Libsa.
- Rosen, M. (2005). *Manuel Rosen Morrison. Arquitectura*. México, D.F.: Limusa.
- Rosen, S. (1970). *El mago de la cúpula*. México, D.F.: Diana.
- Ruvalcaba, P., & Ortega, S. (s.f.). *Hoteles con historia e historias*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de Nueva guía del Centro Histórico de México: [guiadelcentrohistorico.mx/kmcero/el-centro-fondo/hoteles-con-historia-e-historias](http://guiadelcentrohistorico.mx/kmcero/el-centro-fondo/hoteles-con-historia-e-historias)
- Skyscrapercity. (2014). *Historia. Olimpiadas de México 1968*. Recuperado el 06 de octubre de 2014, de [www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=690004](http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=690004)
- Space Frame Technology . (s.f.). *Obras*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de [www.spaceframetechnology.com/#!page-13](http://www.spaceframetechnology.com/#!page-13)
- Tata Steel. (2014). *Brief history and development of systems*. Recuperado el 22 de septiembre de 2014, de Tata Steel Construction: [www.tatasteelconstruction.com](http://www.tatasteelconstruction.com)

Ternium México. (08 de 2009). *Guía práctica: tubería y perfiles*. Recuperado el 05 de 02 de 2015, de [www.ternium.com.mx/files/Guia\\_Practica\\_Tuberia\\_y\\_Perfiles.pdf](http://www.ternium.com.mx/files/Guia_Practica_Tuberia_y_Perfiles.pdf)

Tridiacero. (s.f.). *Estructura*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de Tridi-steel: [www.tridisteel.com/](http://www.tridisteel.com/)

Trimetika. (2014). *Obras*. Recuperado el 13 de octubre de 2014, de [www.trimetika.com/obras.php](http://www.trimetika.com/obras.php)

Turistam. (2014). *Faro de Tampico. La huella de Don Porfirio*. Recuperado el 28 de septiembre de 2014, de [www.janambre.com.mx/Turistam/?p=474](http://www.janambre.com.mx/Turistam/?p=474)

Villasana, R. (2012). *Juan José Díaz Infante. Entre el esplendor y la crisis del movimiento racionalista*. Recuperado el 06 de octubre de 2014, de Navegando la Arquitectura: [navegandolaarquitectura.wordpress.com/2012/06/18/juan-jose-diaz-infante-entre-el-esplendor-y-la-tesis-del-movimiento-racionalista/](http://navegandolaarquitectura.wordpress.com/2012/06/18/juan-jose-diaz-infante-entre-el-esplendor-y-la-tesis-del-movimiento-racionalista/)

## ILUSTRACIONES

- Fotografía 1. Hendrick Berlage. Salón principal de la Bolsa de Valores de Ámsterdam (1897-1903). Recuperado de [www.artehistoria.jcyl.es/v2/obras/16981.htm](http://www.artehistoria.jcyl.es/v2/obras/16981.htm)
- Fotografía 2. Henri Labrouste. Interior de la Biblioteca Nacional, París, Francia. (1860-1868). Fessy, G. Cortesía del MoMA. Recuperado de [arquiscopio.com/labrouste-y-la-exposicion-luminosa-de-la-estructura/](http://arquiscopio.com/labrouste-y-la-exposicion-luminosa-de-la-estructura/)
- Fotografía 3. Giuseppe Mengoni. Interior de la Galería Vittorio Emanuele. (1880). Recuperado de [es.wikipedia.org/wiki/Galer%C3%ADa\\_V%C3%ADctor\\_Manuel\\_II](http://es.wikipedia.org/wiki/Galer%C3%ADa_V%C3%ADctor_Manuel_II)
- Fotografía 4. Joseph Paxton. Vista del Palacio de Cristal. (1851). Recuperado de [www.jeffreygreen.co.uk/098-amazon-warriors-from-dahomey-1893](http://www.jeffreygreen.co.uk/098-amazon-warriors-from-dahomey-1893)
- Fotografía 5. Gustave Eiffel. Etapas de construcción de la Torre Eiffel. (1887-1889). Recuperado de [2012profeciasmayasfindelmundo.wordpress.com/2014/04/05/diez-datos-curiosos-sobre-la-torre-eiffel-y-galeria-de-fotos/](http://2012profeciasmayasfindelmundo.wordpress.com/2014/04/05/diez-datos-curiosos-sobre-la-torre-eiffel-y-galeria-de-fotos/)
- Fotografía 6. Graham Bell (1907). Estructura espacial “Torre Bell”, Nueva Escocia, Canadá. Recuperado de [www.carnetdevol.org/Bell/aeronautical.html](http://www.carnetdevol.org/Bell/aeronautical.html)
- Fotografía 7. Graham Bell. (1907). Armadura espacial experimental formada por células tetraédricas y nodos esféricos. Recuperado de [www.carnetdevol.org/Bell/aeronautical.html](http://www.carnetdevol.org/Bell/aeronautical.html)
- Fotografía 8. Fuller. Análisis: Un cilindro con la misma área de superficie que un cubo, encierra un volumen mayor. / Cúpula. Recuperado de [culturacolectiva.com/el-pensamiento-sustentable-de-buckminster-fuller/](http://culturacolectiva.com/el-pensamiento-sustentable-de-buckminster-fuller/)
- Fotografía 9. Fuller. Vista de la cúpula de la Rotonda Ford. De 28 metros de diámetro y ocho y media toneladas de peso. Recuperado de (Rosen S. , 1970).
- Fotografía 10. Fuller. Pabellón norteamericano de la Feria Mundial Canadiense de 1967. Recuperado de [britton.disted.camosun.bc.ca/expo67/unitedstates.html](http://britton.disted.camosun.bc.ca/expo67/unitedstates.html)
- Fotografía 11. Boris Magaš. Cabina de periodistas del estadio Poljud, Croacia. (1979). Recuperado de [commons.wikimedia.org/wiki/File:Poljud\\_-\\_commentary\\_boxes.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Poljud_-_commentary_boxes.JPG)
- Fotografía 12. Barreta & Associates. Fachada-cubierta de cristal con el sistema MERO, del Presidential Circle Office en Hollywood, E.U.A. Recuperado de [emsolo.wordpress.com/category/marching-bands/](http://emsolo.wordpress.com/category/marching-bands/)
- Fotografía 13. Astrodome de Texas, E.U.A. (1963). Etapa de construcción de la cúpula. Recuperado de [www.curatorofshit.com/r-p-astrodome-houston-demolish-eighth-wonder-world/](http://www.curatorofshit.com/r-p-astrodome-houston-demolish-eighth-wonder-world/)
- Fotografía 14. Módulos del sistema Space Deck. Recuperado de (Makowski).

- Fotografía 15. Nodo del sistema Unistrut. Recuperado de [www.tatasteelconstruction.com/en/reference/teaching\\_resources](http://www.tatasteelconstruction.com/en/reference/teaching_resources)
- Fotografía 16. Nodo del sistema Triodetic. Recuperado de [orgoneresearch.com/2009/10/19/a-seattle-octet-truss/](http://orgoneresearch.com/2009/10/19/a-seattle-octet-truss/)
- Fotografía 17. Pérez Piñero. Maqueta. Recuperado de <http://www.vedoque.net/emilio/>
- Fotografía 18. Faro de Tampico, Tamaulipas. (1883). Recuperado de [www.mexicoenfotos.com/antiguas](http://www.mexicoenfotos.com/antiguas)
- Fotografía 19. Aduana de Tampico, Tamaulipas. (1896.) Recuperado de [www.mexicoenfotos.com/antiguas](http://www.mexicoenfotos.com/antiguas)
- Fotografía 20. Antiguo Palacio Municipal de Orizaba, Veracruz. (1894). Recuperado de [www.mexicoenfotos.com/antiguas](http://www.mexicoenfotos.com/antiguas)
- Fotografía 21. Interior, vista de la cubierta del “Palacio de Cristal”, en Santa María la Rivera, Ciudad de México. (1903). Recuperado de [www.chopo.unam.mx/historia.html](http://www.chopo.unam.mx/historia.html)
- Fotografía 22. Fachada del “Palacio de Cristal”, en Santa María la Rivera, Ciudad de México. (1903). Recuperado de [www.chopo.unam.mx/historia.html](http://www.chopo.unam.mx/historia.html)
- Fotografía 23. Interior del Gran Hotel de la Ciudad de México. Recuperado de [www.guiadelcentrohistorico.mx/kmcero/el-centro-fondo/hoteles-con-historia-e-historias](http://www.guiadelcentrohistorico.mx/kmcero/el-centro-fondo/hoteles-con-historia-e-historias)
- Fotografía 24. Vista de la estructura de los andenes de la Estación del F. C. Mexicano. Recuperado de [www.mexicomaxico.org/Tranvias/ESTACIONES%20FC/Estaciones.htm](http://www.mexicomaxico.org/Tranvias/ESTACIONES%20FC/Estaciones.htm)
- Fotografía 25. Adamo Boari. Etapa de construcción del Palacio de Bellas Artes, Ciudad de México. (1910). Recuperado de [www.guiadelcentrohistorico.mx/kmcero/1-el-centro-fondo/proezas-de-ingenier](http://www.guiadelcentrohistorico.mx/kmcero/1-el-centro-fondo/proezas-de-ingenier)
- Fotografía 26. Emile Bernard. Etapa de construcción del Palacio Legislativo, Ciudad de México. Recuperado de [www.ngenespanol.com/266587/Destaca-el-avance-de-la-obra-de-la-estructura-de-acero-con-la-cúpula-de-67-metros-actual-Monumento-a-la-Revolución](http://www.ngenespanol.com/266587/Destaca-el-avance-de-la-obra-de-la-estructura-de-acero-con-la-cúpula-de-67-metros-actual-Monumento-a-la-Revolución).
- Fotografía 27. Félix Candela. Restaurante Los Manantiales. Xochimilco, Ciudad de México. (1958). Recuperado de [gregcookland.com/journal/2009/09/08/felix-candela//](http://gregcookland.com/journal/2009/09/08/felix-candela//) Planta, sección y alzado de la estructura. Recuperado de [somosreynitas.blogspot.mx/2011/05/restaurante-los-manantiales.html](http://somosreynitas.blogspot.mx/2011/05/restaurante-los-manantiales.html)
- Fotografía 28. Mario Pani. Torre Insignia. Ciudad de México. (1962). Recuperado de [www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=595779&page=316](http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=595779&page=316)
- Fotografía 29. Alberca olímpica Francisco Márquez. Recuperado de (Rosen M. , 2005).
- Fotografía 30. Prieto Posada. Domo de las Fuentes Termales. Oaxtepec, Morelos. (1966). Recuperado de [morelostravel.com/que-hacer/empresas/centro-vacacional-imss-oaxtepec](http://morelostravel.com/que-hacer/empresas/centro-vacacional-imss-oaxtepec)
- Fotografía 31. Félix Candela. Palacio de los Deportes. Recuperado de [www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela](http://www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela)

- Fotografía 32. Félix Candela. Palacio de los Deportes. Recuperado de [www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela](http://www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela)
- Fotografía 33. Díaz Infante. Bufete Industrial. Recuperado de [www.arquine.com/blog/juan-jose-diaz-infante-1936-2012/](http://www.arquine.com/blog/juan-jose-diaz-infante-1936-2012/)
- Fotografía 34. Armado de la estructura de una tridilosa, para los entresijos del Hotel de México. Recuperado de [www.pinterest.com/pin/350366045981687254/](http://www.pinterest.com/pin/350366045981687254/)
- Fotografía 35. Vista aérea de las últimas etapas de construcción del Hotel de México (hoy WTC México). Recuperado de [www.pinterest.com/pin/350366045981687254/](http://www.pinterest.com/pin/350366045981687254/)
- Fotografía 36. Hospital 20 de Noviembre. Recuperado de [www.issste-cmn20n.gob.mx/quienes.html](http://www.issste-cmn20n.gob.mx/quienes.html)
- Fotografía 37. Estructura en voladizo de la cubierta de acceso del Auto Show de Monterrey. Recuperado de (Space Frame Technology ).
- Fotografía 38. Interior de la Iglesia de Nuestra Señora de la Esperanza, Ciudad de México. Recuperado de (Trimetika, 2014)
- Fotografía 39. Detalle del nodo del sistema Ortiz de Lanik. Recuperado de (Estructuras espaciales Lanik, 2014).
- Fotografía 40. Proceso de fabricación del nodo esférico del sistema Ortiz de Lanik. (Estructuras espaciales Lanik, 2014).
- Fotografía 41. Casquillos cónicos de las barras del sistema Ortiz de Lanik. (Estructuras espaciales Lanik, 2014).
- Fotografía 42. Lanik I. Patio exterior de Dillard High School. (Estructuras espaciales Lanik, 2014)
- Fotografía 43. Lanik I. Cubierta del patio exterior de Dillard High School. (Estructuras espaciales Lanik, 2014)
- Fotografía 44. Lanik I. Interior de la plaza de toros de I llumbe (Donostia Arena). (Estructuras espaciales Lanik, 2014)
- Fotografía 45. Lanik I. Vista aérea de la plaza de toros de I llumbe (Donostia Arena). (Estructuras espaciales Lanik, 2014)
- Fotografía 46. MERO. Cubierta de la terraza externa del complejo urbano “Education City”, Doha. (MERO, 2014)
- Fotografía 47. MERO. Complejo urbano “Education City”. Vista inferior de la cubierta exterior. (MERO, 2014)
- Fotografía 48. Perry Ellis, Rice / MERO. Tribunas del estadio Sheikh Khalifa. (MERO, 2014)
- Fotografía 49. Perry Ellis, Rice / MERO. Vista desde el campo del estadio Sheikh Khalifa. (MERO, 2014)

- Imagen 1. Gustave Eiffel. Detalles constructivos de la Torre Eiffel, realizada con piezas de hierro forjado unidas con remaches puestos con calor. (1887). Recuperado de [alaniarchitecture.wordpress.com/2010/05/12/torre-eiffel/](http://alaniarchitecture.wordpress.com/2010/05/12/torre-eiffel/)
- Imagen 2. Ejemplos de la “Ley de estabilidad de las armaduras espaciales” por August Föppl. (Mirafuentes, 1976). / Estructura espacial. Recuperado de [reytac.com/Estructuras.htm](http://reytac.com/Estructuras.htm)
- Imagen 3. Diagrama de nodo desarrollado por Konrad Wachsmann para la creación de estructuras en hangares de grandes dimensiones. Recuperado de (Makowski).
- Imagen 4. Fuller. Experimento del “el más compacto paquete de esferas”. Recuperado de (Rosen S. , 1970). / Módulos geométricos. Recuperado de (Makowski).
- Imagen 5. Poliedro de catorce caras, resultado del paquete compacto de 4 2 esferas. Recuperado de (Rosen S. , 1970).
- Imagen 6. Fuller. Equilibrio de fuerzas propuesto dentro del sistema. / Célula tetraédrica. Recuperado de [es.wikipedia.org/wiki/Malla\\_espacial](http://es.wikipedia.org/wiki/Malla_espacial)
- Imagen 7. Fuller. Poliedros resultantes de la geometría inscrita en los paquetes de esferas. Recuperado de (Rosen S. , 1970).
- Imagen 8. Fuller. Segmentación del paquete compacto. Recuperado de (Rosen S. , 1970). / Cúpula geodésica. Recuperado de [litrabo.es.blogspot.mx/2007/01/cpulas.html](http://litrabo.es/blogspot.mx/2007/01/cpulas.html)
- Imagen 9. Fuller. Equilibrio producido por las fuerzas concentradas en las barras y los nodos. . Recuperado de (Rosen S. , 1970). / Cúpula de Montreal. Recuperado de [www.cupulageodesica.com/gal/content/\\_8356225](http://www.cupulageodesica.com/gal/content/_8356225)
- Imagen 10. Fuller. Distribución de las fuerzas de un sistema, a través de triángulos; en un cubo por sus diagonales. Recuperado de (Rosen S. , 1970).
- Imagen 11. Fuller. Célula piramidal con barras, tensores y nodos, trabajando a compresión y tracción. Recuperado de (Rosen S. , 1970).
- Imagen 12. Fuller. Estructura formada por varias células, ejemplo de un sistema de “tensegrity”. Recuperado de (Rosen S. , 1970).
- Imagen 13. Fuller. Estructura espacial formada por el sistema “octet truss”. Recuperado de (Rosen S. , 1970). / Aplicación del sistema en una cubierta en Albuquerque, Nuevo México. Recuperado de [www.gardendome.com/nl/new5.html](http://www.gardendome.com/nl/new5.html)
- Imagen 14. Mengerinhausen. “Progresión geométrica de crecimiento natural”. Recuperado de (Mirafuentes, 1976). / Armadura tridimensional. Recuperado de [dennys-tecnologia.blogspot.mx/2011/01/estructuras-planas-y-espaciales.html](http://dennys-tecnologia.blogspot.mx/2011/01/estructuras-planas-y-espaciales.html)
- Imagen 15. MERO. Nodo MERO, obteniendo los ángulos a 45°, 60° y 90°. Recuperado de (Makowski).

- Imagen 16. Emmerich. Proyecto sobre cúpula estereométrica. Recuperado de [www.frac-centre.fr/collection/collection-art-architecture/index-des-auteurs/auteurs/projets-64.html?authID=66&ensembleID=65](http://www.frac-centre.fr/collection/collection-art-architecture/index-des-auteurs/auteurs/projets-64.html?authID=66&ensembleID=65)
- Imagen 17. Armado del nodo del sistema Nodus. Recuperado de [behoovingmoving.livejournal.com/pics/catalog/501/457125](http://behoovingmoving.livejournal.com/pics/catalog/501/457125)
- Imagen 18. Sistemas patentados por Stéphane Du Château. (Mirafuentes, 1976).
- Imagen 19. Du Château. Proyecto de casa cúbica. Recuperado de (Makowski).
- Imagen 20. Du Château. Módulo del sistema UNIBAT. Recuperado de [www.archistructures.org/details.html](http://www.archistructures.org/details.html)
- Imagen 21. Gimnasio y alberca olímpica. Elevación y corte longitudinal. Recuperado de (Rosen M. , 2005).
- Imagen 22. Manuel Rosen. Perspectiva del proyecto Centro de Convenciones. Recuperado de (Rosen M. , 2005).
- Imagen 23. Manuel Rosen. Sección del proyecto Centro de Convenciones. Recuperado de (Rosen M. , 2005).
- Imagen 24. Descomposición de fuerzas en el espacio, aplicado al nodo de un módulo geométrico estructural. Reinterpretación personal del Arq. Chargoy Rodríguez.
- Imagen 25. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 26. Estructura híbrida. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 27. Ejemplo de estructura incorrectamente denominada híbrida. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 28. Ejemplos de estructuras híbridas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 29. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Cerchas planas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 30. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Cerchas combinadas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 31. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Cerchas Curvas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 32. Esquema de ordenación de la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo. Mallas espaciales. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 33. Mallas espaciales planas, retomadas de la Fig. 69. Estructuras formadas por figuras geométricas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 34. Esquema de arriostramiento de cercha, mediante triangulación, según Heino Engel. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 35. Esquemas de distribución de fuerzas por Heino Engel. Recuperado de (Engel, 2001).

- Imagen 36. Componentes y denominaciones de un sistema de vector activo, por Heino Engel. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 37. Sistema de separación de vectores por Heino Engel. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 38. Influencia de la distribución de las barras, en la distribución de tensiones en los nodos. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 39. Influencia del perfil de la cercha sobre los cordones y las barras. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 40. División geométrica de la cúpula geodésica. Heino Engel. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 41. Parte sustraída de una cúpula geodésica en la Fig. 77, siendo dos módulos triangulares equiláteros unidos. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 42. Sistema de sustentación de una estructura espacial. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 43. Componentes de una ar madura espacial tridimensional. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 44. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas rectangulares. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 45. Malla espacial coplanaria compuesta por prismas rectangulares, Tipo 1. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 46. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 47. Malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares, Tipo 1. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 48. Diagramas de las cerchas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 49. Cercha espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares, Tipo 2. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 50. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y semioctaedros. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 51. Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y semioctaedros. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 52. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y octaedros. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 53. Malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros. Recuperado de (Engel, 2001).

- Imagen 54. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 55. Malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 56. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas con coordenadas diferentes. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 57. Malla espacial coplanaria compuesta por retículas con coordenadas diferentes. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 58. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias basadas en la pirámide hexagonal invertida. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 59. Malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal invertida. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 60. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas hexagonales diferentes. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 61. Malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas hexagonales diferentes. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 62. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por dos retículas triangulares contrapuestas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 63. Malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas triangulares contrapuestas. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 64. Diagramas de las mallas espaciales coplanarias compuestas por una retícula hexagonal y una triangular. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 65. Malla espacial coplanaria compuesta por una retícula hexagonal y una triangular. Recuperado de (Engel, 2001).
- Imagen 66. Modelo tridimensional del sistema KK de MERO. Recuperado de (MERO, 2014).
- Imagen 67. Esquema de elementos que componen al sistema KK. Recuperado de (MERO, 2014).
- Imagen 68. Modelo tridimensional de la composición y ensamblaje de la barra del sistema KK de MERO. Recuperado de (MERO, 2014).
- Imagen 69. Detalle del nodo del sistema Ortiz de Lanik. Recuperado de (Estructuras espaciales Lanik, 2014).
- Imagen 70. Triángulo equilátero. Polígono regular compuesto por tres vértices y tres aristas.
- Imagen 71. Tetraedro regular. Polígono formado por la unión de cuatro triángulos equiláteros.
- Imagen 72. Unión de tres tetraedros regulares por sus vértices sobre un plano.

- Imagen 73. Reticula formada por la unión de células tetraédricas en los ejes x, y.
- Imagen 74. Reticula formada por la unión de células tetraédricas en los ejes x, z.
- Imagen 75. Reticula formada por la unión de células tetraédricas en los ejes y, z.
- Imagen 76. Diseño geométrico de una célula estructural compuesta por barras y nodos, generada por un triángulo equilátero.
- Imagen 77. Relación de proporción de dimensiones del nodo esférico con la barra del sistema Ortiz de Lanik.
- Imagen 78. Detalle en alzado y sección de la conexión de las barras al nodo esférico, sistema Ortiz de Lanik. Recuperado de (Estructuras espaciales Lanik, 2014).
- Imagen 79. Conexión de la barra a los nodos esféricos con las dimensiones establecidas para el proyecto.
- Imagen 80. Vista en planta del núcleo tetraédrico con las dimensiones establecidas para el proyecto.
- Imagen 81. Vista en alzado (eje y) del núcleo tetraédrico con las dimensiones establecidas para el proyecto.
- Imagen 82. Propuesta columna T-1.
- Imagen 83. Propuesta zapata T-1.
- Imagen 84. Módulo tetraédrico 1, para análisis individual.
- Imagen 85. Diagrama nodo A.
- Imagen 86. Diagrama nodo B.

- Tabla 1. Tabla de la sistematización de las estructuras por Heino Engel.
- Tabla 2. Clasificación de todos los sistemas de estructuras en la edificación por Heino Engel.
- Tabla 3. Esquema de claros librados por materiales según la clasificación de estructuras de sistemas de vector activo.
- Tabla 4. Clasificación de los elementos estructurales de un sistema estructural de vector activo
- Tabla 5. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por prismas rectangulares.
- Tabla 6. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares.
- Tabla 7. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por prismas triangulares.
- Tabla 8. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y semioctaedros.
- Tabla 9. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por tetraedros y octaedros.
- Tabla 10. Características de una malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal.
- Tabla 11. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por retículas con coordenadas diferentes.
- Tabla 12. Características de una malla espacial coplanaria basada en la pirámide hexagonal invertida.
- Tabla 13. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas hexagonales diferentes.
- Tabla 14. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por dos retículas triangulares contrapuestas.
- Tabla 15. Características de una malla espacial coplanaria compuesta por una retícula hexagonal y una triangular.
- Tabla 16. Tabla comparativa de retículas para sistemas estructurales espaciales tridimensionales.
- Tabla 17. Tabla comparativa de sistemas de nodos para estructuras espaciales tridimensionales.
- Tabla 18. Características estructurales del tubo de acero estructural, acabado en frío (Ternium).

- Tabla 19. Dimensiones gráficas de los elementos estructurales del núcleo tetraédrico en base al sistema Ortiz.
- Tabla 20. Dimensión y peso de los elementos estructurales del núcleo tetraédrico en base al sistema Ortiz.
- Tabla 21. Dimensiones generales del núcleo tetraédrico con barras a ejes de 80 cm. 118
- Tabla 22. Precálculo de cubierta con barras a ejes de 80 cm.
- Tabla 23. Predimensionamiento de cubierta.
- Tabla 24. Tabla de esfuerzos en barras.
- Tabla 25. Protekt. Programa para calcular cargas de viento y espesores de vidrio. Método analítico según ASCE 7-05.
- Tabla 26. Protekt. Programa para calcular cargas de viento y espesores de vidrio. Método estático según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Recuperado de ([www.protekt.com.mx/vidrio\\_viento\\_resistencia\\_v2.2.xls](http://www.protekt.com.mx/vidrio_viento_resistencia_v2.2.xls))
- Tabla 27. Programa para calcular cargas de viento y espesores de vidrio. Espesores y flexión del vidrio. Recuperado de ([www.protekt.com.mx/vidrio\\_viento\\_resistencia\\_v2.2.xls](http://www.protekt.com.mx/vidrio_viento_resistencia_v2.2.xls))

## GLOSARIO

- **Acero:** Aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono y que adquiere con el temple gran dureza y elasticidad. La fabricación del acero se obtiene tratando el hierro bruto de los Altos Hornos en convertidores espaciales.
- **Acero al carbono:** Acero que contiene un mínimo no especificado de elementos de aleación; el aumento de la proporción de carbono reduce su ductilidad y soldabilidad a pesar de incrementar su resistencia.
- **Acero galvanizado:** Tipo de acero procesado con un tratamiento que consiste en el recubrimiento de varias capas de zinc, las cuales protegen al acero evitando que se oxide.
- **Ángulo diedro:** Ángulo creado por el espacio delimitado por dos semiplanos que parten de una arista común.
- **Armadura:** Estructura formada por un ensamble triangular que distribuye cargas a los soportes por medio de una combinación de miembros conectados por juntas articuladas, configurados en triángulos, de manera que idealmente todos se encuentren trabajando en compresión o en tracción, donde todas las fuerzas de empuje se resuelvan internamente.
- **Arriostramiento:** Acción de rigidizar o estabilizar una estructura mediante el uso de elementos que impidan el desplazamiento o deformación de la misma, como contrafuertes, arbotantes, tirantes metálicos, etc.
- **Baricentro:** Centro de gravedad de un cuerpo. En un triángulo, punto de intersección de sus medianas.
- **Barra:** Elemento estructural alargado y esbelto, generalmente de sección cuadrada, rectangular o cilíndrica, empleado para resistir esfuerzos de compresión o tracción.
- **Cascarón de concreto:** Estructura laminar de concreto armado, que adquiere su resistencia por su forma. Su superficie delgada y curva transfiere las cargas a los apoyos sólo por esfuerzos de tensión y cortante, diferenciándose de las bóvedas tradicionales por su capacidad para resistir esfuerzos de tensión.

- **Catenaria:** Curva que describe una cadena suspendida por sus extremos, sometida a un campo gravitatorio uniforme.
- **Centro de gravedad:** Punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones materiales de un cuerpo, en el que se concentra el peso de un cuerpo, de forma que si el cuerpo se apoyara en ese punto, permanecería en equilibrio.
- **Circuncentro:** Centro de la circunferencia circunscrita a un triángulo. Punto de corte de las tres mediatrices.
- **Cristalografía:** Parte de la geología que estudia la forma y estructura de los minerales al cristalizar.
- **Ductilidad:** Propiedad de aquellos materiales que, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin llegar a romperse.
- **Electro galvanizado:** recubrimiento que se usa para proporcionar gran resistencia a la corrosión de aceros, que consiste en depositar una capa de zinc sobre hierro.
- **Elemento prefabricado:** Elemento que ha sido manufacturado previamente en fábrica o en sitio cercano a la obra, producido en serie para facilitar el montaje o construcción en el lugar de destino.
- **Ergonomía:** Estudio de las condiciones de adaptación de un lugar de trabajo.
- **Esfuerzo de compresión:** Resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección.
- **Esfuerzo de tracción:** Esfuerzo interno al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.
- **Estabilidad:** Propiedad de un cuerpo de mantenerse en equilibrio o de volver a su estado original tras sufrir un esfuerzo.
- **Estandarización:** Proceso mediante el cual se realiza una actividad de manera standard o previamente establecida.

- **Estereometría:** Parte de la geometría que estudia los cuerpos sólidos, sus superficies y sus volúmenes, en el espacio.
- **Estructura desmontable:** Estructura compuesta por elementos que se pueden separar y ensamblar repetidamente, sin afectar su integridad estructural.
- **Estructura espacial:** Se define como una extensión del mismo espacio, donde las fuerzas se propagan en el vacío, con los que se logran campos de fuerzas homogéneos y sin puntos de sobrecarga grandes, lo que provoca que las secciones de los elementos (trabajando a tracción y compresión) disminuyan traduciéndose en una disminución de material.
- **Estructura espacial tridimensional:** Sistema compuesto por líneas de acción de fuerzas unidas comúnmente en sus extremos por nodos ya sean fijos o articulados (en ciertas ocasiones prescinden de estos), basados en la constitución de formas geométricas tridimensionales (poliédricas), que se forman por módulos rígidos triangulares que al multiplicarse constituyen una red o retícula espacial.
- **Estructura geodésica:** Sistemas contruidos por combinaciones triangulares simétricas que proporciona condiciones ideales para la distribución de energía, dichos triángulos se forman uniendo los vértices por medio de cuerdas de círculo máximo sobre la superficie de la esfera, al subdividirlos en triángulos más pequeños, el sistema tiende a ser más resistente.
- **Estructura híbrida:** Sistemas en los que la desviación de las fuerzas se efectúa a través de la acción conjunta de dos o más sistemas diferentes (equiparables en cuanto a su función portante) de distintas familias estructurales.
- **Estructura hiperestática:** Estructura que en estática se encuentra en equilibrio, destacando que las ecuaciones que expone la estática no son suficientes para saber las fuerzas externas y reacciones que posee.
- **Estructura reticulada:** Estructura formada por una serie de vigas entrecruzadas y conectadas entre sí por medio de nudos rígidos, encargadas de transmitir las cargas aplicadas en dos o más direcciones.
- **Fatiga (estructura):** Progresivo cambio estructural o rotura en un área localizada de un material que está sometido a la acción de fuerzas cíclicas repetidas por debajo de su resistencia a la tracción.

- **Grado de esbeltez:** Relación entre la longitud virtual de pandeo y el radio de torsión de la sección transversal de un elemento estructural.
- **Hierro forjado:** Hierro de fibra natural que trabaja a golpes, poniéndolo al rojo vivo y enfriándolo sucesivamente; resiste el óxido y puede soldarse con facilidad. Posee elevada resistencia a la corrosión y muy dúctil, que se emplea en la fabricación de tuberías, remaches, placas metálicas.
- **Hierro fundido:** Obtenido de la primera fusión del hierro en los altos hornos, que contiene más carbono que el acero o que el hierro forjado, se rompe con mayor facilidad.
- **Incentro:** Punto de intersección de las tres bisectrices de un triángulo.
- **Jugendstil:** Variante del Art Nouveau que surgió en Alemania durante la última década del siglo XIX. Buscaba recuperar un estilo de vida más sencillo y menos condicionado por los imperativos comerciales, teniendo optimismo por la juventud y un gran respeto por la naturaleza.
- **Kalikosmia:** Término designado por Díaz Infante para sus estructuras ligeras tubulares a prueba de sismos, mostrando en sus obras la aplicación de la novedosa ingeniería estructural combinada con la estricta estandarización de materiales, generando una arquitectura racionalizada.
- **Malla espacial:** Se define como una retícula tridimensional, compuesta básicamente en tres partes: capa (malla o cordón) superior, capa (malla o cordón) inferior y el elemento que une a ambas, llamada diagonal.
- **Módulo de elasticidad:** Relación entre la fatiga unitaria y la correspondiente deformación unitaria en un material sometido a un esfuerzo que está por debajo del límite de elasticidad del material. También llamado coeficiente de elasticidad, módulo de Young, módulo elástico.
- **Momento de inercia:** Cuerpo alrededor de un eje, suma de los productos obtenida al multiplicar cada elemento de la masa por el cuadrado de su distancia del eje.
- **Nodo (nudo):** Punto donde convergen las conexiones de los elementos estructurales de un sistema.

- **Nodo esférico:** Nodo estructural en forma de esfera (principalmente fabricada en acero), que permite la conexión de las barras a cualquier ángulo, sin interponerse entre ellas.
- **Núcleo tetraédrico (módulo tetraédrico):** Elemento básico geométrico compuesto por elementos estructurales, como barras y nodos, que es estable por sí mismo y permite la conexión con otros de su tipo.
- **Ortocentro:** Punto donde se cortan las tres alturas de un triángulo.
- **Pandeo:** Flexión lateral de un elemento que está sometido a fuerzas de compresión y que produce al colapso del miembro estructural.
- **Paraboloide hiperbólico:** Superficie doblemente reglada, que se puede construir a partir de rectas. Creada a partir de una parábola con la concavidad hacia abajo que se desliza a lo largo de la otra con la concavidad hacia arriba.
- **Pintura al clorocaucho:** Pintura formulada a partir de un derivado clorado del caucho, pigmentos, disolventes aromáticos, agentes plastificantes y aditivos, ideal para impermeabilización.
- **Pintura epóxica:** Pintura principalmente de uso industrial compuesta por una resina epóxica de alta durabilidad y resistencia, y un esmalte epóxico de alto rendimiento.
- **Poliedro:** Cuerpo geométrico cuyas caras son planas y encierran un volumen finito.
- **Racionalismo arquitectónico:** Corriente arquitectónica nacida en Europa tras la Primera Guerra Mundial. Centra su interés en una nueva estética, que basa su fundamento en el uso de determinados materiales de construcción, dándole a la Arquitectura un enfoque estructural, con rechazo a la ornamentación innecesaria.
- **Retícula tridimensional:** Sistemas estructurales compuestos por elementos lineales unidos de tal modo que las fuerzas son transferidas de forma tridimensional.
- **Sinergia:** Término designado por Buckminster Fuller, el cual formula que el trabajo de un sistema entero es mayor a la suma de sus partes por separado.
- **Sistema Triodetic:** Sistema estructural espacial tridimensional desarrollado en Canadá en 1955, en el cual las barras carecen de soldadura, pernos o remaches, uniéndolas al nodo con forma de prisma a presión.

- **Sistema de estructuras de Vector Activo:** Sistemas de elementos lineales, cortos, sólidos y rectos (barras), en los que la transmisión de fuerzas se realiza mediante descomposición vectorial, es decir, a través de una subdivisión en fuerzas unidireccionales (compresiones o tracciones).
- **Sistema estructural:** Unión de elementos estructurales, cuyo objetivo es la integración del trabajo de sus partes para el correcto funcionamiento del conjunto, como la transmisión de fuerzas hacia los apoyos y posteriormente al suelo.
- **Sistema MERO:** Primer sistema modular prefabricado para la construcción de estructuras espaciales, compuestas básicamente por barras y nodos (sistema KK - esférico), siendo montado en el sitio con equipo simple.
- **Sistema Pyramitec:** Sistema creado en 1960 por Stéphane Du Château, que consiste en un reticulado prefabricado de tres direcciones, formado por pirámides invertidas de base hexagonal, fabricadas de tubos metálicos y nodos formados por placas cilíndricas.
- **Sistema Tridimatec:** Sistema creado por Stéphane Du Château, que consiste en una retícula bidireccional o tridireccional, formada por armaduras planas entrelazadas de manera triangular, fabricadas de tubos metálicos y nodos formados por placas cilíndricas.
- **Sistema UNIBAT:** Sistema creado en 1968 por Stéphane Du Château, formado por pirámides de base cuadrada, en el cual sus bases se unen de dos en dos por uno de sus ángulos, y sus vértices se unen por una barra.
- **Sistema Unistrut (Unistrut Space Frame):** Sistema creado en E.U.A., que consta de sencillas barras de perfiles laminados en forma de canal y nodos hechos de una pieza de lámina troquelada, al que se atornillan los canales.
- **Superficie topológica (derivada de topología geométrica):** Se utiliza para identificar a un área de la matemática que estudia la continuidad y otros conceptos originados a partir de ella. Se trata de una especialización vinculada a las propiedades y características que poseen los cuerpos geométricos y que se mantienen sin alteraciones gracias a cambios continuos, con independencia de su tamaño o apariencia.
- **Susceptible:** Elemento capaz de recibir el efecto o acción que se indica.
- **Tensegrity:** Principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los

miembros comprimidos (barras) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes que trabajan a tracción (cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema.

- **Tensión:** Acción de fuerzas opuestas a que está sometido un cuerpo (compresión-tracción).
- **Tetraedro:** Cuerpo geométrico (poliedro) de cuatro caras triangulares.
- **Traslación:** Movimientos directo sin cambios de orientación, manteniendo la forma y el tamaño de las figuras u objetos trasladados, a las cuales deslizan según el vector.
- **Tridilosa:** Sistema estructural de entrepiso tridimensional mixto de acero y concreto, creado por el ingeniero Heberto Castillo. Consiste en un reticulado en dos direcciones, formado por pirámides de base cuadrada en donde los nodos son placas de acero al que convergen las barras horizontales y diagonales unidas con soldadura, y en la parte superior se tiene una delgada capa de concreto de aproximadamente 7 cm de espesor.
- **Vector:** Segmento de recta, contado a partir de un punto del espacio, cuya longitud representa a escala una magnitud, en una dirección determinada y en uno de sus sentidos.