



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**UNAM**  
**POSGRADO**  
arquitectura

**PROGRAMA DE POSGRADO EN ARQUITECTURA**



**SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA**  
**UNA OPCION PARA CUBIERTAS LIGERAS CON ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL**



**I | H**  
HISTÓRICAS

**PROYECTO DE INVESTIGACION**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA**  
**AREA TECNOLOGIA**



**PRESENTA EL INGENIERO ARQUITECTO**  
**MIGUEL ANGEL CHARGOY RODRIGUEZ**

**MEXICO, D. F. 2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# ÍNDICE

## Introducción

### Capítulo I.- TEORÍA DE LAS ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES ESPACIALES **1**

- Antecedente históricos internacional 2
- Antecedente históricos en México 4
- Diagnóstico de las estructuras tridimensionales actuales 15
- Cualidades de las estructuras tridimensionales: Estandarización productiva, Economía, Seguridad estructural, Desarrollo sísmico, Comportamiento hiperestático, Calidad estética e Integración con el concreto armado 16

### Capítulo II.- ANÁLISIS GEOMETRICO DE LAS ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES ESPACIALES **17**

- Definición 18
- Clasificación 20
- Componentes 21
- Principales tipos de reticulado 21
- Cuadro comparativo de los principales tipos de reticulado 26
  - Cuadro comparativo de los principales tipos de nodos 29
    - Principales tipos de apoyo 33
    - Comportamiento o estabilidad 33
- Propuesta: Estructura tridimensional espacial formada por tetraedros y octaedros 34

### Capítulo III.- CÉLULA TETRAÉDRICA: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS TEORICO **35**

- Metodología de análisis de la célula tetraédrica 36
  - Geometría de la célula tetraédrica 37
- Análisis Teórico de los elementos que componen a la célula tetraédrica 38
  - Barra: Material y forma 38
  - Nodo: Material y forma 38
    - Dimensión del nodo 39
  - Unión entre la barra y el nodo 39
- Características estructurales de la barra 40
  - Área: sección transversal 40

• Momento de inercia: Ejes X y Y	40
• Módulo de sección: Ejes X y Y	40
• Radio de giro: Ejes X y Y	40
• Longitud máxima permisible	41
• Relación de esbeltez	41
• Esfuerzo admisible a compresión	41
• Carga máxima admisible a compresión	41
• Comportamiento estructural de la barra: Gráfica	42
• Diseño y revisión de la unión entre nodo y barra	43
• Número de tornillos requeridos para unir la barra con el nodo	43
• Espesor de las placas que forman al nodo: Circular y Triangular	43
• Resistencia a la fractura del nodo: Placas circular y triangular	44
• Resistencia a la ruptura de la barra	44

#### **Capítulo IV.- MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL ESPACIAL** **45**

▪ Consideraciones	46
▪ Reglamento y normas de diseño	46
▪ Clasificación del sistema	46
▪ Tipos de sistema	46
▪ Materiales de los elementos que la componen	46
▪ Análisis de cargas para diseño	47
▪ Método de análisis estructural	47
▪ Método de análisis por efecto sísmico	49
▪ Método de análisis por efecto del viento	50

#### **Capítulo V.- ANÁLISIS TEÓRICO DEL SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA** **51**

▪ Definición y resultado de alternativas del Sistema Celular Espacial octa-tetra	52
▪ Definición de alternativas	52
▪ Cargas para diseño	53
▪ Distribución de cargas en los nodos: Central y Lateral	53
▪ Análisis estructural de alternativas del sistema: Cargas aplicadas a las barras, Desplazamientos en los nodos y Reacciones en los apoyos	54
• Con apoyos laterales opuestos	55
• Con un apoyo lateral	59
• Con un apoyo lateral y otro central	63
• Con dos apoyos centrales	67
• Con un apoyo central	71

▪ Revisión del sistema por efecto sísmico	75
• Análisis estático	75
▪ Revisión del sistema por efecto viento	77
• Empuje estático	78
• Revisión de las barras ante el empuje del viento	79

## **Capítulo VI.- APLICACIÓN DEL SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA** **81**

▪ Procedimiento constructivo	82
▪ Ejemplos reales de aplicación	84
• Cafetería	86
• Cochera	87
• Jardín	88
• Patio de servicio	89
• Terraza	90
• Pórtico de entrada	91
• Gimnasio	92
• Escalera	93

## **Capítulo VII.- CONCLUSIONES** **95**

▪ Resultados obtenidos	96
------------------------	----

## **FUENTES DE INFORMACIÓN** **98**

▪ Bibliografía	98
▪ Revistas	98
▪ Mediografía	99

## INTRODUCCIÓN

En México, al igual que en muchos otros países uno de los problemas que más aqueja a la población es el referente al sector de la construcción. La demanda de espacios habitacionales, sociales, deportivos, recreativos, industriales, etc., sobrepasa a la oferta y los métodos tradicionales no ofrecen la adaptabilidad a las necesidades de espacio que con el tiempo se van presentando. Lo anterior conlleva a encontrar nuevas y mejores soluciones constructivas, que estén en constante evolución de acuerdo a las circunstancias actuales.

Los sistemas constructivos existentes no satisfacen del todo los requerimientos reales de un espacio arquitectónico inmediato, debido principalmente a que presentan un alto costo de construcción y lentitud en el tiempo de ejecución de la obra, ambos factores determinantes del éxito de un proyecto; por lo que prácticamente es imposible tener una solución rápida ante la urgencia de un inmueble arquitectónico existiendo además un fuerte arraigo hacia la cultura del concreto armado, misma que por desconocimiento o desconfianza impide fomentar e implantar sistemas constructivos con materiales como lo son el acero, o simplemente el fierro. Un procedimiento constructivo en acero implica un costo de inversión inicial alto, perdiendo de vista la ventaja de su uso, ya que las secciones geométricas de la estructura y cimentación implican una disminución, mínimo del 15% en el peso del inmueble con respecto a las tradicionales, lo cual haciendo un balance se traduce al final en una economía en la construcción de cualquier edificación.

Por otra parte, se ha ido desligando el uso de nuevas formas constructivas geométricas

como herramienta en el diseño de un espacio habitable; es decir, se ha caído en el uso constante del cuadrado y el cubo, como las figuras geométricas más repetidas en el diseño, producto del pórtico formado por la columna y la trabe, para todos los espacios arquitectónicos que corresponden a diferentes tipos de uso, es decir, no se puede tener la misma forma para todas las funciones requeridas, por lo que la arquitectura debe apoyarse en la ingeniería para brindar un proyecto acorde y factible en el momento de su construcción; y así, evitar las edificaciones realizadas en forma diferente a su concepción original de funcionamiento.

Con la utilización de los métodos tradicionales, la arquitectura ha tendido a generar proyectos arquitectónicos en los que se busca ahorro en las partidas de estructuras y acabados, llegando al extremo de sacrificar la calidad de los materiales. En otros países los métodos constructivos con acero le han ganado terreno a los sistemas tradicionales de cemento, mientras que en México tan sólo se emplean estructuras metálicas en menos del 30% de las construcciones, naves industriales principalmente, y más recientemente en tiendas, centros comerciales y oficinas, pero no así, en el sector habitacional.

El propósito y el objetivo fundamental de esta investigación es realizar un modelo basado en la ingeniería de las estructuras espaciales y en particular en las estructuras tridimensionales formado por una retícula, el cual buscará ser una alternativa viable dentro de los métodos constructivos metálicos, para responder a las necesidades y requerimientos en el diseño de proyectos arquitectónicos, fomentando la creatividad gracias a su versatilidad y adaptabilidad, a un bajo costo. Para lograr lo

anterior, se tendrá que tener un sistema constructivo ligero, con gran capacidad de carga, con el cual se puedan cubrir claros menores a 10 metros, los cuales son los requeridos en el género de la edificación, con la característica de evitar la mano de obra especializada, pero aumentando la posibilidad de autoconstrucción, teniendo que aprovechar todas las cualidades geométricas de una estructura tridimensional y optimizando al máximo las propiedades físicas de los materiales utilizados en el modelo.

Con el presente documento se pretende encontrar una opción estructural para la construcción de cubiertas ligeras planas, económicas, adaptables a todo tipo de edificación y de ser posible dejar una línea de investigación para la construcción estructuras geodésicas, utilizando el mismo sistema.

El alcance del proyecto es poder aplicar el modelo propuesto, que es un sistema constructivo con el uso de tecnología actual, en cualquier sector de la edificación; a través de la prefabricación y estandarización del modelo. Fomentando la autoconstrucción y economizando costos sin descuidar los estándares de calidad y de resistencia. Un sistema que llegue en forma masiva a los usuarios y se adapte a los requerimientos actuales de la construcción.

La investigación ofrecerá una aportación académica correspondiente a una base de información sobre las estructuras tridimensionales espaciales, que permita en el ámbito de la ingeniería y arquitectura, ampliar el enfoque en el proceso de diseño de cubiertas ligeras planas para claros cortos. Así como también, brindar al mercado de las estructuras metálicas, la opción de una

retícula tridimensional competitiva en precio, versatilidad y fácil adaptabilidad para el diseño arquitectónico de cualquier edificación.

El desarrollo del trabajo se lleva a cabo bajo la siguiente metodología que toma en cuenta dos criterios: el **teórico**, que consiste en determinar las partes que integran al sistema en lo relativo al tipo de materiales, su geometría, dimensiones y capacidad estructural a las que pueden ser sometidos estos elementos que integran al modelo, para posteriormente simular en un programa de cómputo la acción de las cargas permanentes y accidentales actuando sobre el sistema, con lo que se obtienen los esfuerzos a los que están sometidos las partes del sistema, realizando una confrontación de los resultados obtenidos con los esfuerzos permisibles que ofrecen los materiales utilizados en el sistema.

El otro criterio es el **experimental** bajo el cual se fabricarán las partes que forman al sistema, en taller a escala real de la estructura propuesta con la finalidad de efectuar pruebas en un claro específico y con las fuerzas actuantes, lo anterior con la finalidad de poder comprobar y definir las dimensiones óptimas del módulo que forme a la retícula del sistema.

Se propone iniciar la investigación con el segundo criterio, el experimental, para determinar su factibilidad constructiva, con la finalidad de elegir los materiales óptimos para la fabricación del sistema propuesto. Posteriormente, se aplica el criterio teórico con el que se definen las características físico-mecánicas de la retícula tridimensional, regresando nuevamente al criterio experimental para su aplicación a escala real y observar que su comportamiento o

estabilidad estructural sea de acuerdo al análisis teórico efectuado.

Por tanto el contenido de la investigación se integrará por siete capítulos definidos de la siguiente manera:

- El primer capítulo de esta investigación refiere el marco teórico documental, tanto histórico como analítico en lo que respecta al análisis geométrico y estructural de los sistemas tridimensionales espaciales, así como su uso y aplicación pasada y actual, en el ámbito internacional y nacional. También se analizan las cualidades de estas estructuras como un sistema constructivo en forma general y se diagnostica como se encuentran los aplicados los sistemas tridimensionales en el país.

- En el capítulo dos, se analizan geoméricamente las estructuras tridimensionales espaciales, su definición, clasificación, tipos de retículas, nodos y apoyos, así como su comportamiento o estabilidad para su cálculo estructural. Describiendo el marco conceptual planteando la hipótesis y la propuesta específica del modelo: **SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA**.

- El capítulo tres, plantea el método de análisis y el desarrollo mismo del módulo o **célula tetraédrica** que forma al sistema, determinando la geometría o retícula formada por la unión de varios tetraedros en un solo plano; así como, las propiedades físicas y mecánicas del material que forman a las barras y a los nodos, las características de la unión entre los dos elementos que forman al módulo o célula tetraédrica, el tamaño del nodo, el análisis estructural de la barra ante el esfuerzo a la ruptura, la resistencia a la fractura del nodo y la revisión de la unión de nodo con la barra con tornillos.

- En el cuarto capítulo se describe la metodología de análisis del sistema, siguiendo la reglamentación y normatividad de diseño de este tipo de estructuras, su clasificación y tipo de retículas, el material utilizado para su fabricación, y los análisis teóricos relativos a las cargas para diseño, el tipo de estudio estructural y la revisión por efectos de sismo y del viento

- El quinto capítulo, sintetiza el cálculo estructural de la estructura que forma al sistema celular espacial octa-tetra, de un modelo de retícula tipo, analizándose en cinco posibles alternativas: con apoyo en dos lados opuestos, con apoyo en dos lados opuestos y un volado continuo, con dos lados opuestos como apoyo y dos volados continuos, con un apoyo central (tipo paraguas) y como volado o cantiliver. Estableciendo para ello el valor numérico de las cargas permanentes y accidentales.

- En el capítulo seis se menciona el procedimiento constructivo que sigue el sistema para su armado y colocación, los ejemplos de aplicación realizados, utilizando el SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA como cubierta ligera plana.

- Finalmente se expresan las conclusiones de la investigación comparando el marco teórico con la información obtenida en la investigación y de esta forma evidenciar la posibilidad o no, de la hipótesis del modelo propuesto. Así como, las recomendaciones producto de las observaciones y registros obtenidos del comportamiento de las cubiertas ligeras construidas con el sistema propuesto. Por último se establecen posibles líneas de investigación, que se desprenden de la factibilidad constructiva y económica, empleando el mismo del sistema estructural propuesto.

## ANTECEDENTES HISTÓRICOS INTERNACIONALES

Los primeros vestigios de las estructuras tridimensionales se remontan al siglo XVI con el arquitecto **Andrea Palladio** quien utilizó armaduras triangulares de madera, que permitían soportar grandes cargas transversales, con deflexiones bajas y con poco material utilizado en su construcción (Fig. 1) ([www.geocities.com:2000](http://www.geocities.com:2000)).

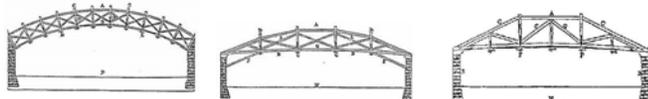


Fig. 1- Puentes de madera presentados por Andrea Palladio.

El desarrollo de las estructuras de acero es en 1750 debido al surgimiento de un nuevo material: el hierro colado, difundido por su relativa resistencia al fuego, fácil utilización y posibilidad de cubrir grandes claros con elementos muy esbeltos; dando así, el inicio de la construcción de vigas y columnas, como estructuras.

Este material dio origen al primer puente el "**Iron Bridge**", en Inglaterra; diseñado por **Thomas Pritchard** y construido por Abraham Darby en los años 1777-1779 (Foto 1) ([www.ironbridge.org.uk](http://www.ironbridge.org.uk)).

Fue hasta 1807 en que surgió un pensamiento estructural espacial, cuando **Bélenger y Brunet** diseñaron y construyeron un domo hemisférico con elementos de hierro: el **Halle au Blé**, en París, Fr. (Fig. 2)

(<http://bebelfish.altavista.com/tr>).



Fig. 2- Halle au Blé (Mercado de trigo), París, Francia.

En 1851 se erigió el **Palacio de Cristal**, proyectado por **Joseph Paxton** considerado como el predecesor de los sistemas de componentes de estructuras espaciales estandarizadas y prefabricadas (Foto 2). Y para 1856 comienza la producción de acero en forma industrializada, siendo un ejemplo de aplicación ante

este esta situación, la **Sala de Máquinas** en 1889, diseñada por **Dutert y Contamin** (Foto 3) (Le Cuyet : 2003).

Alrededor de 1864, **Gustave Eiffel**, trabajó con armaduras espaciales tridimensionales en acero con elementos estandarizados y perfiles comerciales: ángulos y soleras, que llamó "Sistema Portátil", con estas características se construye el **punto de María Pia**, en Portugal en 1877 y el **viaducto de Garabit** en Francia, en 1882 (Fig. 3) (Maia de Magalhães: 1998).

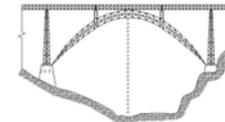


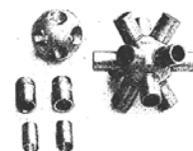
Fig. 3- Viaducto de Garabit, por G.Eiffel.



El hierro y el acero aparecen como materiales trabajando a esfuerzos de compresión, tracción y flexión, desde 1882, criterios estructurales bajo los cuales se hace la estatua de la Libertad en E. U. A. y en la **Torre Eiffel**, en Francia, terminada en 1887 (Fig. 4) (<http://blongsem.blogspot.com>).

Fig. 4- Vista vertical de la Torre Eiffel.

Para la última década del siglo XIX, en Alemania, **August Föppl** publicó una investigación de las "**Armaduras en el espacio**", enunciando la ley de estabilidad de estas estructuras: "**Una armadura espacial es estáticamente determinada y estable cuando el número de barras es igual a la diferencia de tres veces el número de nodos menos seis**" (Mirafuentes: 1969).



**Graham Bell** en 1907 en Canadá, construyó la primera estructura espacial ensamblada (Fig. 5), para formar la llamada **Tower-Bell** (Foto 4) (Urmer: 1998).

Fig. 5.- Nodo tubular roscado de G. Bell



Foto 1.- El primer puente del mundo construido en hierro, en Inglaterra.



Foto 2.- Palacio de Cristal con cubierta de hierro y cristal.



Foto 3.- Sala de máquinas de la exposición mundial de París, 1889



Foto 4.- Estructura espacial "Tower-Bell" en Beinn Brega, Nova Scotia, Canadá.

Hasta el año de 1922, el ingeniero **Z. S. Makowsky** realiza "El estudio de las estructuras espaciales de acero" y sus métodos de cálculo matemático y experimental (Mirafuentes: 1969).

**Robert Le Ricolais**, en 1934, determina la resistencia de las estructuras espaciales en base a las formas de la naturaleza y al estudio sobre la partición geodésica de la esfera, y en 1940, enuncia la teoría de utilización de las estructuras tridimensionales en la arquitectura, aplicada a las mallas tridimensionales compuestas por cuadrados, triángulos y hexágonos, proponiendo el sistema **Trihex**, que cumple la condición: "El número de barras es igual a dos veces el número de sus intersecciones". Éste sistema permite la construcción de bóvedas y domos, con paraboloides de revolución (Fig. 6) (Andre: 2004).



Fig.6.- Modelo a escala del Sistema trihex.

Es en Alemania, en 1942, donde se desarrolló la primer estructura espacial tridimensional patentada llamada sistema "**Mero**", diseñada por **Max Mengerhausen** pionero de las armaduras espaciales basadas en el principio del "paquete concentrado de esferas" (Fig. 7). Un ejemplo es el pabellón "La Ciudad del Mañana" (Foto 5). Este mismo sistema en Francia recibe el nombre de sistema espacial tridimensional "**Tectovis**" (Maia de Magallhaes: 1998).

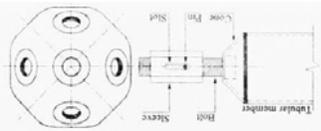


Fig. 7.- Conector del sistema Mero.

**Richard Buckminster Fuller**, en 1944 contribuyó en el desarrollo de las estructuras espaciales, con un sistema de nombre "Synergetic Energetic Geometry" en el que establece cubrir el máximo espacio, con un mínimo de material. Para lo cual utiliza un reticulado en tres direcciones que sigue las aristas de un icosaedro regular proyectado sobre una esfera, de esta manera

genera el concepto de la Cúpula Geodésica (Fig. 8)



(www.wordllingo.com: 1983).

Fig. 8.- Cúpula geodésica.

**Konrad Wachsmann** en 1946, realizó sistemas constructivos espaciales tridimensionales que podían ser producidos en serie. Una aplicación de este sistema fue los hangares de aviación, proyectados por el Instituto de Tecnología de Illinois, (Fig. 9) (Andre: 2004).

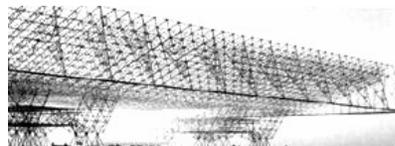


Fig. 9.-Maqueta de hangar de aviación, K Wachsmann.

En Inglaterra, surgió en 1954 el sistema "**Space Deck Ltd.**", basado en las investigaciones de Z. S. Makowski en donde los elementos de montaje son pirámides de base cuadrada prefabricada (Fig.10). Con el tiempo se perfeccionó cambiando a sistema Neck, siendo el cambio sustancial el peralte de la estructura que pasó de 100 a 60 cm (Foto 6) (Oporto: 2002).

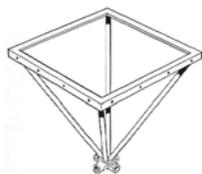


Fig. 10.- Módulo del sistema Space deck.

Contemporáneo al anterior sistema y similar en forma, se diseñó en Inglaterra un reticulado de dos capas y en tres direcciones llamado "**Met-Ram**" (Foto 7) (Makowski: 1968).

Para 1955, en Canadá, se realizaron construcciones con un sistema llamado "**Triodetic**", el cual presenta la unión de las barras a base tubos metálicos de aluminio o de acero, sin soldadura, sin pernos y sin remaches, sólo a presión. El nodo es un prisma como una abrazadera a presión (Fig.11). Un ejemplo de este sistema es el hotel Radisson en Canadá (Foto 8) (Andre: 2004).

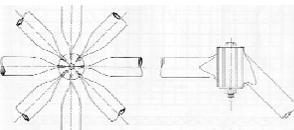


Fig. 11.- Nodo del sistema triodetic.

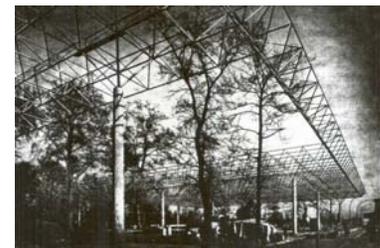


Foto 5.- Sistema Mero en el Pabellón "La ciudad del mañana", en la Expo Berlín '57



Foto 6.- Cubierta de nave para fábrica con el sistema Space Deck en Inglaterra.



Foto 7.- Sistema Met-Ram bajo pruebas de carga en la Universidad de Londres.

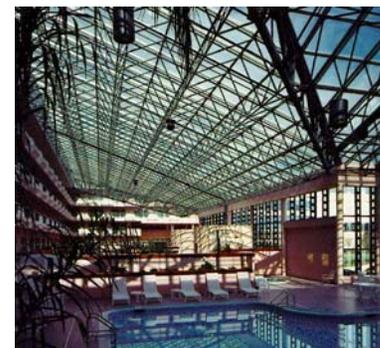
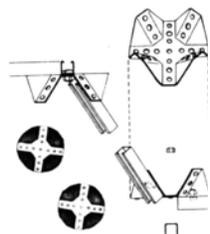


Foto 8.- Sistema Triodetic: Hotel Radisson en Canadá.

Al mismo tiempo, en E. U. A se implementa una estructuras espaciales de acero en dos direcciones llamada "**Unistrut Space Frame**", con barras formadas por perfiles laminados con la misma longitud y sección,



sujetadas con pernos o tornillos a los nodos laminados (Fig. 12). Con una cubierta de este tipo se construyó el acuario de New Jersey, EUA. Este es el sistema más empleado en el mundo (Foto 9) (Maia de Magalhães: 1998).

Fig. 12.- Nodo del sistema Unistrut.

Por el año de 1956 en Francia, **Stéphane du Chateau**, diseña estructura reticulada sistema **SDC** de tres direcciones, en donde las barras son tubos metálicos de diferente longitud y diámetro, unidos al conector también metálico con soldadura (Fig. 13). Un ejemplo del sistema SDC es la piscina del estadio francés de Boulogne (Foto 10) (Oporto: 2002).

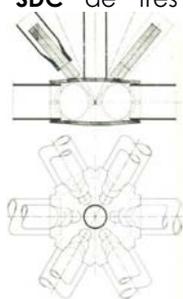


Fig. 13.-Conector del sistema SDC

En Polonia, **Barucki, Dryski, Nalowy, Rozwadowski, Poniz y Szafer**, diseñaron una estructura espacial de tres direcciones, en donde los esfuerzos de tracción son resistidos por barras de acero y los de compresión con elementos prefabricados por concreto armado. Este sistema **Reticulado BX-58**, fue aplicado en el pabellón de Polonia para la Expo-Bruselas, en 1958 (Foto 11) (Makowski: 1968).

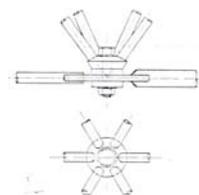
Un sistema similar al SDC, ya que utiliza soldadura en sus uniones fue un reticulado desarrollado en 1959, por Le Ricolais y patentado en Alemania como un sistema en tres direcciones llamado "**Oktaplatte**", constituido por octaedros y tetraedros cuyos lados son tubos de

hasta 2 m de largo, soldados eléctricamente a los nodos formados por esferas de acero (Fig. 14). Una aplicación es la iglesia de Neuss, en Alemania (Foto 12) (Makowski: 1968).



Fig. 14. Nodo del sistema Oktaplatte.

Alrededor de 1960 en Francia, aparece el sistema "**Pyramitec**", diseñado por **Stéphane du Chateau**, consiste en un reticulado prefabricado de tres direcciones formado por pirámides invertidas de base hexagonal, unidas entre sí por barras metálicas. El nodo es un cuerpo cilíndrico central, al que se unen con soldadura las barras diagonales (Fig. 15). Una aplicación es la cubierta del auditorio del sindicato británico en Londres (Foto 13) (Oporto: 2002).



15.-Conector del sistema Pyramitec.

**Stéphane du Chateau** propone en 1965 el sistema "**Tridimatec**", constituido por armaduras planas entre cruzadas, de modo que quede el nodo en medio de las vigas y así disminuya a la mitad el momento de flexión y el peralte mismo de la estructura. El conector recibe a las barras sujetadas con tornillos (Fig. 16). Este sistema puede prefabricarse en módulo doble. El centro social de la zona de urbanización prioritaria en Rennes, Francia, es una estructura de trama modular de 3.6 m (Foto 14) (Oporto: 2002).

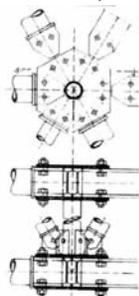


Fig. 16. -Conector del sistema Tridimatec.

Posteriormente en 1968, **Stéphane du Chateau** propone el sistema "**Unibat**", el cual consiste de dos capas ortogonales giradas una de la otra a 45° (Fig. 17) (Oporto: 2002).

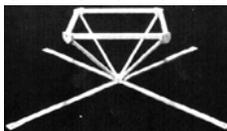


Fig. 17.- Sistema Unibat, S. du Chateau.



Foto 9.- Sistema Unistrut del acuario del estado de New Jersey, EUA.



Foto 10.- Sistema SDC, en cubierta para piscina en París, Fr.



Foto 11.- Sistema Oktaplatte para cubierta de una iglesia en Neuss, Alemania.

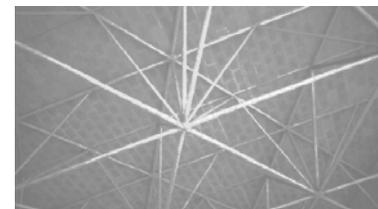


Foto 12.- Reticulado BX-58 en la EXPO58 en Bruselas.

Con este sistema se propuso el diseño de una casa familiar evolutiva con células industrializadas (Fig. 18), edificios de oficinas de dos niveles, espacios de hasta 150 m y macro estructuras urbanas para toda una ciudad de 2500 habitantes (Foto 15) (Oporto: 2002)

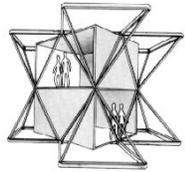


Fig. 18.-Células industrializadas para la vivienda.

En 1979 se plantea el sistema "Spherobot", por Stéphane du Chateau el cual consiste en un reticulado formado por pirámides de base cuadrada donde tanto la malla superior como la malla inferior, están desfasadas a 45°, unidas con conexiones esféricas el nodo. Las barras se acoplan al interior de la esfera que forma el nodo a través de un tornillo de alta resistencia (Fig. 19) (Oporto: 2002).

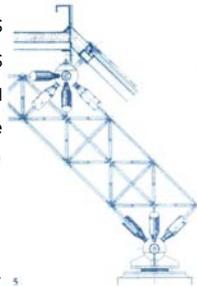


Fig. 19.-Conector del Sistema Spherobot.

Este sistema inicialmente fue diseñado en acero, pero adquirió mayor resistencia estructural al fabricarse en aluminio (Fig. 20).

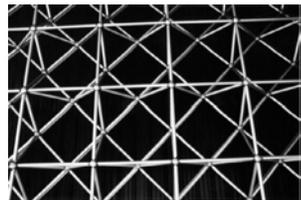


Fig. 20.- Sistema Spherobot.

Hacia mediados de la década de los ochentas, el ingeniero Stéphane du Chateau diseñó más estructuras tridimensionales, entre los más importantes se tienen el Sistema "Bamboutec", con nodos del sistema Spherobot, pero con la diferencia de que sus barras son fabricadas con bambú y (Fig. 21) (Oporto: 2002).

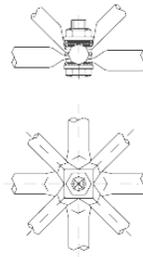


Fig. 21.- Sistema Bamboutec, S. du Chateau.

Una estructura espacial tridimensional diseñada en la década de los noventa, es el sistema "Sarton", formado por pirámides de base cuadrada cuyas barras son tubos de acero o de aluminio con los extremos aplastados y con una perforación (Foto 18). El nodo es un pasador roscado, al que convergen ocho tubos (Fig. 22) (Chilton: 2000).

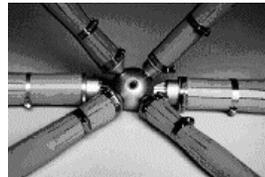


Fig. 22.-Nodo Sarton.

En la actualidad, a nivel mundial han surgido una variedad de sistemas en estructuras espaciales tridimensionales, aunque en la mayoría de los casos sólo son mejoras a los sistemas ya patentados; por lo que analizarlos, se remitirán a las características de los sistemas ya mencionados.



Foto 13.- Congreso del Sindicato británico en Londres, sistema Pyramitec.

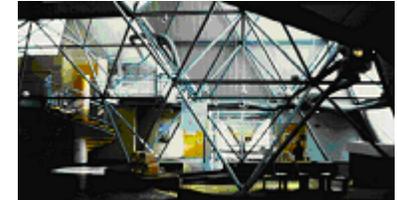


Foto 14.- Sistema tridimatic: Centro social ZUP, Rennes, Francia.



Foto 15.- Módulo urbano: Sistema Unibat.

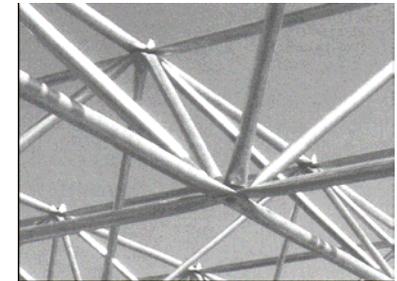


Foto 16.- Sistema Sarton.

## BIBLIOGRAFÍA

Chilton J., *Space grids structures*, Ed. Architectures Press, Oxford 2000  
 Makowski Z.S., *Estructuras Espaciales de Acero*, Ed. G.Gilli, Barcelona 1968/Fotos No. 5, 6, 7, 10, 11 y 13.  
 Mirafuentes José, *Armaduras Espaciales*, Ed. UNAM, México 1969

## MEDIOGRAFÍA

André Paulo B. R. "*Aplicación de las mallas espaciales en arquitectura*", Brasil 2004/ [www.metallica.com.br/](http://www.metallica.com.br/) Figuras No. 6,11 y 22/Foto No. 16

Biblioteca, "*Puentes de armadura*", México 2000/ [www.geocities.com/](http://www.geocities.com/) Figura No. 1  
 De Haan David "*How was it built?*", Reino Unido 2002/ [www.ironbridge.org.uk/](http://www.ironbridge.org.uk/) Foto No. 1  
<http://bebelish.altavista.com/tr/>Figura No. 2/Foto No. 2  
<http://blong-sem-blogspot.com/>Figura No. 4  
 Le Cuyer Annette "*Steel and Beyond: New Strategies for metals in Architecture*", USA 2003/ [www.arcspace.com/](http://www.arcspace.com/) Foto No. 3  
 Maia de Magalhães J. R. y Malite M. "*Estructuras metálicas espaciales: algunos aspectos relativos a su diseño y construcción*", Brasil 1998/ [www.set.eesc.usp.br/](http://www.set.eesc.usp.br/) Figuras No. 3, 7 y 12/Foto No. 12

Oporto Claudia Estrela. "*La concepción estructural de Stephané Du Chateau: Las estructuras metálicas en la evolución de los sistemas espaciales*", Brasil 2002/ <http://copacabana.dlsi.ua.es/> Figuras No. 10, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y 21/Foto No. 14 y 15  
 Oporto Claudia Estrela. "*Estructuras espaciales*", Brasil 2001/ <http://copacabana.dlsi.ua.es/> Figura No. 14  
 Umer Kirby. "*Alexander Graham Bell and the Octet Truss*", USA 1998/ [www.grunch.net/](http://www.grunch.net/) Figura No. 5/Foto No. 4  
 Wikipedia Enciclopedia, "*Buckminster más lleno*", 1983/ [www.worldingo.com/](http://www.worldingo.com/) Figura No. 8  
[www.triodetic.com/](http://www.triodetic.com/)Foto No. 8  
[www.unistrut.com/](http://www.unistrut.com/)Foto No. 9

## ANTECEDENTES HISTÓRICOS EN MÉXICO

Consumada la Conquista de México, y fundada la nueva ciudad en el sitio que ocupara la antigua Tenochtitlan, la planeación urbana estuvo a cargo de Alfonso García Bravo, quien siguiendo los sistemas europeos desarrolló obras de ingeniería construidas sobre las estructuras prehispánicas. La primera estructura espacial en la Nueva España fue la bóveda que se construyó en la **capilla vieja de San Francisco** tallada en piedra por mano de obra indígena, por lo que sus materiales principales fueron una fusión de procedimientos aztecas y europeos, es decir, el ladrillo crudo o adobe, el tepetate y el tezontle, con el ladrillo cocido unidos con la argamasa de cal y arena. También se emplearon las vigas de madera para construir los vanos para puertas o ventanas (Fig. 23) (Espinoza: 2003).

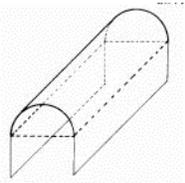


Fig. 23- La bóveda, primera estructura espacial en México.

A finales del siglo XVI empezaron a construirse edificios de estilo renacentista y plateresco, y del XVII hasta fines del XVIII predominaron las edificaciones del barroco mexicano, en las que se utilizaron el tezontle, la chiluca y el teocalli como materiales de construcción, dichas obras fueron de carácter religioso y civil. Estos tres siglos de arquitectura colonial enmarcaron construcciones tipo fortaleza debido a los sistemas constructivos utilizados a base de materiales pétreos y a las disposiciones en forma de cruz, que generaron cúpulas en las intersecciones y bóvedas en los brazos de ésta (Fig. 24) (Mendizábal: 1996).

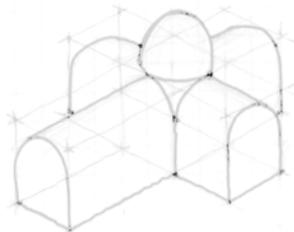


Fig. 24- Bóveda y cúpulas de la arquitectura colonial.

El movimiento de Independencia provocó una disminución en el desarrollo de las construcciones debido a que los técnicos tuvieron que incorporarse a esta lucha, por lo que desde 1810 hasta 1856 hubo un receso en la construcción.

En la primera mitad del siglo XIX, la obra más importante fue, el proyecto del **Monumento a la Constitución**, que estuvo a cargo de los ingenieros mexicanos, General *García Conde* y *Francisco Hidalgo*, este monumento se ubicaría en el centro de la Plaza de la Constitución, pero lo único que se edificó fue el zócalo de éste; basamento que permaneció largo tiempo en ese sitio hasta concederle el nombre popular a la *Plaza de la Constitución* (Foto 17).

La primera vez que se utilizó el hierro como material de construcción fue en 1883, con el **Faro de Tampico**, una torre de forma hexagonal de 40 m de altura, cuya estructura es totalmente metálica, prefabricada en Pittsburg, EUA, diseñada e izada bajo la supervisión del ingeniero civil Ramón de Ibarrola (Foto 18).

Entre los años de 1903 a 1905 se construyó el primer edificio prefabricado de la ciudad de México, que en un principio fue llamado Palacio de Cristal, conocido también como el Edificio de Fierro y más tarde como **Museo del Chopo**, cuya estructura metálica se fundió en Alemania y su ensamblaje estuvo a cargo de los ingenieros *Luis Bachmeister*, *Ruelas* y *Dömer* (Foto 19) (Espinoza: 2003).

El *Gran Hotel de la Ciudad de México* (Hoy Hotel Majestic) ubicado en el lado poniente de la Plaza de la Constitución y construido por el arquitecto Daniel Garza, fue uno de los primeros edificios que tuvo una



Foto 17. - Monumento a la constitución, 1842.



Foto 18.- Faro de Tampico, 1883.

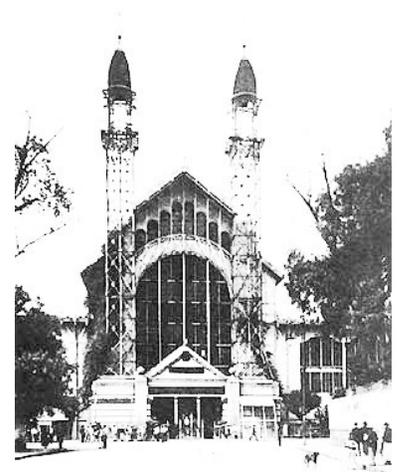


Foto 19.- Museo del Chopo, 1905.

cubierta ligera construida con cristal y hierro en el año de 1908, realizada por el artista francés Jacques Gruber. El espacio que cubre esta estructura es el patio central del hotel de aproximadamente 13.00 de ancho por 21.00 m de largo, con una superficie cóncavo y tres pequeñas cúpulas repartidas al centro México (Foto 20) (Ross: 2002).

En el año de 1910, se inició la construcción del proyecto **Palacio Legislativo** diseñado por el arquitecto francés *Emile Bernard*, y cuya estructura estaba planeada para que fuera totalmente de hierro con lo que llegaría a ser en su momento una de las construcciones más espectaculares del mundo (actualmente es el *Monumento a la Revolución*) (Foto 21) (Delegación Cuauhtémoc: 2005).

El empleo del acero (proveniente del extranjero) en la estructura de los edificios, se continuó utilizado a partir de la primera década del siglo XX, donde se distinguieron las construcciones monumentales en la ciudad de México, entre las que tiene especial relevancia la iniciación del **Palacio de Bellas Artes y la de los edificios de Correos y Teléfonos de la Ciudad de México**, obras proyectadas por *Adamo Boari* arquitecto italiano (Carral: 2005).

Fue en el año de 1932 cuando se erigió el primer edificio de mayor altura en el país con ocho niveles en su construcción, llamado **La Nacional**, realizado por el arquitecto *Manuel Ortiz Monasterios* (Foto 22), que junto con el edificio de la Lotería Nacional del año de 1933 marcaron el inicio del uso del concreto armado como un nuevo sistema constructivo con gran resistencia estructural y el comienzo de nuevas formas arquitectónicas en la edificación (Langagne: 1999).

En 1949 comenzó propiamente en México, la utilización de las cubiertas laminares o cascarones con el arquitecto español *Félix Candela*, siendo el primer

ejemplo de estructura espacial a base de concreto armado, las **Bóvedas Funiculares** experimentales en San Bartolo en el Estado de México (Fig. 25) (Fadón: 2001).



Fig. 25- Bóveda funicular.

Su principal aportación reside en el cálculo y construcción de cubiertas ligeras de concreto armado, cuya forma se basa en los paraboloides y en las hipérbolas. Sobresalen así la cubierta de la iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa en el D. F. en 1953 (Fig. 26) (Fadón: 2001).

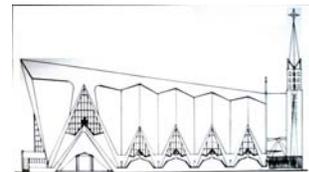


Fig. 26- Fachada Iglesia de la Medalla Virgen Milagrosa.

A partir de este año comenzaron a construirse por distintos rumbos de la ciudad, varios edificios de gran altura apareciendo así nuevos sistemas constructivos como las losas nervadas, diseñadas por el arquitecto *Juan O'Gorman*, que empleaban estructuras de concreto de alta resistencia. Uno de los ejemplos más representativos de este sistema constructivo es la **Biblioteca de la UNAM**, en Ciudad Universitaria México, la que diseñó conjuntamente con los arquitectos *Gustavo Saavedra* y *Juan Martínez de Velasco* y que tiene 45 m de altura, convirtiéndose (mediados del siglo XX), en la estructura de concreto más alta de México (Fig. 27) (Langagne: 1999).



Fig. 27- Biblioteca central UNAM, 1952.

En esta misma década se dio la construcción de espacios recreativos de diversa índole, entre los que destacan los cines **Las Américas** en 1952 y **Paseo** en 1957, obras del arquitecto *Villagrán*, en los cuales se



Foto 20.- Cubierta del gran Hotel de la Ciudad de México.



Foto 21.- Monumento a la Revolución, 1910.



Foto 22.- Edificio la Nacional, 1932.

recurrió a la utilización de armaduras planas metálicas para poder cubrir estas salas de espectáculos (Langagne: 1999).

Durante la década de los cincuentas, el estado promovió la creación de espacios para el servicio público como la **Estación Central de Ferrocarriles Nacionales de México**, en Buenavista (1958) por el arquitecto Jorge L. Medellín en donde se construyó un *extenso claro interior sin apoyos intermedios a la entrada principal del inmueble, resultando ser muy espectacular y constituyéndose como uno de los primeros inmuebles en donde se usó una estructura plana metálica* (Foto 23) (Noelle: 1999).

El arquitecto Candela con sus trabajos de estructuras aporta a la arquitectura en 1958 otro ejemplo de forma estructural: la parábola de concreto armado en el Restaurante Los Manantiales, D. F. (Foto 24) (Fadón: 2001).

La producción de acero en nuestro país a partir de la década de los sesentas, dio la pauta para la prefabricación y estandarización de las estructuras metálicas en la industria de la construcción y es entonces que aparecen con mayor auge edificios construidos con acero nacional habilitado en taller (Grupo IMSA: 2003). Un ejemplo de este tipo de obra fue la **Unidad Profesional del IPN**, por el arquitecto Reynaldo Pérez Rayón (Noelle: 1999).

Las construcciones monumentales que aprovechaban las formas geométricas en su estructura comenzaron a evidenciarse a partir del año de 1964 con la **Torre de Banobras**, obra de los arquitectos Mario Pani y Luis Ramos, y con la **Alberca y Gimnasio Olímpico Juan de la Barrera**, diseñados por los arquitectos E. Gutiérrez, A. Relamiere, M. Rosen y V. Garcés para los juegos olímpicos de México 68 (Foto 25) (Noelle: 1999).

Es en el año de 1966 en el que aparecieron las primeras **estructuras espaciales tridimensionales** con el ingeniero mexicano Heberto Castillo quien se distinguió por tener amplias capacidades para concebir formas complejas y estructuras espaciales, o en tres dimensiones; realizándose la primera obra de este tipo, el diseño estructural, del edificio ubicado en San Antonio Abad, México D. F., empleando el sistema estructural **Tridilosa**, desarrollado por él mismo, en donde aprovechó con gran éxito las características de estabilidad de los tetraedros. Este sistema consiste en un reticulado de 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 de este reticulado se tiene una capa delgada de concreto de aproximadamente 7 cm de espesor (Fig. 28) (Tridilosa: 2004).



Fig. 28- Detalle de Tridilosa.

La Tridilosa surge con el fin de optimizar y racionalizar el diseño y construcción de estructuras, que a diferencia de las estructuras tradicionales, con ésta no era necesario utilizar concreto de relleno en la zona de tensión, sólo en la capa superior de compresión; lo cual supone un ahorro aproximado del 66% del concreto, dando como resultado una estructura que tiene, además, de menor peso, la propiedad de una mayor capacidad para cubrir grandes claros. Ejemplos de aplicación son los puentes tipo de 20 y 100 m de claro en Cuba, la Cubierta hexagonal del auditorio del Centro de Extensión Universitaria en Pachuca, Hgo., la Cubierta de la Concesionaria Automotriz Renault, en México, D. F.; las Cubiertas triangulares y cuadradas del Hospital de Pediatría, la cubierta del vestíbulo principal y el vestíbulo principal del edificio de acceso del Centro Médico Siglo XXI en México D. F. por citar a los más importantes (Tridilosa: 2004).



Foto 23.- Estación Buenavista, F.F.C.C. Cd. México, 1958.

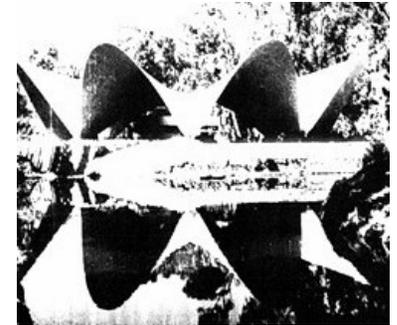


Foto 24.- Restaurante Los Manantiales, 1958.



Foto 25.- Alberca y Gimnasio Juan de la Barrera, 1967.

También en este año se construyó la primera cúpula metálica en el país, el **Domo de las Fuentes Termales del Centro Vacacional Oaxtepec** en el estado de Morelos, del arquitecto *Alejandro Prieto Posada* (Foto 26) (Noelle: 1999).

En 1968, continúan las estructuras espaciales con el **Palacio de los Deportes**, obra también del arquitecto *Félix Candela* en colaboración con el arquitecto *Enrique Castañeda* y el ingeniero *Anthony Peyri*, en la ciudad de México, D. F. La edificación es de una sola planta, circular, cubierta con una bóveda metálica, formada en el exterior por módulos piramidales de cuatro caras, con tejas de cobre, cuyo diseño original se realizó para que pudieran desarrollarse tanto actividades deportivas, como espectáculos de diversa índole. Además, actualmente se usa también como recinto de ferias y exposiciones (Foto 27) (Fadón: 2001).

Con los juegos olímpicos en México 68 se dio la apertura a la mejora de las instalaciones deportivas existentes, en 1970 el **Centro Deportivo Plan Sexenal** cubrió la cancha de actividades múltiples con un domo tridimensional y la alberca con una cubierta a dos aguas también con una estructura reticular en tres dimensiones (Foto 28) (Delegación Cuautémoc: 2005).

Para fines de la década de los sesentas aparece el primer conjunto comercial, **Plaza Universidad** del arquitecto *Sordo Madaleno* como una fuerte influencia de concepción espacial proveniente de Estados Unidos de Norteamérica (Foto 29). A partir de esta concepción de construir centros recreativos y a partir de entonces comenzaron la construcción de comerciales de grandes dimensiones como el **Centro Comercial Plaza Satélite** en 1971 al norponiente del D. F. y el **Centro Comercial Bosques de las Lomas** en 1974, proyectos del mismo arquitecto; se fue dando la aplicación de estructuras tridimensionales en la construcción de cubiertas (Engelkin: 1989).

En el intervalo entre 1975 y 1980 aparecen grandes muestras de la arquitectura mexicana, junto con las cuales se tiene la construcción de estructuras espaciales tridimensionales y son los edificios: el patio central **INFONAVIT** de los arquitectos *González de León* y *Zabludovsky*, la alberca del **Heroico Colegio Militar** de los arquitectos *A. Hernández* y *González Rul*, el patio central del **Centro Cultural Universitario** por los arquitectos *Nuñez Ruiz* y *Artis Espriú*, también el patio central del **Centro Operativo Bancomer** de los arquitectos *Sordo Madaleno*, *Augusto Álvarez* y *Adolfo Wiechers* y el acceso y patio central del edificio de **Bufete Industrial** proyectado por el arquitecto *J. J. Díaz Infante* (Fig. 29) (Arquitectura Mexicana: 2000).

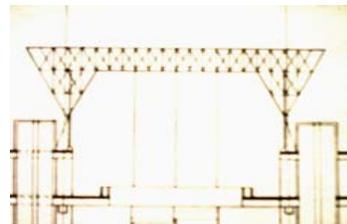


Fig. 29- Cubierta edificio Bufete Industrial, 1980 .

La Ciudad de México crecía y traía como consecuencia para la década de los ochentas, la construcción de una serie de edificios en los que fue necesario emplear alta tecnología y sistemas constructivos novedosos y sofisticados, sin embargo, al comparar éstos con los usados en otros países altamente desarrollados resultaron en realidad poco novedosos e innovadores; lo que ocasionó un caos visual, que se caracterizó por la individualidad de los edificios. En esta década principalmente sobresale en 1986 el proyecto y la construcción de la **Bolsa Mexicana de Valores** del arq. *Díaz infante*, como producto de la combinación de varios sistemas estructurales, su cimentación a base de pilotes sostiene a un edificio compuesto estructuralmente en tres partes; la primera con concreto armado, la segunda con vigas y columnas metálicas y la tercera parte con una estructura espacial tridimensional llegando así, a una altura total de más de 100 metros.



Foto 26.- Domo de las Fuentes Termales, del Centro Vacacional Oaxtepec, Mor. 1966.



Foto 27.- Palacio de los Deportes, 1968.



Foto 28.- Centro Deportivo Plan Sexenal.



Foto 29.- Plaza Universidad, 1969.

De tal forma que, este edificio es un icono del uso de reticulados espaciales tridimensionales y el mayor exponente de la arquitectura mexicana realizada en los ochentas, además es uno de los puntos urbanos más importantes de la Ciudad de México (Foto 30).

Es el arquitecto J .J. Díaz Infante quien en los años noventas, comienza a demostrar el uso de las estructuras espaciales tridimensionales como un sistema constructivo estructural que ofrece versatilidad en el diseño de nuevas edificaciones en todos los géneros: educación, salud, comercio, industria y recreación, teniendo como premisa que todas las obras deben realizarse con la mayor rapidez y ligereza posible, lo que se genero una mayor economía, siendo un claro ejemplo de lo anterior, el **Centro Ecológico Asturiano** de Cuautla, Morelos proyectado por él en el año de 1993 y donde se tiene una estructura tridimensional de 150 m de largo y 60 m de ancho, con un pico de 40 m de altura forrada con una cortina de cristal sin marcos de aluminio, el peso de la misma estructura es 78 kg/m<sup>2</sup> y con únicamente ocho apoyos perimetrales (Foto 31).

A partir de entonces las obras realizadas por Díaz Infante han demostrado la aplicación de una ingeniería purista que implica alta tecnología y estandarización industrial generando así una arquitectura totalmente racionalizada en donde no hay desperdicios, propiciando el inicio de una era *fractal* cuyos componentes son “*menos materia a más velocidad igual a más espacio en menos tiempo*”, por lo que los edificios deberán ser transparentes, prefabricados y reciclables.

Recientemente el arq. Díaz infante en Acapulco, Gro., inició la construcción del primer *módulo fractal* de la **Torre de Residencias** en el espacio, bajo un nuevo concepto de arquitectura y con un estilo diferente. Esta torre llamada “**Kalikosmia**” (casa-cosmos)

conformada por esferas fractales, rompe con el marco rígido de cualquier edificio, por estar dentro de una estructura tridimensional tipo “jaula” (Saslavski: 1992).

Con respecto a la fabricación de estructuras espaciales tridimensionales en México se encuentran varias empresa especializadas en la distribución de sistemas patentados en otros países o sistemas hechizos que tienen la tecnología, la ingeniería y el desarrollo 100% mexicanos para realizar el diseño, la fabricación y la instalación de estas estructuras. Las empresas que sobresalen por los trabajos realizados en el país y por su antigüedad son **Adriann’s de México, Trimetika, Geométrica de México, Tridiacero y GMI** (Reyes: 2001).

**Adriann’s de México**, ofrece el desarrollo y diseño de estructuras en acero y aluminio. Ha desarrollado diversos sistemas de armado de estructuras tridimensionales, de acuerdo a ciertos factores como el tipo de cubierta, claro a cubrir, geometría, costo y acabado; todos sus sistemas son unidos con tornillos y desmontables; sus aplicaciones arquitectónicas son muy variadas, ya que funcionan como cubiertas, losas de entepiso o muros de fachada. Para construirse en áreas comunes, restaurantes, centros comerciales y de convenciones, iglesias y auditorios principalmente. Los sistemas desarrollados por esta empresa son:

a)- *Space-Beam*. Se utiliza para cubrir espacios de 20 a 100 m de largo además de emplearse como losa de entepiso, ya que es capaz de soportar la carga del concreto gracias a su diseño y a la lámina modulada Lami-crete, creada por la misma empresa (Fig. 30).



Fig. 30- Nodo Space-Beam.

b)- *Tri-Beam*. Es una variante del sistema anterior, integrada con perfiles de acero formados en frío con



Foto 30.- Bolsa Mexicana de Valores, 1986.



Foto 31.- Centro Ecológico Asturiano de Cuautla, 1993.

longitudes variables; los nodos son de acero. Es un sistema desmontable, con módulos triangulares de dimensiones variables (90 cm mínimo) de acuerdo con el espacio por cubrir (40 m como máximo en una capa y hasta 50 m o más en estructuras de dos capas). Funciona para formas verticales, horizontales, a dos y cuatro aguas, inclinada y en arco cañón, que pueden cubrirse con concreto, cristal o cualquier otro material ligero.

c)- *Sphere-Beam*. Conformada con perfiles tubulares de acero, con longitudes variables y nodos esféricos de acero de diferentes diámetros llamados *Sphere-nodes*; es un sistema unido con tornillos, desmontable y cubre los mismos claros que Tri-beam, es un reticulado igual al sistema internacional Mero. Las formas arquitectónicas que posibilita son horizontales, verticales, inclinadas, a



dos y cuatro aguas, cuadradas y geodésicas, cubriendo una dimensión de claro de hasta 100 m (Fig. 31).

Fig. 31- Nodo Sphere-Beam.

d)- *Screw-Beam*. Es un sistema basado en perfiles tubulares circulares de acero formado en frío, con longitudes y diámetros variables; su nodo consiste en un tornillo y los módulos pueden ser cuadrados, rectangulares y triangulares. El claro que cubre en superficies planas es de 20 m y de 30 m cuando son curvas (Fig. 32).



Fig. 82- Nodo Screw-Beam.

Entre los proyectos más recientes desarrollados por Adriann's de México, se encuentra la **Catedral de Ecatepec**, en el Estado de México, cuya estructura curva cubre un claro de 70 m (Foto 32). Otro es el **Teatro de San Benito Abad** del colegio Centro Escolar

del Lago con muros y cubierta tridimensional (Foto 33) y el acceso del **Hospital 20 de Noviembre** (Foto 34) ([www.adriannsdemexico.com](http://www.adriannsdemexico.com)).

**Trimetika**, es una empresa mexicana dirigida por el Arquitecto *Carlos Clausell*, que también desarrolla sistemas de estructuras tridimensionales. Su propuesta se compone de un nodo conector y barras de acero estructural de alta resistencia (Fig. 33), para formar un sistema que brinda soluciones versátiles para cubiertas de corto tiempo de ejecución, mediante el análisis de diversas alternativas geométricas. Para cada proyecto ofrecen el diseño, fabricación de la estructura, armado, montaje y un servicio profesional en obra.



Fig. 33- Nodo diseñado por Trimetika.

Su proceso de diseño sigue estrictas normas de construcción y considera el cálculo de la tensión, compresión, fatiga, momento de inercia y el módulo de elasticidad de cada uno de los componentes para especificar el tipo de nodos conectores, barras, tornillos y apoyos que integran la estructura tridimensional.

Una vez fabricados los componentes, se aplica el acabado final con pintura horneada en fábrica, la cual es retocada con pintura de esmalte al término del montaje.

El armado se realiza manualmente por ser una estructura unida con tornillo y en el proceso se sigue un programa de montaje, o bien puede realizarse en el piso por módulos terminales que después son izados; ésto depende del claro de la cubierta.

Entre los trabajos realizados por Trimetika se encuentra el *punte Peatonal para el acceso al Foro Sol* de la ciudad de México (Foto 35), la *entrada principal del*



Foto 32.- Catedral de Ecatepec, 2000.



Foto 33. – Teatro de San Benito Abad.



Foto 34. – Hospital general 20 de Noviembre.



Foto 35. – Puente peatonal Foro sol, D. F.

**Aeropuerto de Toluca** del Estado de México (Foto 44) y la cubierta del **Salón Principal de Exposiciones de del WTC** de Veracruz (Foto 36) ([www.trimetrika.com](http://www.trimetrika.com)).

Otra empresa mexicana y con difusión internacional es **Geométrica**, cuya planta de fabricación y diseño se localiza en Monterrey, NL, desde donde exporta a todo el mundo.

Fundamenta el diseño de sus estructuras espaciales en formas elípticas, parabólicas y circulares y, por la forma de distribuir las cargas, basa sus diseños en el concepto de losa reticular tridimensional (Fig. 34).



Fig. 34- Losa reticular tridimensional.

El diseño de estas estructuras son optimizadas, cuando se curvean en uno o varios sentidos porque transmiten las cargas al suelo, para así formar domos o formas esféricas (Fig. 35).

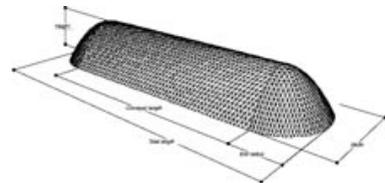


Fig. 35- Estructura tridimensional en superficie curva.

La fabricación de estas estructuras es principalmente de acero galvanizado. El nodo es versátil y varía según el diámetro de los elementos a unir, que van desde 1.5 hasta 3.5 pulg (Fig. 36).



Fig. 36- Nodo tipo empleado por Geométrica.

Con las estructuras espaciales de Geométrica, se pueden construir cubiertas arquitectónicas, plantas industriales y almacenes de estructura metálica, con claros de 45 a 300 m y libres de columnas intermedias,

que permiten mayor libertad de diseño y áreas flexibles de acuerdo a cualquier tipo de actividad ha desarrollar.

Con su innovador sistema tridimensional, llamado *Freedom*, resuelven un claro máximo de hasta 300 m; el diseño de la forma geométrica es de doble curvatura y se utiliza para cubrir plantas de forma irregular. Así, el claro más grande que han solucionado es de 224 m, para la planta **Nemak**, ubicada en Monterrey, NL. (Foto 38).

Para recubrir estas estructuras se utilizan materiales transparentes: translúcidos u opacos, los cuales se combinan para crear patrones de luz natural, además de brindar diseño en el exterior de la cubierta y reducir el consumo de energía. En otras utilizan lámina de acero e inclusive concreto.

El montaje de las piezas se realiza en forma manual y no se requiere de mano de obra especializada debido a la ligereza, al fácil manejo y a la sencillez de los elementos. En general no requiere mucho equipo, ya que lo único necesaria es una herramienta de plástico que permite insertar los tubos en los nodos. El izaje y la colocación de la estructura implican la utilización de una torre central o grúa.

A la fecha, Geométrica ha realizado cubiertas para varios tipos de edificaciones en distintos lugares de México y del mundo, un ejemplo es la *Cubierta del Auto Show*, Monterrey, NL. (Foto 39) ([www.geometrica.com](http://www.geometrica.com)).

**Tridiacero** es otra empresa mexicana que ha difundido varios sistemas tridimensionales tanto soldados como con uniones a base de tornillos. Uno de los principales sistemas para entepiso de grandes claros es la *Tridilosa*, diseñada por el ingeniero Heberto Castillo la cual ha sido aplicada en medianas y grandes construcciones, en donde se requiere cubrir claros



Foto 36. - Entrada al aeropuerto de Toluca, Edo. México.



Foto 37. - Cubierta del Salón Principal de Exposiciones del WTC de Veracruz.



Foto 38. - Sistema tridimensional Freedom.



Foto 39. - Auto Show.

para entrepisos como es el Centro Cultural Telmex en el D. F. cuyo estacionamiento está construido totalmente con este procedimiento constructivo y el **Centro Comercial Plaza Cuauhtémoc**, en el cual, los entrepisos fueron construidos con *tridilosa* (Foto 40).

Esta empresa ha desarrollado además otros sistemas de reticulado espacial tridimensional utilizando cuatro tipos de nodos:

El primer nodo es de tipo laminar soldado cuyo uso principal es de tipo industrial, emplea tubos cuadrados unidos al nodo con soldadura generando un reticulado tridimensional de pirámides de base cuadrada (Fig. 37). Un ejemplo de aplicación de este sistema es la **Agencia de Autos Interlomas** (Foto 41).

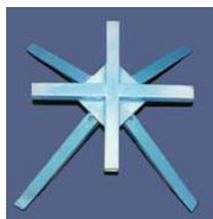


Fig. 37- Nodo laminar soldado.

El segundo tipo de nodo presenta un diseño cilíndrico (similar al sistema Triodetic) cuyas barras formadas con tubos circulares se unen a presión con éste. La retícula formada es también con pirámides de base cuadrada (Fig. 38).



Fig. 38- Nodo cilíndrico.

El tercer nodo desarrollado por Tridiacero es de tipo esférico (similar al sistema Mero)), con las barras tubulares cromadas que se unen al nodo también con el mismo acabado con tornillos formando pirámides de base rectangular dispuestas en un reticulado de dos direcciones (Fig. 39).

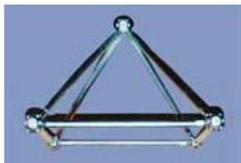


Fig. 39 - Nodo esférico atornillado.

Aunque este último sistema es utilizado principalmente en interiores de oficinas y restaurantes, por su apariencia estética, también se ha aplicado en otros tipos de edificios: como la **Estación de Servicio** en Tlalpan en la ciudad de México (Foto 42).

El último nodo esta formado por barras a base de perfil tubular con sus extremos aplastados y con orificio para permitir la entrada de un tornillo para su unión (Fig. 40).

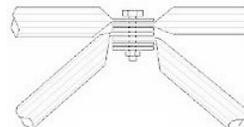


Fig. 40- Nodo atornillado.

Este sistema forma un reticulado tridimensional de pirámides de base cuadrada en dos direcciones. El teatro y acceso principal de la Escuela Secundaria Justo Sierra en San Juan de Aragón, D. F. y la entrada principal de las **Instalaciones Deportivas del Club de fútbol Cruz Azul "La Noria"** también en la ciudad de México son aplicaciones de este último sistema (Foto 43).

La empresa Tridiacero actualmente tiene a su cargo la construcción de la cubierta del Hotel Paraíso del Sur en la carretera Cuernavaca México, cafetería de Symrice planta, S. A. en el parque industrial Cuamantla y la cubierta de Hella México, S. A. ([www.tridiacero.com/](http://www.tridiacero.com/)).

La última de las principales empresas que en México se dedica a la construcción de estructuras espaciales tridimensionales es **GMI Tecnología**. Esta empresa presenta dos tipos de sistemas:

El *Modular GMI* es una retícula tridimensional constructiva de estructuras espaciales similar al sistema Mero, basado en perfiles y conectores armados con una estética moderna, ofreciendo una excelente resistencia a sismos y vientos, desarrollado con ingeniería de más alto nivel y diseñado para cubrir grandes claros sin necesidad de apoyos intermedios.



Foto 40. – Centro comercial Plaza Cuauhtémoc, D. F.



Foto 41. – Agencia de Autos Interlomas, Mex.



Foto 42. – Estación de Servicio en Tlalpan, D. F.



Foto 43. – Instalaciones Deportivas del Club de Fútbol Cruz Azul "La Noria".

La instalación no requiere de equipo o maquinaria especial, llevándose a cabo con una gran rapidez y seguridad. Los elementos del sistema son prefabricados en acero o bien galvanizados para regiones que presentan condiciones climáticas altamente corrosivas. Este sistema admite cualquier tipo de recubrimiento (paneles de poliuretano, cristal, policarbonato, acrílico, lámina rolada, fibrocemento), que lo hace flexible para cualquier tipo de uso interior o exterior.

Quick Space es una estructura espacial similar al sistema Unistrut, desarrollado por GMI Tecnología, que forma un reticulado tridimensional en dos direcciones por pirámides rectangulares que permite edificar rápidamente estructuras metálicas de cualquier tipo de construcciones.

Por la ligereza del sistema una estructura de este tipo,

se puede prescindir prácticamente de cimentación alguna. Además este reticulado ofrece la ventaja de instalarse como superficie plana, inclinada o vertical.

Un ejemplo de este segundo sistema es la cubierta de la **Estación "Viaducto" del Sistema de Transporte Colectivo Metro**, de la ciudad de México, que presenta grandes claros, cubiertas en diferentes niveles y apoyos verticales formados por la misma estructura tridimensional (Foto 44).

También GMI Tecnología ha desarrollado la construcción de diversas techumbres para estación de servicio, casetas de cobro, albergues, auditorios y centros comerciales como lo es **Wal Mart**, en el D. F. (Foto 45) ([www.gmi.com.mx/](http://www.gmi.com.mx/)).



Foto 44. – Estación viaducto del Sistema de transporte colectivo Metro, D. F.



Foto 45. – Centro Comercial Wal Mart, D. F.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Espinoza López Enrique, **Ciudad de México compendio cronológico de su desarrollo urbano 1521 a 2000**, Ed. IPN, México 2003/Figura No. 23
- Langagne Eduardo, **Arquitectos de la Ciudad de México, 1950 - 2000**, Ed. UNAM, 1999/Figura No. 27
- Meade Grace, **Arquitectura Mexicana**, Ed. McGraw - Hill, México, 2000
- Noelle Louise, **Arquitectos Contemporáneos de México**, Ed. Trillas, México, 1999/Figura No. 29/Foto No. 22 y 26

#### REVISTAS

- Engelkin M. Segismundo, " **Diseño Estructural: 20 años después**", **Obras, panorama de la construcción**, Año XXII, Vol. XVII, No. 198 Junio 1989, Ed. Expansión, S.A., México 1989/Foto No. 29
- Ross María Elena y Machorro Malja Patricia, " **El zócalo corazón de la Ciudad, 6: Gran Hotel de la Ciudad de México**", **Centro, Guía para caminantes**, Año 1, No. 1 Octubre-Noviembre, Ed. Fundación del centro histórico de la ciudad de México A. C., México 2002/Foto No. 20
- Saslavsky Ricardo, " **Entrevista Juan José Díaz Infante, todo aquello que puede ser imaginado, puede ser creado**", **Enlace en la industria de la construcción**, Año 1, Vol. 1, No. 5 Enero 1992, Ed. Recursos de Alta Calidad, S.A., México 1992/Foto No. 30

#### MEDIOGRAFÍA

- Barragán López Leticia, " **De la Plaza Mayor al Zócalo**", México 2003/ [www.e-mexico.gob.mx/](http://www.e-mexico.gob.mx/) Foto No. 17
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, " **Canacero**", México 1999/ [www.conacero.org.mx](http://www.conacero.org.mx)
- Carral Adriana, " **El teatro nacional y Bellas Artes bajo la lente de Casasola**", México 2005/ [www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- Delegación Cuauhtémoc, " **Historia colonias: Santa María La Ribera**", México 2005/ [www.cuauhtemocdf.gob.mx](http://www.cuauhtemocdf.gob.mx)
- Delegación Cuauhtémoc, " **Monumento La Revolución**", México 2005/ [www.cuauhtemocdf.gob.mx](http://www.cuauhtemocdf.gob.mx)
- Díaz Infante J. J. " **Entre las pieles del espacio**". México 2003/ [www.imcvc.com/](http://www.imcvc.com/) Foto No. 31
- Esteroeestructuras de acero, [www.geometrica.com/](http://www.geometrica.com/) Figura No. 34, 35 y 36/ Fotos No. 38 y 39
- Estructuras espaciales, [www.gmitecnologia.com/](http://www.gmitecnologia.com/) Fotos No. 44 y 45
- Estructuras tridimensionales Adriann's de México, [www.adriannsdemexico.com/](http://www.adriannsdemexico.com/) Figura No. 30, 31 y 32 / Fotos No. 32, 33 y 34
- Estructuras tridimensionales de acero/ [www.trimetrika.com/](http://www.trimetrika.com/) Figura No. 33/Fotos No. 35, 36 y 37
- Estructuras tridimensionales Tridi-steel, " **Tridilosa**", [www.tridisteel.com/](http://www.tridisteel.com/) Figura No. 37, 38, 39 y 40/Fotos No. 40, 41, 42 y 43

- Fadón Salazar Fernando, " **Análisis gráfico de obras emblemáticas de Félix Candela**". España 2001 [www.felixcandela.com/](http://www.felixcandela.com/) Figuras No. 25 y 26/Foto No. 24, 27
- Grupo IMSA, " **Historia del acero**", México 2003/ [www.grupoimsa.com](http://www.grupoimsa.com)
- Jiménez Víctor, " **El siglo del México contemporáneo en la arquitectura**", México 1999/ [www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- Llanas Roberto, " **La ingeniería civil, una profesión legendaria**", México 1999/ [www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- Mendizabal José, " **Santo Domingo, historia de una restauración**", México 1996/ [www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- Ovalle Rodríguez Edna, " **Acero y estado**", México 2005/ [www.uom.edu.mx](http://www.uom.edu.mx)
- Reyes Fabiola, " **Techados tridimensionales**", México 2001/ [www.obrasweb.com](http://www.obrasweb.com)
- Wikipedia Enciclopedia, " **Marcos del espacio**", 2005/ [www.worldlingo.com](http://www.worldlingo.com) [www.tampico-online.com/](http://www.tampico-online.com/) Foto No. 18 [www.chopo.unam.mx/](http://www.chopo.unam.mx/) Foto No. 19 [www.arqahys.com/](http://www.arqahys.com/) Foto No. 21

Las figuras y fotos no referenciadas fueron realizadas por el autor de esta investigación.

## DIAGNÓSTICO DE LAS ESTRUCTURAS

Las estructuras tridimensionales espaciales desarrolladas en México son construidas principalmente de dos formas, con nodos atornillados y con nodos soldados. En ambos casos únicamente se han creado estructuras reticulares con medios octaedros y tetraedros, debido a la facilidad constructiva y a la adaptabilidad a espacios ortogonales, ya que este tipo de estructuras son también en dos direcciones.

A diferencia de otros países, en México sólo se han aplicado tres tipos de estructuras que han sido patentadas, el Sistema Unistrut, el Sistema Mero y el Sistema Triodetic. El primer sistema es el más construido tanto con nodos atornillados como con nodos soldados para cubiertas ligeras. El segundo con menor grado de utilización es empleado principalmente por su apariencia estética, sin soportar carga alguna para trabajar como estructura, es decir, es una estructura subutilizada porque no soporta carga alguna, además que el tipo de nodo del sistema mero es el más versátil de todos los sistemas patentados cuyas posibilidades constructivas es la única para diseñar una retícula tridimensional en dos o en tres direcciones. Por último el tercer sistema igualmente es subutilizado y solo es aplicado por su apariencia estética, desaprovechando su cualidad de fijación a presión de las barras con el nodo.

## TRIDIMENSIONALES ACTUALES

En general las características de las estructuras espaciales tridimensionales patentadas y desarrolladas en México son:

- Cubren grandes espacios (mayores de diez metros)
- Gran calidad estética en su apariencia
- Alto costo de instalación
- Estandarización y modulación en sus elementos que lo componen
- Mano de obra calificada para su armado
- Equipo especializado para su instalación e izaje
- Dificultad en el transporte y maniobras de los materiales
- Sujeción de barras con tornillos o a presión
- No se tienen módulos para cubrir espacios de uno a diez metros
- Prefabricación en sus piezas lo componen

Paralelamente han surgido estructuras tridimensionales hechas de igual tipo que el Sistema Unistrut o sea solo retículas tridimensionales en dos sentidos, pero siendo éstas fabricadas en el sitio de la obra y con la característica particular de presentar uniones soldables con o sin nodos, y con barras metálicas tubulares o macizas, debido a los altos costos de venta de los sistemas patentados o que no se pueden aplicar a pequeños espacios. Estas estructuras se caracterizan por las siguientes consideraciones:

- Pueden cubrir claros grandes y pequeños
- Uniones soldables
- Mano de obra calificada en su armado
- Equipo especializado para su fabricación
- La estructura no trabaja a su máxima capacidad estructural
- Las piezas que lo componen no son reutilizables
- Peso volumétrico alto
- Tiempo de ejecución alto
- Costo alto de construcción

## CUALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS

Las estructuras espaciales han desarrollado un nuevo y autónomo campo del arte de la construcción, en el cual, los aspectos fundamentales arquitectura, análisis estructural y fabricación están en una continua y rápida evolución. Tienen tal cantidad de aplicaciones, que pueden considerarse ilimitadas, se aplican desde la cubierta de un pequeño vestíbulo, hasta la de un estadio; desde el techo de una estación de servicio hasta en el de una iglesia y es posible encontrarla en pabellones deportivos, albercas, centros comerciales, áreas de exhibición, etc.; las razones de su desarrollo se basan en numerosas ventajas y cualidades, las más importantes de las cuales se resumen a continuación:

### ESTANDARIZACION PRODUCTIVA

Las estructuras espaciales generalmente están hechas de un número relativo pequeño de componentes modulares (barras y nodos) con dimensiones y formas unificadas y coordinadas. Pueden producirse masivamente con una notable reducción en los costos de producción y ensamble, con lo cual se facilita el almacenamiento, empaque y transportación sin costo excesivo, aún a grandes distancias.

### ECONOMIA

Debido a la colocación tridimensional de los miembros estructurales, las acciones externas no se toman solamente por los elementos directamente cargados, sino por todos los elementos de la estructura, de ellos se deriva una mejor redistribución de las fuerzas internas,

## TRIDIMENSIONALES

con una consecuente reducción de las secciones diseñadas y una considerable reducción del peso global de la estructura, todo lo cual se refleja favorablemente en el costo de la cimentación.

### SEGURIDAD ESTRUCTURAL

Cualquier daño localizado eventualmente en estas estructuras, generalmente no produce la suficiente reacción en cadena en zonas adyacentes para provocar el colapso; puede ocurrir una sobrecarga concentrada sin que afecte mucho las fuerzas externas de los componentes, dado que pueden llegar al equilibrio correspondiente con una distribución cambiante de las fuerzas en los miembros. Similarmente, aún en caso de incendio, las estructuras espaciales tridimensionales mantienen una alta estabilidad.

### DESARROLLO SISMICO

Como su estructura es hiperestática, el desarrollo de su ductilidad es muy lento debido a su redundancia, asegurando un buen comportamiento al sismo. Mas aun, dada su gran ligereza, debido a la esbeltez de sus componentes, combinados con una remarcada rigidez de todo el sistema, tienen una positiva influencia en la frecuencia natural y valor de la aceleración inducida.

### COMPORTAMIENTO HIPERESTATICO

Las estructuras espaciales tridimensionales a menudo constituyen la solución mas adecuada al problema de cubrir grandes áreas sin columnas interiores. Su eficiencia

viene de la confiable Synergy que se manifiesta en el efecto espacio, consistente en la capacidad distributiva de fuerzas en diferentes direcciones resistentes, y su efecto reticular que refleja el funcionamiento de un estado de esfuerzo uniforme inducido por fuerzas axiales puras: generando peraltes grandes con bajos pesos volumétricos. Asimismo, también el peralte de las estructuras espaciales tridimensionales octa-tetra puede aproximarse entre un 1/20 a 1/40 del claro, para cubiertas ligeras.

### CUALIDAD ESTETICA

Desde el punto de vista arquitectónico, el potencial estético de las estructuras es evidente, los diseñadores y constructores tienden cada vez más al uso de la tecnología como herramienta para el diseño y la estética en la edificación, porque permite gran variedad de expresión y composición. Además, de la resolución de esquemas estructurales, calidad de forma, original belleza y en esencia un dominante carácter constructivo, particularmente adecuado para representar concepciones arquitectónicas del tiempo moderno.

### INTEGRACION CON EL CONCRETO ARMADO

Las estructuras espaciales tridimensionales, permiten una buena conexión con estructuras verticales (columnas y muros) y horizontales (losas) de concreto reforzado, permitiendo sistemas compuestos generalizados que consisten en una racional y coordinada integración de componentes estructurales de acero y de concreto reforzado.

## DEFINICIÓN

La arquitectura actual muestra construcciones ligeras con tendencia a la disminución de la cantidad de material y a considerar desde el diseño inicial de un proyecto, la forma de repartir cargas, distribuir esfuerzos, reducir momentos y obtener la máxima utilidad de la materia. Esto origina una nueva forma de construcción: la estructura espacial, es decir, una arquitectura con grandes ventajas técnicas de capacidad de carga y de apariencia estética.

**Una estructura espacial** es una extensión del mismo espacio, en donde las fuerzas actuantes sobre una edificación se ramifican en el vacío, con lo que se logran campos de fuerzas homogéneos y sin puntos de sobrecarga grandes, lo que ocasiona que las secciones de los elementos estirados o comprimidos disminuyan traduciéndose en una disminución de material.

Existen otros factores que favorecen a las estructuras espaciales como son la prefabricación de sus elementos, la estandarización y la menor utilización de mano de obra.

Estas estructuras son sistemas para cubiertas ligeras que sirven para salvar grandes espacios por su gran capacidad estructural, principalmente construidas en acero, aluminio o inclusive plástico.

**Un malla o retícula tridimensional** es una estructura espacial formada por un conjunto

de barras unidas entre sí por nodos, lo que significa que todas esas barras y nodos forman parte de un todo estructural que actúa, no en uno o en dos planos sino en el espacio; es decir, en tres dimensiones; en consecuencia la trayectoria de los esfuerzos en toda la estructura es tridimensional.

También se define a la estructura tridimensional espacial como una versión en tres dimensiones de una armadura plana, cuya disposición estructural está formada por un gran número de barras de longitud pequeña, unidas entre sí a través de sus extremos, dando lugar a una red tridimensional (Fig. 41).

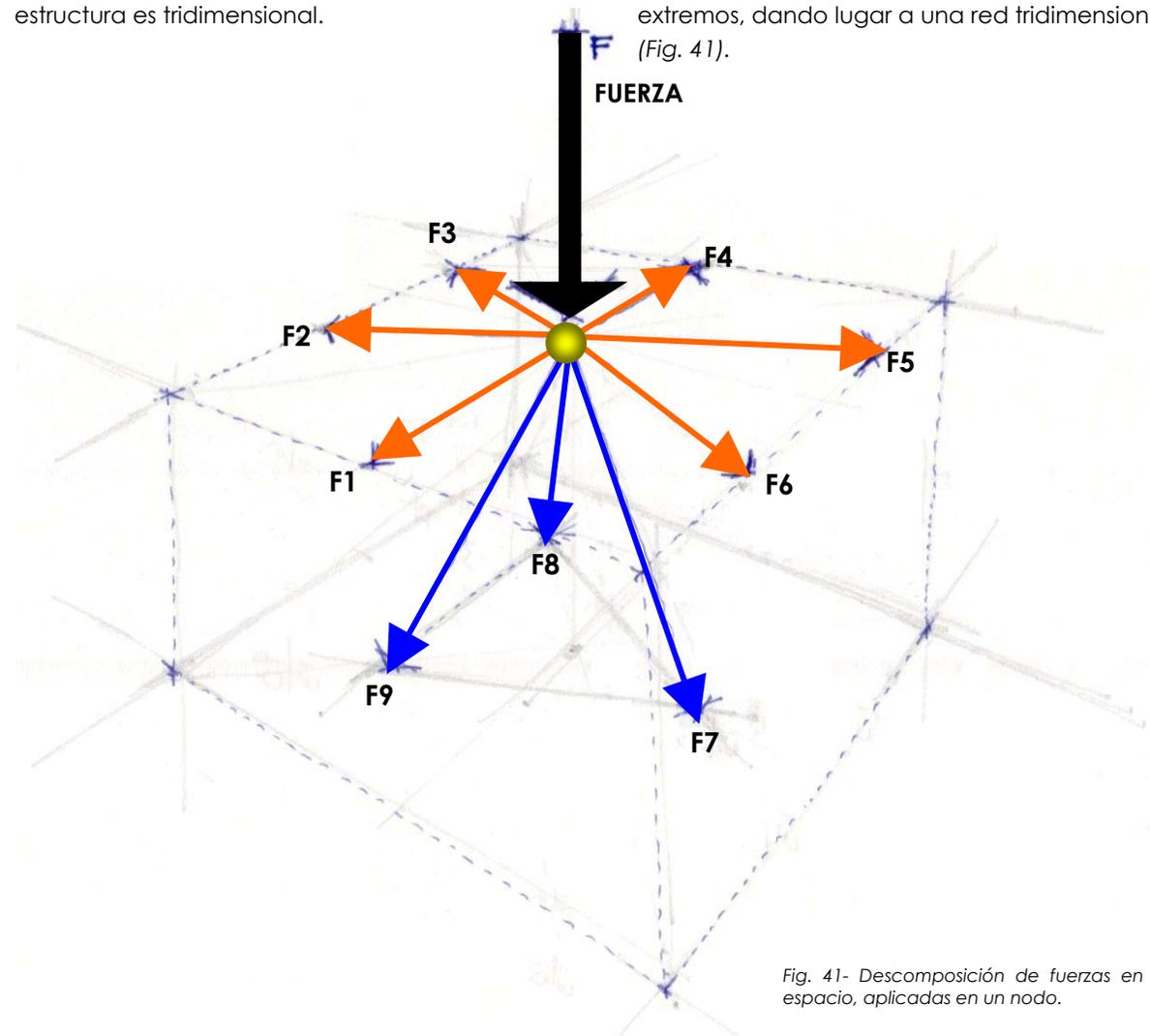


Fig. 41- Descomposición de fuerzas en el espacio, aplicadas en un nodo.

Los ingenieros **HEINEN y GUTIÉRREZ**<sup>1</sup> la definen 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.

Para **MAKOWSKI**<sup>2</sup> estas estructuras "Son líneas de acción de las fuerzas actuantes en tres dimensiones"<sup>1</sup>. El arquitecto **JOSE MIRAFUENTES**<sup>3</sup> dice, "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".

Por sus características geométricas **EMMERICH**<sup>3</sup> expone 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".

Con relación a la geometría de las estructuras espaciales **B. FULLER**<sup>3</sup> comentaba "... 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".

El arquitecto mexicano **JUAN JOSE DÍAZ INFANTE** enmarca las estructuras espaciales tridimensionales en su teoría **Kaliscomica**, la cual es un modelo arquitectónico basado en perfiles geométricos que dan lugar a construcciones de entramados 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 de ensamblaje (Saslavsky: 1992).

Para **J. MARGARIT y C. BUXADÉ**<sup>4</sup> las mallas espaciales se basan en la triangulación, con la cual se logra la célula más rígida que se pueda obtener.

Según **HENRICH SCHMITT**<sup>5</sup> las estructuras tridimensionales basan su forma en la geometría del cubo y sus secciones regulares o segmentos de cubo.

El arquitecto **E. SANABRIA ATILANO**<sup>5</sup> 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...".

Y para **RUY CHUDLEY**<sup>6</sup> define a las mallas espaciales como "estructuras en la unidad piramidal repetitiva, que puede crecer en dos direcciones".

*Por tanto el para una estructura tridimensional espacial se definirá como un conjunto de barras o líneas de acción de fuerzas unidas por sus extremos con nodos fijos o articulados, basados en la geometría de las secciones y segmentos del cubo que generan células rígidas triangulares repetitivas en el espacio.*

---

#### NOTAS:

- 1 Heinen J. y Gutiérrez V. J., **Estructuras**, Ed. IPN, México 1986
- 2 Makowski Z. S., **Estructuras Espaciales de Acero**, Ed. G.Gilli, Barcelona 1968
- 3 Mirafuentes José, **Armaduras Espaciales**, Ed. UNAM, México 1972
- 4 Margarit J. y Buxadé C., **Las mallas espaciales en arquitectura**, Ed. G. Gilli, Barcelona 1994
- 5 García Flores Alejandro, **Estructuras Espaciales (Una opción adaptable)**, Ed. UNAM, México 1998
- 6 Chilton John, **Space grids structures**, Ed. Architectures Press, Oxford 2000

#### REVISTA:

Saslavsky Ricardo, (1992) "**Entrevista Juan José Díaz Infante, todo aquello que puede ser imaginado, puede ser creado**", Enlace en la industria de la construcción. Año 1, Vol. 1, No. 5 Enero 1992, Ed. Recursos de Alta Calidad, S.A., México

*La figura no referenciada fue realizada por el autor de esta investigación.*

## CLASIFICACIÓN

Las estructuras tienen como objetivo principal el proceso de transmisión de fuerzas hacia la superficie en que se apoya una edificación; es decir, la manera de encauzar su peso propio y las cargas accidentales o sobrecargas adicionales, hacia el terreno en que se desplanta una construcción. Por tanto una estructura trabaja bajo un flujo de fuerzas el cual se compone de tres etapas consecutivas: recepción de cargas, flujo y transmisión de éstas. En base a este recorrido de cargas se puede establecer la rentabilidad de una estructura.

El arquitecto **Heino Engel**<sup>1</sup> define a los *Sistemas de Estructuras* (TRAGSYSTEME) en función de que en la naturaleza existen cuatro mecanismos típicos para contrarrestar la transmisión o desvío de cargas o fuerzas incidentes y con ello el fundamento para establecer la clasificación de los sistemas estructurales:

- Adaptación a los esfuerzos debido a la acción de las cargas, generando estructuras que trabajan básicamente adaptando su forma física a un sistema estructural de forma activa, cuyo estado tensional sea de un sólo signo: tracción o compresión
- **División de los esfuerzos debido a la acción de las cargas, generando estructuras que trabajan principalmente por la combinación**

**de barras en estado de compresión y tracción, es decir, un sistema estructural de vector activo, cuyo estado tensional cooperativo es de tracción y compresión**

- Confinamiento de los esfuerzos debido a la acción de las cargas, generando estructuras que trabajan mediante su sección y la continuidad de su materia, es decir, un sistema estructural de sección activa, cuyo estado puede ser por tracción, compresión y flexión
- Dispersión de los esfuerzos debido a la acción de las cargas, originando estructuras que funcionan mediante la extensión de su superficie o la forma de la misma, generando un sistema estructural de superficie activa, cuyo estado tensional de la superficie está sujeto a esfuerzos de tracción, compresión y torsión

La presente investigación se enfoca al segundo tipo de mecanismo mencionado: **Sistema Estructural de vector Activo** en donde los elementos que integran a la estructura son componentes lineales cortos, rígidos y rectos (llamados barras), a través de los cuales la transmisión de cargas o fuerzas actuantes, se realiza mediante la descomposición vectorial; es decir, una división de las fuerzas compresiones o tracciones, en varias direcciones.

En este sistema el elemento principal son las barras, las cuales unidas de una manera determinada por sus extremos mediante nodos crean un figura estable e indeformable en dos direcciones, el triángulo y en tres direcciones, el tetraedro, con la cual se pueden dividir las fuerzas actuantes y transmitir las cargas con un cambio de dirección en un rango de 45° a 60°, como pequeñas magnitudes repartidas de forma multidireccional.

Por tanto, de acuerdo al acomodo de la triangulación con las barras en un plano o en tres dimensiones, este tipo de sistema estructural se clasifica en cuatro grupos:

### 1. Armaduras o cerchas planas:

- Cuerda superior
- Cuerda inferior
- Con cuerda superior e inferior
- Sobreelevada

### 2. Armaduras o cerchas combinadas:

- Lineal
- Plegada
- Cruzada

### 3. Armaduras o cerchas curvas:

- Simple
- Con forma de silla de montar
- Cúpula
- esférica

#### 4. Malla o estructura tridimensional espacial:

- Plana
- Plegada
- Curva
- Lineal

El tipo de estructura presentado en este trabajo que más se asemeja a esta clasificación, corresponde al cuarto grupo del Sistema Estructuras de Vector Activo llamado **Malla o Estructura Espacial Tridimensional Plana**, el cual consiste de un arreglo de vectores formados físicamente por las barras de la estructura, que trabajan en forma activa, es decir que presentan un comportamiento estructural reducido únicamente a dos tipos de esfuerzos a tracción o a compresión.

---

#### NOTA:

1 Engel Heino, **Sistemas de Estructuras**, Ed. G.Gilli, Barcelona  
2001- Sistemas de estructuras de vector activo  
Pág. 157 a 165

#### COMPONENTES

Las retículas tridimensionales se componen de tres partes: capa o malla superior, capa o malla inferior y el elemento que une a ésta llamada diagonal (Fig. 42).

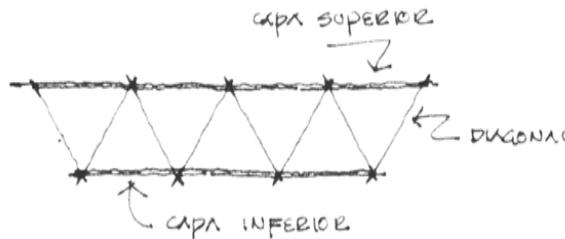


Fig. 42- Elementos que componen a una retícula tridimensional espacial.

Por la disposición o acomodo de éstas tres partes se generan principalmente los siguientes tipos de retículas tridimensionales espaciales planas<sup>1</sup>:

1. Puro de cubos
2. Con prisma triangular de capas superior e inferior cuadrada
3. Con prisma triangular de capas superior e inferior triangular
4. Con prisma hexagonal
5. Semioctatetra
6. Octatetra
7. Con pirámide hexagonal
8. Con capas superior e inferior de cuadrados de diferente tamaño y giradas
9. Con capas superior e inferior de triángulos equiláteros opuestas
10. Con capa superior triangular e inferior hexagonal
11. Octatetra irregular

#### PRINCIPALES TIPOS DE RETICULADO

La geometría es un punto muy importante constructivamente para las estructuras espaciales, pues su forma determina la distribución de esfuerzos; además, el largo de las barras es condicionante para saber si pueden prefabricarse ya que el número de barras es directamente proporcional a su economía. Este principio es aplicable tanto a geodésicas como a cubiertas planas.

La longitud y sección que debe tener una barra depende del tamaño del espacio por cubrir con una retícula tridimensional, aunque también en ocasiones hay limitantes en el peralte.

Las condiciones para que el montaje de estas estructuras sea lo más fácil posible y para que sea factible la fabricación industrializada de sus elementos prefabricados, dependen de la normalización de las longitudes de las barras y la disposición de sus uniones.

Los tipos de retícula tridimensional espacial se basan principalmente en la geometría del cubo y sus partes regulares, es decir los segmentos del cubo, además de la combinación de octaedros completos o semicompletos con tetraedros, para formar en la capa superior e inferior un reticulado rectangular, triangular y hexagonal.

La unión de dos o más poliedros origina una posibilidad infinita de combinaciones para la conformación de una retícula tridimensional espacial. Los once tipos de reticulado tridimensional espacial plana son:

- |  |
|--|
| <b>1. Reticulado tridimensional espacial puro de cubos (Fig. 43)</b> |
|--|

Poliedro base	Cubo
Capa superior	Cuadrada (a x a)
Capa inferior	Cuadrada (a x a)
Número de barras por nodo	4 horizontales 1 vertical 1 diagonal ----- 6 barras en total
Tipo de barras	Tres tipos de longitud de barras
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 20

Es de los primeros sistemas reticulares formado por cubos, el cual al no ser estable geoméricamente, se estabiliza por medio de diagonales.

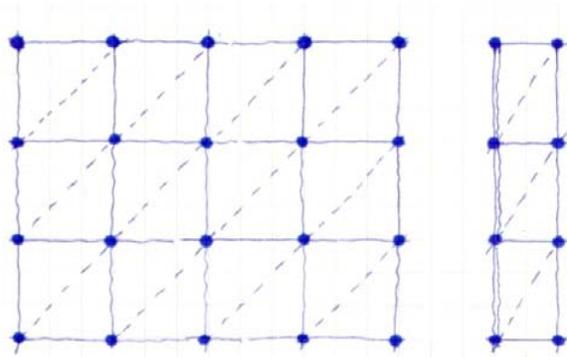


Fig. 43- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional puro de cubos.

**2. Reticulado tridimensional espacial con prisma triangular de capas superior e inferior cuadrada (Fig. 44)**

Poliedro base	Prisma triangular (triángulo rectángulo)
Capa superior	Cuadrada (a x a)
Capa inferior	Cuadrada (a x a)
Número de barras por nodo	4 horizontales 4 diagonal ----- 8 barras en total
Tipo de barras	Dos tipos de longitud de barras
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 25

Estructura reticular compuesta por prismas de base integrada por triángulos equiláteros, en donde sus caras laterales forman las capas superior e inferior.

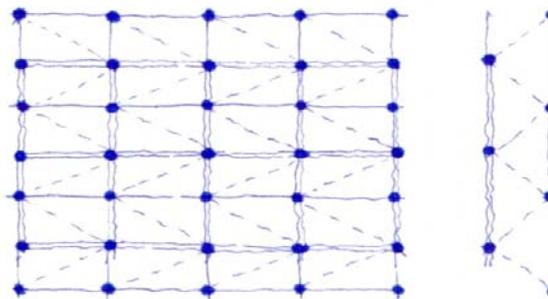


Fig. 44- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional con prisma triangular de capas superior e inferior cuadrada.

**3. Reticulado tridimensional espacial con prisma triangular de capas superior e inferior triangular (Fig. 45)**

Poliedro base	Prisma triangular (triángulo equilátero)
Capa superior	Triángulo equilátero (a x a x a)
Capa inferior	Triángulo equilátero (a x a x a)
Número de barras por nodo	6 horizontales 1 diagonal ----- 7 barras en total
Tipo de barras	Dos tipos de longitud de barras
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 25

Reticula compuesta por prismas con base formada por triángulos equiláteros, en donde sus bases forman las capas superior e inferior.

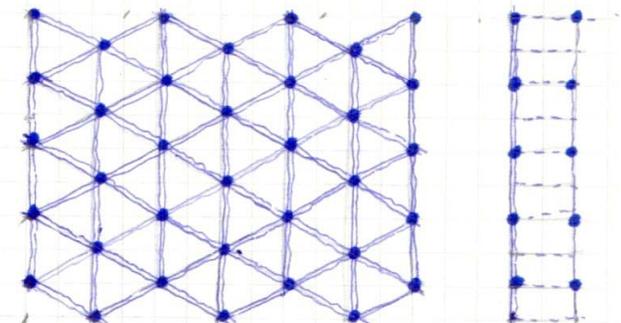


Fig. 45- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional con prisma triangular de capas superior e inferior triangular.

**4. Reticulado tridimensional espacial con prisma hexagonal (Fig. 46)**

Poliedro base	Prisma hexagonal
---------------	------------------

Capa superior	Hexágono (a x a x a x a x a)
Capa inferior	Hexágono (a x a x a x a x a)
Número de barras por nodo	6 horizontales 1 diagonal ----- 7 barras en total
Tipo de barras	Dos tipos de longitud de barras
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 20

Este sistema está formado por prismas de base hexagonal con una sola longitud de barra, con lo cual ofrece un aspecto tipo panal de abeja que le da una gran ventaja estética. Sin embargo, presenta baja capacidad estructural debido precisamente a su composición geométrica.

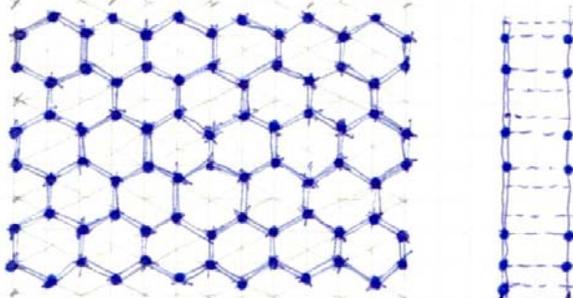


Fig. 46- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial con prisma hexagonal.

5. Reticulado tridimensional espacial semioctatetra (Fig. 47)	
Poliedro base	Pirámide cuadrangular
Capa superior	Cuadrada (a x a)

Capa inferior	Cuadrada (a x a)
Número de barras por nodo	4 horizontales 4 diagonal ----- 8 barras en total
Tipo de barras	Igual
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

La retícula espacial semioctatetra está compuesta por pirámides de base cuadrada y tetraedros, con una sola longitud de barra para mayor facilidad constructiva de armado y con la ventaja de adaptarse a espacios rectangulares, por la disposición ortogonal de las mismas barras en las capas superior e inferior.

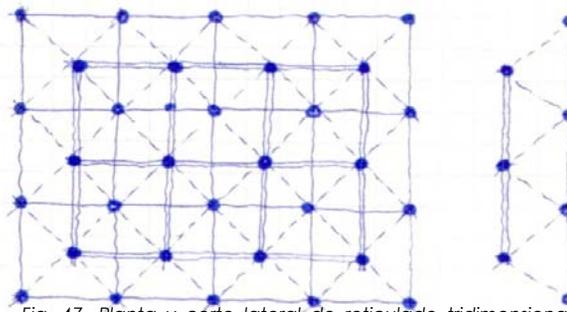


Fig. 47- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional semioctatetra.

6. Reticulado tridimensional espacial octatetra (Fig. 48)	
Poliedro base	Tetraedro regular
Capa superior	Triángulo equilátero (a x a x a)

Capa inferior	Triángulo equilátero (a x a x a)
Número de barras por nodo	6 horizontales 3 diagonal ----- 9 barras en total
Tipo de barras	Igual
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 40

Un reticulado tridimensional espacial octatetra se compone por tetraedros y octaedros, con barras de una sola longitud. La utilización del triángulo equilátero como figura no formable en sus capas superior e inferior y en las diagonales entre ambas capas, la convierte en el sistema de mayor rigidez y por tanto de mayor capacidad estructural.

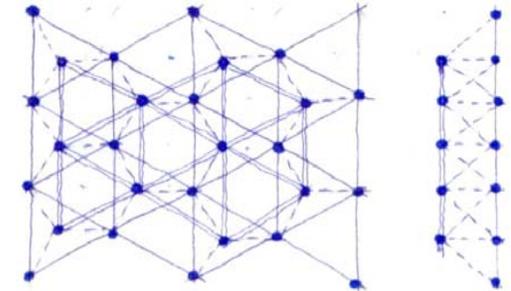


Fig. 48- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial octatetra.

7. Reticulado tridimensional espacial con pirámide hexagonal en la capa inferior (Fig. 49)	
Poliedro base	Pirámide hexagonal
Capa superior	Triángulo equilátero (a x a x a)

Capa inferior	Hexágono regular (a x a x a x a x a)
Número de barras por nodo	6 horizontales 6 diagonal ----- 12 barras en total
Tipo de barras	Iguales
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

Estructura tridimensional compuesta por pirámides de base hexagonal y octaedros, formadas con barras de una sola longitud, con una gran capacidad estructural y apariencia estética en su capa inferior.

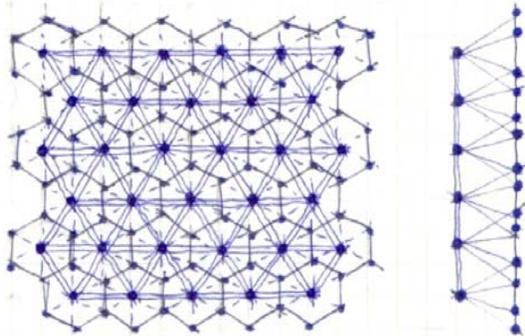


Fig. 49- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial con pirámide hexagonal en su capa inferior.

<b>8. Reticulado tridimensional espacial con capas de cuadrados de diferente tamaño y giradas (Fig. 50)</b>	
Poliedro base	Dodecaedro irregular
Capa superior	Cuadrada (a x a)
Capa inferior	Cuadrada (b x b)

Número de barras por nodo	4 horizontales 2 diagonal ----- 6 barras en total
Tipo de barras	Dos longitudes diferentes
Dirección de barras por capa	Ortogonal
Peralte promedio	Longitud del claro entre 25

Es el sistema tridimensional formado con dodecaedros irregulares y pirámides de base cuadrada, generando la capa superior con barras de un tamaño menor a las barras de la capa inferior. Esta estructura presenta mayores ventajas de uso cuando se arma como doble reticulado.

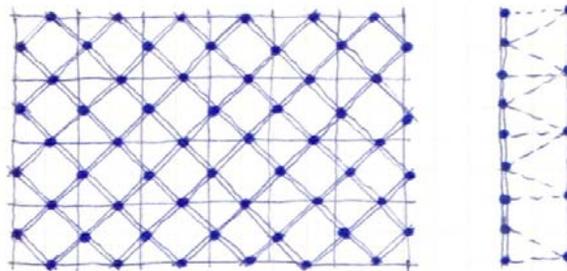


Fig. 50- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial con capas cuadradas de diferente tamaño giradas.

<b>9. Reticulado tridimensional espacial con capas de triángulos equiláteros opuestas (Fig. 51)</b>	
Poliedro base	Octaedro regular
Capa superior	Triángulo equilátero (a x a x a)

Capa inferior	Triángulo equilátero (a x a x a)
Número de barras por nodo	6 horizontales 3 diagonal ----- 9 barras en total
Tipo de barras	Dos longitudes diferentes
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 35

Esta retícula integrada por tetraedros y octaedros irregulares, con un tipo de longitud de barra en sus capas y otro en las diagonales, presenta gran resistencia por utilizar el triángulo en su composición.

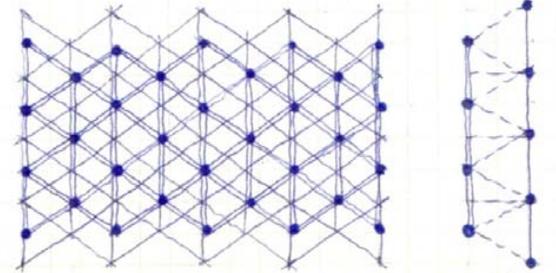


Fig. 51- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial con triángulos equiláteros opuestos en sus capas.

<b>10. Reticulado tridimensional espacial con capa superior triangular e inferior hexagonal (Fig. 52)</b>	
Poliedro base	Undecaedro irregular
Capa superior	Triángulo equilátero (a x a x a)
Capa inferior	Hexágono regular (b x b x b x b x b x b)

Número de barras por nodo	6 horizontales 6 diagonal ----- 12 barras en total
Tipo de barras	Dos longitudes diferentes
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 30

Una retícula de este tipo se compone de poliedros irregulares de once caras y tetraedros también irregulares. Las barras que lo conforman son de dos tipos de longitud y tiene gran apariencia estética.

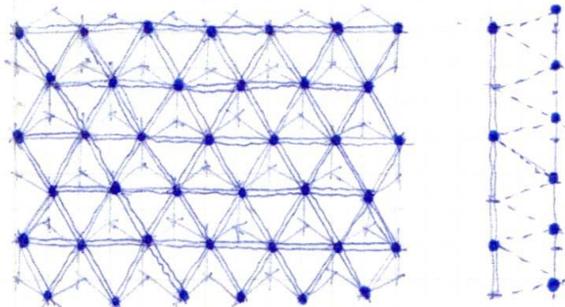


Fig. 52- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial con capa superior triangular e inferior hexagonal.

11. Reticulado tridimensional espacial octatetra irregular (Fig. 53)	
Poliedro base	Tetraedro irregular
Capa superior	Triángulo equilátero (a x a x a)
Capa inferior	Triángulo equilátero (b x b x b)

Número de barras por nodo	6 horizontales 3 diagonal ----- 9 barras en total
Tipo de barras	Dos longitudes diferentes
Dirección de barras por capa	En tres direcciones
Peralte promedio	Longitud del claro entre 40 o más

Es una estructura tridimensional que se compone de octaedros y tetraedros irregulares, a base de dos tipos de longitudes de barras que le brindan una resistencia estructural muy alta debido a la propiedad del triángulo como figura geoméricamente indeformable.

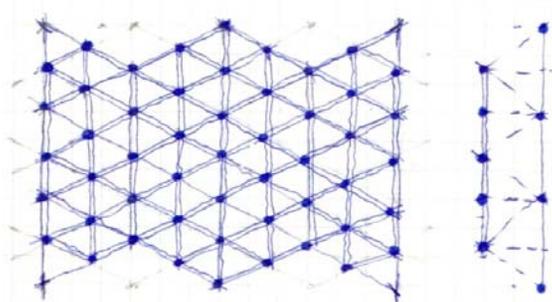


Fig. 53- Planta y corte lateral de reticulado tridimensional espacial octatetra irregular.

Estos ejemplos de estructuras espaciales tridimensionales son los arreglos de retículas más representativos y más empleados en la construcción para cubiertas ligeras planas.

Las característica en estas estructuras es la utilización de uno o dos poliedros regulares o irregulares como figura base, con las capas superior o inferior son formadas siempre por

polígonos regulares, lo que implica un tipo de barra del mismo tamaño.

Una de las grandes ventajas en las retículas, es el número de barras que convergen a un nodo, porque de esto depende el costo y la resistencia de la misma, y de estas once estructuras mostradas el promedio es de 8 a 9 barras por nodo.

Finalmente en cuanto al peralte promedio, este se define en función a la longitud de las barras colocadas como diagonales de la retícula, la cual es en varios casos de igual tamaño a los empleados en las capas o simplemente de otra longitud, por lo que implica tener mínimo dos tipos de barra por estructura. Y de acuerdo al acomodo de las barras, se determina si la retícula es en dos o tres direcciones en el espacio.

#### NOTAS:

1 Engel Heino, **Sistemas de Estructuras**, Ed. G.Gilli, Barcelona 2001- Sistemas de estructuras de vector activo Pág. 157 a 165

Las figuras No. 38 a la 49 fueron realizadas por el autor de esta investigación.

## CUADRO COMPARATIVO DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE RETICULAS TRIDIMENSIONALES

En el siguiente cuadro se exponen los once tipos de retículas tridimensionales espaciales anteriores, los cuales fueron analizados y evaluados de acuerdo a sus características correspondientes al **número de barras que convergen en el nodo más desfavorable, los tipos de tamaño de las barras, su comportamiento resistente a la indeformabilidad de acuerdo a la figura geométrica utilizada en las capas superior, inferior y diagonal, y finalmente el peralte máximo aproximado que ofrecen**. Considerando que estas características determinadas por el autor, son las cualidades que determinan la factibilidad constructiva, la economía y la resistencia estructural de una retícula tridimensional espacial.

El criterio de evaluación de los tipos de reticulado tridimensional se determinó asignándole un valor de 0 a 2 puntos a cada una de las características descritas anteriormente, para luego realizar una sumatoria total que arroja la calificación de los tipos de retículas. Y de acuerdo a la sumatoria obtenida, los reticulados se clasificarán de la siguiente manera:

	1 a 2 puntos:	<b>MALO</b>
	3 a 4 puntos:	<b>DESAVORABLE</b>
	5 a 6 puntos:	<b>REGULAR</b>
	7 a 8 puntos:	<b>BUENO</b>
	9 puntos :	<b>EXCELENTE</b>

CUADRO COMPARATIVO DE RETICULAS TRIDIMENSIONALES			NÚMERO DE BARRAS EN EL NODO MÁS DESFAVORABLE		TIPO DE TAMAÑO DE LAS BARRAS		INDEFORMABILIDAD EN SUS CAPAS O DIAGONALES			PERALTE		SUMA TOTAL
			MÁS DE SIETE	IGUAL O MENOR DE SIETE	DOS O MÁS	ÚNICO	CAPA		DIAGONALES	IGUAL O MENOR DE 1/30	MAYOR DE 1/30	
TIPO	FIGURA GEOMÉTRICA QUE COMPONE LA CAPA:		1	2	1	2	1	1	1	1	2	VALOR
	SUPERIOR	INFERIOR										
1. PURO DE CUBOS	CUADRADO	CUADRADO	0	2	1	0	0	0	1	1	0	5
2. PRISMA TRIANGULAR	TRIANGULO	CUADRADO	1	0	1	0	1	0	1	1	0	5
3. PRISMA TRIANGULAR	TRIANGULO	TRIANGULO	0	2	1	0	1	1	0	1	0	6
4. PRISMA HEXAGONAL	HEXAGONO	HEXAGONO	0	2	1	0	0	0	0	1	0	4

CUADRO COMPARATIVO DE RETICULAS TRIDIMENSIONALES			NÚMERO DE BARRAS EN EL NUDO MÁS DESFAVORABLE		TIPO DE TAMAÑO DE LAS BARRAS		INDEFORMABILIDAD EN SUS CAPAS O DIAGONALES			PERALTE		SUMA TOTAL
TIPO	FIGURA GEOMÉTRICA QUE COMPONE LA CAPA:		MÁS DE SIETE	IGUAL O MENOR DE SIETE	DOS O MÁS	ÚNICO	CAPA		DIAGONALES	IGUAL O MENOR DE 1/30	MAYOR DE 1/30	
	SUPERIOR	INFERIOR					SUPERIOR	INFERIOR				
			1	2	1	2	1	1	1	1	2	VALOR
5. SEMIOCTATETRA	CUADRADO	CUADRADO	1	0	0	2	0	0	1	0	2	6
6. OCTATETRA	TRIANGULO	TRIANGULO	1	0	0	2	1	1	1	0	2	8
7. PRISMA HEXAGONAL	TRIANGULO	HEXAGONO	1	0	0	2	1	0	1	0	2	7
8. DODECAEDRO IRREGULAR	CUADRADO	CUADRADO	0	2	1	0	0	0	1	1	0	5
9. OCTAEDRO REGULAR	TRIANGULO	TRIANGULO	1	0	1	0	1	1	1	0	2	7
10. UNDECAEDRO IRREGULAR	TRIANGULO	HEXAGONO	1	0	1	0	1	0	1	0	2	6
11. OCTATETRA IRREGULAR	TRIANGULO	TRIANGULO	1	0	1	0	1	1	1	0	2	7

**RESULTADOS**

PROMEDIO POR COLUMNA	0.64	0.73	0.73	0.55	0.64	0.36	0.82	0.45	1.09	6.00
PROMEDIO POR PARTIDA	1.36	1.27	1.82	1.55	6.00					
PORCENTAJE DE PARTICIPACION PROMEDIO POR PARTIDA	22.73%	21.21%	30.30%	25.76%	100.00%					
PORCENTAJE DE PARTICIPACION GENERAL POR COLUMNA	63.64%	36.36%	72.73%	27.27%	63.64%	36.36%	81.82%	45.45%	54.55%	

Analizando los valores obtenidos para los principales tipos de retículas tridimensionales, se determinó que la calificación promedio de estas posibles formas para estructuras fue de 6 puntos de un valor máximo posible de 9, teniéndose la retícula octatetra con 8 puntos como la mayor calificación y la mínima con 4 puntos para la retícula de prisma hexagonal. La calificación promedio es regular, de acuerdo a lo establecido en la escala de valores.

El mayor porcentaje de participación en la calificación promedio es del 30.0%, correspondiente a partida de **calidad de indeformabilidad** en las partes que componen a una estructura tridimensional. La partida demuestra que el 81.8% de los once tipos presentan gran rigidez en sus diagonales, el 63.6% tienen gran resistencia en su capa superior y para la capa inferior esta resistencia la presentan solo el 34.4% de los reticulados. La rigidez es debida a la creación de figuras triangulares en el armado de la retícula, ya que son figuras no deformables geoméricamente. Cabe mencionar que solo tres tipos de retículas tiene la máxima calificación en esta partida: la octatetra, el octaedro regular y el octaedro irregular, siendo la más desfavorable el prisma hexagonal.

La segunda partida más importante de acuerdo a su participación en la calificación promedio es del 25.76%, relativa al **peralte** que tienen los tipos de retículas tridimensionales. El 54.55% del total de retículas, ofrecen un peralte promedio, calculado en función al espacio a cubrir por la retícula entre un

denominador mayor a 30. Los armados reticulares que ofrecen esta cualidad y que también cumplen con la partida anterior son los tipos octatetra, octaedro regular y octaedro irregular.

El 22.73% es el porcentaje de participación en la calificación promedio de la tercera partida llamada: **número de barras que convergen en el nodo más desfavorable**. En la cual se puede establecer en gran parte que el éxito de toda estructura tridimensional espacial será contar con el menor número de barras posible convergiendo en los nodos; sin embargo, el 63.6% de los principales tipos de reticulados tridimensionales rebasan la cantidad de más de siete barras por nodo; por que, los transforma en un sistema pesado por la cantidad de barras y por ende las convierte en retículas con altos costos. Las retículas que presentan igual o menos de siete barras en el nodo más desfavorable son el 36.4% del total, pero esta ventaja se pierde al presentar una menor rigidez debida a la menor cantidad de barras. De los tipos de retículas mejor calificados en las dos partidas anteriores ninguno tiene esta cualidad.

La última partida **tipo de tamaño de las barras** participa con el 21.21% en la calificación promedio. De esta partida se obtiene que el 72.7% de los tipos de retículas tienen la desventaja de utilizar dos o más tipos de tamaño de las barras, para armar un reticulado tridimensional, siendo 27.3% los que requieren un solo tipo de tamaño de barra y

que por tanto tienen la ventaja de crear un sistema de fácil armado. De los tres tipos de retícula mejor calificados en las dos partidas más importantes, sólo el tipo octatetra ofrece de tener un solo tamaño en las barras que componen al sistema.

De los resultados obtenidos del cuadro de los tipos de reticulado tridimensional espacial, se resume que la mejor opción es el sistema formado por octaedros y tetraedros (octatetra), al presentar el más alto puntaje con respecto a los otros tipos, debido principalmente a tres cualidades:

- Rigidez en sus capas superior e inferior y diagonales, por emplear al triángulo como figura base
- Peralte bajo por la gran capacidad de carga que le genera el tetraedro
- Tipo de tamaño de barra único, lo que brinda la ventaja de estandarización, prefabricación y fácil habilitado de la estructura.

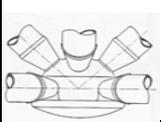
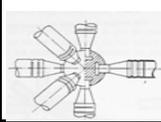
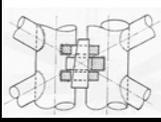
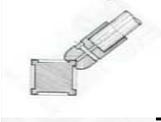
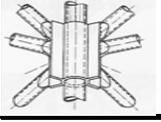
Sin embargo este tipo de reticulado, presenta la desventaja de tener nueve barras que convergen en el nodo, lo que implica una cantidad considerable de barras para su armado y sabiendo que el peso total de las barras es directamente proporcional al costo implicaría que a mayor número de barras mayor también será el costo, por lo que, para poder contrarrestar esta desventaja, se podría utilizar un material ligero de las piezas, disminuyendo así el peso.

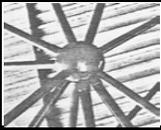
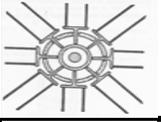
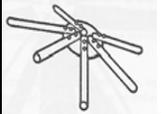
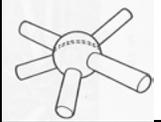
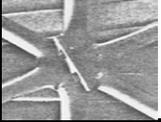
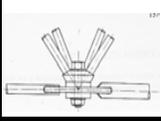
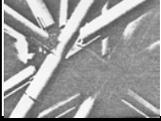
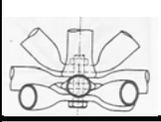
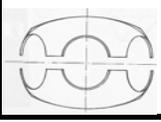
## CUADRO COMPARATIVO DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE NODOS

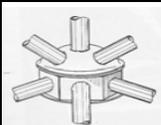
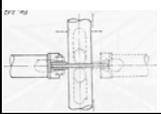
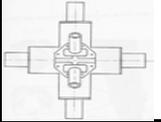
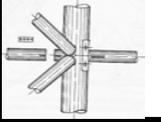
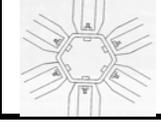
Los principales tipos de nodos para retículas tridimensionales, se exponen en el siguiente cuadro. Cada uno de ellos fue analizado y evaluado de acuerdo a sus características correspondientes al **tipo de unión entre nodo y barra, el grado de dificultad de ensamblaje, el peso del nodo, el costo de su fabricación, la herramienta necesaria para su colocación y el tipo de mano de obra requerida para su armado y colocación**. Considerando que estas características determinadas por el autor son las cualidades que determinan la factibilidad constructiva y la economía del tipo de nodo.

El criterio de evaluación de los tipos de nodos se determinó asignándole un valor de 0, 1, 2, 3 o 4 puntos dependiendo sus cualidades descritas. Posteriormente se obtuvo una calificación final de cada tipo de nodo a partir de la sumatoria de valores asignados. Y dependiendo de esta calificación los tipos de nodos podrán ser:

	1 a 5 puntos:	<b>MALO</b>
	6 a 10 puntos:	<b>REGULAR</b>
	11 a 14 puntos:	<b>BUENO</b>
	15 a 17 puntos:	<b>EXCELENTE</b>

CUADRO COMPARATIVO DE NODOS			TIPO DE UNIÓN				GRADO DE DIFICULTAD DE ENSAMBLAJE			DE PESO DEL NODO			COSTO DE FABRICACION			HERRAMIENTA NECESARIA		MANO DE OBRA REQUERIDA		SUMA TOTAL
NOMBRE	FIGURA	DESCRIPCIÓN	SOLDADURA	ATORNILLADO	REMACHADA	SUJECION A PRESION	ALTO	MEDIO	BAJO	PESADO	MEDIO	LIGERO	ALTO	MEDIO	ECONÓMICO	COMPLEJA	SIMPLE	CALIFICADA	SIMPLE	
			1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	VALOR
1. BEGUE		NODO SÓLIDO FORMADO POR MEDIA ESFERA METALICA HUECA	0	2	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	8
2. BEGUE- KIEFFER		NODO SÓLIDO COMPUESTO POR UNA ESFERA METALICA CON ORIFICIOS	0	0	0	4	1	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	10
3. BITUBULAR		NODO TUBULAR INTEGRADO CON DOS TUBOS CIRCULARES PARALELOS	1	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0	1	0	1	0	9
4. BOUQUARDEZ		NODO TUBULAR FORMADO POR UN TOROIDE CON MANGOS TUBULARES	0	0	3	0	0	0	3	0	2	0	1	0	0	0	2	0	2	13
5. CHAMAYOU		NODO TUBULAR A BASE DE PRISMA HEXAGONAL CON CONEXIÓN TIPO MACHO EN SUS ARISTAS	0	0	0	4	0	2	0	0	0	3	1	0	0	0	2	0	2	14
6. DELACROIX		NODO LAMINADO COMPUESTO POR DOS SEMITUBOS CON ALETAS	0	2	0	0	0	2	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	9

NOMBRE	FIGURA	DESCRIPCIÓN	SOLDADURA	ATORNILLADO	REMACHADA	SUJECION A PRESION	ALTO	MEDIO	BAJO	PESADO	MEDIO	LIGERO	ALTO	MEDIO	ECONÓMICO	COMPLEJA	SIMPLE	CALIFICADA	SIMPLE	SUMA TOTAL	
			1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2		VALOR
7. ESFERICO		NODO SÓLIDO ESFÉRICO MACIZO	1	0	0	0		1	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0	1	0	7
8. KIEFFER		NODO COMPUESTO POR DOS CILINDROS CONCÉNTRICOS CON RANURAS EN SU CIRCUNFERENCIA	0	0	0	4		0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	2	1	0	11
9. MAKOWSKI		NODO LAMINADO CON FORMA DE CASQUETE	0	2	0	0		0	2	0	0	0	3	1	0	0	0	2	0	2	12
10. MERO		NODO SÓLIDO MACIZO COMPUESTA POR UNA ESFERA FORMADA CON OCTÁGONOS Y ORIFICIOS	0	2	0	0		0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	8
11. OKTAPLATTE		NODO SÓLIDO HUECO INTEGRADO CON DOS SEMIESFERAS UNIDAS POR UNA APLACA CIRCULAR	1	0	0	0		1	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	7
12. PIÑEIRO		NODO LAMINADO FORMADO POR DOS PLACAS METÁLICAS EN ÁNGULO	1	0	0	0		0	2	0	0	2	0	0	2	0	1	0	1	0	9
13. PIRAMITEC		NODO SÓLIDO FORMADO POR UN CILINDRO	1	0	0	0		1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	6
14. PLETINAS		NODO TUBULAR A BASE DE PLACAS DOBLADAS UNIDAS A UN TUBO CENTRAL DE MAYOR DIÁMETRO	1	0	0	0		1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	6
15. SARTON		NODO FORMADO ÚNICAMENTE POR UN TORNILLO CENTRAL	0	2	0	0		1	0	0	0	0	3	1	0	0	1	0	0	2	10
16. SDC		NODO LAMINADO FORMADO POR DOS CAPARAZONES	1	0	0	0		0	2	0	0	2	0	1	0	0	0	2	0	2	10

NOMBRE	FIGURA	DESCRIPCIÓN	SOLDADURA	ATORNILLADO	REMACHADA	SUJECIÓN A PRESIÓN	ALTO	MEDIO	BAJO	PESADO	MEDIO	LIGERO	ALTO	MEDIO	ECONÓMICO	COMPLEJA	SIMPLE	CALIFICADA	SIMPLE	SUMA TOTAL	
			1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	VALOR	
17. SEGMO		NODO TUBULAR COMPUESTO POR UN TUBO HEXAGONAL CON TAPAS CIRCULARES SEMIESFÉRICAS EN SUS EXTREMOS	1	0	0	0		1	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	7
18. TESEP		NODO TUBULAR INTEGRADO POR UN TUBO CENTRAL CON LÁMINA TIPO BRIDA	1	0	0	0		1	0	0	0	2	0	0	2	0	1	0	1	0	8
19. TRIDIMATEC		NODO TUBULAR FORMADO POR DOS TUBOS UNIDOS EN FORMA DE CRUZ	1	0	0	0		0	2	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	0	8
20. TRIODETIC		NODO SÓLIDO MACIZO A BASE DE UN CILINDRO CON RANURAS EN SU CIRCUNFERENCIA	0	0	0	4		0	0	3	1	0	0	1	0	0	1	0	0	2	12
21. TUBACCORD		NODO SÓLIDO MACIZO CILINDRO CON RANURAS PARA SOLDAR LAS BARRAS	1	0	0	0		1	0	0	0	2	0	0	2	0	1	0	1	0	8
22. UNISTRUT		NODO LAMINADO INTEGRADO POR UNA PLACA DOBLADA CON ORIFICIOS	0	2	0	0		0	0	3	0	2	0	1	0	0	0	2	0	2	12
23. WUPPERMANN		NODO TUBULAR A BASE DE TUBO HEXAGONAL PARA UNIR LAS BARRAS CON TORNILLOS	0	2	0	0		0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	2	1	0	9

## RESULTADOS

PORCENTAJE PARTICULAR POR COLUMNA	0.48	0.61	0.13	0.70	0.43	0.87	0.39	0.30	1.13	0.39	0.78	0.43	0.00	0.70	0.61	0.70	0.61	9.26
PORCENTAJE PARTICULAR POR PARTIDA	1.91			1.70			1.83			1.22			1.30			1.30		9.26
PORCENTAJE PARTICULAR POR PARTIDA	20.66%			18.31%			19.72%			13.15%			14.08%			14.08%		100.00%

PORCENTAJE DE PARTICIPACION GENERAL POR COLUMNA	47.8%	30.4%	4.3%	17.4%	43.5%	43.5%	13.0%	30.4%	56.5%	13.0%	78.3%	21.7%	0.0%	69.6%	30.4%	69.6%	30.4%	
---	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	--

A partir del cuadro comparativo de los tipos de nodos, se determinó que la calificación promedio por tipo de nodo fue de 9.26 puntos de un valor máximo posible de 17, considerándose de acuerdo a escala de valores de evaluación como una calificación regular. Los valores extremos fueron de 14 y 6 puntos respectivamente.

El mayor porcentaje de participación corresponde a la partida referente al **tipo de unión** con el 26.66%. En ella se indica que el 47.8% de los 23 tipos de nodos analizados utilizan soldadura en sus uniones, el 30.4% son nodos que emplean tornillos, en el 17.4% la sujeción es a presión y apenas el 4.3% son remachadas. De acuerdo al puntaje el mejor nodo es el que trae como unión la sujeción a presión, pero implica un costo de fabricación muy alto, por lo que se deberá optar por la unión que ofrezca costos de fabricación más accesibles, siendo esta la unión con tornillos.

La segunda partida más importante de acuerdo al puntaje promedio obtenido es la del 19.72%, relativa al **peso de los nodos** de una estructura tridimensional, y en la cual, aparece el 56.5% del total de nodos, con un peso calificado como medio, por ser piezas sólidas huecas, el 30.4% son dispositivos pesados, cuya característica es que son piezas

sólidas o huecas con gran espesor, y los nodos ligeros el 13.0%. Estos nodos ligeros son piezas laminadas y con perforaciones.

La partida que indica el grado de **dificultad de ensamblaje** con un 18.31%, ocupa el tercer lugar de participación en el promedio general con el 18.1%. Esta indica que el 43.5% de los 23 nodos, presentan un alto grado de dificultad de ensamblaje. También el 43.5% de los 23 tipos de nodos manifiestan un grado de dificultad de unión tipo medio y sólo el 13.0% son nodos fáciles de armar.

El 14.08% es el porcentaje de participación en la calificación de la partida **herramienta necesaria** para unir los nodos con las barras ubicándose en el cuarto lugar. Se encontró en este grupo que el 69.6% de los principales nodos requieren de herramienta compleja en su armado, razón que los limita para calificarlos como de buena calidad y sólo el 30.4% son nodos que necesitan de una herramienta simple, lo que representaría una gran ventaja.

La partida correspondiente a **mano de obra requerida** también representa el 14.08% de la calificación total del nodo. Al analizar ésta, se encuentra que el 69.6% de los nodos evaluados requieren de una mano de obra calificada y el 30.4% no requieren de personal

especializado para ejecutar el ensamblaje de piezas.

La partida con menos porcentaje de participación es la referente al **costo de fabricación de los nodos** y participa con el 13.15%. Esta partida muestra que el 78.3% de los 23 tipos de nodos, son piezas con un alto costo de producción, lo cual provoca también un incremento en costo del sistema que forman. El 21.7%, son nodos con un costo de fabricación tipo medio y el 0% es decir, ninguno de los tipos analizados fueron económicos.

Es precisamente en esta partida donde se tiene los porcentajes extremos, es decir, el más alto y el más bajo de todas las características que ofrecen los nodos.

De los resultados obtenidos del cuadro comparativo de nodos, se concluye que las cualidades necesarias en el diseño del nodo deben ser preferentemente jerarquizadas de la siguiente forma:

1. Costo de fabricación, bajo
2. Tipo de unión, atornillado o sujeto a presión
3. Peso, ligero
4. Grado de dificultad de ensamblaje, bajo
5. Mano de obra requerida, simple
6. Herramienta necesaria, simple

## PRINCIPALES TIPOS DE APOYO

El soporte de una estructura tridimensional espacial, es a través de los nodos, ya sean de la capa superior e inferior, o únicamente de alguna de las dos capas con *apoyos en forma aislada*, por medio de elementos verticales como podría ser las columnas metálicas, de concreto armado, de madera, etc.

Las opciones para los apoyos aislados en una estructura tridimensional espacial son:

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

Otra posibilidad de apoyo para este tipo de estructuras es también a través de sus nodos, pero contiguos, ya sea de la capa superior o de la capa inferior con *apoyos continuos* formados por elementos horizontales, como serían los muros o trabes de cualquier tipo de material.

Las posibilidades para apoyos continuos en una estructura tridimensional espacial son:

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

Sin embargo, existe una tercera opción, la cual es una combinación de los tipos de apoyos: aislado y continuo, resultando las siguientes posibilidades:

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

## COMPORTAMIENTO O ESTABILIDAD

Las estructuras espaciales tridimensionales se rigen por la Ley de estabilidad establecida por **AUGUST FOPPL**<sup>1</sup> (Munich, 1892), enunciada de la siguiente forma:

“Una estructura espacial tridimensional es estáticamente determinada y estable, cuando entre el número “**n**” de nodos y el número “**b**” de barras se cumple la condición: **b = 3n-6**”.

Según esta ley, de todos los poliedros regulares de los antiguos griegos, sólo el tetraedro y el icosaedro, son estables, si están contruidos con estructuras de barras, mientras que el cubo y el dodecaedro sólo formarán estructuras estables si se triangulan en sus caras laterales”.

El triángulo con  $n = 3$  y  $b = 3$  es la superficie más simple formada con barras y estáticamente la más estable.

El tetraedro con  $n = 4$  y  $b = 6$  es la figura más simple y estáticamente es la más estable.

En base a lo anterior se dice, que:

1. Las estructuras espaciales se forman con triángulos rectángulos o equiláteros de tal manera que se generen poliedros regulares en forma de tetraedros, cubos, octaedros y cuboctaedros o parte de ellos

2. Las estructuras espaciales así formadas son más completas porque garantizan condiciones estáticas
3. óptimas y posibilitan la construcción con barras del mismo tamaño, y con conectores uniformes.
4. El largo de las barras de los poliedros mencionados, forman una progresión
5. geométrica de crecimiento natural con el factor raíz cuadrada de dos.
6. Con diferentes largos de barra, de la progresión geométrica del crecimiento natural, se pueden construir series de poliedros regulares semejantes:

- Con una sola medida de la barra se construyen tetraedros y octaedros.
- Con dos diferentes medidas de barra se generan cubos triangulares con diagonales.
- Con tres diferentes medidas de barra se forman un medio cubo despuntado con triangulaciones diagonales.

NOTA:

<sup>1</sup> Mirafuentes José, **Armaduras Espaciales**, Ed. U. N. A. M., México 1972

## PROPUESTA: ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL ESPACIAL FORMADA POR TETRAEDROS Y

En los antecedentes se describieron los diferentes sistemas de estructuras tridimensionales espaciales diseñadas hasta la actualidad, tanto en el plano internacional como en el nacional. Estos sistemas han evolucionado para ser más resistentes y ligeros para cubrir espacios cada vez más grandes, pero sin embargo a un costo muy alto; lo que ha originado, la disminución de la construcción de estas estructuras tridimensionales con sistemas patentados, orillando así a la fabricación de retículas armadas en el lugar, cuyas barras son unidas a los nodos principalmente con soldadura. En muchas de las ocasiones, se tiene la necesidad de que estas estructuras cubran espacios menores a los cinco ó diez metros como máximo.

Por tanto, se propone una estructura tridimensional espacial que pueda cubrir claros menores a las dimensiones descritas anteriormente y a un bajo costo, en cuyo caso para lograr este objetivo se opta por aplicar la retícula que mayor resistencia ofrece debido a su composición geométrica: **la estructura tridimensional espacial formada por tetraedros y octaedros (CÉLULA OCTA-TETRA)**, en la cual se aprovecha al máximo las cualidades de estabilidad y de oposición a la deformación de estos poliedros, debido a su composición a base de triángulos equiláteros en sus caras, lo cual se traduce en una retícula de tres direcciones con gran rigidez.

## OCTAEDROS

Para construir este sistema es necesario definir de qué material serán fabricadas las partes que componen a esta estructura en sus nodos y barras, con los cuales se dará la pauta de factibilidad y éxito del sistema propuesto.

El material que se puede utilizar para la fabricación de esta estructura es el fierro, ya que ofrece las características de resistencia más adecuadas, las que se pueden combinar con la resistencia propia de la misma retícula y ofreciendo además un costo accesible. Por lo que, se buscó un perfil estructural existente en el mercado para la fabricación de las barras del sistema y cuya sección ofreciera una buena rigidez, encontrándose a la bagueta, la cual es un perfil de fierro laminado con una sección transversal con forma de "U" que lo hace tener mayor posibilidad de resistencia y además, ser un perfil ligero y que se puede comprar a bajo costo.

Del análisis comparativo de los nodos existentes patentados, se deduce que los mejores nodos son los laminados, los cuales son ligeros, de fácil sujeción ya sea con tornillos o únicamente a presión y que requieren de mano de obra y herramienta muy sencillas, concluyendo en que se propondrá un nodo laminado que tendrá que ser diseñado para unir a las nueve barras que converjan en él.

Para unir las barras compuestas por bagueta y los nodos laminados se plantea que el sistema sea atornillado y que únicamente se utilice

una sola pieza en cada extremo de la barra. Esta disposición hará que el sistema sea versátil, de fácil armado y con el uso de herramienta muy sencilla que no requiera de ningún equipo para su colocación.

Con la propiedad de poder construir tetraedros con bagueta y nodos laminados, se podrá crear un módulo tipo al que se propone llamar célula tetraédrica. La unión o progresión de estas células generará el sistema tridimensional espacial octa-tetra.

Se pretende que los elementos de esta estructura sean prefabricados para lograr una estandarización, modulación y control de calidad, lo que originará una reducción en los tiempos de armado en el lugar de izaje y además con la posibilidad de formar un sistema constructivo por autoconstrucción.

Otra de las ventajas que se pretende tenga este sistema es su adaptabilidad a espacios ya existentes, es decir, la posibilidad de combinarse con otros sistemas constructivos que permita llegar a crear, posibilidades infinitas de soluciones arquitectónicas.

Por último, con respecto a los apoyos, la estructura se puede emplear en cantiliver o con apoyos perimetrales o centrales y aislados o continuos; pudiendo ser construida en cualquier parte de la República Mexicana, superando las fuerzas accidentales ocasionadas por sismo o por viento.

## METODOLOGÍA DE ANALISIS DE LA CELULA TETRAÉDRICA

Un sistema tridimensional espacial adquiere una gran resistencia y capacidad de carga en función a la indeformabilidad de la forma geométrica con gran resistencia y capacidad de carga debida a la forma geometrica de los polígonos y poliedros, la investigación partirá del triángulo equilátero como la figura inicial que mejores características ofrece y que por tanto será necesario analizar sus líneas y puntos notables que lo integran, cualidades y ventajas geométricas, y como en determinado arreglo de esta figura va generando a dos poliedros cuyas caras solo son triángulos equiláteros: el tetraedro y octaedro, que implicarán establecer sus características geométricas, y de que a cierto acomodo de éstos generar una composición tridimensional a base de tetraedros y octaedros; es decir, establecer la construcción de un sistema estructural tipo cuya unidad es una célula Tetraédrica que pueda crecer tantas veces como sea necesaria.

Una vez determinada el diseño geométrico de la estructura tridimensional espacial con tetraedros y octaedros será necesario investigar la estabilidad y comportamiento estructural de este tipo de estructuras, para así encontrar las características que la hace posible calcularlas.

Posteriormente se analizarán los posibles materiales con los cuales se fabricarán los componentes del sistema: barras y nodos. Para ello se definirá el primer elemento que compone a las estructuras tridimensionales espaciales, sus barras, por lo que deberá considerarse un material con resistencia a la rotura y a la vez ligero para generar una retícula ligera y por ende un sistema a bajo a costo. Este posible material sería el acero, con sus características correspondiente a un material laminado. Luego, definir la forma de la sección de las barras:

- Dimensiones

- Calibre de su espesor
- Peso propio
- Área en su sección transversal

Se determinarán las propiedades estructurales para su diseño:

- Momento de inercia
- Módulo de sección
- Radio de giro
- Longitud máxima a la que se puede fabricar la barra

Con la dimensión establecida de la barra se obtendrá la medida que tendrá la célula tridimensional del sistema y posteriormente su capacidad de carga que puede soportar:

- relación de esbeltez
- esfuerzo admisible a compresión
- carga máxima posible a compresión.

El segundo elemento que compone a la estructura tridimensional espacial son sus nodos. Para su diseño se seguirán las siguientes características:

- Tipo de sujeción más adecuado para su armado
- Grado de complejidad de ensamblaje
- Peso propio
- Costo de fabricación
- Herramienta necesaria
- Colocación e izaje
- Tipo de mano obra requerida

En el diseño del nodo se establecerá el material más idóneo del mismo, y su forma y dimensiones se definen de acuerdo a la manera de cómo convergen las barras a este punto, tanto en la capa superior o inferior y en las diagonales del sistema; así como también,

se deberá atender la apariencia estética de los nodos que le dará también la apariencia estética final a la estructura de este tipo.

Con la definición de estos dos elementos se buscará un dispositivo en la unión directa entre las barras y los nodos, con lo cual, generará la facilidad de ensamblaje y armado del sistema. En esta unión se genera un esfuerzo cortante simple, en donde, este esfuerzo será absorbido por los tornillos que unen al nodo con la barra, para lo cual se calcularán número de tornillos en función al cuádruple de la carga a la que esta sometida la barra, entre el producto del esfuerzo resistente a cortante del material que forma a los nodos por el cuadrado del valor del diámetro de los tornillos propuestos.

Por último se revisará analíticamente la unión entre la barra y el nodo, consistente en comprobar los siguientes puntos:

- Resistencia a la ruptura de estos dos elementos de acuerdo al área posible de la sección transversal en sus orillas por el efecto de la línea o trayectoria del desgarramiento del perfil que forma al nodo
- Área neta obtenida de la diferencia del área de la sección transversal menos el área de lo orificios o barrenos
- Área efectiva igual al 85 % de su área neta
- Resistencia a la fractura, para posteriormente comparar que la carga máxima a compresión obtenida es mayor a la carga máxima requerida

Con célula tetraédrica definida se procederá a la obtención del sistema tridimensional espacial formado por este módulo.

## GEOMETRIA DE LA CÉLULA TETRAÉDRICA

En una estructura espacial tridimensional octa-tetra la figura base es el triángulo equilátero, el cual es el primer polígono regular formado con tres lados o barras y tres vértices o nodos y cuya superficie es indeformable (Fig. 54). Es por tanto una figura estable que no se deforma siempre y cuando no se rompa alguna de las barras que la forman ó no se separen los nodos que la contienen.

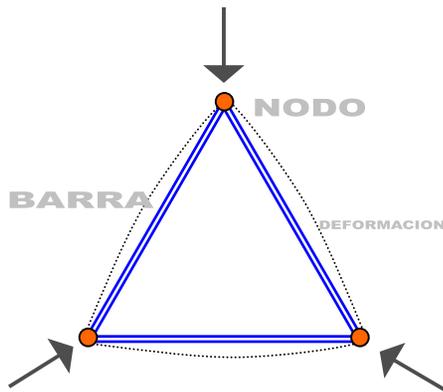


Fig. 54- El triángulo equilátero en una estructura espacial es la figura principal de estas estructuras por su estabilidad estática e indeformabilidad.

Dentro de los tipos de triángulos, el equilátero que es un polígono regular con sus tres lados y sus tres ángulos interiores iguales, es el más estable debido a que sus rectas medianas, bisectrices, mediatrices y alturas, coinciden en la misma posición y sus intersecciones que generan respectivamente los puntos de incentro, baricentro, circuncentro y ortocentro, coinciden en un solo punto llamado centro de gravedad de figura (Fig. 55).

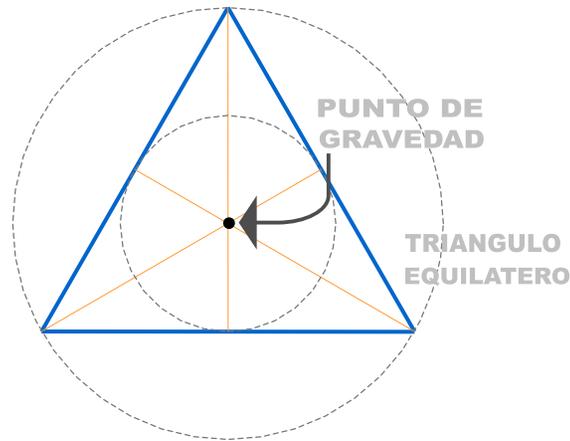


Fig. 55- El triángulo equilátero es el único polígono en el que sus rectas y puntos notables coinciden en uno solo respectivamente.

Debido a la geometría del triángulo equilátero, sus lados tienen la misma medida; con esta ventaja, al unir cuatro triángulos de este tipo, se crea el tetraedro (Fig. 56), el primero y más sencillo de los poliedros regulares y convexo. Este poliedro presenta 4 caras, 4 vértices, 6 aristas y un ángulo diedro de  $70^\circ 32'$ , generándose como el sólido con la mejor estabilidad y la máxima rigidez posible.

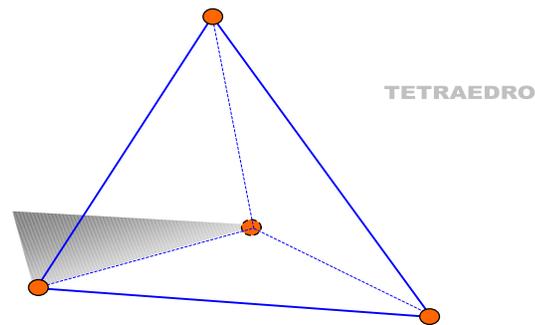


Fig. 56- El primer poliedro regular es el tetraedro, formado con cuatro triángulos equiláteros.

Al unirse tres tetraedros por sus vértices formando un triángulo equilátero al centro de entre sus bases, se genera entre las caras de los tetraedros un octaedro regular (Fig. 57), con 6 vértices y 12 aristas iguales en longitud, este poliedro es estáticamente estable por la geometría misma de la figura.

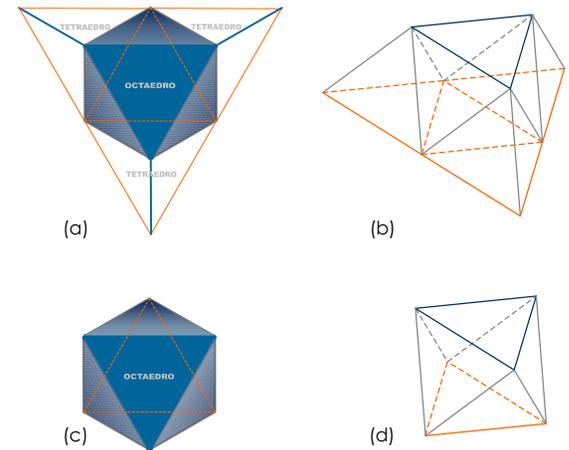


Fig. 57- a)- Proyección superior de tres tetraedros que forman a un octaedro en el centro de estos. b)- Isométrico de tres tetraedros y un octaedro al centro. c)- Octaedro generado por triángulos equiláteros. d) Isométrico de un octaedro regular

NOTA:

Las figuras No. 50 a 53 fueron realizadas por el autor de esta investigación.

## ANÁLISI TEÓRICO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONENEN A LA CELULA TETRAEDRICA

### BARRAS

#### MATERIAL Y FORMA

Con la finalidad de crear una estructura espacial tridimensional octa-tetra es necesario primeramente definir las barras que puedan formar a un tetraedro, por lo que se consideró un material con resistencia a la rotura como lo es el acero, pero a la vez ligero para disminuir su costo.

El elemento que reúne las características anteriores es la **bagueta**, que es un perfil construido con lámina de sección cuadrada en forma de "U" con sus lados iguales de 1.27 cm, en calibre # 18 equivalente a un espesor de 0.121 cm y un peso de 4.52 grs. por metro lineal de bagueta, lo que origina que sea un material ideal para fabricar las barras que forman al tetraedro (Fig. 58).

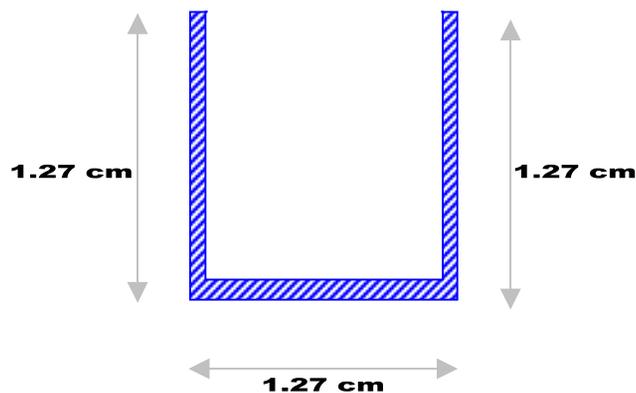


Fig. 58- Las barras del tetraedro son baguetas, con perfil de fierro laminado de sección cuadrada en horma de "U".

### NODOS

#### MATERIAL Y FORMA

Con respecto a la determinación del nodo que une las barras que convergen en sentido horizontal y en forma diagonal, se requiere de un material resistente y ligero, para unir a las barras. Por tanto, se propone un nodo fabricado con material de acero laminado, compuesto en dos partes, una es una placa de lámina cuya forma se originó debido a que en ella convergen las tres barras diagonales y la otra también es una placa de acero laminado a la cual llegan seis barras.

La forma de la primera placa es generada de acuerdo al siguiente diagrama (Fig. 59 a y b):

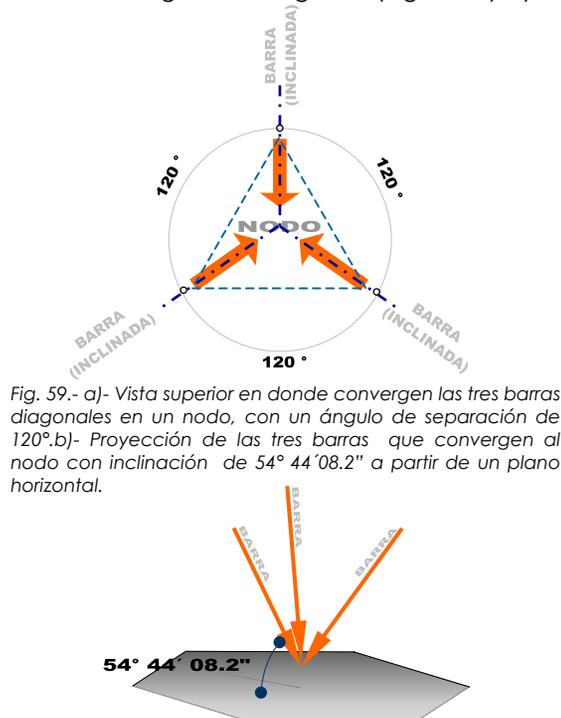


Fig. 59.- a)- Vista superior en donde convergen las tres barras diagonales en un nodo, con un ángulo de separación de 120°. b)- Proyección de las tres barras que convergen al nodo con inclinación de 54° 44' 08.2" a partir de un plano horizontal.

Como se puede observar en el esquema anterior, se propone una placa metálica con forma de triángulo equilátero a la cual convergen las tres diagonales y por tanto deberá tener tres dobleces con una inclinación de 54° 44' 08.2" para que las barras se puedan unir a esta placa. Por lo tanto esta parte del nodo quedará con la siguiente forma (Fig. 60):

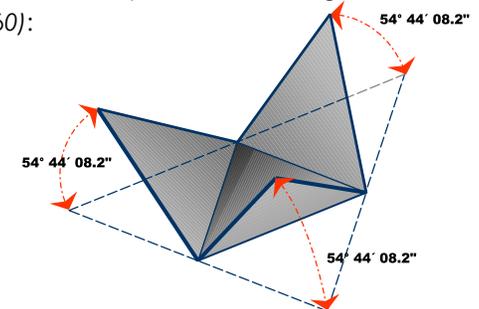


Fig. 60- La línea recta punteada muestra el triángulo equilátero original el cual quedará dividido en cuatro partes con las orillas dobladas con un ángulo de 54° 44' 08.2"

La otra placa que es el complemento del nodo tiene características similares a la placa triangular, pero con la diferencia que a ésta convergen seis barras en un plano horizontal, formando ángulos de 60° (Fig. 61).

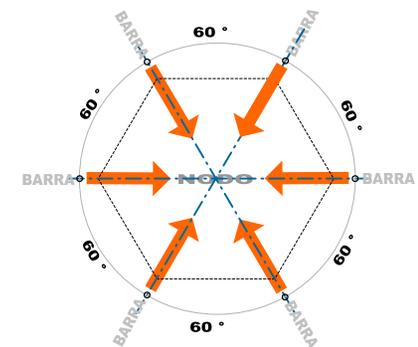


Fig. 61- Complemento del nodo el cual une seis barras en un plano horizontal.

La forma circular de esta placa es la mejor figura geométrica para unir a las seis barras porque optimiza la cantidad de material, con una facilidad de ensamblaje y con mejor apariencia estética (Fig. 62)

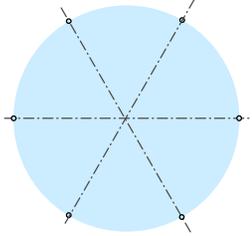
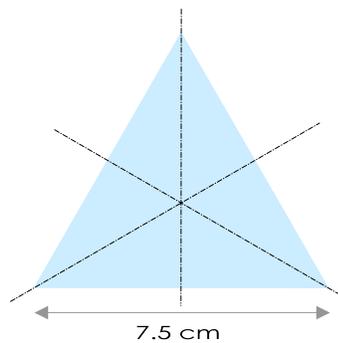


Fig. 62.- Placa circular la cual se unirá a otra placa pero triangular para formar el nodo.

### DIMENSION DEL NODO

El nodo de la estructura espacial tridimensional esta compuesto por dos placas una de forma triangular con tres dobleces y otra circular plana. El tamaño de la placa triangular se determinó de acuerdo a la sección cuadrangular de 1.27 por lado de las barras de forma que no se estorben una de otra, así como el espacio necesario para traslapar las barras con esta placa, por lo que se propone como la mejor dimensión posible para esta



placa con forma de triángulo equilátero de 7.50 cm de lado a reserva de su revisión analítica (Fig. 63).

Fig. 63- Placa triangular de 7.5 cm de longitud en sus orillas.

Para el tamaño de la placa circular se determinó también de acuerdo a la sección cuadrangular de la barra y el traslape de éstos, además de considerar el espacio para la unión entre ambas placas circular y triangular, por lo que se propone como la

mejor dimensión posible para esta placa circular de 6.00 cm de diámetro a reserva de su revisión analítica (Fig. 64).

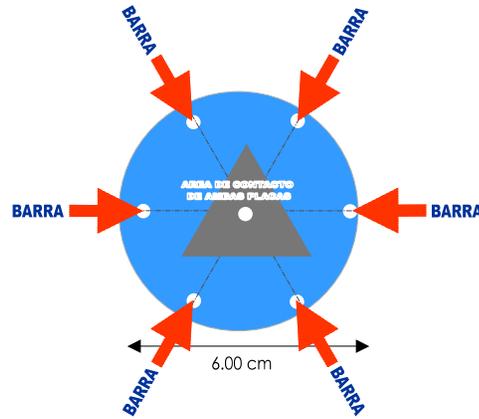


Fig. 64- Placa circular de 6.00 cm de diámetro y área de contacto de ambas placas.

Entonces la estructura espacial tridimensional formada por tetraedros y octaedros quedará armada con barras a base de bagueta y con nodos construidas con dos placas metálicas una circular y otra triangular (Fig. 65).

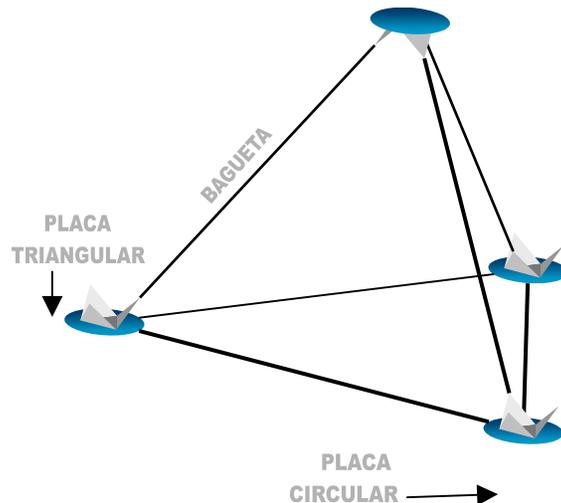


Fig. 65- Nodo compuesto por una placa triangular doblada en sus tres esquinas y una circular, con barras de bagueta e isométrico del tetraedro formado con éstos elementos.

### UNION ENTRE NODO Y BARRA

Otra de las características que debe reunir este sistema espacial tridimensional octa-tetra, es que debe ser un sistema atornillado para mayor facilidad de ensamblaje, por lo tanto se determinó utilizar un tornillo y una tuerca tipo, como elementos de sujeción para unir las barras a las placas circular y triangular que componen a un nodo.

Las dimensiones del tornillo están en función de la escuadría de la barra (1.27 cm por lados), en la cual se pretende que el tornillo quede oculto en el mismo perfil que conforma a una barra o sea a la bagueta (Fig. 66).

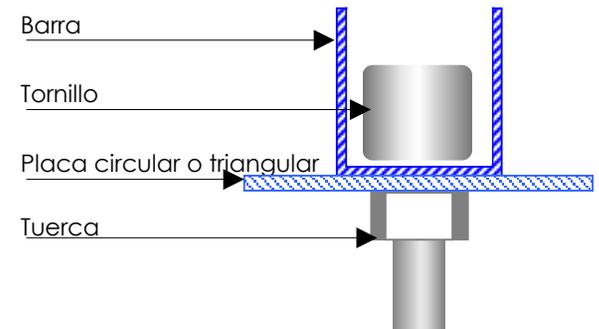


Fig. 66- Tornillo y tuerca tipo para la unión de las barras con el nodo.

Por tanto el tamaño del tornillo que mejor se adapta a este fin es de un diámetro de **3/16" (4.7625 mm)** y con una longitud de **1/2" (12.7 mm)** para poderse atornillar con una tuerca del mismo diámetro y así sujetar la barra con el nodo.

También este tornillo será de alta resistencia debido a que trabajará principalmente a un esfuerzo cortante, por lo que un tornillo tipo "Allen" de cabeza hexagonal reúne las mejores condiciones de resistencia.

## CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LA BARRA

La barra será entonces fabricada con bagueta, cuyas características físicas de acuerdo a la compañía Perfiles y herrajes LM, S.A. de C.V., que elabora este producto y que aparece en el "**Catálogo de perfiles y tubos de acero**", de Editorial LM, publicada en México, 2001, indica lo siguiente:

DIMENSIONES	
BASE	1.27 cm
ALTURA	1.27 cm
ESPESOR	
CALIBRE	# 18 (0.121 cm)
PESO	0.37 kg/m

Con estos datos de la sección, se procede a calcular sus **propiedades geométricas** correspondientes:

- Área
  - Momento de inercia
  - Módulo de sección
  - Radio de giro
- **El área de la sección transversal de la barra es:**  
 $A = (1.27)^2 - (1.028)(1.149) = 0.43 \text{ cm}^2$

- **Su momento de inercia ( I ):**

En el eje "x" es:

$$I_{x-x} = \frac{(b1)(h1)^3 - (b2)(h2)^3}{12}$$

$$I_{x-x} = \frac{(1.27)(1.27)^3 - (1.028)(1.149)^3}{12}$$

$$I_{x-x} = \mathbf{0.0868 \text{ cm}^4}$$

Y en el eje "y", es:

$$I_{y-y} = \frac{(b1)(h1)^3 - (b2)(h2)^3}{12}$$

$$I_{y-y} = \frac{(1.27)(1.27)^3 - (1.149)(1.028)^3}{12}$$

$$I_{y-y} = \mathbf{0.1128 \text{ cm}^4}$$

- **El módulo de sección ( S ) :**

En el eje "x", con:

$$S_{x-x} = \frac{(b1)(h1)^3 - (b2)(h2)^3}{6}$$

$$S_{x-x} = \frac{(1.27)(1.27)^3 - (1.028)(1.149)^3}{6}$$

$$S_{x-x} = \mathbf{0.1152 \text{ cm}^3}$$

Y en el eje "y", es:

$$S_{y-y} = \frac{(b1)(h1)^2 - (b2)(h2)^2}{6}$$

$$S_{y-y} = \frac{(1.27)(1.27)^2 - (1.149)(1.028)^2}{6}$$

$$S_{y-y} = \mathbf{0.1390 \text{ cm}^3}$$

- **El radio de giro ( r ):**

En el eje "x" es:

$$r_{x-x} = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r_{x-x} = \sqrt{\frac{0.0868}{0.43}}$$

$$r_{x-x} = \mathbf{0.4484 \text{ cm}}$$

Y en el eje "y", es:

$$r_{y-y} = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r_{y-y} = \sqrt{\frac{0.1128}{0.43}}$$

$$r_{y-y} = \mathbf{0.5122 \text{ cm}}$$

- **Longitud máxima permisible**

Con las propiedades geométricas obtenidas, se determina la longitud máxima de la barra con su capacidad máxima de carga a compresión.

Utilizando el dato obtenido anteriormente, referente al radio de giro, se establece la **longitud máxima permisible de la bagueta o barra**, en función a la fórmula de relación de esbeltez ( $l/k/r$ ), la que indica:

$$\frac{\text{Longitud de barra } (l)k}{R} = 120 \text{ sustituyendo}$$

$$\frac{L k}{\mathbf{0.4484}} = 120$$

Se considera un **valor de k = 1**, porque las barras presentan traslación restringida, con rotación libre. Por lo tanto la longitud máxima será:

$$l = (120)(0.4484) = \mathbf{53.81 \text{ cm}}$$

- Relación de esbeltez  
El factor para el cálculo del esfuerzo permisible es:

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

$$C_c = \sqrt{\frac{(2.00) (9.87) (2039000)}{2530}}$$

$$C_c = \mathbf{126.13}$$

- Para este valor le corresponde un **esfuerzo admisible a compresión (Fa)** de:

$$F_a = \frac{\left(1 - \frac{(k \cdot l/r)^2}{2 C_c}\right) F_y}{5/3 + (3k \cdot l/r)/(8 C_c) - (k \cdot l/r)^2/(8 C_c)}$$

$$F_a = \frac{\left(1 - \frac{14400}{31817.55}\right) (2530)}{1.67 + \frac{360}{1009.04} - \frac{1728000}{16052592.24}} = \frac{1384.97}{1.92}$$

$$F_a = \mathbf{722.92 \text{ kg/cm}^2}$$

- **La carga máxima admisible a compresión (a):**

$$a = (F_a) (\text{Área sección transversal})$$

$$a = (722.92) (0.43) = \mathbf{310.85 \text{ kg}}$$

En resumen sus características para diseño, son:

CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES	
SECCIÓN TRANSVERSAL	<b>0.43 cm<sup>2</sup></b>
RELACIÓN DE ESBELTEZ A COMPRESIÓN	<b>126.13 s/u</b>
MOMENTO DE INERCIA EJE X	<b>0.0868 cm<sup>4</sup></b>
MOMENTO DE INERCIA EJE Y	<b>0.1128 cm<sup>4</sup></b>
MODULO DE SECCIÓN EJE X	<b>0.1152 cm<sup>3</sup></b>
MODULO DE SECCIÓN EJE Y	<b>0.1390 cm<sup>3</sup></b>
RADIO DE GIRO EJE X	<b>0.4484 cm</b>
RADIO DE GIRO EJE Y	<b>0.5122 cm</b>
LONGITUD MÁXIMA PERMISIBLE	<b>53.81 cm</b>
ESFUERZO MÁXIMO ADMISIBLE COMPRESIÓN	<b>722.92 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>CARGA MÁX. ADMISIBLE</b>	<b>310 kg</b>

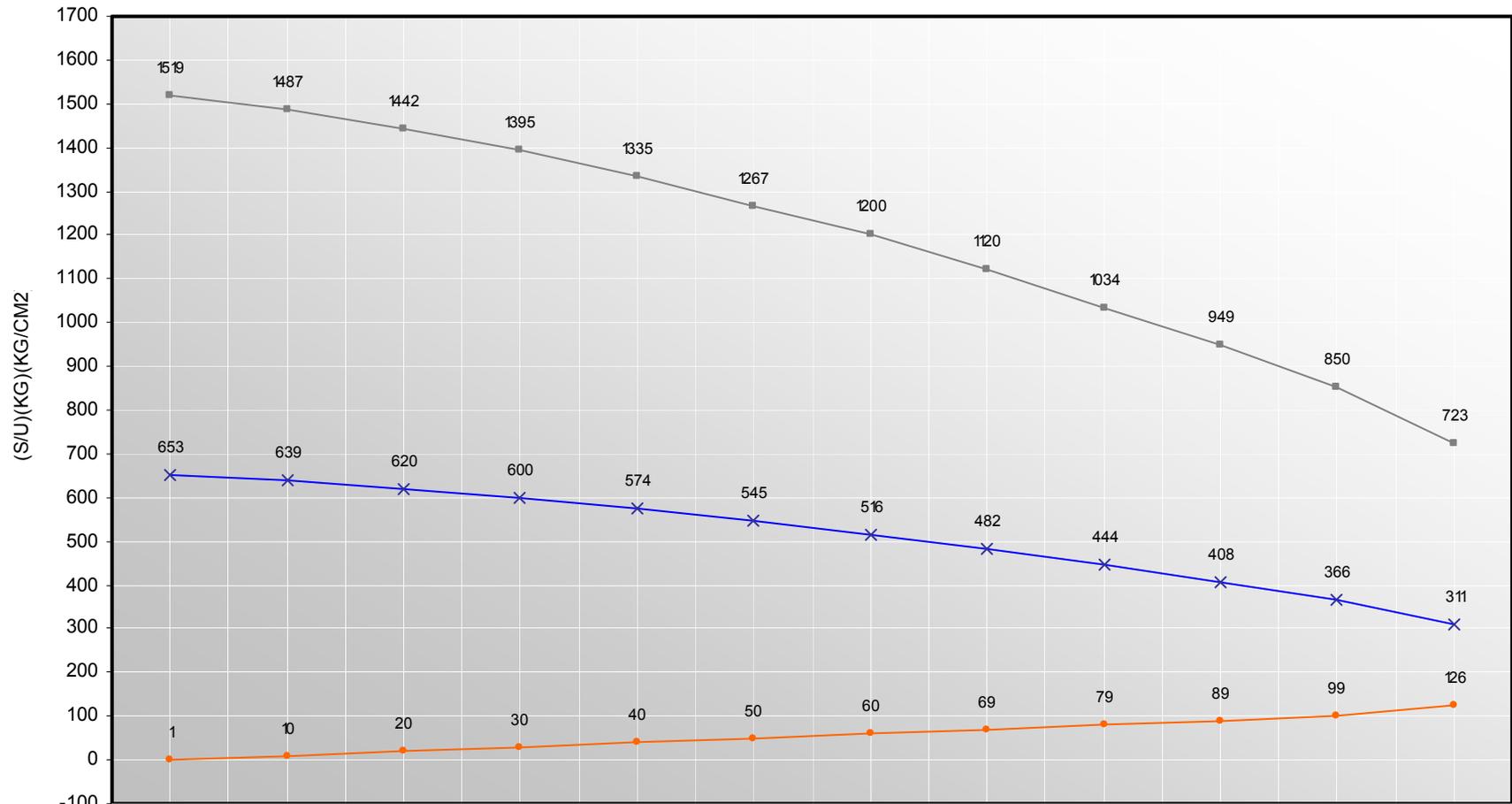
## COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA BARRA

En la gráfica se aprecia que la barra puede tener una longitud máxima posible de **53 cm** con una capacidad máxima de carga a

compresión de **311 kg**, obtenida del producto de su esfuerzo máximo admisible de

**723 kg/cm<sup>2</sup>** por el área de su sección transversal de **0.43 cm<sup>2</sup>**.

GRÁFICA



LONGITUD DE BARRA	0.47	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	53.81
ESFUERZO ADMISIBLE (KG/ CM2)	1518.8	1486.7	1442.4	1394.7	1334.7	1267.4	1200.3	1120.2	1033.7	949.4	850.4	722.92
RELACION DE ESBELTEZ(S/ U)	0.93	9.92	19.84	29.75	39.67	49.59	59.51	69.42	79.34	89.26	99.18	126.13
CARGA ADMISIBLE (KG)	653.08	639.28	620.23	599.72	573.92	544.98	516.13	481.69	444.49	408.24	365.67	310.86

## DISEÑO Y REVISIÓN DE LA UNIÓN ENTRE NODO Y BARRA

Gran parte del éxito de una estructura tridimensional espacial es la unión entre sus elementos, en este caso se busca sencillez constructiva, resistencia estructural y economía en su ensamblaje, por lo que para garantizar la unión entre la barra y el nodo, es necesario determinar los siguientes puntos:

- El número de tornillos requeridos para unir la barra con el nodo
- El espesor de las placas que forman al nodo: circular y triangular
- La resistencia a la fractura del nodo: placas circular y triangular
- La resistencia a la ruptura de la barra en su ensamblaje

### NÚMERO DE TORNILLOS REQUERIDOS PARA UNIR LA BARRA CON EL NODO

Se calculó el número de tornillos requeridos para la unión entre el nodo y la barra de acuerdo al siguiente diagrama (Fig. 67):

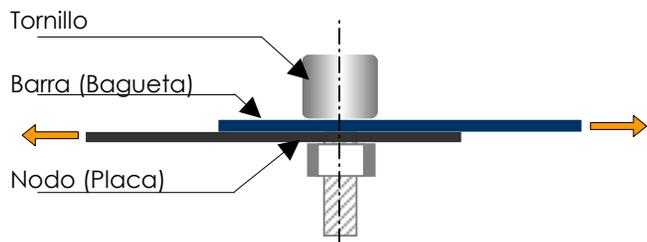


Fig. 67- Sujeción de la barra y el nodo con tornillo tipo "allen".

En la unión de la bagueta con la placa circular o triangular, al momento de trabajar estructuralmente se genera un esfuerzo cortante simple, en donde el cálculo el número de tornillos es de acuerdo a la siguiente expresión:

$$n = \frac{(4) (t)}{(fv) (pi) (d^2)}$$

En donde:

n = número de tornillos

t = carga a tensión de 310 kg

fv = Esfuerzo resistente a cortante = 0.4

(Fv) = (0.4)(6000) = 2400 kg/cm<sup>2</sup>

d = diámetro del tornillo propuesto = 3/16"

d = 0.476 cm

$$n = \frac{(4) (310)}{(2400) (3.1416) (0.476)^2}$$

$$n = 0.7258 = 1 \text{ pieza}$$

Así de esta manera se establece que todas las uniones entre la bagueta y las placas son con un solo tornillo de 3/16" de diámetro que equivale a 0.476 cm.

### ESPESOR DE LAS PLACAS QUE FORMAN AL NODO: CIRCULAR Y TRIANGULAR

El espesor de ambas placas, se determina en función de la siguiente expresión:

$$e = \frac{t}{(fv) (n) (d)}$$

En donde:

e = espesor de la placa

t = Carga máxima = 310 kg

fv = Esfuerzo resistente a cortante = 0.4 (Fv)

fv = (0.4)(6000)=2400kg/cm<sup>2</sup>

n = número de tornillos = 1 pza

d = diámetro propuesto del tornillo

d = 0.476 cm

$$e = \frac{310}{(2700) (1) (0.476)}$$

$$e = 0.2412 \text{ cm} = 2.41 \text{ mm}$$

Por lo que los dos tipos de placas que forman al nodo, serán del calibre No. 12.

## RESISTENCIA A LA FRACTURA DEL NODO:

- PLACA CIRCULAR

La placa circular tiene siete barrenos, uno central y seis en su perímetro. En éstos últimos, se analizó la resistencia en sus orillas por desgarramiento, en donde la línea posible por desgarrar se indica en el dibujo (Fig. 68):

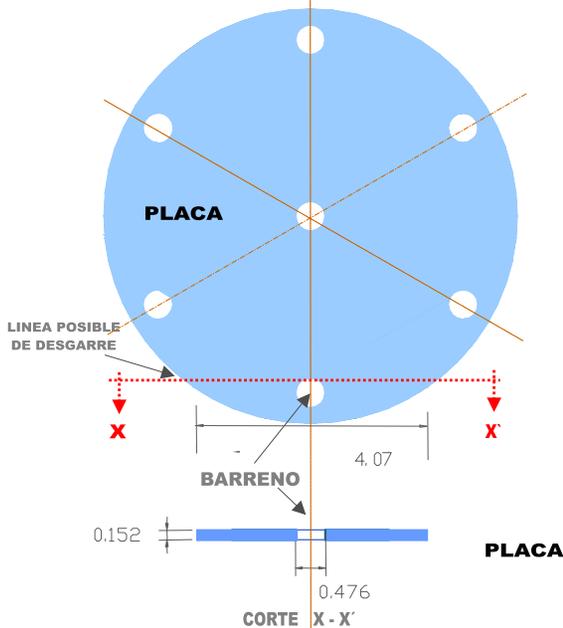


Fig. 68- Placa circular que forma el nodo en vista superior y corte, en el cual se indica la línea o trayectoria de desgarre y el espacio del barreno.

$$\text{Área total} = 4.07 \times 0.152 = \mathbf{0.618 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área barreno} = 0.152 \times 0.476 = \mathbf{0.072 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área neta} = 0.618 - 0.072 = \mathbf{0.546 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área efectiva} = 0.546 \times 0.85 = \mathbf{0.464 \text{ cm}^2}$$

Resistencia a la fractura:

$$0.464 \times 0.5 \times 3000 = \mathbf{696.00 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{696 > 312 \text{ kg} \quad \text{OK}}$$

- PLACA TRIANGULAR

La placa triangular tiene cuatro barrenos, uno central y tres en su perímetro. En éstos últimos, se analizó la resistencia en sus orillas por desgarramiento, en donde la trayectoria posible por desgarre se indica en el dibujo (Fig. 69):

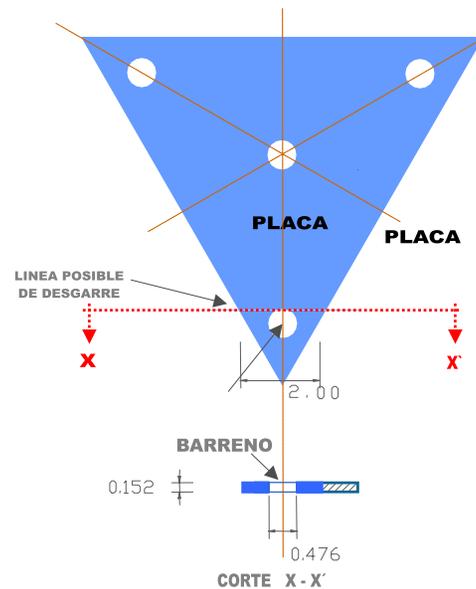


Fig. 69- Placa triangular que forma el nodo en vista superior y corte, en el cual se indica la línea o trayectoria de desgarre y el espacio del barreno.

$$\text{Área total} = 2.10 \times 0.152 = \mathbf{0.3192 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área barreno} = \mathbf{0.072 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área neta} = 0.3192 - 0.072 = \mathbf{0.2472 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área efectiva} = 0.2472 \times 0.85 = \mathbf{0.2101 \text{ cm}^2}$$

Resistencia a la fractura:

$$0.2101 \times 0.5 \times 3000 = \mathbf{315.15 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{315.15 > 312 \text{ Kg} \quad \text{OK}}$$

## RESISTENCIA A LA RUPTURA DE LA BARRA

La barra presenta un barreno en sus extremos con un diámetro igual a 3/16" equivalente a 0.476 cm, como se indica en el dibujo (Fig. 70):

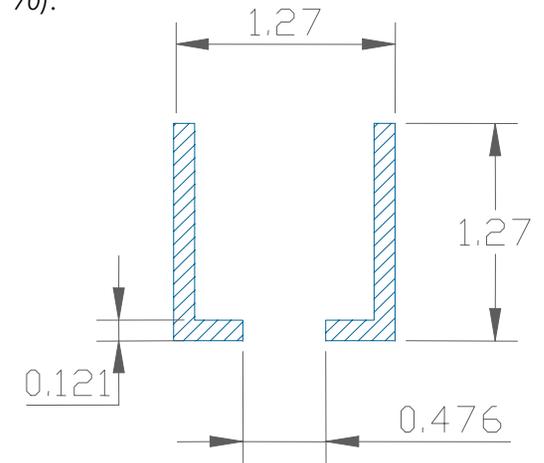


Fig. 70- Corte transversal por el extremo de la barra (bagueta), con barreno de 0.476 cm de diámetro.

$$\text{Área del perfil} = 0.4317 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área del barreno} = 0.476 \times 0.121$$

$$= \mathbf{0.0576 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área neta} = 0.4317 - 0.0576$$

$$= \mathbf{0.24720. \text{ cm}^2}$$

$$\text{Área efectiva} = 0.3741 \times 0.85$$

$$= \mathbf{0.318 \text{ cm}^2}$$

Resistencia a la fractura:

El esfuerzo a la ruptura de la bagueta es de 3 000 kg/cm<sup>2</sup>

$$0.318 \times 0.5 \times 3000 = \mathbf{477 \text{ kg}}$$

Carga máx. compresión obtenida: 310 kg

$$\mathbf{310 < 477 \quad \text{OK}}$$

## CRITERIOS DE ANÁLISIS DEL SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA

### CONSIDERACIONES

Partiendo de las características de la célula tetraédrica analizada en el capítulo anterior, se procederá a determinar las propiedades de la estructura tridimensional espacial octa-tetra formada con la célula, por lo que se definen los siguientes puntos sobre el sistema:

- Tipos de apoyos con los que se puede sostener: columnas metálicas o de concreto, muros de mampostería y combinación de muro y columna
- Parámetros para su construcción: ubicación geográfica, tipo de terreno, altura sobre el nivel del suelo, forma, disposición y tamaño del armado de las células tetraédrica
- Capacidad de absorción al efecto por sismo, para que pueda construirse en cualquier parte de la República Mexicana y sobre todo tipo de terreno
- Resistencia al empuje por viento sobre la cubierta que sostiene la estructura en costa o en la zona central y a una altura máxima de 10 metros de altura
- El espacio o claro máximo que puede cubrir con cualquier forma geométrica: rectangular, triangular, hexagonal, etc.
- La longitud que puede alcanzar como cantiliver

### REGLAMENTO Y NORMAS PARA SU DISEÑO

La estructura tridimensional espacial oct-tetra se regirá por las especificaciones generales para edificaciones de acero establecidas por:

- Instituto Mexicano del Concreto y Acero (IMCA)

- Reglamento de Construcciones de D. F. del año 2003
- Manual para Construcción en Acero

### CLASIFICACION DEL SISTEMA

Por la seguridad que deberá ofrecer la estructura; ésta se clasifica de acuerdo al artículo 174 del Reglamento de Construcciones del D. F., como del **grupo B**, relativo a edificaciones comunes destinadas para vivienda, oficinas y locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no indicadas en el grupo A, a la vez el sistema se subdivide como del **subgrupo B2** en el que se enmarcan las edificaciones menores de 30 metros de altura o con menos de 6000 m<sup>2</sup> de construcción.

### TIPO DE SISTEMA

La estructura es de **tipo 2** a lo establecido en el apartado **1.3** de la Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, en el cual las construcciones metálicas están 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.

### MATERIALES DE LOS ELEMENTOS QUE LO COMPONEN

Las barras y nodos que componen a la estructura espacial tridimensional octa-tetra serán construidos con acero.

Para estos elementos, se usará un perfil tubular de acero al carbono laminado en frío, para uso estructural el cual se ajustará a la norma **NOM-B-252 (ASTM A366)** y cuyas propiedades mecánicas son:

Tipo de acero		Esfuerzo a la Ruptura	Limite de Fluencia	Elongación en 5.1 cm	Dureza (RB)
Rolado en Frío	ASTM A366	3,000 kg/cm <sup>2</sup>	1,800 kg/cm <sup>2</sup>	40%	55%

Las características que deberá reunir el perfil tubular laminado para que la estructura sea eficiente y segura, son:

- Propiedades a la tensión
- Facilidad para conexión
- Transportación en módulos
- Rapidez en el armado de la estructura
- Económico

La conexión de la barra con el nodo será con tornillos de acero de alta resistencia **ASTM A325** y las que presentan las siguientes propiedades mecánicas:

Tipo de tornillo	Tensión Permisible	Cortante Permisible
ASTM A325	3,090 kg/cm <sup>2</sup>	2,110 kg/cm <sup>2</sup>

## ANÁLISIS DE CARGAS PARA DISEÑO

Tomando los parámetros obtenidos del capítulo anterior, la longitud máxima posible de la barra o bagueta es de 53 cm con capacidad máxima de carga a compresión de 310 kg. El módulo o célula tetraédrica es de 50 cm de longitud y con esta modulación se calculan las áreas correspondientes para los nodos central y lateral.

Una estructura espacial tridimensional octa-tetra empleada como cubierta ligera siempre deberá tener una pendiente mínima del 5 %, por lo que será necesario descomponer en sus componentes rectangulares la carga aplicada.

De igual forma los dos tipos de carga concentrada que se presentan en los nodos, son:

- Central
- Lateral

Por lo tanto se realizará el análisis de cargas del sistema ante los efectos debidos por:

- **Acciones permanentes** como es su peso propio, deformaciones, desplazamientos y empuje estático de tierra
- **Acciones variables** como la carga viva los efectos de la temperatura, hundimientos diferenciales, las vibraciones o impactos
- **Acciones accidentales** originadas por fuerzas externas de sismo, viento, lluvia, granizo explosiones e incendio, considerando las posibles combinaciones de este tipo de acciones

Para determinar la carga muerta se considerará el peso una cubierta tipo formada

por la estructura tridimensional espacial octa-tetra cubierta con lámina de policarbonato y un peso determinado por las instalaciones. A ésta carga determinada se le suma la carga viva indicada en el Reglamento de Construcciones del D. F. artículo 199, que establece la carga viva máxima **Wm** para cubiertas con pendiente mayor de 5% es de **40 kg/m<sup>2</sup>**.

Por tanto el peso de la estructura propuesta por metro cuadrado se calculará de la suma de la carga muerta más carga viva y más la carga accidental.

## METODO DE ANALISIS ESTRUCTURAL

Las estructuras de este tipo presentan tres principios básicos:

- Están formados por elementos sujetos solo a fuerza axial
- Las barras son elementos rectos
- Las cargas solo son aplicadas a los nudos

Su comportamiento estructural se analizará de acuerdo a la disposición de los apoyos, con los que puede trabajar:

- Con dos apoyos laterales, para determinar su claro máximo posible
- Con un solo apoyo lateral, para determinar el cantiliver máximo
- Combinando el claro máximo y el cantiliver en un solo extremo
- Combinando un claro y el cantiliver en ambos extremos

- Con un apoyo central

Existe gran variedad de métodos que están en función del tipo de estructuras que se desea analizar, su magnitud, complejidad forma geométrica, etc., los cuales se clasifican en dos grupos: aproximados y exactos.

Los métodos exactos son para analizar estructuras que presentan diversas sollicitaciones y sus posibles combinaciones. Ejemplos de métodos exactos son Kani, Cross, Maxwell, Mohr, Flexibilidades, Rigideces y Elemento Finito.

El desarrollo de esta investigación se basa en la aplicación del método exacto de rigideces, por considerar que es de los más organizados y conceptualmente sencillo, ya que se obtiene son desplazamientos unitarios producidos por las fuerzas aplicadas en puntos determinados. Las hipótesis en que está basado este método son

- El material empleado para la construcción de una estructura será homogéneo e isótropo, es decir, el material propuesto tiene las mismas propiedades físicas y químicas en cualquier dirección
- El material es linealmente elástico y por tanto cumple con la ley de Hook con el principio de superposición de causas y efectos
- Los desplazamientos provocados por las cargas aplicadas son pequeños, comparados con las dimensiones originales de los elementos estructurales

- Además los siguientes principios básicos:
  - ✓ Una estructura se considera en equilibrio cuando inicialmente está en reposo y se conservará así cuando se someta a un conjunto de fuerzas, compatibilidad y relación acción desplazamiento.
  - ✓ Los desplazamientos resultantes en un nodo de la estructura, deben ser compatibles con los desplazamientos de los extremos de las barras que forman ese nodo.
  - ✓ Como el comportamiento de la estructura es elástico-lineal, entonces los desplazamientos son proporcionales a las acciones aplicadas.

7. Asignar a las barras la sección que tiene la bagueta
8. Distribuir las fuerzas en cada uno de los nodos centrales y perimetrales
9. Definir los nodos como apoyos con sus restricciones correspondientes

Una vez que el programa tiene estos datos se corre y posteriormente se muestran los resultados obtenidos:

1. Las cargas a las que están sujetas las barras
2. Los desplazamientos en los nodos
3. Las reacciones en los apoyos

Con la información se analizarán los siguientes puntos:

1. Se verificará que los valores de las cargas obtenidas sean menores al valor de 310 kg, la cual es la carga máxima posible que puede soportar una barra con una longitud máxima de 53 cm y que se encuentra determinada en el capítulo anterior.
2. Los desplazamientos obtenidos en los nodos se comparan con los parámetros establecidos en el Reglamento de Construcciones para el D. F. en su artículo No. 184 fracción primera en donde se marca que la revisión del estado límite de desplazamientos, se cumplirá si se verifica que no exceda el valor de dividir la dimensión del claro en centímetros entre 480, más 0.3 cm y en el caso de un cantiliver el estado límite de desplazamientos anterior se duplicará.

Para aplicar el Método de Rigideces se utilizará un software llamado SAP200 con el cual determina el análisis y diseño de las estructuras tridimensionales estáticas o dinámicas sus elementos finitos, por lo que requiere se le definan los siguientes parámetros sobre la estructura a analizar:

1. Dibujar la estructura tridimensional espacial octa-tetra
2. Establecer la posición de los ejes coordenados
3. Enumerar los nodos y barras que integran el arreglo estructural (Fig. No. 71)
4. Determinar las cargas a las cuales estará expuesta
5. Definir el material a utilizar
6. Establecer las sección de la bagueta

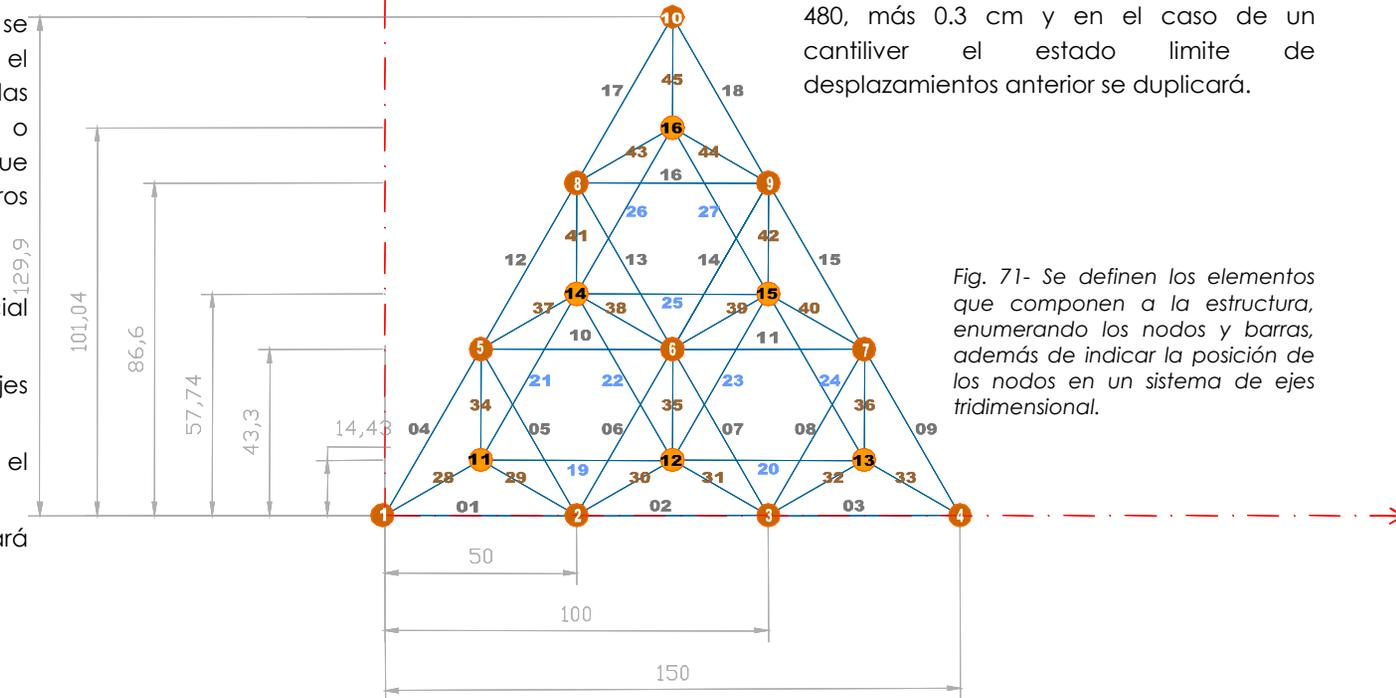


Fig. 71- Se definen los elementos que componen a la estructura, enumerando los nodos y barras, además de indicar la posición de los nodos en un sistema de ejes tridimensional.

## METODO DE ANALISIS POR EFECTO SISMICO

De acuerdo al Manual para Construcción en Acero, el sistema se clasifica como estructura **tipo 3** puesto que a este tipo pertenecen "las construcciones que se encuentran soportadas por una sola columna, por un conjunto de ellas, por muros o por la combinación de estos".

El criterio de diseño por sismo es adaptar la estructura tridimensional espacial para resistir sismos de normal intensidad, con ocurrencia relativamente frecuente, ya que trata de evitar el colapso o daños estructurales serios, durante su vida útil.

La estructura presentará las siguientes características para su diseño:

- Poco peso
- Sencillez, simetría y regularidad en su vista superior
- Planta poco alargada
- Uniformidad en la distribución de resistencia, rigidez y ductilidad

El método a aplicar es el de **análisis estático**, en donde las fuerzas equivalente al efecto sísmico se evalúan considerando una aceleración en el nivel inferior (Coeficiente Sísmico) reducida por ductibilidad, que al multiplicarse por el peso de la estructura, da como resultado una fuerza cortante en la base del mismo. Ésta fuerza total se aplica en el primer nivel de la estructura.

Para el análisis estático, el coeficiente sísmico "**C**" se tomará como **0.4** para la **zona III**

(terreno lacustre) de acuerdo al artículo 206 del Reglamento de Construcciones del D. F.

La fuerza sísmica se obtiene como el producto del peso de la masa correspondiente, por un coeficiente que varía linealmente desde un valor nulo en la base o a partir del nivel del cual las deformaciones de la estructura serán apreciables, hasta un máximo en el extremo superior, de modo que la relación cortante/masa (**v/w**) en la base, sea igual al coeficiente sísmico entre el factor de ductibilidad (**C/Q**), pero que no será menor a la ordenada espectral (**a<sub>0</sub>**) en el periodo natural de la estructura, en segundos (**T**).

El valor de la ordenada espectral "**a<sub>0</sub>**" será igual al producto del coeficiente sísmico por el período característico de los espectros de diseño:

$$a_0 = \frac{(C) (T_b)}{T}$$

Cabe mencionar que como criterio general de análisis no será necesario considerar la acción simultánea por efecto sísmico y por efecto del viento.

La cubierta podrá estar sustentada en apoyos aislados o continuos, ésto dependerá de la necesidad del espacio por cubrir.

La carga vertical "**w**" es la suma de la carga muerta más la carga viva en un metro cuadrado, por tanto el peso total "**w<sub>i</sub>**" de la estructura es el producto de la carga vertical por el área "**A**":

$$W_i = (w) (A)$$

El factor de comportamiento sísmico "**Q**" es igual a la unidad, basado en el apartado número 5 de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo del Reglamento de construcciones del D. F.

El coeficiente sísmico para análisis estático en ambas direcciones "**C<sub>sx</sub>**" y "**C<sub>sy</sub>**" se obtendrá dividiendo al coeficiente sísmico entre el valor de "**x**" e "**y**":

$$C_{Sy} = \frac{C}{y}$$

$$C_{Sx} = \frac{C}{x}$$

El cortante sísmico "**V<sub>i</sub>**" se determina multiplicando el coeficiente de corte basal por el peso de la estructura (**w<sub>i</sub>**), en ambos ejes:

$$V_i = (C_s) (w_i)$$

La fuerza sísmica "**F<sub>i</sub>**" es igual al cortante sísmico por el producto del peso de la estructura por la altura entre este peso y altura; es decir, será directamente al cortante sísmico en sus respectivos ejes:

$$F_i = V_i \frac{(W_i) (h_i)}{\sum (W_i) (h_i)} = V_i$$

Por último, la relación del cortante en la base entre el peso de la estructura **V<sub>i</sub>/w** será igual al intervalo que va desde el cociente del coeficiente sísmico hasta el factor de ductibilidad a la ordenada espectral:

$$a_0 < V_i / w < C / Q$$

Se heca notar que la fuerza actuante en la o las columnas debida al efecto del sismo, no

### **METODO DE ANALISIS POR EFECTO DEL VIENTO**

Para analizar el efecto del viento sobre la estructura espacial tridimensional octa-tetra con cubierta ligera, se establecerá la situación que represente las condiciones más desfavorables para la estabilidad de la estructura con la finalidad de proponer un sistema versátil y adaptable a cualquier medio físico. Por lo tanto, las consideraciones serán:

1. El diseño o composición arquitectónica podrá adoptar cualquier tipo de forma; con caras horizontales, verticales o inclinadas y con apoyos a base de columnas o muros perimetrales o centrales, o combinación de éstos.
2. El sistema se construirá en cualquier región eólica de la República Mexicana
3. Se clasificará de acuerdo a la reglamentación correspondiente
4. La topografía del terreno sobre el cual se construirá será la más desfavorable
5. La altura de la estructura sobre el nivel del terreno se considerará la máxima posible
6. Determinar la velocidad de diseño del viento en función de la velocidad regional

será el alcance de esta investigación.

7. La pendiente de la cubierta tendrá una inclinación mayor de 5°
8. La altura de la cubierta de la estructura sobre el nivel del mar se establece igual a cero, con la finalidad de que no disminuya la presión o succión debida al viento.
9. Se analizarán también las presiones interiores originadas por el viento

Ya específicamente para el **empuje estático** originado por el viento sobre el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra con cubierta ligera, se tendrán las tres vertientes de análisis:

1. Efecto externo del viento
2. Presión interior por el viento
3. Empuje del viento sobre las barras de la estructura

Se verificará la resistencia de las barras de la estructura espacial tridimensional octa-tetra por efecto del viento, llevando a cabo el siguiente procedimiento:

- Al valor del empuje estático obtenido se le restará el peso propio de la estructura para obtener la carga en la cubierta por

metro cuadrado

- La carga que soportará cada una de las barras será la carga distribuida en su área tributaria (**A<sub>t</sub>**)
- La barra estará sujeta a una carga uniforme (**w**) por metro lineal
- A esta carga se le sumará la carga debida al empuje sobre elementos de la estructura
- Tomando en cuenta que las barras son de un perfil laminado en forma de "U", que se apoyan en los nodos de la estructura espacial tridimensional, se considerarán como una viga empotrada; ya que, no tiene libertad de movimiento en el sentido vertical
- Se revisará el esfuerzo para flexión biaxial en las barras
- El límite de fluencia (**F<sub>b</sub>**) para las barras a base de perfil laminado es:
- Se compararán los valores por flexión biaxial con el límite de fluencia

Si el esfuerzo actuante resultara menor que el permisible, la sección y el tamaño del módulo o célula tetraédrica propuesto será aceptable,

en caso contrario se cambiarán la sección o el tamaño de la célula.

## RESULTADOS Y DEFINICION DE ALTERNATIVAS DEL SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA

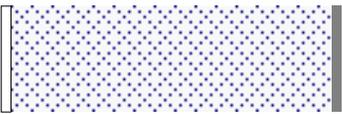
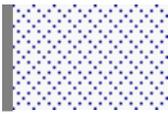
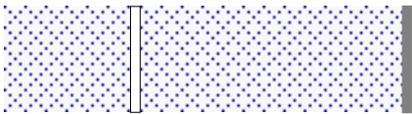
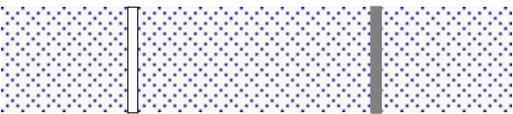
### DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS

Con la aplicación de la metodología indicada en el capítulo cuatro se determinará la factibilidad de la estructura formada por las células tetraédricas, para lo cual se definen

primeramente solo algunos de los tipos de cubiertas más comunes que se pueden construir de acuerdo al espacio a cubrir y a los apoyos aislados o continuos, es decir sobre columnas o por muros y que en todos los casos

posibles se determinará la longitud máxima posible del espacio (Fig. 67):

Fig. 67- Posibles cubiertas con la estructura tridimensional octa-tetra

ALTERNATIVA	FORMA	DISEÑO	ESPACIO	APOYOS
1	RECTANGULAR		Un claro máximo posible que puede cubrir el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, con un ancho mínimo de 2.50 m	Dos apoyos opuestos: uno continuos y otro apoyo libre
2	RECTANGULAR		Un volado máximo posible que puede cubrir el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, con un ancho mínimo de 2.50 m	Con un apoyo continuos
3	RECTANGULAR		Un claro con un volado máximos posibles, que puede cubrir el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, con un ancho mínimo de 2.50 m	Dos apoyos opuestos: uno continuos y otro apoyo libre
4	RECTANGULAR		Un claro con dos volado máximos posibles, que puede cubrir el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, con un ancho mínimo de 2.50 m	Dos apoyos opuestos: uno continuos y otro apoyo libre
5	TRIANGULAR		Un volado tipo paraguas máximo posible que puede cubrir el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, con un ancho mínimo de 2.50 m	Un sólo apoyo aislado



ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL ESPACIAL



EMPOTRAMIENTO



APOYO LIBRE

## CARGAS PARA DISEÑO

Para determinar la carga muerta se considera el peso de la cubierta tipo formada por la estructura tridimensional espacial octa-tetra con lámina de policarbonato. A ésta carga muerta determinada se le agrega la carga viva máxima **Wm** para cubiertas con pendiente mayor de 5% cuyo valor es de 40 kg/m<sup>2</sup>.

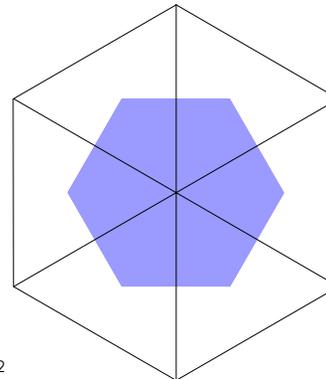
Por tanto el peso de la estructura propuesta por metro cuadrado es de 65.26 kg como se desglosa en la siguiente tabla:

Lámina de policarbonato de 6 mm de espesor:	3.15 kg/m <sup>2</sup>
Tornillos tipo Allen de 3/16" de diámetro:	0.71 kg/m <sup>2</sup>
Nodos a base de placa cal. 16:	1.52 kg/m <sup>2</sup>
Barras base de bagueta cal. 18:	9.71 kg/m <sup>2</sup>
Instalaciones en general:	10.00 kg/m <sup>2</sup>
<b>Total de carga muerta:</b>	<b>25.26 kg/m<sup>2</sup></b>
<b>Carga viva:</b>	<b>40.00 kg/m<sup>2</sup></b>
<b>Carga total unitaria :</b>	<b>65.09 kg/m<sup>2</sup></b>

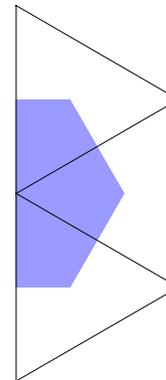
## DISTRIBUCION DE CARGAS EN LOS NODOS

El sistema empleado como cubierta ligera siempre deberá tener una pendiente mínima del 5 %, por lo que le corresponde una inclinación mínima de 2° 51' 44.66", por lo que es necesario descomponer en sus componentes rectangulares la carga aplicada. En caso de que la pendiente sea mayor a esta pendiente, menor será el valor de la carga perpendicular aplicada en los nodos.

Para un módulo o cédula tetraédrica de 50 cm de lado, las áreas tributarias son:



Área tributaria Central: 0.2165m<sup>2</sup>



Área tributaria Lateral: 0.1083 m<sup>2</sup>

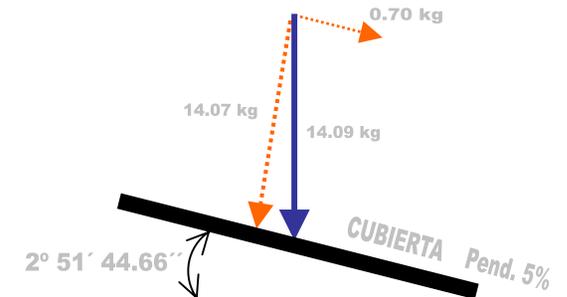
Carga por nodo central:

$$(0.2165 \text{ m}^2)(65.09 \text{ kg/m}^2) = 14.09 \text{ kg}$$

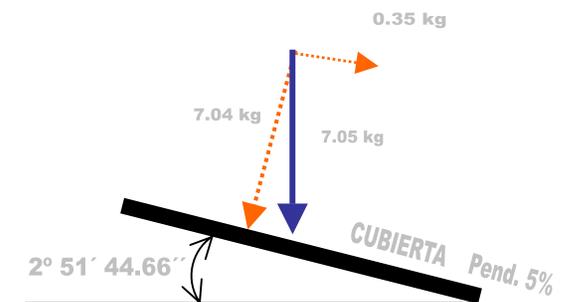
Carga por nodo lateral:

$$(0.1083 \text{ m}^2)(65.09 \text{ kg/m}^2) = 7.05 \text{ kg}$$

Descomposición de carga central:



Descomposición de carga lateral:



Las cargas perpendiculares aplicadas a los nodos central y lateral son de 14.11 kg y 7.05 kg respectivamente.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA

La determinación del comportamiento estructural al sistema se realizó a las cinco alternativas descritas anteriormente, pero cabe mencionar que no son las únicas y que se podrán desarrollar otros tipos de posibilidades:

1. Con apoyos laterales opuestos: empotrado y libre, con lo cual se puede determinar su claro máximo posible
2. Con un solo apoyo lateral empotrado, para así determinar el cantiliver o volado máximo
3. Con un apoyo lateral empotrado y otro central libre, combinando un claro y un volado en un solo extremo, para determinar el espacio máximo que pueden cubrir
4. Con dos apoyos centrales: empotrado y libre, combinando un claro y dos volados en ambos extremos, con los cuales se podrá calcular la distancia máxima que abarcan estos elementos al trabajar juntos
5. Con un apoyo central empotrado, formando un tipo paraguas y de esta manera determinar que área puede cubrir

El método utilizado para calcular estas alternativas fue el **Matricial de Rigideces**, para lo cual se aplicó el software **SAP2000** al que se le ingresaron los datos correspondientes de cada una de las cinco alternativas propuestas. Para ello se determinaron los siguientes puntos:

- Diseño del reticulado de cada una de las cinco alternativas, con las condicionantes del tipo de apoyo para cada caso y considerando un ancho mínimo de 2.50 m, cuya dimensión esta basada con base en la medida mínima que indica el Reglamento de Construcciones del D. F., en el artículo transitorio noveno del inciso "G", que se refiere a los requisitos mínimos de los patios de iluminación, para lo cual en la fracción II establece que *los espacios destinados para la iluminación no serán nunca menores de la medida indicada anteriormente.*
- Enumeración de los nodos y barras
- Ubicación espacial de los nodos en los tres ejes coordenados
- Definición del material para la fabricación de las barras, que para este caso son las propiedades físico, químico y mecánicas

- Puntualización de las dimensiones referente a la sección de la bagueta que forma a las barras (mencionadas en el capítulo tres)
- Ubicación de los nodos como apoyos, con las respectivas restricciones en los tres ejes
- Asignación de las cargas permanentes para los nodos: central igual a 14.07 kg y de 7.04 kg para el nodo perimetral

A partir de esta información fue posible analizar y diseñar estas primeras cinco alternativas propuestas de la estructura tridimensional espacial octa-tetra.

Los resultados obtenidos del programa de cómputo para cada alternativa, se refieren a:

1. Los esfuerzos a los que están trabajando las barras
2. Los desplazamientos en tres direcciones de los nodos
3. Las reacciones sobre los apoyos

Estos datos son mostrados a continuación en forma resumida, indicando únicamente los valores más relevantes de los resultados calculados y que servirán para compararse con los parámetros estructurales establecidos en los capítulos anteriores.

## PRIMERA ALTERNATIVA: SISTEMA CON APOYOS LATERALES OPUESTOS

Esta alternativa tiene la finalidad de demostrar el máximo claro posible que pueda cubrir la estructura tridimensional espacial octa-tetra. Después del análisis se concluye que las dimensiones máximas para este claro son: largo **8.30 m** de largo, ancho 2.50 m y peralte de 41 cm.

La estructura se compone de un total de 873 barras de las cuales 289 son de la capa inferior, 304 son las diagonales y 280 están en la capa superior. Con respecto a los nodos se tienen 220 en total, 110 en la capa inferior y también 110 nodos en la capa superior.

Las barras están fabricadas con bagueta, que es un perfil de fierro laminado de sección cuadrada en forma de "U" con lados de 1.27 cm, en calibre #18 equivalente a un espesor de 0.121 cm y con tan sólo 2.03 gr de peso por pieza.

Los nodos están fabricados con lámina negra calibre #16 en dos piezas, una circular de 6 cm de diámetro y otra en forma de triángulo equilátero de 7.5 cm por lado con las esquinas dobladas el peso por nodo es 116.92 gr.

Las uniones entre nodos y barras son con tornillos tipo "allen" de cabeza hexagonal y de alta resistencia con un diámetro de 3/16" y de 1.27 cm de largo.

Con seis barras y cuatro nodos se formada la célula tetraédrica (Fig. 72) cuya repetición genera la estructura tridimensional espacial octa-tetra (Fig. 73).

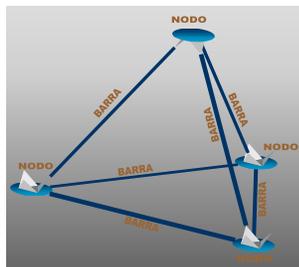
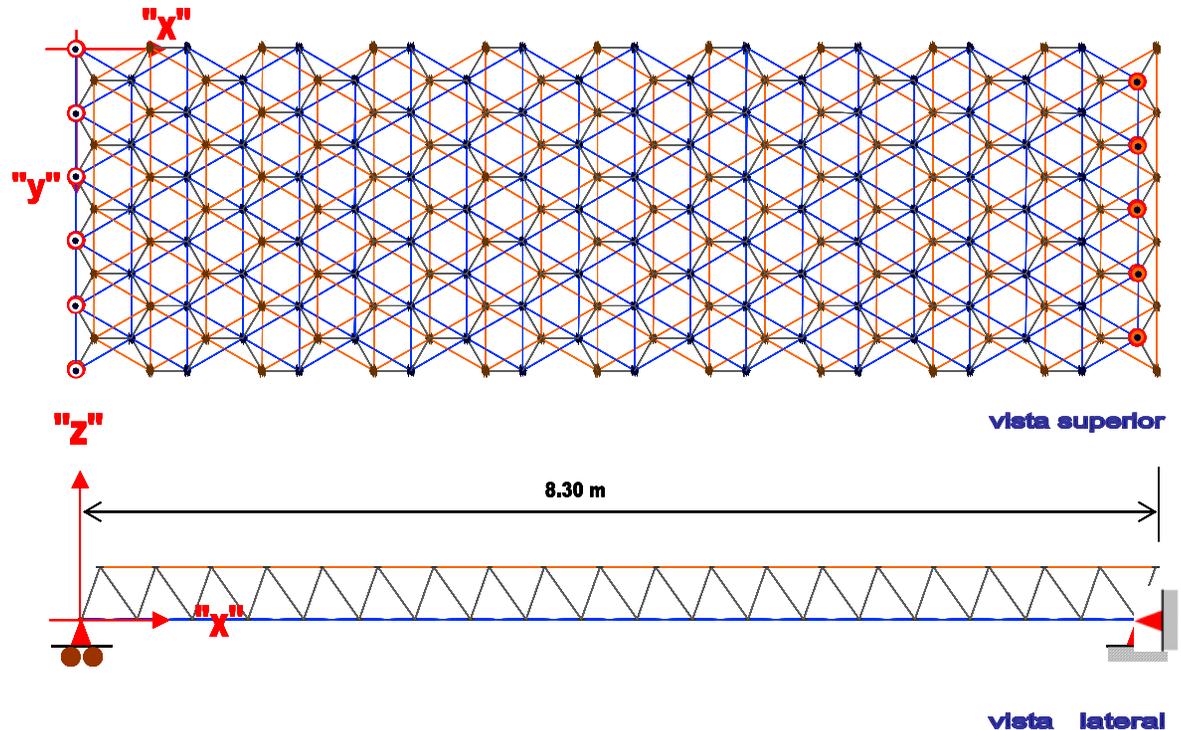


Fig.72- Célula tetraédrica de 50 cm en sus aristas.



- ⊙ **APOYO EMPOTRADO EL LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"**
- **APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"**

Fig. 73- Estructura tridimensional espacial octa-tetra con un claro maximo de 8.30 m.

### 1a. CARGAS APLICADAS A LAS BARRAS

La Tabla No. 1 muestra los resultados obtenidos correspondientes a los esfuerzos a compresión a los que están sometidas las barras. Para efectuar el análisis se considera que el límite de capacidad de carga para una barra sujeta a esfuerzo por compresión es de 310 kg .

La siguiente información es el compendio de los resultados de acuerdo a intervalos preestablecidos cuyo rango fluctúa desde +/- 100 kg hasta +/- 310 kg. El código de color del intervalo, corresponde a los datos de la Tabla No. 01 para localizar el número de barra que presenta cada carga.

No. barra	Carga kg												
331	-304.28	72	-164.86	1166	-134.54	1117	-108.91	1662	111.71	1036	140.16	1351	166.86
336	-304.28	392	-163.85	1164	-134.17	1126	-108.91	1666	111.85	1365	140.29	1031	172.7
329	-300.97	396	-163.85	1165	-134.17	1329	-106.48	364	117.71	1371	140.29	1038	172.7
338	-300.97	152	-157.34	1121	-133.97	1338	-106.48	369	117.71	298	141.57	469	180.73
333	-296.67	153	-157.34	1122	-133.97	1603	-105.6	1032	119.69	302	141.57	471	180.73
334	-296.67	29	-152.53	1148	-133.8	1604	-105.6	1037	119.69	1347	142.2	57	184.29
332	-280.37	39	-152.53	1153	-133.8	1146	-105.32	1375	124.44	1348	142.2	62	184.29
335	-280.37	1134	-149.59	1119	-133.78	1155	-105.32	1378	124.44	1332	142.39	470	185.75
316	-256.01	1137	-149.59	1124	-133.78	1131	-105.22	1302	125.01	1333	142.39	379	197.08
323	-256.01	1149	-149.09	1133	-132.83	1140	-105.22	1305	125.01	1373	142.56	384	197.08
337	-252.91	1152	-149.09	1138	-132.83	1605	-104.05	299	126.68	1380	142.56	59	205.35
343	-252.91	151	-148.58	1120	-132.5	1602	-103.91	301	126.68	310	144.41	60	205.35
20	-235.71	154	-148.58	1123	-132.5	1300	-101.74	300	128.02	314	144.41	381	209.5
27	-235.71	1176	-146.94	1162	-131.96	1309	-101.74	366	128.7	1315	146.36	382	209.5
318	-221.32	1183	-146.94	1167	-131.96	1160	-100.7	367	128.7	1322	146.36	380	216.87
321	-221.32	1168	-146.74	68	-129.37	1169	-100.7	1034	130.25	1307	146.81	383	216.87
22	-217.94	1174	-146.74	69	-129.37	1314	101.95	1035	130.25	1313	146.81	58	222.59
25	-217.94	315	-145.12	187	-128.99	1323	101.95	1316	132.37	55	147.37	61	222.59
23	-209.91	324	-145.12	188	-128.99	1668	104.02	1321	132.37	64	147.37	378	233.61
24	-209.91	1110	-142.35	1498	-128.18	1671	104.16	1360	133.07	427	148.65	385	233.61
319	-203.83	1116	-142.35	1497	-126.87	1161	104.82	1363	133.07	430	148.65	2	254.97
320	-203.83	1025	-142.33	1499	-126.87	1170	104.82	1345	133.46	1331	149.41	9	254.97
21	-196.81	1029	-142.33	1178	-124.94	1670	105.56	1350	133.46	1334	149.41	56	256.84
26	-196.81	1150	-142.07	1181	-124.94	1669	105.69	1330	134.21	1346	149.91	63	256.84
42	-185.96	1151	-142.07	1105	-123.85	1328	106.27	1335	134.21	1349	149.91	11	282.41
317	-182.55	1135	-141.75	1108	-123.85	1337	106.27	1318	134.37	468	152.74	14	282.41
322	-182.55	1136	-141.75	66	-118.44	1343	106.65	1319	134.37	472	152.74	12	298.44
40	-181.16	1496	-141.57	71	-118.44	1352	106.65	1359	134.43	428	157.22	13	298.44
41	-181.02	1500	-141.44	185	-118.37	1132	109.38	1364	134.43	429	157.22	3	301.93
191	-171.51	67	-140.54	190	-118.37	1141	109.38	1361	134.54	370	163.83	8	301.93
197	-171.51	70	-140.54	1608	-111.9	1357	110.05	1362	134.54	376	163.83	10	305.69
1139	-166.95	1118	-139.88	1611	-111.76	1366	110.05	1317	134.59	377	164.42	15	305.69
1145	-166.95	1125	-139.88	1179	-111.17	1376	111.06	1320	134.59	386	164.42		
1147	-165.74	186	-138.87	1180	-111.17	1377	111.06	365	139.98	1336	165.88		
1154	-165.74	189	-138.87	1106	-110.37	1303	111.23	368	139.98	1342	165.88		
65	-164.86	1163	-134.54	1107	-110.37	1304	111.23	1033	140.16	1344	166.86		

Rango de carga en kg +/-	Color	Cantidad de barras	Porcentaje %
--------------------------	-------	--------------------	--------------

De 226 a 310		27	3.45
De 151 a 225		57	7.28
De 76 a 150		257	32.82
De 2 a 75	*	387	49.43
De 0 a 1	*	55	7.02
<b>Total</b>		<b>783</b>	<b>100.00</b>

\* Estos valores de carga aplicados en la barra no aparecen en la tabla No. 01 porque son menores a +/- 100 kg.

En base a los porcentajes obtenidos, se establece que casi el 90% de las barras de la estructura analizada se encuentran trabajando a la mitad de su capacidad de carga y solamente el 3.45% de las barras se encuentra fatigado a casi el 100% de su capacidad de trabajo.

Tabla No. 1- Tabla de valores más cercanos al límite de carga de la barra por esfuerzos de compresión y tracción para alternativa uno.

## 1b. DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS

Con respecto a los desplazamientos en los nodos, en la tabla aparecen los resultados obtenidos en los tres ejes, x, y y z. Así como el número de nodo de la estructura (Tabla No. 2).

A continuación se indican los resultados más significativos de desplazamientos, en un rango de valores mayores a 3 mm en cualquiera de los tres ejes coordenados:

Rango de desplazamiento mm (+/-)	Color	Cantidad de nodos			Porcentaje %		
		x	y	z	x	y	Z
> 5	Orange	0	0	66	0.00	0.00	30.00
> 3 pero < 5	Blue	0	0	44	0.00	0.00	20.00
> 1 pero < 3	Green*	0	0	54	0.00	0.00	24.55
< 1	Grey*	12	12	56	100.00	100.00	25.45
<b>Total</b>		<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>
		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>			

\* Estos valores de desplazamientos en los nodos no aparecen en la tabla porque son menores a 3 mm en el eje "z".

El desplazamiento máximo posible es:

$$\begin{array}{r} 830 \text{ cm} \\ \text{-----} \\ 480 \end{array} + 0.3 \text{ cm} = 2.23 \text{ cm} = \mathbf{22.3 \text{ mm}}$$

Por lo que la estructura no tiene problemas de desplazamiento de nodos, ya que el máximo desplazamiento presente es de 6.02 mm.

Tabla No. 2- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa uno.

No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)		
	X	y	Z		X	y	Z		X	y	Z
394	-0.12	0.11	-6.02	467	-0.05	0.00	-5.70	491	0.02	0.46	-4.34
399	0.12	0.11	-6.02	401	-0.03	0.01	-5.61	495	-0.02	0.46	-4.34
468	0.12	0.11	-6.02	403	0.03	0.01	-5.61	373	-0.02	0.46	-4.33
473	-0.12	0.11	-6.02	464	0.03	0.01	-5.60	376	0.02	0.46	-4.33
389	-0.05	0.22	-5.87	466	-0.03	0.01	-5.60	412	-0.02	-0.17	-4.56
393	0.05	0.22	-5.87	402	0.00	0.01	-5.57	414	0.02	-0.17	-4.56
474	0.05	0.22	-5.87	465	0.00	0.01	-5.57	492	0.00	0.45	-4.30
478	-0.05	0.22	-5.87	405	-0.11	-0.09	-5.37	494	0.00	0.45	-4.30
383	-0.09	0.32	-5.67	410	0.11	-0.09	-5.37	374	0.00	0.45	-4.29
388	0.09	0.32	-5.67	457	0.11	-0.10	-5.36	375	0.00	0.45	-4.29
479	0.09	0.31	-5.67	462	-0.11	-0.10	-5.36	453	0.02	-0.18	-4.55
484	-0.09	0.31	-5.67	378	-0.03	0.40	-5.07	455	-0.02	-0.18	-4.55
395	-0.06	0.12	-5.85	382	0.03	0.40	-5.07	413	0.00	-0.17	-4.54
398	0.06	0.12	-5.85	485	0.03	0.40	-5.08	454	0.00	-0.17	-4.53
469	0.06	0.11	-5.85	489	-0.03	0.40	-5.08	416	-0.08	-0.24	-3.87
472	-0.06	0.11	-5.85	379	-0.02	0.40	-4.99	421	0.08	-0.24	-3.87
390	-0.03	0.22	-5.76	381	0.02	0.40	-4.99	446	0.07	-0.25	-3.86
392	0.03	0.22	-5.76	486	0.02	0.39	-4.99	451	-0.07	-0.25	-3.86
475	0.03	0.22	-5.76	488	-0.02	0.39	-4.99	417	-0.04	-0.24	-3.80
477	-0.03	0.22	-5.76	406	-0.06	-0.09	-5.22	420	0.04	-0.24	-3.80
391	0.00	0.22	-5.73	409	0.06	-0.09	-5.22	447	0.03	-0.24	-3.79
476	0.00	0.22	-5.73	458	0.05	-0.09	-5.21	450	-0.03	-0.24	-3.79
396	-0.02	0.12	-5.78	461	-0.05	-0.09	-5.21	499	0.00	0.49	-3.52
397	0.02	0.12	-5.78	487	0.00	0.39	-4.97	503	0.00	0.49	-3.52
470	0.02	0.11	-5.77	380	0.00	0.40	-4.96	367	0.00	0.50	-3.52
471	-0.02	0.11	-5.77	407	-0.02	-0.09	-5.16	371	0.00	0.50	-3.52
384	-0.05	0.32	-5.53	408	0.02	-0.09	-5.16	418	-0.01	-0.23	-3.77
387	0.05	0.32	-5.53	459	0.02	-0.09	-5.15	419	0.01	-0.23	-3.77
480	0.04	0.31	-5.53	460	-0.02	-0.09	-5.15	448	0.01	-0.23	-3.76
483	-0.04	0.31	-5.53	372	-0.03	0.46	-4.40	449	-0.01	-0.23	-3.76
385	-0.01	0.32	-5.46	377	0.03	0.46	-4.40	500	0.00	0.48	-3.49
386	0.01	0.32	-5.46	490	0.03	0.45	-4.40	502	0.00	0.48	-3.49
481	0.01	0.31	-5.46	496	-0.03	0.45	-4.40	368	0.00	0.49	-3.49
482	-0.01	0.31	-5.46	411	-0.04	-0.18	-4.62	370	0.00	0.49	-3.49
400	-0.06	0.01	-5.71	415	0.04	-0.18	-4.62	501	0.00	0.48	-3.48
404	0.06	0.01	-5.71	452	0.04	-0.18	-4.61	369	0.00	0.48	-3.48
463	0.05	0.00	-5.70	456	-0.04	-0.18	-4.61				

### 1c. REACCIONES EN LOS APOYOS

La estructura se sostiene a través de once nodos repartidos seis en un lado y cinco en el otro, en donde todos fueron considerados como apoyos empotrados en uno de sus

extremos. La restricción se enfocó en el primer lado, en el sentido de los ejes "y" y "z", con apoyo libre en el sentido "x" para disminuir el efecto sísmico en este sentido (Fig. No. 74).

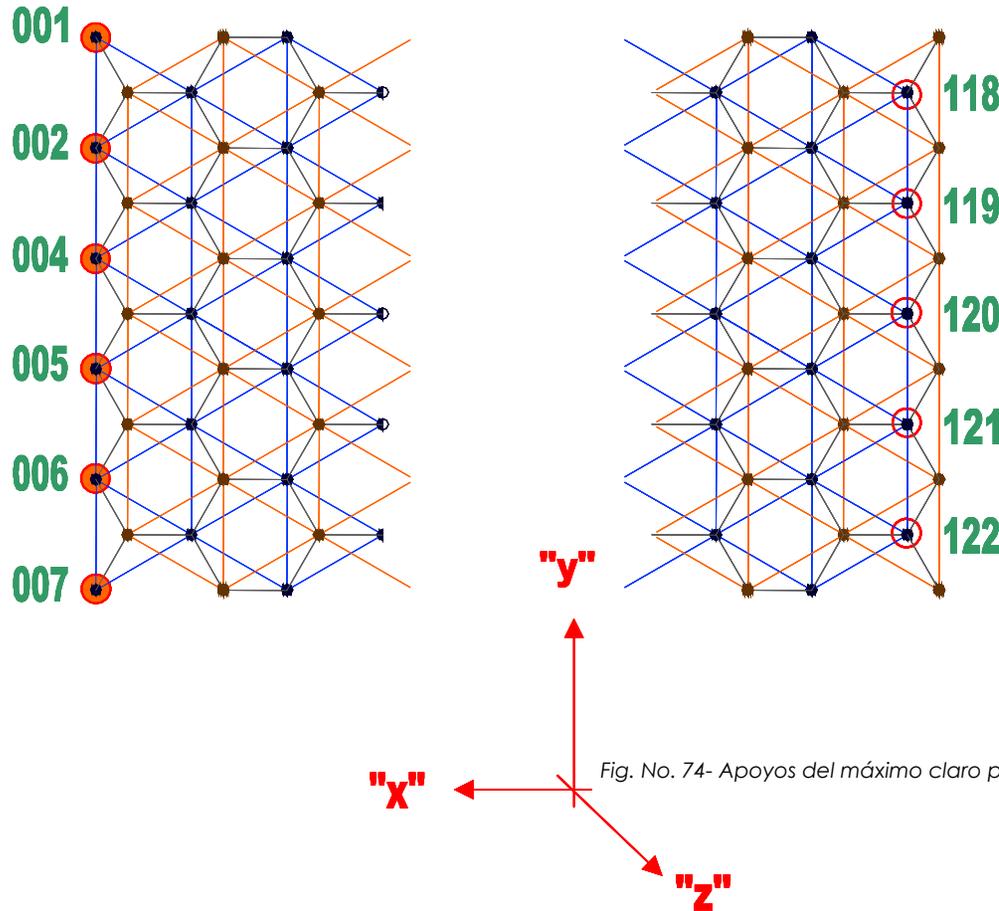


Fig. No. 74- Apoyos del máximo claro posible.

- **APOYO EMPOTRADO EL LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"**
- **APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"**

Las reacciones en los apoyos de la estructura en sus tres ejes aparecen en la tabla No. 3.

No. Nodo	REACCION		
	X (kg)	Y (kg)	Z (kg)
1	-150.87	-261.53	<b>34.69</b>
2	-25.37	-485.67	<b>145.06</b>
4	-8.03	-503.16	<b>158.88</b>
5	8.03	-503.16	<b>158.88</b>
6	25.37	-485.67	<b>145.06</b>
7	150.87	-261.53	<b>34.69</b>
118	0	432.88	<b>121.20</b>
119	0	462.87	<b>143.53</b>
120	0	470.06	<b>147.41</b>
121	0	462.87	<b>143.53</b>
122	0	432.88	<b>121.20</b>
SUMATORIA	----	----	<b>1354.15</b>

Tabla No. 3- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa uno.

Las cargas o reacciones en los apoyos para el eje vertical "z" aumentan hacia el centro de la estructura y disminuyen a las orillas de ésta, siendo estos valores bajos.

## SEGUNDA ALTERNATIVA: SISTEMA CON UN APOYO LATERAL

Esta alternativa tiene la finalidad de demostrar el volado máximo posible que puede cubrir la estructura tridimensional espacial octa-tetra, siendo este espacio de **3.00 m** de largo, con 2.50 m de ancho y un peralte de 41 cm.

La estructura se compone de un total de 354 barras de las cuales 124 barras son de la capa inferior, 106 barras son las diagonales y 124 barras en la capa superior. Por otra parte, los nodos son 93 en total, 49 en la capa inferior y también 44 nodos en la capa superior.

Las barras están fabricadas con bagueta que es un perfil de fierro laminado de sección cuadrada en forma de "U" con lados de 1.27 cm, en calibre #18 equivalente a un espesor de 0.121 cm y con tan solo 2.03 gr de peso por pieza.

Los nodos están fabricados con lámina negra calibre #16 en dos piezas, una circular de 6 cm de diámetro y otra en forma de triángulo equilátero de 7.5 cm por lado con las esquinas dobladas siendo su peso de 116.92 gr.

Las uniones entre nodos y barras son con tornillos tipo "allen" de cabeza hexagonal y de alta resistencia con un diámetro de 3/16" y de 1.27 cm de largo.

Con seis barras y cuatro nodos se forma la célula tetraédrica (Fig. 75) cuya repetición genera la estructura tridimensional espacial octa-tetra (Fig. 76).

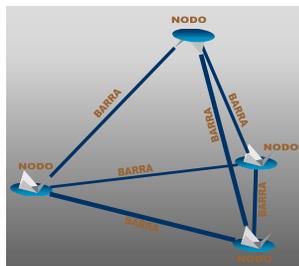
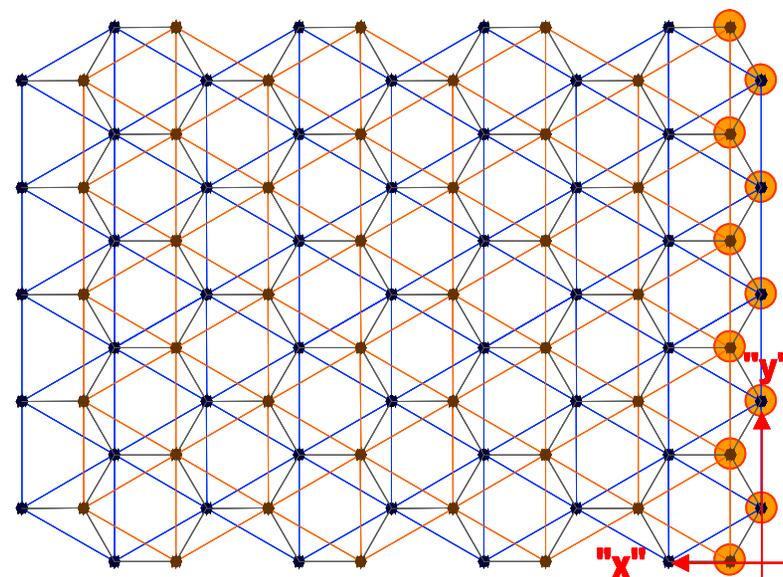
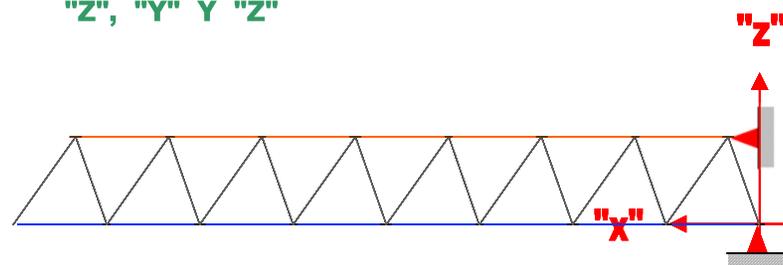


Fig. 75- Célula tetraédrica de 50 cm en sus aristas.



vista superior

### 6 APOYO EMPOTRADO EN LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "X"



vista lateral

Fig. 76- Estructura tridimensional espacial octa-tetra con un volado máximo de 3.00 m.

## 2a. CARGAS APLICADAS A LAS BARRAS

La Tabla No. 4 muestra los resultados obtenidos correspondientes a los esfuerzos a compresión a los que están sometidas las barras. Para efectuar el análisis se considera que el límite de capacidad de carga para una barra sujeta a esfuerzo por compresión es de 310 kg.

La siguiente información es el compendio de los resultados de acuerdo a intervalos preestablecidos cuyo rango fluctúa desde +/- 100 kg hasta +/- 310 kg. El código de color del intervalo, corresponde a los datos de la Tabla No. 01 para localizar el número de barra que presenta cada carga.

No. barra	Carga kg												
1344	-304.33	1557	-81.37	1535	-41.46	1510	-17.84	1082	14.19	1615	45.33	1300	92.25
1351	-304.33	1554	-81.23	1536	-41.32	1501	-17.7	1075	14.38	1088	46.11	1309	92.25
1346	-273.36	1303	-79.69	1530	-40.84	1502	-16.6	1080	14.38	1097	46.11	1629	93.94
1349	-273.36	1304	-79.69	1521	-40.7	1509	-16.47	1267	17.12	1623	46.29	1633	93.94
1347	-247.93	1301	-67.81	1285	-38.03	1113	-15.62	1268	17.12	1628	46.43	1110	97.43
1348	-247.93	1306	-67.81	1294	-38.03	1115	-15.62	1077	20.95	1092	47.34	1116	97.43
1345	-209.03	1555	-67.76	1542	-37.77	1098	-14.76	1078	20.95	1093	47.34	1117	104.99
1350	-209.03	1556	-67.63	1549	-37.63	1101	-14.76	1076	25.67	1325	50.64	1126	104.99
1336	-199.43	1548	-62.34	1278	-35.4	1504	-14.34	1079	25.67	1326	50.64	1630	111.6
1342	-199.43	1543	-62.2	1284	-35.4	1507	-14.2	1609	25.98	1340	50.86	1632	111.74
1332	-186.33	1546	-58.49	1533	-35.35	1272	-12.93	1634	26.04	1324	51.11	1119	112.61
1333	-186.33	1545	-58.35	1538	-35.21	1277	-12.93	1639	26.17	1327	51.11	1124	112.61
1331	-185.18	1550	-55.46	1526	-31.96	1506	-12.58	1607	26.22	1090	51.58	1631	117.82
1334	-185.18	1541	-55.33	1525	-31.82	1505	-12.44	1610	26.22	1095	51.58	1121	120.96
1330	-179.42	1103	-53.88	1522	-31.77	1508	-11.07	1081	28.34	1311	53.15	1122	120.96
1335	-179.42	1112	-53.88	1529	-31.63	1503	-10.93	1087	28.34	1102	58.45	1120	130.07
1343	-147.18	1287	-50.09	1524	-31.58	1084	-10.67	1295	28.55	1111	58.45	1123	130.07
1352	-147.18	1292	-50.09	1527	-31.44	1086	-10.67	1298	28.55	1310	61.63	1635	134.68
1315	-134.05	1544	-48.58	1511	-31.32	1252	10.01	1282	28.98	1312	61.63	1638	134.68
1322	-134.05	1547	-48.44	1528	-31.31	1254	10.01	1281	30.11	1621	63.57	1118	145.5
1317	-129.96	1553	-48.05	1520	-31.18	1061	10.33	1283	30.11	1619	63.71	1125	145.5
1320	-129.96	1558	-47.91	1523	-31.18	1066	10.33	1612	31.83	1620	64.74	1329	146.57
1318	-127.44	1289	-47.42	1551	-25.85	1253	11.47	1617	31.83	1339	69.86	1338	146.57
1319	-127.44	1290	-47.42	1273	-25.84	1266	11.53	1608	35.01	1341	69.86	1636	149.79
1316	-122.93	1537	-46.52	1276	-25.84	1269	11.53	1611	35.14	1618	73.12	1637	149.92
1321	-122.93	1299	-46.4	1560	-25.71	1073	14.19	1296	35.89	1622	73.26	1131	166.55
1328	-121.16	1308	-46.4	1517	-22.42	1082	14.19	1297	35.89	1104	78.49	1140	166.55
1337	-121.16	1534	-46.38	1514	-22.28	1075	14.38	1089	36.25	1109	78.49	1133	173.47
1307	-107.54	1531	-45.91	1515	-22.09	1080	14.38	1096	36.25	1106	79.86	1138	173.47
1313	-107.54	1540	-45.77	1519	-22	1254	10.01	1271	37.75	1107	79.86	1139	178.2
1314	-92.71	1539	-45.55	1513	-21.98	1061	10.33	1280	37.75	1627	81.65	1145	178.2
1323	-92.71	1532	-45.42	1516	-21.95	1066	10.33	1613	44.85	1624	81.79	1135	180.06
1302	-89.04	1288	-43.24	1512	-21.86	1253	11.47	1616	44.85	1105	81.97	1136	180.06
1305	-89.04	1291	-43.24	1518	-21.85	1266	11.53	1091	44.87	1108	81.97	1134	181.3
1559	-85.74	1286	-42.83	1274	-19.75	1269	11.53	1094	44.87	1625	88.66	1137	181.3
1552	-85.6	1293	-42.83	1275	-19.75	1073	14.19	1614	45.33	1626	88.8		

Rango de carga en kg +/-	Color	Cantidad de barras	Porcentaje %
De 226 a 310		6	1.69

De 151 a 225		20	5.65
De 76 a 150		59	16.67
De 2 a 75		237	66.95
De 0 a 1	*	32	9.04
<b>Total</b>		<b>354</b>	<b>100.00</b>

\* Estos valores de carga aplicados en la barra no aparecen en la tabla No. 01 porque son menores a +/- 100 kg

En base a los porcentajes obtenidos, se establece que casi el 93% de las barras de la estructura analizada se encuentran trabajando a la mitad de su capacidad de carga y solamente el 1.69% de las barras se encuentra fatigada a casi el 100% de su capacidad de trabajo.

Tabla No. 4- Tabla de valores más cercanos al límite de carga de la barra por esfuerzos de compresión y tracción para alternativa dos.

## 2b. DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS

Con respecto a los desplazamientos en los nodos, en la tabla aparecen los resultados obtenidos en los tres ejes, x, y y z. Así como el número de nodo de la estructura (Tabla No. 5).

A continuación se indican los resultados más significativos de desplazamientos, en cualquiera de los tres ejes coordenados:

Rango de desplazamiento mm (+/-)	Color	Cantidad de nodos			Porcentaje %		
		x	y	z	x	y	Z
MENORES A 1		93	93	93	100.00	100.00	100.00
<b>Total</b>		<b>93</b>	<b>93</b>	<b>93</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

El desplazamiento máximo posible es:

$$2 \times \left( \frac{830 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} \right) = 1.85 \text{ cm} = \mathbf{18.5 \text{ mm}}$$

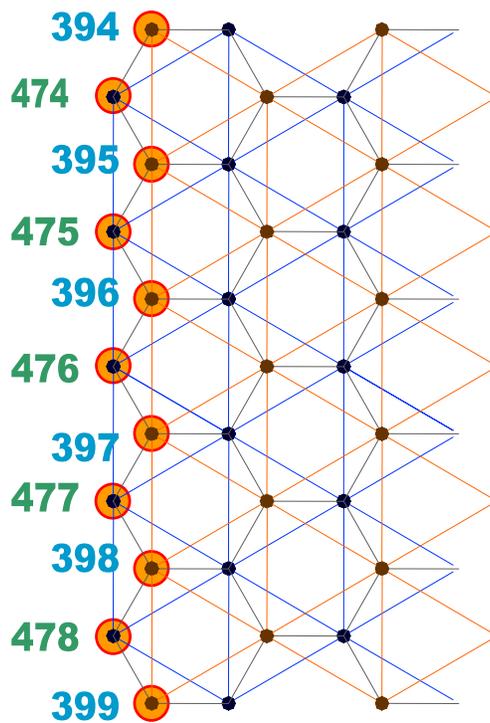
Por lo que la estructura no tiene problemas de desplazamiento de nodos, ya que el máximo desplazamiento presente es menor a 1 mm.

Tabla No.5- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa dos.

No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)		
	X	y	X		X	y	Z		X	y	Z
27	0.0000	0.0005	-0.0058	388	0.0000	-0.0002	-0.0009	460	0.0000	0.0004	-0.0015
28	0.0000	0.0005	-0.0058	389	0.0000	-0.0001	-0.0003	461	0.0001	0.0004	-0.0014
29	0.0000	0.0005	-0.0058	390	0.0000	-0.0001	-0.0004	462	0.0001	0.0004	-0.0013
30	0.0000	0.0005	-0.0058	391	0.0000	-0.0001	-0.0004	463	-0.0001	0.0003	-0.0007
31	0.0000	0.0005	-0.0058	392	0.0000	-0.0001	-0.0004	464	0.0000	0.0003	-0.0008
356	0.0000	-0.0003	-0.0052	393	0.0000	-0.0001	-0.0003	465	0.0000	0.0003	-0.0008
357	0.0000	-0.0003	-0.0052	394	0.0000	0.0000	0.0000	466	0.0000	0.0003	-0.0008
358	0.0000	-0.0003	-0.0052	395	0.0000	0.0000	0.0000	467	0.0001	0.0003	-0.0007
359	0.0000	-0.0003	-0.0052	396	0.0000	0.0000	0.0000	468	-0.0001	0.0002	-0.0001
360	0.0000	-0.0003	-0.0052	397	0.0000	0.0000	0.0000	469	-0.0001	0.0002	-0.0002
361	0.0000	-0.0003	-0.0043	398	0.0000	0.0000	0.0000	470	0.0000	0.0002	-0.0002
362	0.0000	-0.0003	-0.0043	399	0.0000	0.0000	0.0000	471	0.0000	0.0002	-0.0002
363	0.0000	-0.0003	-0.0043	435	0.0000	0.0005	-0.0049	472	0.0001	0.0002	-0.0002
364	0.0000	-0.0003	-0.0043	436	0.0000	0.0005	-0.0049	473	0.0001	0.0002	-0.0001
365	0.0000	-0.0003	-0.0043	437	0.0000	0.0005	-0.0049	474	0.0000	0.0000	0.0000
366	0.0000	-0.0003	-0.0043	438	0.0000	0.0005	-0.0049	475	0.0000	0.0000	0.0000
367	0.0000	-0.0003	-0.0034	439	0.0000	0.0005	-0.0049	476	0.0000	0.0000	0.0000
368	0.0000	-0.0003	-0.0034	440	0.0000	0.0005	-0.0049	477	0.0000	0.0000	0.0000
369	0.0000	-0.0003	-0.0034	441	0.0000	0.0005	-0.0040	478	0.0000	0.0000	0.0000
370	0.0000	-0.0003	-0.0034	442	0.0000	0.0005	-0.0040				
371	0.0000	-0.0003	-0.0034	443	0.0000	0.0005	-0.0040				
372	0.0000	-0.0003	-0.0025	444	0.0000	0.0005	-0.0040				
373	0.0000	-0.0003	-0.0025	445	0.0000	0.0005	-0.0040				
374	0.0000	-0.0003	-0.0026	446	0.0000	0.0005	-0.0030				
375	0.0000	-0.0003	-0.0026	447	0.0000	0.0005	-0.0031				
376	0.0000	-0.0003	-0.0025	448	0.0000	0.0005	-0.0031				
377	0.0000	-0.0003	-0.0025	449	0.0000	0.0005	-0.0031				
378	0.0000	-0.0003	-0.0016	450	0.0000	0.0005	-0.0031				
379	0.0000	-0.0003	-0.0017	451	0.0000	0.0005	-0.0030				
380	0.0000	-0.0003	-0.0017	452	0.0000	0.0005	-0.0022				
381	0.0000	-0.0003	-0.0017	453	0.0000	0.0005	-0.0023				
382	0.0000	-0.0003	-0.0016	454	0.0000	0.0005	-0.0023				
383	0.0000	-0.0002	-0.0009	455	0.0000	0.0005	-0.0023				
384	0.0000	-0.0002	-0.0009	456	0.0000	0.0005	-0.0022				
385	0.0000	-0.0002	-0.0010	457	-0.0001	0.0004	-0.0013				
386	0.0000	-0.0002	-0.0010	458	-0.0001	0.0004	-0.0014				
387	0.0000	-0.0002	-0.0009	459	0.0000	0.0004	-0.0015				

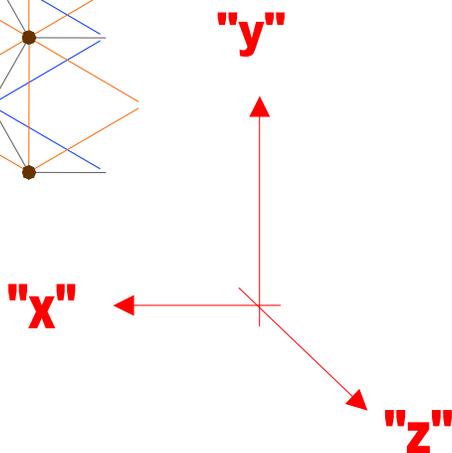
## 2c. REACCIONES EN LOS APOYOS

La estructura se sostiene a través de once nodos repartidos seis en un lado y cinco en el otro, en donde todos fueron considerados como apoyos empotrados en uno de sus



extremos. La restricción se enfocó en el primer lado, en el sentido de los ejes "y" y "z", con apoyo libre en el sentido "x" para disminuir el efecto sísmico en este sentido (Fig. No. 77).

Fig. No. 77-Apoyos del máximo cantiliver o volado posible.



### ● APOYO EMPOTRADO EN LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "X"

Las reacciones en los apoyos de la estructura en sus tres ejes aparecen en la tabla No. 6.

No. Nudo	REACCION		
	X (kg)	Y (kg)	Z (kg)
394	-79.61	152.53	20.67
395	2.34	366.06	105.86
396	0.61	382.53	117.82
397	-0.61	382.53	117.82
398	-2.34	366.06	105.86
399	79.61	152.53	20.67
474	75.41	-374.61	0.12
475	30.86	-400.20	0.17
476	0.00	-411.36	0.17
477	-30.86	-400.20	0.17
478	-75.41	-374.61	0.12
SUMATORIA	----	----	489.45

Tabla No. 06- Tabla de valores respectivos a las reacciones en los apoyos para alternativa dos.

Las cargas o reacciones en los apoyos para el eje vertical "z" aumentan hacia el centro de la estructura y disminuyen a las orillas de ésta, siendo estos valores bajos.

### TERCERA ALTERNATIVA: SISTEMA CON UN APOYO LATERAL Y OTRO CENTRAL

Esta alternativa tiene la finalidad de demostrar el máximo claro y volado posible que puede cubrir la estructura tridimensional espacial octa-tetra. Después del análisis se concluye que las dimensiones máximas para esta alternativa son: 8.00 m para el claro, 3.00 m para el volado, es decir 11.00 m de largo, ancho 2.5 m y peralte de 41 cm.

La estructura se compone de un total de 1143 barras de las cuales 379 barras son de la capa inferior, 397 barras son las diagonales y 367 barras en la capa superior. Por otra parte, los nodos son 286 en total, con 143 en cada una de las capas inferior y superior.

Las barras están fabricadas con bagueta que es un perfil de fierro laminado de sección cuadrada en forma de "U" con lados de 1.27 cm, en calibre #18 equivalente a un espesor de 0.121 cm y con tan solo 2.03 gr de peso por pieza.

Los nodos están fabricados con lámina negra calibre #16 en dos piezas, una circular de 6 cm de diámetro y otra en forma de triángulo equilátero de 7.5 cm por lado con las esquinas dobladas siendo su peso de 116.92 gr.

Las uniones entre nodos y barras son con tornillos tipo "allen" de cabeza hexagonal y de alta resistencia con un diámetro de 3/16" y de 1.27 cm de largo.

Con seis barras y cuatro nodos se forma la célula tetraédrica (Fig. 78) cuya repetición genera la estructura tridimensional espacial octa-tetra (Fig. 79).

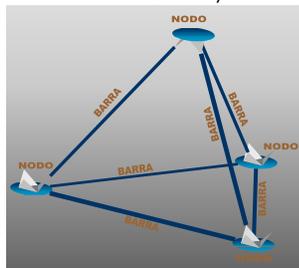
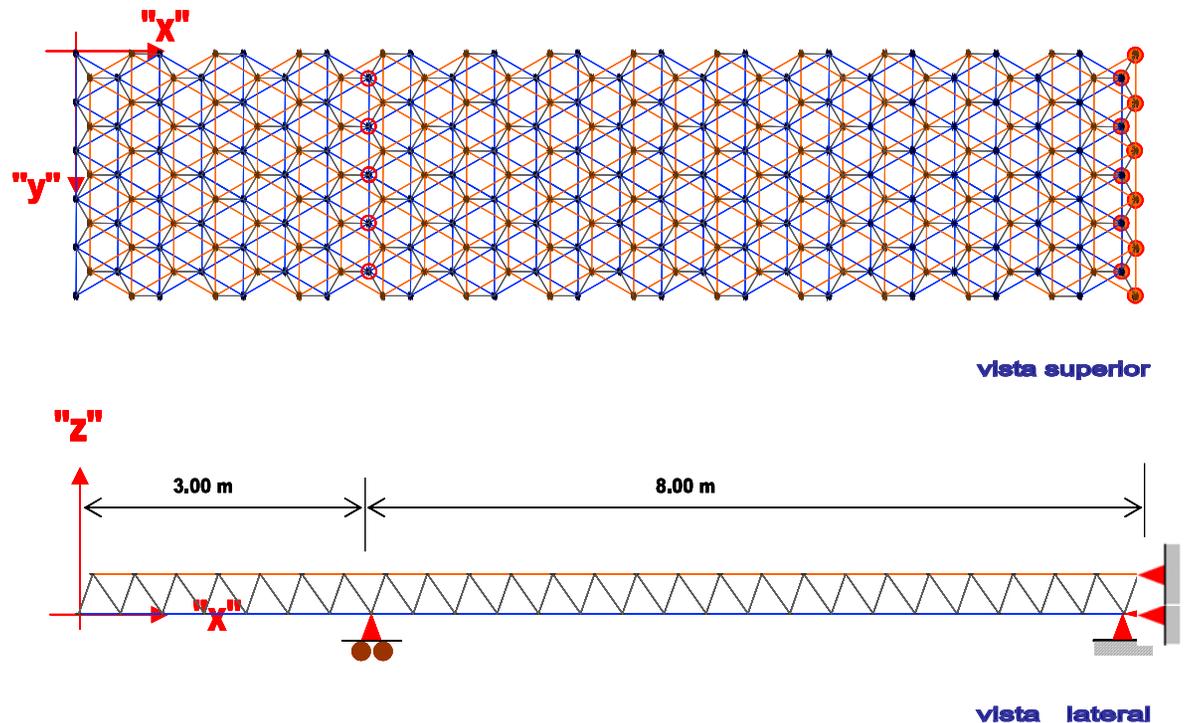


Fig. 78- Célula tetraédrica de 50 cm en sus aristas.



⊙ APOYO EMPOTRADO EL LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"

● APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "X"

Fig. 79- Estructura tridimensional espacial octa-tetra con el máximo claro y volado posible.

### 3a. CARGAS APLICADAS A LAS BARRAS

La Tabla No. 7 muestra los resultados obtenidos correspondientes a los esfuerzos a compresión a los que están sometidas las barras. Para efectuar el análisis se considera que el límite de capacidad de carga para una barra sujeta a esfuerzo por compresión es de 310 kg .

La siguiente información es el compendio de los resultados de acuerdo a intervalos preestablecidos cuyo rango fluctúa desde +/- 100 kg hasta +/- 310 kg. El código de color del intervalo, corresponde a los datos de la Tabla No. 01 para localizar el número de barra que presenta cada carga.

No. barra	Carga kg												
606	-308.68	165	-161.20	188	-134.28	377	-121.00	481	123.49	51	152.90	285	246.74
613	-308.68	167	-160.20	194	-134.28	378	-121.00	464	124.22	58	152.90	288	246.74
608	-272.11	174	-160.20	196	-134.04	985	-120.88	465	124.22	312	154.37	284	247.22
611	-272.11	592	-160.16	203	-134.04	636	-119.65	463	125.30	319	154.37	289	247.22
609	-247.57	597	-160.16	141	-132.97	641	-119.65	466	125.30	271	156.01	286	254.61
610	-247.57	366	-156.47	142	-132.97	695	-113.65	493	126.04	272	156.01	287	254.61
358	-222.44	372	-156.47	140	-132.72	696	-113.65	494	126.04	591	161.36	9	260.55
365	-222.44	374	-154.83	143	-132.72	509	112.69	296	127.95	600	161.36	12	260.55
607	-212.07	381	-154.83	139	-131.66	506	112.69	305	127.95	298	163.91	10	274.56
612	-212.07	701	-151.49	144	-131.66	55	112.75	478	129.88	303	163.91	11	274.56
598	-208.18	794	-150.33	376	-131.61	54	112.75	479	129.88	37	166.69	6	277.26
604	-208.18	795	-150.33	379	-131.61	718	112.92	314	130.35	42	166.69	15	277.26
360	-205.57	798	-148.74	153	-130.79	717	113.06	317	130.35	270	172.06	8	280.81
363	-205.57	802	-148.74	158	-130.79	507	115.98	35	133.13	273	172.06	13	280.81
627	-201.35	635	-146.16	36	-128.14	508	115.98	44	133.13	706	172.95		
633	-201.35	642	-146.16	45	-128.14	267	116.12	492	134.35	707	172.95		
361	-198.10	154	-144.84	637	-127.08	276	116.12	495	134.35	300	178.78		
362	-198.10	157	-144.84	640	-127.08	511	117.01	711	135.15	301	178.78		
622	-186.37	130	-143.48	168	-125.96	517	117.01	713	135.15	282	184.69		
625	-186.37	136	-143.48	173	-125.96	448	117.08	477	135.23	291	184.69		
359	-186.24	169	-143.02	125	-125.42	451	117.08	480	135.23	39	185.35		
364	-186.24	172	-143.02	128	-125.42	491	117.08	461	136.80	40	185.35		
623	-178.99	793	-142.28	184	-124.69	496	117.08	468	136.80	299	187.91		
624	-178.99	796	-142.28	185	-124.69	721	117.73	453	137.13	302	187.91		
800	-178.22	700	-141.99	182	-124.01	722	117.73	459	137.13	275	194.77		
593	-176.16	702	-141.99	187	-124.01	505	117.93	269	137.14	281	194.77		
596	-176.16	138	-141.17	638	-123.96	510	117.93	274	137.14	38	200.54		
799	-173.94	145	-141.17	639	-123.96	519	119.21	712	139.22	41	200.54		
801	-173.94	155	-138.38	183	-123.64	526	119.21	710	142.54	304	202.09		
594	-170.25	156	-138.38	186	-123.64	462	121.66	714	142.54	310	202.09		
595	-170.25	619	-137.29	297	-123.06	467	121.66	482	149.33	43	231.34		
621	-164.44	628	-137.29	306	-123.06	315	122.47	488	149.33	49	231.34		
626	-164.44	787	-135.51	789	-122.09	316	122.47	490	150.38	7	236.22		
605	-162.10	791	-135.51	788	-121.13	53	122.50	497	150.38	14	236.22		
614	-162.10	170	-135.00	790	-121.13	56	122.50	705	152.12	283	237.13		
159	-161.20	171	-135.00	990	-121.02	476	123.49	708	152.12	290	237.13		

Rango de carga en kg +/-	Color	Cantidad de barras	Porcentaje %
--------------------------	-------	--------------------	--------------

De 226 a 310		26	2.27
De 151 a 225		56	4.90
De 76 a 150		299	26.16
De 2 a 75	*	723	63.15
De 0 a 1	*	39	3.45
<b>Total</b>		<b>1143</b>	<b>100.00</b>

\* Estos valores de carga aplicados en la barra no aparecen en la tabla No. 01 porque son menores a +/- 100 kg.

En base a los porcentajes obtenidos, se establece que casi el 93% de las barras de la estructura analizada se encuentran trabajando a la mitad de su capacidad de carga y solamente el 2.27% de las barras se encuentra fatigado a casi el 100% de su capacidad de trabajo.

Tabla No. 7- Tabla de valores más cercanos al límite de carga de la barra por esfuerzos de compresión y tracción para alternativa tres.

### 3b. DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS

Con respecto a los desplazamientos en los nodos, en la tabla aparecen los resultados obtenidos en los tres ejes, x, y y z. Así como el número de nodo de la estructura (Tabla No. 8).

A continuación se indican los resultados más significativos de desplazamientos, en cualquiera de los tres ejes coordenados:

Rango de desplazamiento mm (+/-)	Color	Cantidad de nodos			Porcentaje %		
		x	y	z	x	y	z
< 1	*	286	286	286	100.0	100.0	100.0
<b>Total</b>		<b>286</b>	<b>286</b>	<b>286</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

El desplazamiento máximo posible para el claro es:

$$\frac{800 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} = 1.97 \text{ cm} = \mathbf{19.7 \text{ mm}}$$

Y en el volado:

$$2 \times \left( \frac{300 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} \right) = 1.85 \text{ cm} = \mathbf{18.5 \text{ mm}}$$

Por lo que la estructura no tiene problemas de desplazamiento de nodos, ya que el máximo desplazamiento presente es de 6.02 mm.

Tabla No. 8- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa tres.

No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)		
	X	y	Z		X	y	Z		X	y	Z
188	0.00	0.00	-0.21	199	0.00	0.01	-0.19	173	0.00	-0.01	-0.16
193	0.00	0.00	-0.21	204	0.00	0.01	-0.19	175	0.00	-0.01	-0.16
62	0.00	0.00	-0.21	69	0.00	0.00	-0.19	174	0.00	-0.01	-0.16
67	0.00	0.00	-0.21	71	0.00	0.00	-0.19	319	0.00	0.02	-0.16
57	0.00	0.01	-0.21	70	0.00	0.00	-0.19	318	0.00	0.02	-0.16
61	0.00	0.01	-0.21	200	0.00	0.01	-0.19	320	0.00	0.02	-0.16
189	0.00	0.00	-0.20	203	0.00	0.01	-0.19	40	0.00	0.02	-0.16
192	0.00	0.00	-0.20	178	0.00	0.00	-0.19	45	0.00	0.02	-0.16
63	0.00	0.00	-0.20	181	0.00	0.00	-0.19	317	0.00	0.02	-0.16
66	0.00	0.00	-0.20	201	0.00	0.01	-0.18	321	0.00	0.02	-0.16
194	0.00	0.01	-0.20	202	0.00	0.01	-0.18	41	0.00	0.02	-0.16
198	0.00	0.01	-0.20	179	0.00	0.00	-0.18	44	0.00	0.02	-0.16
58	0.00	0.01	-0.20	180	0.00	0.00	-0.18	42	0.00	0.02	-0.15
60	0.00	0.01	-0.20	46	0.00	0.01	-0.18	43	0.00	0.02	-0.15
183	0.00	0.00	-0.20	50	0.00	0.01	-0.18	79	0.00	-0.01	-0.15
187	0.00	0.00	-0.20	73	0.00	-0.01	-0.18	83	0.00	-0.01	-0.15
190	0.00	0.00	-0.20	78	0.00	-0.01	-0.18	80	0.00	-0.01	-0.15
191	0.00	0.00	-0.20	47	0.00	0.01	-0.18	82	0.00	-0.01	-0.15
51	0.00	0.01	-0.20	49	0.00	0.01	-0.18	81	0.00	-0.01	-0.15
56	0.00	0.01	-0.20	48	0.00	0.01	-0.18	166	0.00	-0.01	-0.14
59	0.00	0.01	-0.20	74	0.00	-0.01	-0.17	171	0.00	-0.01	-0.14
64	0.00	0.00	-0.20	77	0.00	-0.01	-0.17	341	0.00	-0.01	-0.14
65	0.00	0.00	-0.20	75	0.00	-0.01	-0.17	210	0.00	0.02	-0.14
195	0.00	0.01	-0.20	76	0.00	-0.01	-0.17	215	0.00	0.02	-0.14
197	0.00	0.01	-0.20	346	0.00	-0.01	-0.17	340	0.00	-0.01	-0.14
184	0.00	0.00	-0.20	347	0.00	-0.01	-0.17	342	0.00	-0.01	-0.14
186	0.00	0.00	-0.20	345	0.00	-0.01	-0.17	339	0.00	-0.01	-0.14
196	0.00	0.01	-0.20	348	0.00	-0.01	-0.17	343	0.00	-0.01	-0.14
185	0.00	0.00	-0.20	344	0.00	-0.01	-0.17	211	0.00	0.02	-0.14
52	0.00	0.01	-0.20	349	0.00	-0.01	-0.17	214	0.00	0.02	-0.14
55	0.00	0.01	-0.20	205	0.00	0.01	-0.17	212	0.00	0.02	-0.14
68	0.00	0.00	-0.19	209	0.00	0.01	-0.17	213	0.00	0.02	-0.14
72	0.00	0.00	-0.19	172	0.00	-0.01	-0.17	167	0.00	-0.01	-0.14
53	0.00	0.01	-0.19	176	0.00	-0.01	-0.17	170	0.00	-0.01	-0.14
54	0.00	0.01	-0.19	206	0.00	0.01	-0.16	168	0.00	-0.01	-0.14
177	0.00	0.00	-0.19	208	0.00	0.01	-0.16	169	0.00	-0.01	-0.14
182	0.00	0.00	-0.19	207	0.00	0.01	-0.16				

### 3c. REACCIONES EN LOS APOYOS

La estructura se sostiene a través de once nodos repartidos seis en un lado y cinco en el otro, en donde todos fueron considerados como apoyos empotrados en uno de sus

extremos. La restricción se enfocó en el primer lado, en el sentido de los ejes "y" y "z", con apoyo libre en el sentido "x" para disminuir el efecto sísmico en este sentido (Fig. No. 00).

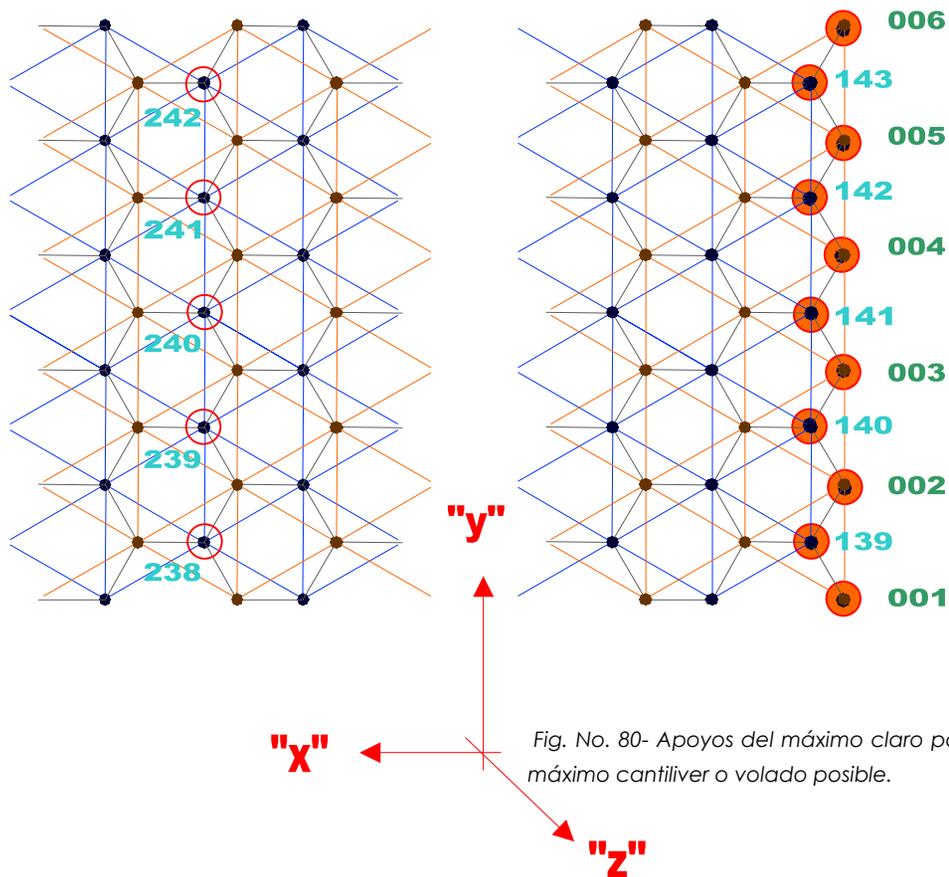


Fig. No. 80- Apoyos del máximo claro posible con el máximo cantiliver o volado posible.

- **APOYO EMPOTRADO EL LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"**
- **APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"**

Las reacciones en los apoyos de la estructura en sus tres ejes aparecen en la tabla No. 9.

No. Nudo	REACCION		
	X (kg)	Y (kg)	Z (kg)
1	-130.45	-226.14	0.05
2	-21.00	-421.70	0.19
3	-6.60	-436.46	0.21
4	6.60	-436.46	0.21
5	21.00	-421.70	0.19
6	130.45	-226.14	0.05
139	31.17	389.91	114.98
140	9.11	414.09	134.46
141	0.00	419.98	137.76
142	-9.11	414.09	134.46
143	-31.17	389.91	114.98
238	86.38	-92.57	169.14
239	22.29	-87.86	269.58
240	0.00	-86.77	279.70
241	-22.29	-87.86	269.58
242	-86.38	-92.57	169.14
SUMATORIA	----	----	1794.65

Tabla No. 9- Tabla de valores respectivos a las reacciones en los apoyos para alternativa tres.

Las cargas o reacciones en los apoyos para el eje vertical "z" aumentan hacia el centro de la estructura y disminuyen a las orillas de ésta, siendo estos valores bajos.

### 3a. CARGAS APLICADAS A LAS BARRAS

La Tabla No. 7 muestra los resultados obtenidos correspondientes a los esfuerzos a compresión a los que están sometidas las barras. Para efectuar el análisis se considera que el límite de capacidad de carga para una barra sujeta a esfuerzo por compresión es de 310 kg .

La siguiente información es el compendio de los resultados de acuerdo a intervalos preestablecidos cuyo rango fluctúa desde +/- 100 kg hasta +/- 310 kg. El código de color del intervalo, corresponde a los datos de la Tabla No. 01 para localizar el número de barra que presenta cada carga.

No. barra	Carga kg												
606	-308.68	165	-161.20	188	-134.28	377	-121.00	481	123.49	51	152.90	285	246.74
613	-308.68	167	-160.20	194	-134.28	378	-121.00	464	124.22	58	152.90	288	246.74
608	-272.11	174	-160.20	196	-134.04	985	-120.88	465	124.22	312	154.37	284	247.22
611	-272.11	592	-160.16	203	-134.04	636	-119.65	463	125.30	319	154.37	289	247.22
609	-247.57	597	-160.16	141	-132.97	641	-119.65	466	125.30	271	156.01	286	254.61
610	-247.57	366	-156.47	142	-132.97	695	-113.65	493	126.04	272	156.01	287	254.61
358	-222.44	372	-156.47	140	-132.72	696	-113.65	494	126.04	591	161.36	9	260.55
365	-222.44	374	-154.83	143	-132.72	509	112.69	296	127.95	600	161.36	12	260.55
607	-212.07	381	-154.83	139	-131.66	506	112.69	305	127.95	298	163.91	10	274.56
612	-212.07	701	-151.49	144	-131.66	55	112.75	478	129.88	303	163.91	11	274.56
598	-208.18	794	-150.33	376	-131.61	54	112.75	479	129.88	37	166.69	6	277.26
604	-208.18	795	-150.33	379	-131.61	718	112.92	314	130.35	42	166.69	15	277.26
360	-205.57	798	-148.74	153	-130.79	717	113.06	317	130.35	270	172.06	8	280.81
363	-205.57	802	-148.74	158	-130.79	507	115.98	35	133.13	273	172.06	13	280.81
627	-201.35	635	-146.16	36	-128.14	508	115.98	44	133.13	706	172.95		
633	-201.35	642	-146.16	45	-128.14	267	116.12	492	134.35	707	172.95		
361	-198.10	154	-144.84	637	-127.08	276	116.12	495	134.35	300	178.78		
362	-198.10	157	-144.84	640	-127.08	511	117.01	711	135.15	301	178.78		
622	-186.37	130	-143.48	168	-125.96	517	117.01	713	135.15	282	184.69		
625	-186.37	136	-143.48	173	-125.96	448	117.08	477	135.23	291	184.69		
359	-186.24	169	-143.02	125	-125.42	451	117.08	480	135.23	39	185.35		
364	-186.24	172	-143.02	128	-125.42	491	117.08	461	136.80	40	185.35		
623	-178.99	793	-142.28	184	-124.69	496	117.08	468	136.80	299	187.91		
624	-178.99	796	-142.28	185	-124.69	721	117.73	453	137.13	302	187.91		
800	-178.22	700	-141.99	182	-124.01	722	117.73	459	137.13	275	194.77		
593	-176.16	702	-141.99	187	-124.01	505	117.93	269	137.14	281	194.77		
596	-176.16	138	-141.17	638	-123.96	510	117.93	274	137.14	38	200.54		
799	-173.94	145	-141.17	639	-123.96	519	119.21	712	139.22	41	200.54		
801	-173.94	155	-138.38	183	-123.64	526	119.21	710	142.54	304	202.09		
594	-170.25	156	-138.38	186	-123.64	462	121.66	714	142.54	310	202.09		
595	-170.25	619	-137.29	297	-123.06	467	121.66	482	149.33	43	231.34		
621	-164.44	628	-137.29	306	-123.06	315	122.47	488	149.33	49	231.34		
626	-164.44	787	-135.51	789	-122.09	316	122.47	490	150.38	7	236.22		
605	-162.10	791	-135.51	788	-121.13	53	122.50	497	150.38	14	236.22		
614	-162.10	170	-135.00	790	-121.13	56	122.50	705	152.12	283	237.13		
159	-161.20	171	-135.00	990	-121.02	476	123.49	708	152.12	290	237.13		

Rango de carga en kg +/-	Color	Cantidad de barras	Porcentaje %
--------------------------	-------	--------------------	--------------

De 226 a 310		26	2.27
De 151 a 225		56	4.90
De 76 a 150		299	26.16
De 2 a 75	*	723	63.15
De 0 a 1	*	39	3.45
<b>Total</b>		<b>1143</b>	<b>100.00</b>

\* Estos valores de carga aplicados en la barra no aparecen en la tabla No. 01 porque son menores a +/- 100 kg.

En base a los porcentajes obtenidos, se establece que casi el 93% de las barras de la estructura analizada se encuentran trabajando a la mitad de su capacidad de carga y solamente el 2.27% de las barras se encuentra fatigado a casi el 100% de su capacidad de trabajo.

Tabla No. 7- Tabla de valores más cercanos al límite de carga de la barra por esfuerzos de compresión y tracción para alternativa tres.

### 3b. DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS

Con respecto a los desplazamientos en los nodos, en la tabla aparecen los resultados obtenidos en los tres ejes, x, y y z. Así como el número de nodo de la estructura (Tabla No. 8).

A continuación se indican los resultados más significativos de desplazamientos, en cualquiera de los tres ejes coordenados:

Rango de desplazamiento mm (+/-)	Color	Cantidad de nodos			Porcentaje %		
		x	y	z	x	y	z
< 1	*	286	286	286	100.0	100.0	100.0
<b>Total</b>		<b>286</b>	<b>286</b>	<b>286</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

El desplazamiento máximo posible para el claro es:

$$\frac{800 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} = 1.97 \text{ cm} = \mathbf{19.7 \text{ mm}}$$

Y en el volado:

$$2 \times \left( \frac{300 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} \right) = 1.85 \text{ cm} = \mathbf{18.5 \text{ mm}}$$

Por lo que la estructura no tiene problemas de desplazamiento de nodos, ya que el máximo desplazamiento presente es de 6.02 mm.

Tabla No. 8- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa tres.

No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)		
	X	y	Z		X	y	Z		X	y	Z
188	0.00	0.00	-0.21	199	0.00	0.01	-0.19	173	0.00	-0.01	-0.16
193	0.00	0.00	-0.21	204	0.00	0.01	-0.19	175	0.00	-0.01	-0.16
62	0.00	0.00	-0.21	69	0.00	0.00	-0.19	174	0.00	-0.01	-0.16
67	0.00	0.00	-0.21	71	0.00	0.00	-0.19	319	0.00	0.02	-0.16
57	0.00	0.01	-0.21	70	0.00	0.00	-0.19	318	0.00	0.02	-0.16
61	0.00	0.01	-0.21	200	0.00	0.01	-0.19	320	0.00	0.02	-0.16
189	0.00	0.00	-0.20	203	0.00	0.01	-0.19	40	0.00	0.02	-0.16
192	0.00	0.00	-0.20	178	0.00	0.00	-0.19	45	0.00	0.02	-0.16
63	0.00	0.00	-0.20	181	0.00	0.00	-0.19	317	0.00	0.02	-0.16
66	0.00	0.00	-0.20	201	0.00	0.01	-0.18	321	0.00	0.02	-0.16
194	0.00	0.01	-0.20	202	0.00	0.01	-0.18	41	0.00	0.02	-0.16
198	0.00	0.01	-0.20	179	0.00	0.00	-0.18	44	0.00	0.02	-0.16
58	0.00	0.01	-0.20	180	0.00	0.00	-0.18	42	0.00	0.02	-0.15
60	0.00	0.01	-0.20	46	0.00	0.01	-0.18	43	0.00	0.02	-0.15
183	0.00	0.00	-0.20	50	0.00	0.01	-0.18	79	0.00	-0.01	-0.15
187	0.00	0.00	-0.20	73	0.00	-0.01	-0.18	83	0.00	-0.01	-0.15
190	0.00	0.00	-0.20	78	0.00	-0.01	-0.18	80	0.00	-0.01	-0.15
191	0.00	0.00	-0.20	47	0.00	0.01	-0.18	82	0.00	-0.01	-0.15
51	0.00	0.01	-0.20	49	0.00	0.01	-0.18	81	0.00	-0.01	-0.15
56	0.00	0.01	-0.20	48	0.00	0.01	-0.18	166	0.00	-0.01	-0.14
59	0.00	0.01	-0.20	74	0.00	-0.01	-0.17	171	0.00	-0.01	-0.14
64	0.00	0.00	-0.20	77	0.00	-0.01	-0.17	341	0.00	-0.01	-0.14
65	0.00	0.00	-0.20	75	0.00	-0.01	-0.17	210	0.00	0.02	-0.14
195	0.00	0.01	-0.20	76	0.00	-0.01	-0.17	215	0.00	0.02	-0.14
197	0.00	0.01	-0.20	346	0.00	-0.01	-0.17	340	0.00	-0.01	-0.14
184	0.00	0.00	-0.20	347	0.00	-0.01	-0.17	342	0.00	-0.01	-0.14
186	0.00	0.00	-0.20	345	0.00	-0.01	-0.17	339	0.00	-0.01	-0.14
196	0.00	0.01	-0.20	348	0.00	-0.01	-0.17	343	0.00	-0.01	-0.14
185	0.00	0.00	-0.20	344	0.00	-0.01	-0.17	211	0.00	0.02	-0.14
52	0.00	0.01	-0.20	349	0.00	-0.01	-0.17	214	0.00	0.02	-0.14
55	0.00	0.01	-0.20	205	0.00	0.01	-0.17	212	0.00	0.02	-0.14
68	0.00	0.00	-0.19	209	0.00	0.01	-0.17	213	0.00	0.02	-0.14
72	0.00	0.00	-0.19	172	0.00	-0.01	-0.17	167	0.00	-0.01	-0.14
53	0.00	0.01	-0.19	176	0.00	-0.01	-0.17	170	0.00	-0.01	-0.14
54	0.00	0.01	-0.19	206	0.00	0.01	-0.16	168	0.00	-0.01	-0.14
177	0.00	0.00	-0.19	208	0.00	0.01	-0.16	169	0.00	-0.01	-0.14
182	0.00	0.00	-0.19	207	0.00	0.01	-0.16				

### 3c. REACCIONES EN LOS APOYOS

La estructura se sostiene a través de once nodos repartidos seis en un lado y cinco en el otro, en donde todos fueron considerados como apoyos empotrados en uno de sus

extremos. La restricción se enfocó en el primer lado, en el sentido de los ejes "y" y "z", con apoyo libre en el sentido "x" para disminuir el efecto sísmico en este sentido (Fig. No. 00).

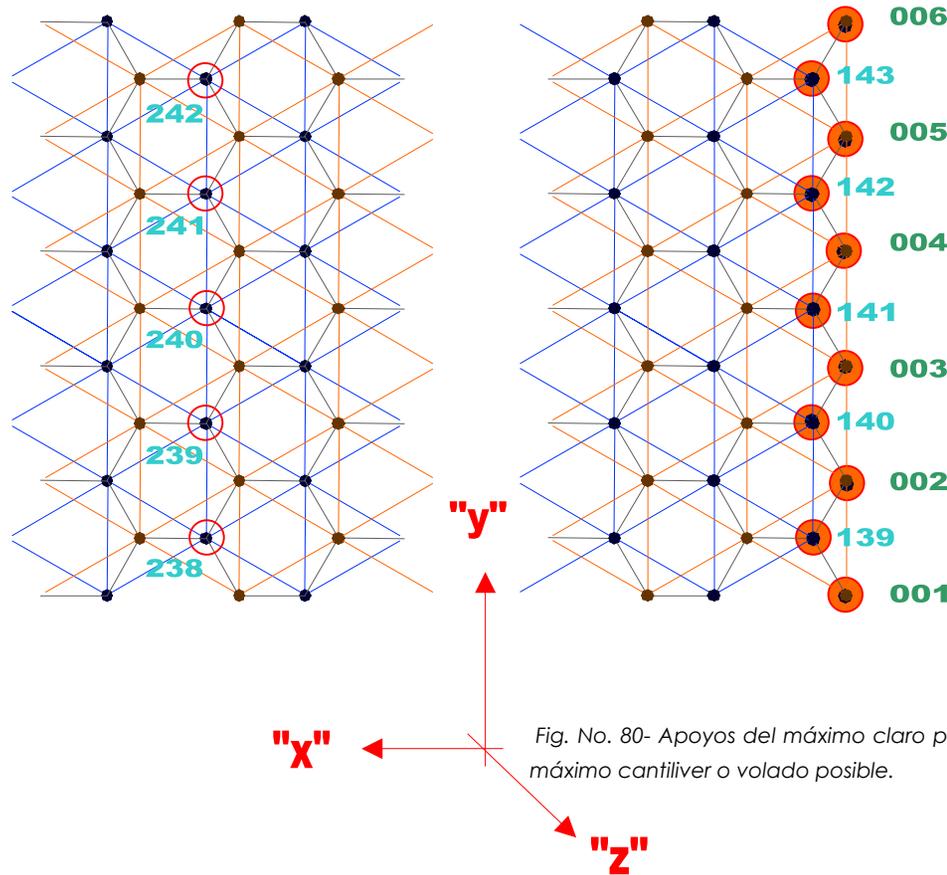


Fig. No. 80- Apoyos del máximo claro posible con el máximo cantiliver o volado posible.

- ⊙ **APOYO EMPOTRADO EL LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"**
- **APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"**

Las reacciones en los apoyos de la estructura en sus tres ejes aparecen en la tabla No. 9.

No. Nodo	REACCION		
	X (kg)	Y (kg)	Z (kg)
1	-130.45	-226.14	0.05
2	-21.00	-421.70	0.19
3	-6.60	-436.46	0.21
4	6.60	-436.46	0.21
5	21.00	-421.70	0.19
6	130.45	-226.14	0.05
139	31.17	389.91	114.98
140	9.11	414.09	134.46
141	0.00	419.98	137.76
142	-9.11	414.09	134.46
143	-31.17	389.91	114.98
238	86.38	-92.57	169.14
239	22.29	-87.86	269.58
240	0.00	-86.77	279.70
241	-22.29	-87.86	269.58
242	-86.38	-92.57	169.14
SUMATORIA	----	----	1794.65

Tabla No. 9- Tabla de valores respectivos a las reacciones en los apoyos para alternativa tres.

Las cargas o reacciones en los apoyos para el eje vertical "z" aumentan hacia el centro de la estructura y disminuyen a las orillas de ésta, siendo estos valores bajos.

#### CUARTA ALTERNATIVA: SISTEMA CON DOS POYOS CENTRALES

Esta alternativa tiene la finalidad de demostrar el máximo claro con dos volados posible que puede cubrir la estructura tridimensional espacial octa-tetra. Después del análisis se concluye que las dimensiones máximas para esta alternativa son: 6.93 m para el claro, 3.03 m para un volado y 3.18 para el otro, es decir 13.14 m de largo, ancho 2.5 m y peralte de 41 cm.

La estructura se compone de un total de 1369 barras de las cuales 455 barras son de la capa inferior, 439 barras son las diagonales y 475 barras en la capa superior. Por otra parte, los nodos son 341 en total, con 170 en la capas inferior y 171 en la capa superior.

Las barras están fabricadas con bagueta que es un perfil de fierro laminado de sección cuadrada en forma de "U" con lados de 1.27 cm, en calibre #18 equivalente a un espesor de 0.121 cm y con tan solo 2.03 gr de peso por pieza.

Los nodos están fabricados con lámina negra calibre #16 en dos piezas, una circular de 6 cm de diámetro y otra en forma de triángulo equilátero de 7.5 cm por lado con las esquinas dobladas siendo su peso de 116.92 gr.

Las uniones entre nodos y barras son con tornillos tipo "allen" de cabeza hexagonal y de alta resistencia con un diámetro de 3/16" y de 1.27 cm de largo.

Con seis barras y cuatro nodos se forma la célula tetraédrica (Fig. 81) cuya repetición genera la estructura tridimensional espacial octa-tetra (Fig. 82).

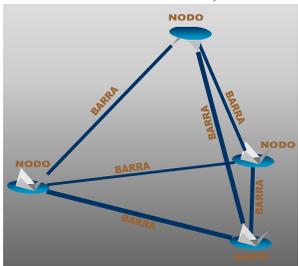
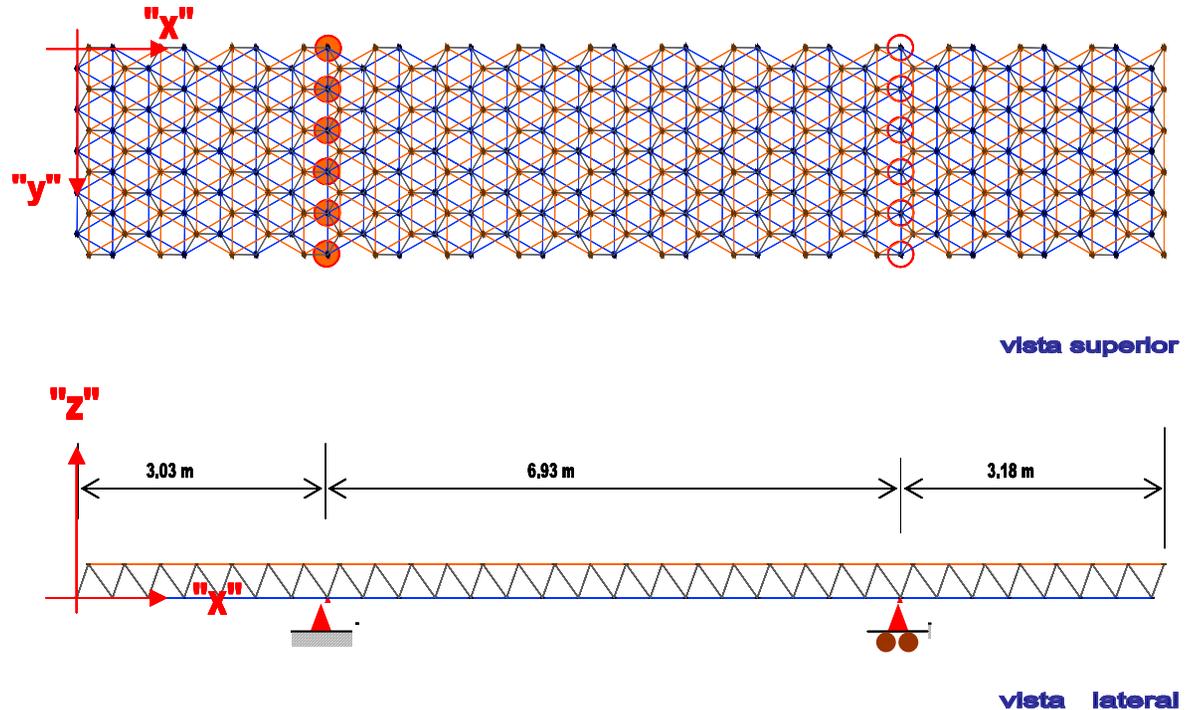


Fig. 81- Célula tetraédrica de 50 cm en sus aristas.



- **APOYO EMPOTRADO EL LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"**
- **APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"**

Fig. 82- Estructura tridimensional espacial octa-tetra con el máximo claro con dos volados posible.

#### 4a. CARGAS APLICADAS A LAS BARRAS

La Tabla No. 10 muestra los resultados obtenidos correspondientes a los esfuerzos a compresión a los que están sometidas las barras. Para efectuar el análisis se considera que el límite de capacidad de carga para una barra sujeta a esfuerzo por compresión es de 310 kg .

La siguiente información es el compendio de los resultados de acuerdo a intervalos preestablecidos cuyo rango fluctúa desde +/- 100 kg hasta +/- 310 kg. El código de color del intervalo, corresponde a los datos de la Tabla No. 10 para localizar el número de barra que presenta cada carga.

Rango de carga en kg +/-	Color	Cantidad de barras	Porcentaje %
De 226 a 310		26	1.90
De 151 a 225		80	5.84
De 76 a 150		269	19.65
De 2 a 75	*	957	69.91
De 0 a 1	*	37	2.70
<b>Total</b>		<b>1369</b>	<b>100.00</b>

\* Estos valores de carga aplicados en la barra no aparecen en la tabla No. 01 porque son menores a +/- 100 kg.

En base a los porcentajes obtenidos, se establece que casi el 92% de las barras de la estructura analizada se encuentran trabajando a la mitad de su capacidad de carga y solamente el 1.90% de las barras se encuentra fatigado a casi el 100% de su capacidad de trabajo.

No. barra	Carga kg												
359	-254.61	577	-168.61	1173	-127.73	478	101.09	716	116.42	713	149.99	58	205.83
364	-254.58	584	-168.60	1172	-127.71	479	101.09	719	116.56	1105	153.28	51	205.85
372	-251.47	794	-164.25	789	-127.27	492	102.77	59	117.07	1103	153.30	283	206.07
366	-251.45	795	-164.25	375	-125.60	495	102.78	50	117.08	712	155.32	290	206.07
361	-248.77	1176	-158.87	380	-125.58	1216	103.12	241	117.42	267	157.84	269	226.39
362	-248.74	1182	-158.86	373	-122.99	1184	103.13	244	117.42	276	157.84	274	226.39
363	-233.56	36	-156.32	382	-122.96	477	104.40	298	124.04	44	161.44	37	233.30
360	-233.51	45	-156.29	623	-122.88	480	104.40	303	124.04	35	161.47	42	233.30
1399	-227.95	1393	-155.70	624	-122.88	802	104.40	718	124.34	57	161.79	271	254.83
1392	-227.92	1398	-155.68	787	-122.86	798	104.53	717	124.48	52	161.82	272	254.83
592	-211.56	268	-153.04	791	-122.86	242	105.01	1099	125.00	254	170.22	39	257.66
597	-211.56	277	-153.04	788	-122.69	243	105.01	1100	125.03	261	170.22	40	257.68
365	-209.70	374	-152.76	790	-122.69	453	105.66	1169	127.69	256	170.51	41	268.73
358	-209.61	381	-152.76	1175	-121.82	459	105.66	300	127.71	259	170.51	38	268.77
594	-209.45	706	-150.95	1170	-121.80	461	106.98	301	127.71	284	175.71	270	270.79
595	-209.44	707	-150.95	578	-118.15	468	106.98	1178	127.71	289	175.71	273	270.79
590	-208.13	627	-149.79	583	-118.15	70	109.42	710	128.33	255	175.91	43	283.55
599	-208.12	633	-149.79	701	-116.01	67	109.43	714	128.33	260	175.91	49	283.61
593	-200.81	793	-149.01	621	-114.25	312	110.76	299	130.09	257	176.78	275	288.41
596	-200.81	796	-149.00	626	-114.25	319	110.76	302	130.09	258	176.78	281	288.41
1397	-195.87	379	-145.41	981	-112.03	1186	112.57	282	130.70	55	176.91		
1394	-195.84	376	-145.40	974	-111.89	1185	112.58	291	130.70	54	176.92		
598	-185.30	579	-144.47	700	-110.21	721	112.88	1101	133.82	8	179.74		
604	-185.30	582	-144.47	702	-110.21	722	112.88	1098	133.84	13	179.78		
608	-183.70	377	-136.09	562	-106.29	68	113.12	801	136.20	53	184.96		
611	-183.70	378	-136.07	569	-106.29	72	113.12	799	136.24	56	184.96		
613	-183.55	622	-133.44	619	-106.15	69	113.13	246	136.64	286	185.83		
606	-183.54	625	-133.44	628	-106.15	78	113.14	252	136.64	287	185.83		
609	-181.16	705	-133.09	979	-103.82	482	114.25	304	139.76	10	185.88		
610	-181.16	708	-133.09	976	-103.68	488	114.25	310	139.76	11	185.92		
1395	-176.83	1171	-132.52	821	-103.10	66	114.34	800	143.49	12	186.00		
1396	-176.80	1174	-132.51	814	-103.00	71	114.34	253	147.10	9	186.05		
607	-174.72	580	-131.89	783	-101.16	1097	115.32	262	147.10	285	188.86		
612	-174.72	581	-131.89	784	-101.16	1102	115.35	6	148.17	288	188.86		
605	-171.60	1400	-128.31	635	-100.42	490	116.18	15	148.19	14	192.47		
614	-171.60	1391	-128.28	642	-100.42	497	116.18	711	149.99	7	192.54		

Tabla No.10- Tabla de valores más cercanos al límite de carga de la barra por esfuerzos de compresión y tracción para alternativa cuatro.

#### 4b. DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS

Con respecto a los desplazamientos en los nodos, en la tabla aparecen los resultados obtenidos en los tres ejes, x, y y z. Así como el número de nodo de la estructura (Tabla No. 11).

A continuación se indican los resultados más significativos de desplazamientos, en cualquiera de los tres ejes coordenados:

Rango de desplazamiento o mm (+/-)	Color	Cantidad de nodos			Porcentaje %		
		x	y	z	x	y	Z
> 5	Orange	0	0	44	0.00	0.00	12.87
> 3 pero < 5	Blue	0	0	44	0.00	0.00	12.87
> 1 pero < 3	Green*	0	0	110	0.00	0.00	32.46
< 1	Grey*	143	143	143	100.00	100.00	41.81
<b>Total</b>		<b>341</b>	<b>341</b>	<b>341</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

El desplazamiento máximo posible para el claro es:

$$\frac{800 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} = 1.97 \text{ cm} = \mathbf{19.7 \text{ mm}}$$

Y en el volado:

$$2 \times \left( \frac{300 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} \right) = 1.85 \text{ cm} = \mathbf{18.5 \text{ mm}}$$

Por lo que la estructura no tiene problemas de desplazamiento de nodos, ya que el máximo desplazamiento es de 7.18 mm.

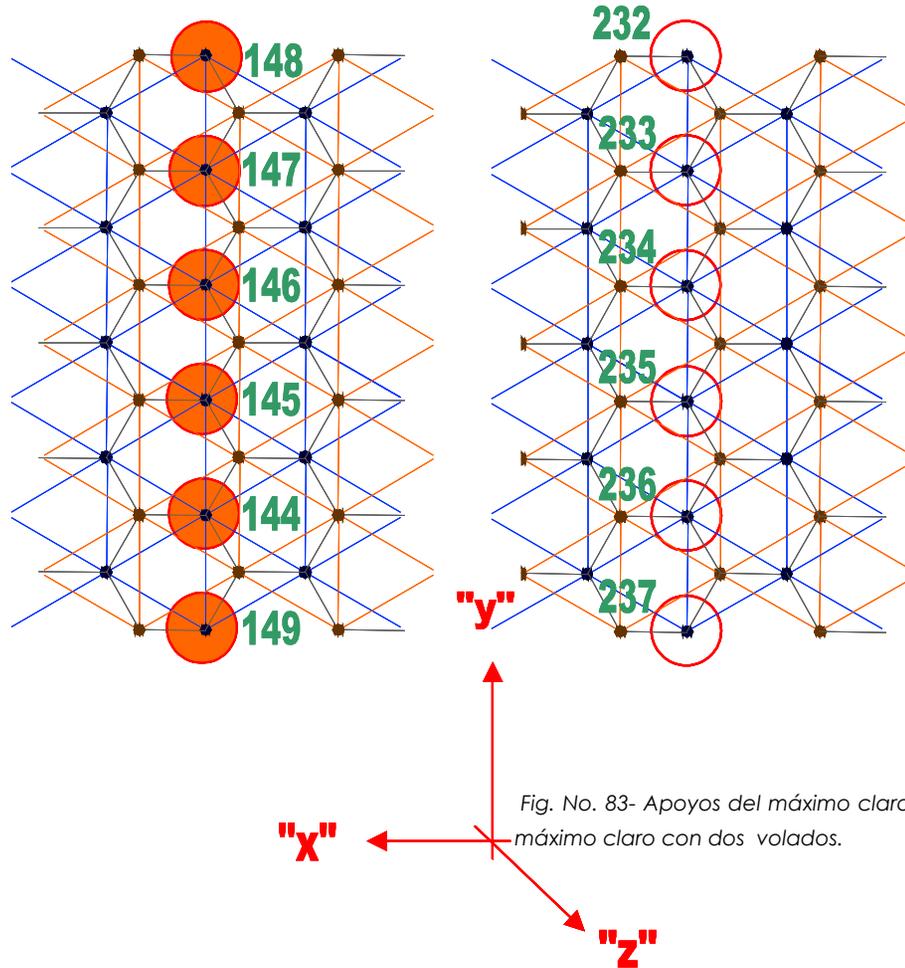
Tabla No. 11- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa tres.

No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)		
	X	y	Z		X	y	Z		X	y	Z
15	0.00	-0.57	-7.18	302	-0.03	0.50	-5.58	258	0.01	-0.30	-3.41
16	0.00	-0.57	-7.18	303	0.03	0.50	-5.58	254	-0.02	-0.30	-3.35
14	0.00	-0.58	-7.17	136	0.00	0.72	-5.29	259	0.02	-0.30	-3.35
17	0.00	-0.58	-7.17	135	0.01	0.72	-5.28	322	-0.01	0.44	-3.34
13	0.00	-0.57	-7.15	137	-0.01	0.72	-5.28	323	0.01	0.44	-3.34
265	0.00	-0.57	-7.15	134	0.01	0.72	-5.26	310	-0.04	0.45	-3.31
295	0.00	0.50	-6.80	138	-0.01	0.72	-5.26	324	0.04	0.45	-3.31
294	-0.01	0.51	-6.79	273	0.00	-0.57	-4.87	309	-0.07	0.44	-3.21
296	0.01	0.51	-6.79	274	0.00	-0.57	-4.87	325	0.07	0.44	-3.21
293	-0.01	0.51	-6.77	272	0.01	-0.57	-4.84	125	0.00	0.67	-3.08
297	0.01	0.51	-6.77	275	-0.01	-0.57	-4.84	124	0.02	0.67	-3.07
341	0.00	-0.32	-6.77	271	0.01	-0.57	-4.81	126	-0.02	0.67	-3.07
340	0.00	-0.32	-6.76	276	-0.01	-0.57	-4.80	123	0.03	0.67	-3.02
342	0.00	-0.32	-6.76	262	0.00	-0.31	-4.54	127	-0.03	0.67	-3.02
339	0.00	-0.32	-6.75	261	-0.01	-0.31	-4.53	284	0.01	-0.52	-2.62
343	0.00	-0.32	-6.75	263	0.01	-0.31	-4.53	285	-0.01	-0.52	-2.62
314	0.00	0.73	-6.40	260	-0.01	-0.32	-4.49	283	0.02	-0.52	-2.58
313	0.00	0.73	-6.40	264	0.01	-0.32	-4.49	286	-0.02	-0.52	-2.58
315	0.01	0.73	-6.39	306	0.00	0.48	-4.48	282	0.03	-0.52	-2.50
312	-0.01	0.73	-6.39	305	-0.02	0.48	-4.47	287	-0.04	-0.52	-2.50
316	0.01	0.73	-6.37	307	0.02	0.48	-4.47	251	0.00	-0.26	-2.39
311	-0.01	0.73	-6.37	304	-0.03	0.49	-4.43	250	-0.01	-0.26	-2.37
268	0.00	-0.57	-6.03	308	0.03	0.49	-4.43	252	0.01	-0.26	-2.37
269	0.00	-0.57	-6.02	130	0.01	0.70	-4.17	188	-0.08	0.11	-2.31
267	0.00	-0.57	-6.02	131	-0.01	0.70	-4.17	193	0.08	0.11	-2.31
270	0.01	-0.58	-5.99	129	0.02	0.70	-4.15	249	-0.02	-0.27	-2.30
266	-0.01	-0.58	-5.99	132	-0.02	0.70	-4.15	253	0.02	-0.27	-2.30
335	0.00	-0.32	-5.66	128	0.04	0.70	-4.08	328	0.00	0.38	-2.28
336	0.00	-0.32	-5.66	133	-0.04	0.70	-4.08	67	0.05	0.06	-2.27
334	-0.01	-0.32	-5.64	279	0.00	-0.55	-3.72	62	-0.05	0.06	-2.27
337	0.01	-0.32	-5.64	278	0.01	-0.55	-3.71	61	0.02	0.11	-2.26
300	-0.01	0.50	-5.64	280	-0.01	-0.55	-3.71	57	-0.02	0.11	-2.26
299	0.01	0.50	-5.64	277	0.01	-0.56	-3.65	327	-0.02	0.38	-2.26
333	0.00	-0.32	-5.62	281	-0.01	-0.56	-3.65	329	0.02	0.38	-2.26
338	0.00	-0.32	-5.62	256	0.00	-0.29	-3.44	189	-0.04	0.12	-2.23
301	-0.02	0.50	-5.62	257	0.00	-0.29	-3.44	192	0.04	0.12	-2.23
298	0.02	0.50	-5.62	255	-0.01	-0.30	-3.41	60	0.01	0.11	-2.21

#### 4c. REACCIONES EN LOS APOYOS

La estructura se sostiene a través de once nodos repartidos seis en un lado y cinco en el otro, en donde todos fueron considerados como apoyos empotrados en uno de sus

extremos. La restricción se enfocó en el primer lado, en el sentido de los ejes "y" y "z", con apoyo libre en el sentido "x" para disminuir el efecto sísmico en este sentido (Fig. No. 83).



- Ⓢ **APOYO EMPOTRADO EN LOS EJES "Y" Y "Z", Y CON APOYO LIBRE EN EL EJE "X"**
- **APOYO EMPOTRADO EN LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"**

Las reacciones en los apoyos de la estructura en sus tres ejes aparecen en la tabla No. 12.

No. Nudo	REACCION		
	X (kg)	Y (kg)	Z (kg)
144	13.23	-110.23	231.22
145	5.20	-119.21	257.41
146	-5.22	-119.23	257.43
147	-13.27	-110.28	231.29
148	179.79	-83.31	47.96
149	-179.75	-83.33	47.89
232	189.20	-24.15	46.79
233	-13.56	-7.65	232.42
234	-4.86	-7.26	256.09
235	4.86	-7.26	256.09
236	13.56	-7.65	232.42
237	-189.20	-24.15	46.79
SUMATORIA	----	----	2143.791

Tabla No. 12- Tabla de valores respectivos a las reacciones en los apoyos para alternativa tres.

Las cargas o reacciones en los apoyos para el eje vertical "z" aumentan hacia el centro de la estructura y disminuyen a las orillas de ésta, siendo estos valores bajos.

## QUINTA ALTERNATIVA: SISTEMA CON UN APOYO CENTRAL

Esta alternativa se tiene la finalidad de demostrar el tamaño máximo posible para una cubierta tipo paraguas de forma triangular con apoyo central, con la estructura tridimensional espacial octa-tetra. Después del análisis se concluye que las dimensiones máximas para esta alternativa son: 6.00 m por lado del triángulo, 3.46 m del apoyo central a esquina del triángulo y peralte de 41 cm.

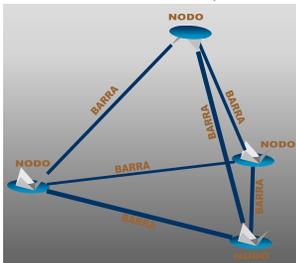
La estructura se compone de un total de 778 barras de las cuales 229 son de la capa inferior, 266 son las diagonales, 252 en la capa superior y 40 en el apoyo central. Por otra parte, los nodos son 175 en total, con 78 en la capa inferior, 91 en la capa superior y 6 en el apoyo central.

Las barras están fabricadas con bagueta que es un perfil de fierro laminado de sección cuadrada en forma de "U" con lados de 1.27 cm, en calibre #18 equivalente a un espesor de 0.121 cm y con tan solo 2.03 gr de peso por pieza.

Los nodos están fabricados con lámina negra calibre #16 en dos piezas, una circular de 6 cm de diámetro y otra en forma de triángulo equilátero de 7.5 cm por lado con las esquinas dobladas siendo su peso de 116.92 gr.

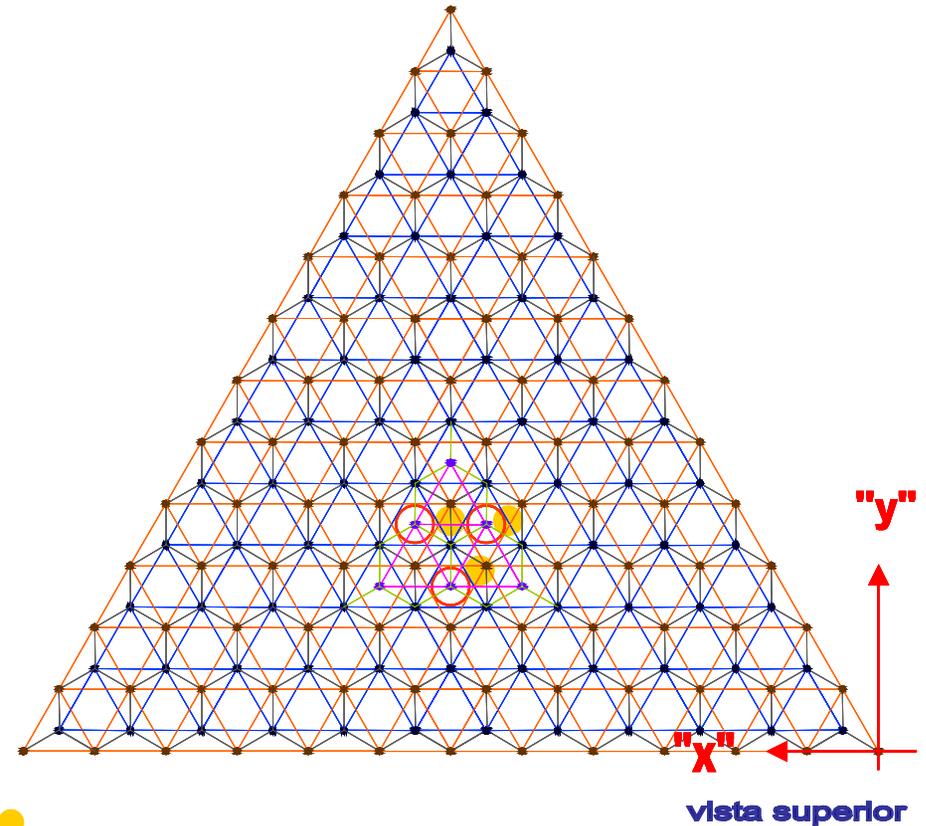
Las uniones entre nodos y barras son con tornillos tipo "allen" de cabeza hexagonal y de alta resistencia con un diámetro de 3/16" y de 1.27 cm de largo.

Con seis barras y cuatro nodos se forma la célula tetraédrica (Fig. 84) cuya repetición genera la estructura tridimensional espacial octa-tetra (Fig. 85).



cuya repetición genera la estructura tridimensional espacial octa-tetra (Fig. 85).

Fig. 84- Célula tetraédrica de 50 cm en sus aristas.



### ⊕ APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"

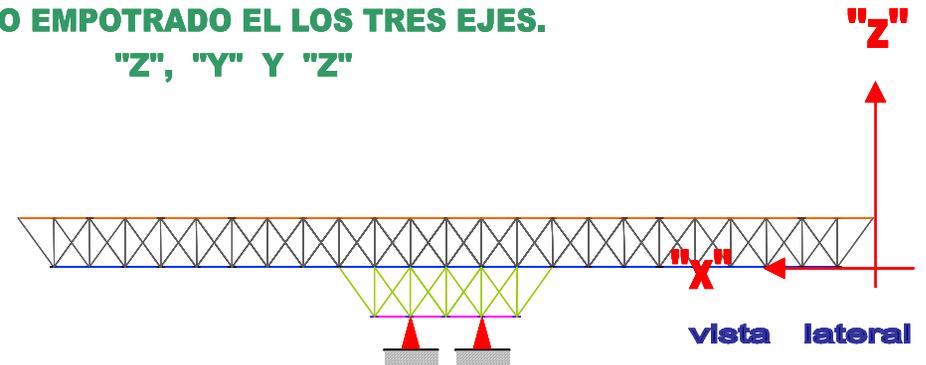


Fig. 85- Estructura tridimensional espacial octa-tetra con el tamaño máximo posible para una paraguas.

### 5a. CARGAS APLICADAS A LAS BARRAS

La Tabla No. 13 muestra los resultados obtenidos correspondientes a los esfuerzos a compresión a los que están sometidas las barras. Para efectuar el análisis se considera que el límite de capacidad de carga para una barra sujeta a esfuerzo por compresión es de 310 kg .

La siguiente información es el compendio de los resultados de acuerdo a intervalos preestablecidos cuyo rango fluctúa desde +/- 70 kg hasta +/- 310 kg. El código de color del intervalo, corresponde a los datos de la Tabla No. 13 para localizar el número de barra que presenta cada carga.

Rango de carga en kg +/-	Color	Cantidad de barras	Porcentaje %
De 226 a 310		3	0.43
De 151 a 225		5	0.72
De 76 a 150		99	14.33
De 2 a 75		562	81.33
De 0 a 1		22	3.18
<b>Total</b>		<b>1369</b>	<b>100.00</b>

\* Estos valores de carga aplicados en la barra no aparecen en la tabla No.13 porque son menores a +/- 700 kg.

En base a los porcentajes obtenidos, se establece que casi el 99% de las barras de la estructura analizada se encuentran trabajando a la mitad de su capacidad de carga y solamente el 0.43% de las barras se encuentra fatigado a casi el 100% de su capacidad de trabajo.

No. barra	Carga kg										
726	-306.63	1330	-82.79	748	-60.69	1298	60.64	1071	89.34	860	123.46
727	-306.49	1331	-82.79	773	-60.69	1305	60.78	1133	89.34	857	123.46
722	-231.91	708	-81.05	1028	-59.82	865	61.09	994	89.41	1303	118.91
703	-197.14	716	-81.05	1102	-59.82	866	61.09	1002	89.41		
705	-197.14	766	-79.90	841	-57.27	1207	66.15	927	90.27		
1312	-183.89	767	-79.90	845	-57.27	1209	66.15	929	90.27		
725	-161.53	733	-78.16	1282	-55.78	869	66.21	1276	94.08		
728	-161.53	774	-78.16	1275	-55.64	889	66.21	1281	94.22		
718	-137.88	737	-77.62	776	-53.93	993	67.34	876	94.92		
734	-124.29	756	-77.62	777	-53.93	1003	67.34	928	96.32		
753	-124.29	1311	-77.45	1346	-53.63	985	69.98	850	97.04		
690	-116.11	1313	-77.45	1229	-53.58	988	69.98	852	97.04		
691	-116.11	707	-72.27	1218	-53.44	896	73.85	995	99.91		
1290	-114.51	715	-72.27	827	-51.39	906	73.85	1001	99.91		
1291	-114.51	742	-70.22	832	-51.39	1069	74.81	853	100.07		
750	-113.60	758	-70.22	1194	-50.90	1131	74.81	1036	100.07		
751	-113.60	1029	-69.61	1189	-50.76	1072	75.83	877	101.74		
1255	-111.55	1101	-69.61	1274	50.26	1134	75.83	878	101.74		
1250	-111.41	740	-69.09	1283	50.40	864	76.42	855	102.03		
1227	-103.55	768	-69.09	883	50.73	867	76.42	862	102.03		
1220	-103.42	738	-68.96	903	50.73	1249	77.79	704	102.40		
695	-102.81	757	-68.96	1073	51.09	1256	77.92	706	102.40		
696	-102.81	1280	-68.20	1135	51.09	986	79.88	881	106.85		
843	-100.20	1277	-68.07	875	53.48	987	79.88	898	106.85		
736	-94.69	1257	-64.56	892	53.48	885	80.54	851	108.34		
755	-94.69	1248	-64.42	894	54.68	888	80.54	856	109.95		
709	-93.62	735	-64.02	905	54.68	854	82.25	890	109.95		
717	-93.62	754	-64.02	1068	54.83	861	82.25	880	110.10		
720	-89.93	825	-63.90	1130	54.83	1321	82.64	897	110.10		
721	-89.93	834	-63.90	1208	56.76	1322	82.78	858	110.23		
731	-88.71	749	-63.85	996	57.97	882	85.96	859	110.23		
732	-88.71	752	-63.85	999	57.97	904	85.96	886	111.57		
1225	-85.57	826	-63.56	1319	58.59	1070	88.19	887	111.57		
1222	-85.43	833	-63.56	1324	58.73	1132	88.19	723	115.49		
842	-84.78	1030	-61.43	926	59.80	1000	89.29	724	115.49		
844	-84.78	1100	-61.43	930	59.80	1049	89.29	1300	118.77		

Tabla No.13- Tabla de valores más cercanos al límite de carga de la barra por esfuerzos de compresión y tracción para alternativa cinco.

**5b. DESPLAZAMIENTOS EN LOS NODOS**

Rango de desplazamiento	Col	Cantidad de nodos			Porcentaje %		
		x	y	z	x	y	Z
		< 1	17	17	17	100.0	100.0
		5	5	5	0	0	0
<b>Total</b>		<b>17</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Con respecto a los desplazamientos en los nodos, en la tabla aparecen los resultados obtenidos en los tres ejes, x, y y z. Así como el número de nodo de la estructura (Tabla No. 14).

A continuación se indican los resultados más significativos de desplazamientos, en cualquiera de los tres ejes coordenados:

El desplazamiento máximo posible para el claro es:

En el volado:

$$2 \times \left( \frac{346 \text{ cm}}{480} + 0.3 \text{ cm} \right) = 2.04 \text{ cm} = \mathbf{20.4 \text{ mm}}$$

Por lo que la estructura no tiene problemas de desplazamiento de nodos, ya que el máximo desplazamiento es de 0.0021 mm.

Tabla No. 14- Tabla de valores principales respectivos a los desplazamientos en los nodos para alternativa cinco.

No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)			No. NODO	DESPLAZAMIENTO (EN MM)		
	X	y	X		X	y	Z		X	y	Z
351	0.0000	-0.0001	-0.0024	234	-0.0001	-0.0002	-0.0013	232	-0.0001	-0.0002	-0.0009
350	0.0000	-0.0004	-0.0022	322	0.0001	-0.0003	-0.0013	256	0.0001	-0.0003	-0.0009
325	0.0001	-0.0003	-0.0021	340	-0.0001	-0.0003	-0.0013	263	-0.0001	-0.0003	-0.0009
337	-0.0001	-0.0003	-0.0021	226	0.0001	-0.0002	-0.0012	304	0.0001	-0.0002	-0.0009
348	0.0000	-0.0001	-0.0021	233	-0.0001	-0.0002	-0.0012	332	-0.0001	-0.0002	-0.0009
349	0.0000	-0.0001	-0.0021	308	0.0000	-0.0003	-0.0012	210	0.0000	-0.0003	-0.0009
311	0.0001	-0.0002	-0.0019	328	0.0000	-0.0003	-0.0012	320	0.0001	-0.0002	-0.0009
336	-0.0001	-0.0002	-0.0019	283	0.0001	-0.0003	-0.0012	342	-0.0001	-0.0002	-0.0009
310	0.0000	-0.0003	-0.0019	298	-0.0001	-0.0003	-0.0012	288	0.0000	-0.0001	-0.0009
326	0.0000	-0.0003	-0.0019	217	0.0000	-0.0003	-0.0012	293	0.0000	-0.0001	-0.0009
324	0.0001	-0.0003	-0.0018	218	0.0000	-0.0003	-0.0012	267	-0.0001	-0.0003	-0.0009
338	-0.0001	-0.0003	-0.0018	266	-0.0001	-0.0003	-0.0012	272	0.0001	-0.0003	-0.0009
312	0.0000	-0.0001	-0.0018	273	0.0001	-0.0003	-0.0012	319	0.0000	-0.0002	-0.0009
313	0.0001	-0.0003	-0.0018	317	0.0000	-0.0001	-0.0012	343	0.0000	-0.0002	-0.0009
314	-0.0001	-0.0003	-0.0018	345	0.0000	-0.0001	-0.0012	306	0.0000	-0.0003	-0.0008
315	0.0000	-0.0001	-0.0018	289	0.0000	-0.0001	-0.0011	330	0.0000	-0.0003	-0.0008
347	0.0000	-0.0001	-0.0018	292	0.0000	-0.0001	-0.0011	275	-0.0001	-0.0003	-0.0008
301	0.0001	-0.0002	-0.0016	265	0.0000	-0.0001	-0.0011	279	0.0001	-0.0003	-0.0008
335	-0.0001	-0.0002	-0.0016	274	-0.0001	-0.0003	-0.0011	212	-0.0001	-0.0002	-0.0008
236	0.0001	-0.0002	-0.0016	280	0.0001	-0.0003	-0.0011	223	0.0001	-0.0002	-0.0008
237	-0.0001	-0.0002	-0.0016	303	0.0001	-0.0002	-0.0011	260	0.0000	-0.0001	-0.0008
323	0.0001	-0.0003	-0.0016	333	-0.0001	-0.0002	-0.0011	264	0.0000	-0.0001	-0.0008
339	-0.0001	-0.0003	-0.0016	321	0.0001	-0.0003	-0.0010	305	0.0001	-0.0003	-0.0008
309	0.0000	-0.0003	-0.0016	341	-0.0001	-0.0003	-0.0010	331	-0.0001	-0.0003	-0.0008
327	0.0000	-0.0003	-0.0016	211	-0.0001	-0.0002	-0.0010	285	0.0001	-0.0002	-0.0008
235	0.0000	-0.0003	-0.0015	224	0.0001	-0.0002	-0.0010	296	-0.0001	-0.0002	-0.0008
282	0.0001	-0.0003	-0.0015	307	0.0000	-0.0003	-0.0010	287	0.0000	-0.0002	-0.0007
299	-0.0001	-0.0003	-0.0015	329	0.0000	-0.0003	-0.0010	294	0.0000	-0.0002	-0.0007
281	0.0001	-0.0003	-0.0014	284	0.0001	-0.0003	-0.0010	194	0.0001	-0.0002	-0.0007
300	-0.0001	-0.0003	-0.0014	297	-0.0001	-0.0003	-0.0010	199	-0.0001	-0.0002	-0.0007
316	0.0000	-0.0001	-0.0014	203	-0.0001	-0.0002	-0.0010	215	0.0000	-0.0003	-0.0007
346	0.0000	-0.0001	-0.0014	209	0.0001	-0.0002	-0.0010	220	0.0000	-0.0003	-0.0007
290	0.0000	-0.0001	-0.0014	318	0.0000	-0.0001	-0.0009	286	0.0001	-0.0002	-0.0007
291	0.0000	-0.0001	-0.0014	344	0.0000	-0.0001	-0.0009	295	-0.0001	-0.0002	-0.0007
302	0.0001	-0.0002	-0.0014	216	0.0000	-0.0003	-0.0009	201	-0.0001	-0.0002	-0.0007
334	-0.0001	-0.0002	-0.0014	219	0.0000	-0.0003	-0.0009	206	0.0001	-0.0002	-0.0007
225	0.0001	-0.0002	-0.0013	227	0.0001	-0.0002	-0.0009				

### 5c. REACCIONES EN LOS APOYOS

La estructura se sostiene a través de once nodos repartidos seis en un lado y cinco en el otro, en donde todos fueron considerados como apoyos empotrados en uno de sus

extremos. La restricción se enfocó en el primer lado, en el sentido de los ejes "y" y "z", con apoyo libre en el sentido "x" para disminuir el efecto sísmico en este sentido (Fig. No. 86).

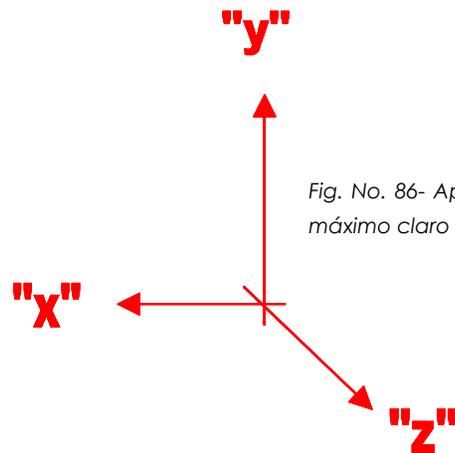
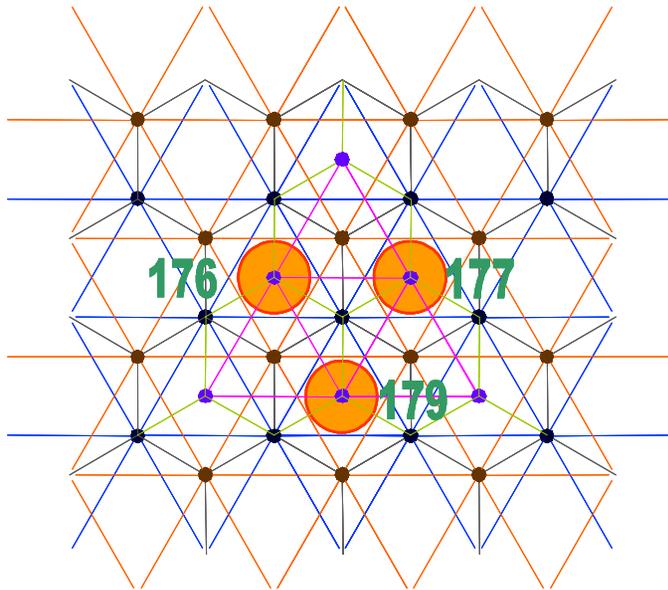


Fig. No. 86- Apoyos del máximo claro posible con el máximo claro con dos volados.

Las reacciones en los apoyos de la estructura en sus tres ejes aparecen en la tabla No. 15.

No. Nudo	REACCION		
	X (kg)	Y (kg)	Z (kg)
176	4.04	216.38	339.39
177	4.04	216.38	339.39
179	4.04	216.38	339.39
SUMATORIA	---	---	1018.16

Tabla No. 15- Tabla de valores respectivos a las reacciones en los apoyos para alternativa tres.

Las cargas o reacciones en los apoyos para el eje vertical "z" aumentan hacia el centro de la estructura y disminuyen a las orillas de ésta, siendo estos valores bajos.

### Ⓢ APOYO EMPOTRADO EL LOS TRES EJES. "Z", "Y" Y "Z"

El análisis estructural del Sistema Celular Espacial Octa-tetra demuestra teóricamente la factibilidad constructiva de los cinco casos o alternativas propuestos:

- Sistema con apoyos laterales opuestos
- Sistema con un apoyo lateral (en cantiliver)
- Sistema con un apoyo lateral y otro central
- Sistema con dos apoyos centrales
- Sistema con un apoyo central

En todas las posibilidades se utilizó la célula tetraédrica cuyas aristas miden 50 cm de longitud y por tanto una altura de 41 cm como peralte, construida con barras fabricadas de bagueta de fierro laminado con sección cuadrada en forma de "U" de 1.27 cm de lado, con nodos formados de lámina negra en calibre 16 y con la unión atornillada entre la barra y el nodo a base de tornillos tipo "allen" en 3/16" de diámetro y con 1/2" de longitud. Para el análisis estructural del sistema se consideró una capacidad de carga de las barras ante el esfuerzo a compresión de 310 kg un ancho de la estructura tridimensional de 2.50 m.

Al reticulado formado por la unión de las células tetraédricas, fue sometida a una carga de diseño de 65.09 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual equivale a una carga puntual por nodo central de 14.07 kg y de 7.04 kg en el nodo lateral.

Del primer caso se estableció el claro máximo posible que puede cubrir el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, el cual es de 8.30 cm de longitud.

Con la segunda alternativa se dedujo que el sistema puede tener un volado o cantiliver máximo de 3.00 m de largo.

En la tercera posibilidad se combinaron el claro y el volado máximos posibles, siendo estos posibles de 8.00 y 3.00 m de longitud respectivamente.

A la cuarta alternativa se propuso el efecto de continuidad, por la combinación de un claro central y dos volados máximos posibles, arrojando un resultado de un claro central de casi 7.00 m y ambos volados de 3.00 m de longitud.

Finalmente, en el último caso se diseñó un paraguas de forma triangular en su proyección horizontal, obteniéndose una longitud máxima posible en los lados del triángulo equilátero propuesto de 6.00 m.

En los cinco análisis se obtuvo que el 90 % de las barras del sistema están trabajando a la mitad de su capacidad de carga ante los esfuerzos a la compresión y que menos del 5% de las mismas barras se encuentran trabajando a su máxima capacidad de carga.

El movimiento de los nodos en las estructura tridimensional ante los efectos de la aplicación de cargas, aprueban satisfactoriamente el

límite de desplazamientos, establecido por el Reglamento de construcciones del D. F.

La revisión del sistema por efecto sísmico, indica que el área máxima que se puede construir con el Sistema celular Espacial Octa-tetra es de 15.00 x 15.00 m como máximo, en cualquier tipo de terreno y que puede tener una altura no mayor de m sobre el nivel de la banqueta.

Por último, el efecto del viento en la estructura propuesta demuestra que el sistema se puede construir en cualquier zona heólica y con una pendiente mínima desde el 5% hasta el 100% en su superficie.



## REVISIÓN DEL SISTEMA POR EFECTO SISMICO

### Análisis estático

El valor de la ordenada espectral  $\alpha_0$ , esta determinada, por:

$$\alpha_0 = \frac{(C) (T_b)}{T}$$

$$\begin{aligned} C &= 0.4 \\ T_b &= 3.9 \text{ seg} \\ T &= 60 \text{ seg} \end{aligned}$$

$$\alpha_0 = \frac{(0.4) (3.9)}{60}$$

$$\alpha_0 = 0.026$$

El coeficiente de corte basal  $C_s$ , es:

$$C_s = \frac{C}{Q}$$

$$Q = 1$$

$$C_s = \frac{0.4}{1} = 0.4$$

El peso total ( $w_i$ ) de la estructura esta en función al tamaño del espacio a cubrir con la estructura y como no se tienen dimensiones definidas, la ecuación será indeterminado al tener dos variables:

$$W_i = (w) (A)$$

$$\begin{aligned} W &= 65.09 \text{ kg/m}^2 \\ A &= \text{Variable} \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$W_i = 65.09 (A)$$

De igual manera los coeficientes sísmicos para análisis estático en ambas direcciones " $C_{sx}$ " y " $C_{sy}$ " se obtendrá dividiendo al coeficiente sísmico quedarán indeterminadas:

$$C_{sx} = \frac{C}{x} = \frac{0.4}{x}$$

$$C_{sy} = \frac{C}{y} = \frac{0.4}{y}$$

El cortante sísmico  $V_i$ , quedará pendiente de los valores en "x" e "y":

$$V_i = (C_s) (w_i)$$

$$V_{ix} = \frac{0.4}{x} (65.09)(A) = \frac{26.10(A)}{x}$$

$$V_{iy} = \frac{0.4}{y} (65.09)(A) = \frac{26.04(A)}{y}$$

La fuerza sísmica  $F_i$ , es:

$$F_i = V_i \frac{(W_i) (h_i)}{\sum (W_i) (h_i)}$$

La altura " $h_i$ " máxima posible para el sistema es de 10.00 m:

$$(F_i) (V_i) = \frac{(65.09)(A) (10)}{\sum (65.09)(A)(10)} = V_i$$

Por lo tanto:

$$F_i = V_i$$

$$F_{ix} = \frac{26.04 (A)}{x}$$

$$F_{iy} = \frac{26.04 (A)}{y}$$

En resumen:

NIVEL	ALTURA "hi" m	PESO DE LA ESTRUCTURA "Wi" kg	(Wi) (hi) Kg m
1	10.00	65.09 (A)	65.09(A)
$\Sigma$		<b>65.09 (A)</b>	<b>65.09(A)</b>

NIVEL	DIRECCION EN "X"	
	Fi	Vi
1	26.04 (A) / X	
		26.04 (A) / X
$\Sigma$	<b>26.04 (A) / X</b>	<b>26.04 (A) / X</b>
1	26.04 (A) / X	
		26.04 (A) / X
$\Sigma$	<b>26.04 (A) / X</b>	<b>26.04 (A) / X</b>

Los valores de las coordenadas "x" e "y" se pueden establecer de acuerdo al intervalo del cociente del coeficiente sísmico y el factor de ductibilidad a la ordenada espectral:

$$0.026 < V_i / W_i < 0.4$$

Por lo tanto en el eje "x":

$$V_{ix} / W_i = \frac{26.04 (A) / X}{65.09 (A)}$$

$$V_{ix} / W_i = \frac{0.4}{x}$$

Si:

$$V_{ix} / W_i = 0.026$$

$$\text{Entonces: } \frac{0.4}{x} = 0.026$$

Por lo tanto:

$$x = 15.38 \text{ m}$$

Para el eje "y":

$$V_{iy} / W_i = \frac{26.04(A) / y}{65.09 (A)}$$

$$V_{iy} / W_i = \frac{0.4}{y}$$

Si:

$$V_{iy} / W_i = 0.026$$

$$\text{Entonces: } \frac{0.4}{y} = 0.026$$

Por lo tanto:

$$y = 15.38 \text{ m}$$

Con el análisis y los valores obtenidos se establece que el Sistema Celular Espacial Octa-tetra, no tiene problemas por efecto de sismo, siempre y cuando su diseño o composición por regular o irregular que sea no rebase las dimensiones de **15.00 x 15.00 m** en la proyección de su vista superior.

## REVISION DEL SISTEMA POR EFECTO DEL VIENTO

Para la definición de los resultados se tomarán los siguientes parámetros:

1. El Sistema Celular Espacial Octa-Tetra se adoptó a cualquier tipo de forma; con caras horizontales, verticales o inclinadas y con apoyos a base de columnas o muros perimetrales o centrales, o combinación de éstos.
2. El sistema puede construirse en cualquier región eólica de la República Mexicana y de acuerdo a su clasificación según su destino pertenece al **grupo "B"**, en las que estas estructuras en el caso de fallar causarían pérdidas directas o indirectas de magnitud moderada. Y por lo tanto el criterio para elegir la velocidad regional ( $V_R$ ) es con un período de recurrencia ( $T_R$ ) de 50 años, en donde la **zona 4** (costa este y sureste de México) presenta la mayor velocidad regional promedio de **160 km/hr.**
3. Por su respuesta sensible a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento se clasifica como **tipo I inciso "b"**, en el que abarcan sistemas de cubiertas ligeras que son capaces de tomar las cargas debidas a viento sin que varíe esencialmente su geometría.
4. La topografía del terreno más desfavorable para protegerse de las corrientes de aire son los promontorios, el cual equivale a un factor de topografía "**K**" igual a **1.2**.
5. La velocidad del viento varía con la altura

del nivel del terreno en que se encuentre la cubierta, se considera una altura máxima de **10.00 m.**

6. Para determinar la velocidad de diseño del viento se considera un factor de ráfaga ( $F_R$ ) igual a **1.0** para estructuras tipo I.
7. Para el diseño de las estructuras del tipo I bastará con tomar en cuenta los **empujes estáticos** debidos a las presiones y succiones del viento.
8. La estructura espacial tridimensional octa-tetra, puede construirse con una pendiente cuya inclinación puede ser de 5 a **90°**
9. La altura de la cubierta de la estructura sobre el nivel del mar se estableció igual a cero, con la finalidad de que no disminuya la presión o succión debida al viento.
10. Para *cubiertas de una pendiente* el coeficiente de empuje exterior (**C**) es de **-1.75**, en base a los siguientes datos:
  - a. Cuando el viento esta actuando perpendicularmente a las generatrices horizontales, se tienen dos casos:
    - Si la cubierta esta orientada hacia el lado del barlovento, se tomarán los siguientes valores:

Ángulo de	Superficie de barlovento
	Zonas

inclinación de la cubierta	Barlovento	Central	Sotavento	Superficie de sotavento
Menor a 15°	-1..75	-1.00	-0.4	-0.68

- Si la cubierta esta orientada hacia el lado del sotavento, el coeficiente de empuje es de **0.68** negativo
- b. Cuando el viento esta actuando paralelamente a las generatrices horizontales, los coeficientes varían en tres zona: en la primera que se extiende desde la arista del barlovento hasta una distancia de un tercio de la altura de la cubierta, **C = -1.75**, la segunda que abarca hasta 1.5 veces la altura de la cubierta, **C = 1.0** y en la tercera **C = 0.4** negativo
11. Para el empuje del viento sobre elementos que forman a la estructura espacial tridimensional, se considero un coeficiente de empuje transversal ( $C_T$ ) igual a **2.04** (sin unidades)
  12. En el análisis de presiones interiores originadas por el viento se considero un valor de **-0.6** como coeficiente de empuje, debido a que las paredes exteriores del perímetro de la cubierta pueden tener aberturas mayores del 30%. A este empuje interior originado por el viento, se le sumará el empuje exterior también originado por el viento

## EMPUJE ESTÁTICO

El empuje estático originado por el viento es el análisis requerido para una estructura espacial tridimensional octa-tetra con cubierta ligera, por lo que su desarrollo se compone de tres partes:

1. EFECTO EXTERNO DEL VIENTO
2. PRESION INTERIOR POE EL VIENTO
3. EMPUJE DEL VIENTO SOBRE LA BARRA DE LA ESTRUCTURA

## EFECTO EXTERNO DEL VIENTO

La *velocidad básica* del viento  $V_B$  se calcula con la fórmula:

$$V_B = (K) (V_R)$$

En donde:

$V_B$  es la velocidad básica a 10 metros sobre el nivel terreno

$K$  es el factor que depende de la topografía del terreno igual a 1.2

$V_R$  es la velocidad regional de la región eólica más desfavorable, con un valor igual a 160 km/hr

Por tanto:

$$V_B = (1.2) (160) = 192 \text{ Km/hr}$$

La *velocidad de diseño* se obtiene con la expresión:

$$V_D = (F_R) (V_B)$$

En donde:

$V_D$  es la velocidad de diseño, en km/hr

$F_R$  es el factor de reducción igual a la unidad por ser estructura tipo I

$V_B$  es la velocidad básica a 10 metros sobre el nivel terreno

Por tanto:

$$V_D = (1) (192) = 192 \text{ Km/hr}$$

El cálculo de la *fuerza exterior del viento a la superficie* de la cubierta, se obtiene con la fórmula:

$$P = (0.0048) (G) (C) (V_D)^2$$

En donde:

$P$  es la Presión o succión debida al viento, en kg/m<sup>2</sup>

$G$  es igual a la expresión  $(8+h)/(8+2h)$ , factor de reducción de densidad de la atmósfera, a la altura "h" en km sobre el nivel del mar. Para el caso más desfavorable  $h = 1$  y por lo tanto  $G = 1$

$C$  es el coeficiente de empuje igual a **-1.75** sin unidades

$V_D$  es la velocidad de diseño, igual a **192 km/h**

Por tanto:

$$p = (0.0048) (1) (-1.75) (192)^2$$

$$p = - 309.66 \text{ Kg/m}^2$$

Al obtener un valor negativo en el empuje estático se determina una succión debida al viento con un valor igual a **- 309.66 Kg/m<sup>2</sup>**

## PRESION INTERIOR POR EL VIENTO

El cálculo de la *presión interior del viento a la superficie* de la cubierta, se obtiene también con la fórmula:

$$P = (0.0048) (G) (C) (V_D)^2$$

En donde:

$C$  es el coeficiente de empuje igual a **-0.6** sin unidades, establecido cuando las aberturas de sus paredes verticales que sostienen a la cubierta tipo, son mayores del 30% de la superficie y se encuentran del lado de sotavento o en los costados

Por tanto:

$$p = (0.0048) (1) (-0.6) (192)^2$$

$$p = - 106.17 \text{ Kg/m}^2$$

A esta fuerza se le agregará el valor obtenido por el empuje estático exterior, ya que ambos valores son succiones:

	- 309.66	Kg/m <sup>2</sup>
	- 106.17	Kg/m <sup>2</sup>
	-----	
<b>Empuje estático total:</b>	<b>- 415.83</b>	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>

### EMPUJE DEL VIENTO SOBRE LA BARRA

Se consideró un empuje del viento sobre la barra que forma a la estructura espacial tridimensional, obtenido con la expresión:

$$P = (0.0048) (G) (C_r) (B) (V_b)^2$$

En donde:

**B** es el ancho de la superficie expuesta, en metros

**C<sub>r</sub>** es el coeficiente de empuje transversal igual a **2.04** sin unidades

Por tanto:

$$P = (0.0048) (1) (2.04) (0.0127) (192)^2$$

$$P = 4.58 \quad \text{Kg/m}$$

### REVISIÓN DE LAS BARRAS ANTE EL EMPUJE DEL VIENTO

Para verificar la resistencia de la estructura espacial tridimensional octa-tetra por el efecto del viento, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

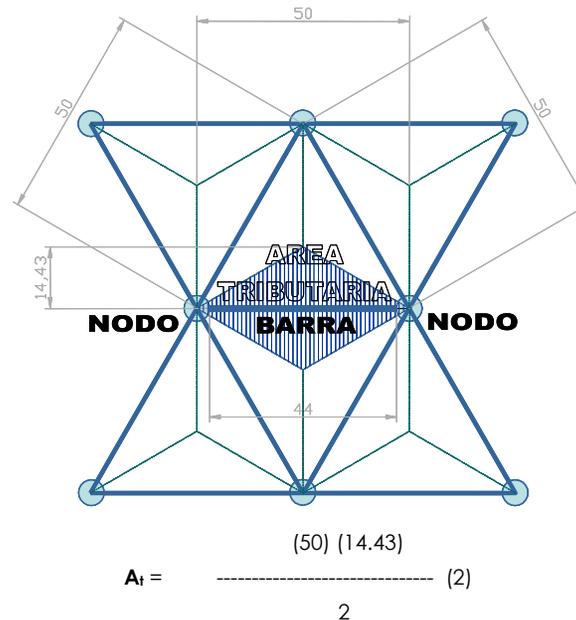
- Al valor del empuje estático obtenido se le resta el peso propio de la estructura para obtener la carga en la cubierta por metro cuadrado:

- 415.83	Kg/m <sup>2</sup>	Empuje por viento
+25.26	Kg/m <sup>2</sup>	Peso propio

---


$$- 390.57 \quad \text{Kg/m}^2 \quad \text{Carga por m}^2$$

- La carga que soportará cada una de las barras será la carga distribuida en el área tributaria (**A<sub>t</sub>**) respectiva como se muestra en el dibujo:



$$A_t = 721.69 \text{ cm}^2 = 0.0722 \text{ m}^2$$

- La carga (**w**) que recibe cada una de las barras por su área tributaria es:

$$w = (0.0722) (390.57) = 28.20 \text{ kg}$$

- Por tanto la barra estará sujeta a una carga uniforme (**w**) por metro, igual a:

$$w = \frac{28.20}{0.44} = 63.46 \text{ kg/m}$$

- A esta carga se le suma la carga debida al empuje sobre elementos de la estructura, obtenida anteriormente:

64.09	Kg/m
4.58	Kg/m
<hr/>	
68.67	Kg/m

- Considerando que las barras son de un perfil laminado en forma de "U", que se apoya en los nodos de la estructura espacial

tridimensional, se puede considerar como una viga empotrada; ya que, no tiene libertad de movimiento en el sentido vertical, cuyo momento (**M**) se obtiene con la fórmula:

$$M = \frac{(w) (l)^2}{12}$$

Sustituyendo:

$$M = \frac{(68.57) (0.44)^2}{12}$$

$$M = 110.79 \quad \text{Kg-cm}$$

- La revisión de esfuerzos para flexión biaxial es:

$$\frac{M_y}{S_y} + \frac{M_x}{S_x} \leq 1800$$

Por tanto:

$$\frac{110.79}{0.1390} + \frac{110.79}{0.1152} = 1758.76 \text{ Kg/cm}^2$$

- El límite de fluencia (**F<sub>b</sub>**) para las barras a base de perfil laminado es:

$$F_b = 0.6 f_y$$

En donde el esfuerzo de ruptura (**f<sub>y</sub>**), es igual a 3 000 kg/cm<sup>2</sup>

Por tanto:

$$F_b = (0.6) (3000) = 1800 \text{ Kg/cm}^2$$

- Comparando ambos valores:

$$1758.76 \text{ Kg/cm}^2 < 1800 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{ok}$$

**El esfuerzo actuante resulta menor que el permisible, por lo que la sección y el tamaño del módulo propuestos son aceptables.**

El análisis estructural del Sistema Celular Espacial Octa-tetra demuestra teóricamente la factibilidad constructiva de los cinco casos propuestos:

- Sistema con apoyos laterales opuestos
- Sistema con un apoyo lateral (en cantiliver)
- Sistema con un apoyo lateral y otro central
- Sistema con dos apoyos centrales
- Sistema con un apoyo central

En todas las alternativas se utilizó la célula tetraédrica cuyas aristas miden 50 cm de longitud y por tanto 41 cm como peralte, construida con barras fabricadas de bagueeta de fierro laminado de sección cuadrada en forma de "U" de 1.27 cm de lado, con nodos formados de lámina negra en calibre 16 y con la unión atornillada entre la barra y el nodo a base de tornillos tipo "allen" en 3/16" de diámetro y 1/2" de longitud. Para el análisis estructural del sistema se consideró una capacidad de carga permisible de las barras ante el esfuerzo a compresión de 310 kg y un ancho de la estructura tridimensional de 2.50 m.

El reticulado formado por la unión de las células tetraédricas, fue sometido a una carga de diseño de 65.09 kg/cm<sup>2</sup>, lo que equivale a una carga puntual por nodo central de 14.07 kg y de 7.04 kg en el nodo lateral.

Para el sistema con apoyos laterales opuestos se estableció que el espacio máximo posible que puede cubrir es de 8.30 m de longitud.

Con la segunda alternativa se dedujo que el sistema puede tener un volado o cantiliver máximo de 3.00 m de largo.

En el sistema con apoyo lateral y otro central se combinaron el claro y el volado máximos posibles, siendo estos de 8.00 y 3.00 m de longitud respectivamente.

En la cuarta alternativa se propuso el efecto de continuidad, por la combinación de un claro central y dos volados máximos posibles, arrojando un resultado de un claro central de casi 7.00 m y ambos volados de 3.00 m de longitud.

Finalmente, en el último caso se diseñó un paragüas de forma triangular en su proyección horizontal, obteniéndose una longitud máxima posible en los lados del triángulo equilátero propuesto de 6.00 m.

En los cinco análisis se obtuvo que el 90 % de las barras del sistema están trabajando a la mitad de su capacidad de carga ante los esfuerzos a la compresión y que menos del 5% de las mismas se encuentran trabajando con su capacidad de carga permisible.

El movimiento de los nodos en las estructura tridimensional ante los efectos de la aplicación de cargas, aprueban satisfactoriamente el límite de desplazamientos, establecido por el

Reglamento de construcciones del D. F.

La revisión del sistema por efecto sísmico, indica que el área máxima que se puede construir con el Sistema celular Espacial Octa-tetra es de 15.00 x 15.00 m, en cualquier tipo de terreno y que puede tener una altura no mayor de 10.00 m sobre el nivel de la banqueta.

Por último, el efecto del viento en la estructura propuesta demuestra que el sistema se puede construir en cualquier zona heólica y con una pendiente mínima del 5% hasta una inclinación totalmente vertical en su superficie.

## PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Debido a la versatilidad del sistema celular espacial octa-tetra, el procedimiento constructivo se torna fácil, rápido y sin necesidad de mano de obra especializada. Para el desarrollo del armado del sistema se requieren los siguientes materiales prefabricados:

- Barras de 45 cm de largo con dos barrenos de 3/16" de diámetro en sus extremos (Foto 46)

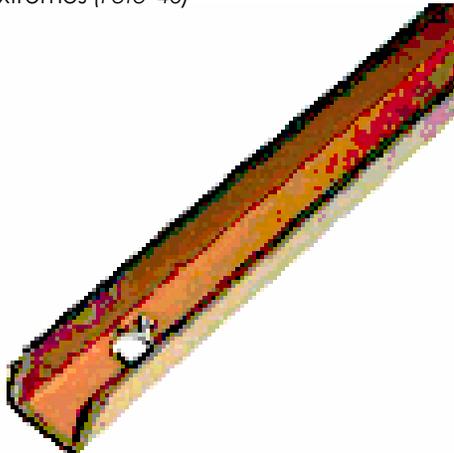


Foto 46.- Barra del Sistema Celular Espacial Octa-Tetra.

- Nodo formado por dos placas una circular de 6.00 cm de diámetro con siete barrenos de 3/16" de diámetro y otra triangular con tres lados de 7.5 cm doblada por sus esquinas con cuatro barrenos de 3/16" de diámetro (Foto 47)



Foto 47.-Nodo del Sistema Celular Espacial Octa-Tetra

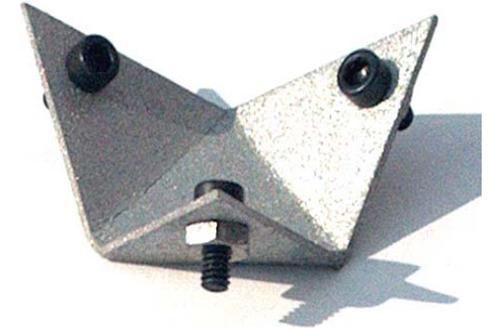
- Tornillo tipo "Allen" cilíndrico con cabeza hexagonal interior standar de 3/16" de diámetro y de 1/2" de largo con tuerca del mismo diámetro (Foto 3)



Foto 48.- Tornillo tipo para unión de barra y nodo del Sistema Celular Espacial Octa-Tetra.

Con respecto a la herramienta para el ensamblaje, se utilizará:

- Llave española de 5/16" de medida
- Llave "allen" para tornillos de cabeza hexagonal de 3/16" de diámetro



Una de las ventajas sin duda del sistema propuesto, es que la mano de obra para su armado no requiere ser especializada, lo que implica que con cuadrillas formadas por ayudantes es suficiente para el desarrollo de este trabajo (Foto 49).



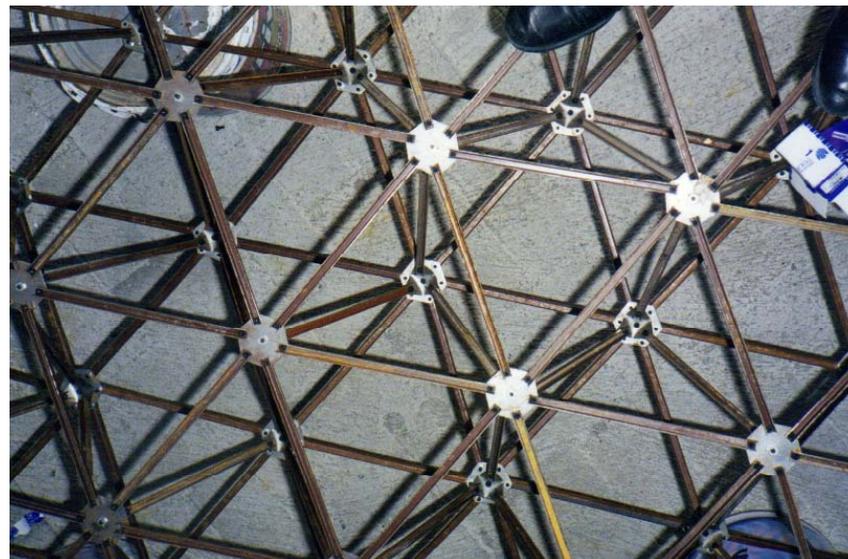
Foto 49.- Materiales requeridos para el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra.

Una vez que ya se cuenta con todos los insumos mencionados anteriormente, las etapas constructivas del sistema se pueden llevar a cabo en el lugar mismo de la obra y se mencionan a continuación:

1. Se unen las placas (circular y triangular) por el barreno central de ambas con el tornillo tipo (Foto 50)



Foto 51.- Capa superior e inferior y diagonales del Sistema Celular Espacial Octa-Tetra, con lámina galvanizada, lámina durock, lámina de policarbonato, etc.



2. Para la capa inferior del sistema se atornillan las barras a la placa circular por los barrenos perimetrales de ambas elementos
3. Posteriormente se unen las barras a las placas triangulares a través de los barrenos perimetrales, con los tonillos descritos
4. La capa superior del sistema, sigue el mismo procedimiento constructivo de la capa inferior
5. Los pasos anteriores se repiten cuantas veces sean necesarias, de acuerdo al tamaño del claro por cubrir (Foto 51)



Foto 52.- Izaje del Sistema Celular Espacial Octa-Tetra



Ya terminado el armado se procederá al izaje, el cual podrá realizarse sin equipo alguno debido a que el peso de la estructura es ligero (Foto 52).

## EJEMPLOS REALES DE APLICACION

El Sistema Celular Espacial Octa-Tetra ofrece la versatilidad de construcción de cualquier tipo de diseño o composición arquitectónica, en cualquier género de la edificación. Aunque su ventaja, que se puede constituir como su aplicación principal, es la adaptabilidad que logra hacia otros sistemas constructivos, en donde se requiera cubrir un espacio corto, ofreciendo la ventaja de una superficie libre de apoyos, con una gran resistencia por su rigidez y de apariencia estética agradable.

Para esta aplicación se construye una *CUBIERTA PLANA TIPO* cubierta con paneles de policarbonato de 3 a 9 mm de espesor y cuyas dimensiones pueden ser de hasta 8 metros de claro libre o de hasta 3 metros en cantiliver o volado y de peralte igual a 41 cm, cuya pendiente de superficie es factible que tenga una inclinación desde 3° hasta 90°. El acabado de la cubierta plana tiene los nodos y las barras con primer anticorrosivo con pintura de esmalte en color y de la lámina de policarbonato pudiendo ser en color azul, gris, transparente o color humo (Foto 53).

Se pueden construir *CUBIERTAS PLANAS TIPO* de forma rectangular, triangular o hexagonal principalmente, en cantiliver o voladas y con dos o más apoyos perimetralmente en forma continua sobre muros o directamente sobre la misma losa o marquesina de concreto existente, o también en forma puntual sobre columnas de cualquier tipo de material.

En el diseño de LA *CUBIERTA TIPO*, al Sistema Celular Espacial Octa-Tetra, se le pueden suprimir determinadas barras o células tetraédricas con lo cual se tendrá una retícula con ciertos vacíos, los cuales estarán principalmente en el centro del claro, con el



Foto 53.- Cubierta plana tipo de 8 metros de largo posible o de 3 metros en volado, con 41 cm de peralte.

fin de aligerar aún más la estructura, para alojar equipos de alumbrado o para la colocación de cualquier tipo de instalaciones (Foto 54).

La *CUBIERTA PLANA TIPO*, puede construirse en cualquier región de la República Mexicana, lo cual implica que puede soportar los efectos del viento o clima en regiones costeras o que puede desplantarse sobre zonas de alta sismicidad y se podrá instalar sobre todo tipo de terreno por muy inclinado o sinuoso que sea, a una altura del mismo no mayor de 10 metros; ya que, la cubierta tiene un peso

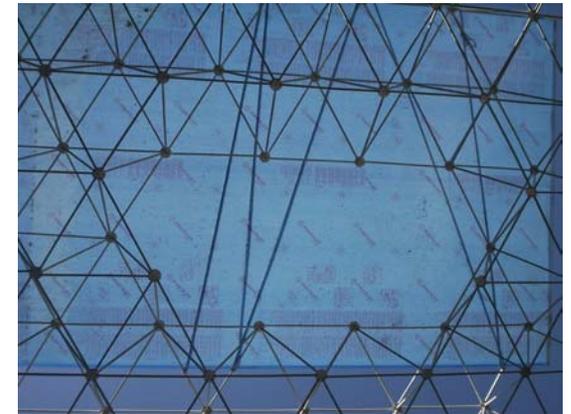


Foto 54.- Supresión de barras de la capa inferior, para alojar luminaria

propio de casi 15 kg/m<sup>2</sup> y puede soportar hasta 50 kg/m<sup>2</sup> más por cargas debidas instalaciones en general y por efectos de fuerzas externas combinadas de viento y sismo.

Esta *CUBIERTA TIPO*, es fácil de armar por ser un sistema atornillable, que no requiere de herramienta complicada, ni de mano de obra especializada, porque sus elementos que la componen están estandarizados para formar células tetraédricas de 50 cm en sus lados, los cuales son prefabricados en el taller, para su fácil ensamblaje en el mismo lugar de su colocación, con lo cual se acelera el tiempo de ejecución y evita así problemas por error en su colocación. Así también, su izaje es muy fácil al ser muy ligero, que por tanto no requiere de equipo especial para su instalación.

Para transportar los insumos para su construcción se requiere de un transporte muy sencillo, porque sus materiales no implican un volumen o peso considerable.

Por otro lado, la CUBIERTA PLANA TIPO es desmontable, ya sea en módulos o en cada uno de los elementos que la integran, con lo que es fácil reubicarla en otro lado teniendo una recuperación de materiales, cercana al 100%.

El sistema tiene diversas aplicaciones debido a que se puede ampliar o disminuir el tamaño de la cubierta, conforme se vayan sucediendo las nuevas necesidades de espacio.

El panel de policarbonato utilizado para cubrir al Sistema Celular Espacial Octa-Tetra es un material muy estable dimensionalmente porque resiste los efectos debidos por los cambios bruscos de temperatura a los que estará expuesto, es decir el panel tiene la ventaja de mantener su geometría original sin contracciones o expansiones por el sol o el frío. Dado que el panel estará expuesto a altas temperaturas, éste también tiene la propiedad de gran resistencia a la incombustibilidad por lo que se considera en material inflamable (Foto 55).

Por iluminación, la cubierta a base de paneles de policarbonato permite la entrada de luz solar, al 88% la intensidad de la luminosidad de los rayos solares; además, el efecto de radiación es totalmente evitado ya que los rayos ultravioleta son repelidos por el panel que tiene la característica de ser térmico, porque el panel se compone de celdas o ductos vacíos en su interior, formándose una cámara de aire, evitando así el paso del calor hacia el interior y por tanto desaparece el efecto invernadero. Para la iluminación nocturna, se podrá colocar cualquier tipo de luminaria, según sea el caso para cada necesidad en particular teniéndose la ventaja que la instalación eléctrica puede modificarse

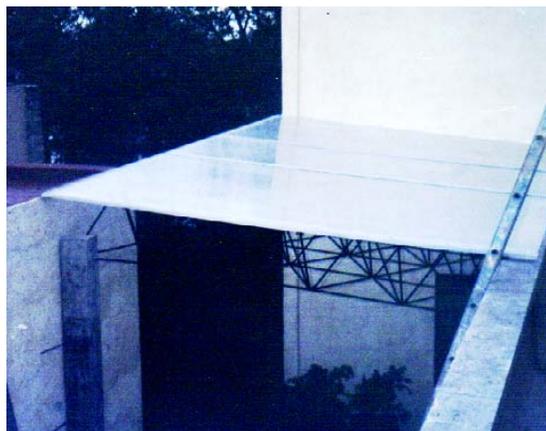


Foto 55.- Paneles de policarbonato sobre la estructura.

conforme varíen los requerimientos de la iluminación, ya que se pueden instalar o desinstalar los ramales de cableado (Foto 56).

Para el caso de una mayor ventilación del espacio que cubre el sistema, se podrá generar un flujo de aire en forma cruzada al colocar únicamente los paneles de policarbonato sobre la retícula superior permitiendo la entrada de aire en todo su perímetro. Para evitar la entrada de insectos u objetos en espacios que se requiera todo cerrado, para mantener la ventilación se podrá colocar una malla tipo mosquitero en toda la orilla de la cubierta.

En lo relativo al efecto por lluvia, la cubierta esta diseñada para trabajar con una pendiente mínima del 5% en su superficie, para permitir el escurrimiento de las aguas pluviales, las cuales podrán ser recolectadas por un canalón en la parte baja de la cubierta, para luego encausarlas a la bajada de aguas pluviales de la red sanitaria correspondiente para su recolección o salida directa o



Foto 56.- Supresión de barras de la capa inferior, para alojar luminaria

En general toda la estructura espacial y el panel son de fácil mantenimiento preventivo e incluso correctivo, ya que la estructura sólo requiere de aplicaciones de pintura cada cinco años y el panel se puede limpiar inclusive caminando sobre él para poder quitar el polvo o alguna otra impureza, no se requiere de limpiadores abrasivos o solventes, ni de equipos especiales.

Las cubiertas planas tipo realizadas han sido aplicadas en los siguientes espacios:

- Cochera
- Portal de acceso peatonal o vehicular
- Patio de usos múltiples
- Terraza
- Vestíbulos de acceso a oficinas
- Gimnasio
- Cafetería
- Jardín
- Escaleras
- Etc.

**CAFETERIA** (Fotos 57 y 58)

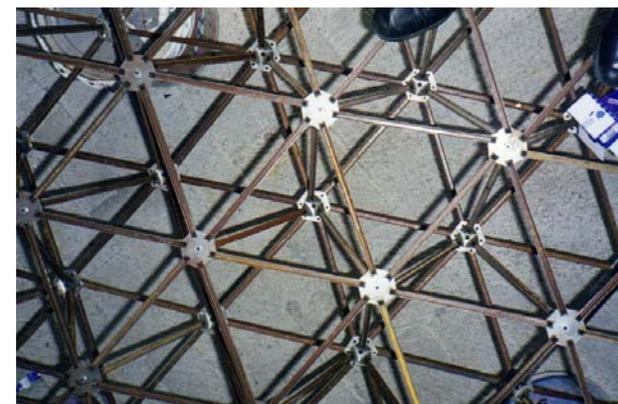
Propietario:	<b>COLEGIO FRAY GARCIA DE CISNEROS</b>
Ubicación:	<b>Calle de Arequipa # 777 Col. Lindavista Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2005</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo en cafetería para la zona de mesas y cocina, formado por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra acabada con pintura de esmalte en color azul y cubierta con lámina de policarbonato en color también azul de 6 mm de espesor</b>
Medidas:	<b>11.30 x 6.00 m</b>
Área:	<b>67.80 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>10.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetral sobre muros de tabique</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Instalación eléctrica</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Siete semanas</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 59,731.80 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 57 y 58.- Área de mesas de cafetería y detalle de armado de la estructura.

## COCHERA (Fotos 59, 60 y 61)

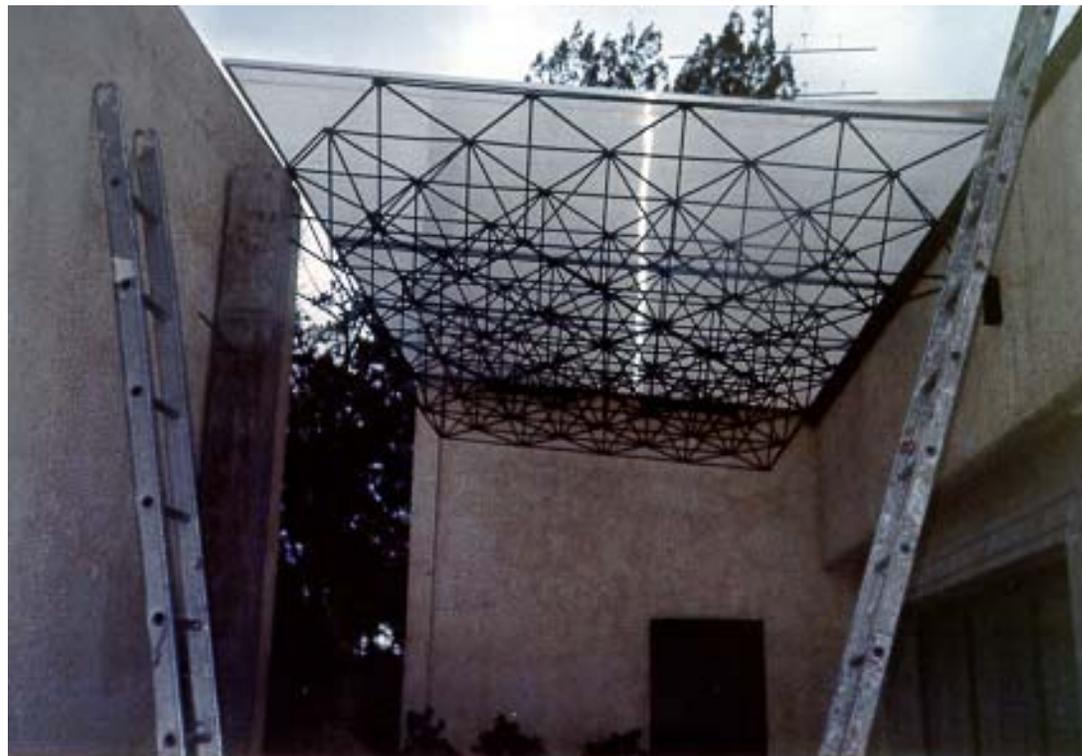
Propietario:	<b>PARTICULAR</b>
Ubicación:	<b>Calle de Montes Urales S/n Col. Bosques de las Lomas Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2000</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo sobre jardín a una altura de 3.00 m, formada por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra acabada con pintura de esmalte en color negro mate y cubierta con lámina de policarbonato en color humo de 6 mm de espesor</b>
Medidas:	<b>7.82 x 4.50 m</b>
Área:	<b>35.19 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>7.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetrales continuos opuestos sobre muro y una columna aisladas en cada uno de los laterales largos</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Ninguna</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Tres semanas y media</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 31,002.39 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 59, 60 y 61.- Detalle interior del sistema celular espacial octa-tetra, en el que se aprecian las caras triangulares del tetraedro.

## JARDÍN (Fotos 62, 63 y 64)

Propietario:	<b>PARTICULAR</b>
Ubicación:	<b>Calle de Montes Urales S/n Col. Bosques de las Lomas Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2000</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo sobre jardín a una altura de 7.50 m, formada por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra acabada con pintura de esmalte en color negro mate y cubierta con lámina de policarbonato en color humo de 6 mm de espesor</b>
Medidas:	<b>6.50 x 2.50 m</b>
Área:	<b>14.95 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>5.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Aislados en las cuatro esquinas</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Ninguna</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Una semana y media</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 13,170.95 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 62, 63 y 64.- Cubierta ligera para tapar área de jardín, en el que los apoyos aislados son tres en la capa superior y uno en la capa inferior.

**PATIO DE SERVICIO** (Fotos 65, 66 y 67)

Propietario:	<b>PARTICULAR</b>
Ubicación:	<b>Calle de Sta. Cruz Acayucan # 151 Col. Sta. Cruz Acayucan Azcapotzalco, Méx. D. F.</b>
Año:	<b>1998</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo en patio para esparcimiento infantil en departamento, formado por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra acabada con pintura de esmalte en color negro satinado y cubierta con lámina de policarbonato en color humo y transparente de 6 mm de espesor</b>
Medidas:	<b>6.00 x 4.14 m</b>
Área:	<b>24.84m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>10.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetral sobre muros de tabique</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Instalación eléctrica</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Dos semana y media</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 21,884.04 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 65, 66 y 67.- Cubierta ligera en patio para esparcimiento infantil y detalle del peralte en la estructura, formada por las barras y nodos.

**TERRAZA** (Fotos 68 y 69)

Propietario:	<b>PARTICULAR</b>
Ubicación:	<b>Calle de Faisanes # 21 Col. Izcalli Jardines Ecatepec, Edo. de Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2002</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo en terraza de casa habitación unifamiliar, formado por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra acabada con pintura de esmalte en color blanco mate y cubierta con lámina de policarbonato en color transparente de 6 mm de espesor</b>
Medidas:	<b>4.00 x 3.25 m</b>
Área:	<b>13.00 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>15.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetral continuo en uno de los lados largo y dos apoyos aislados en las esquinas restantes</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Ninguna</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Una semana y media</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 11,453.00 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 68 y 69.-  
Cubierta ligera sin y con lámina transparente de policarbonato.

**PORTICO DE ENTRADA: SALON CHARPY (Fotos 70, 71 y 72)**

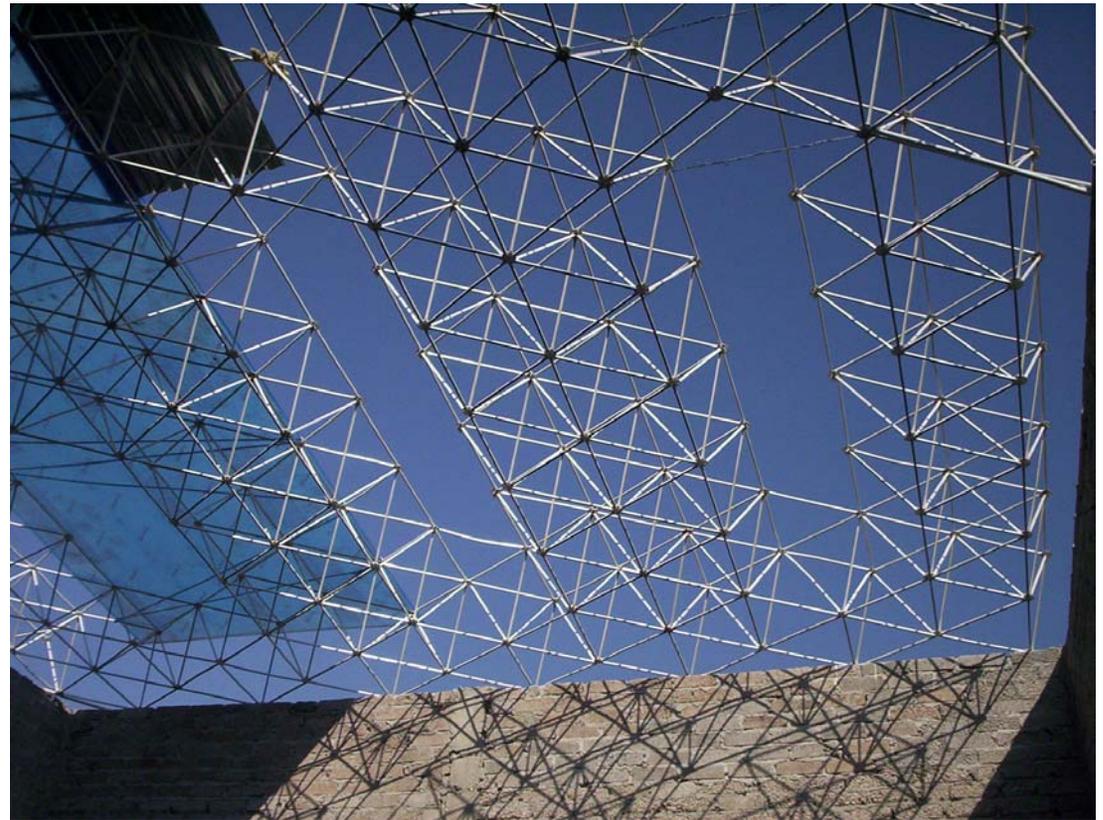
Propietario:	<b>GRUPO CHARPY</b>
Ubicación:	<b>Av. Jardines de Morelos # 249 Col. Jardines de Morelos Ecatepec, Edo. de Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2000</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo en la entrada principal de Salón de fiestas, formado por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra acabada con pintura de esmalte en color negro mate.</b>
Medidas:	<b>Base mayor: 3.00m, base menor: 1.40 y largo 3.70 m</b>
Área:	<b>8.14 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>5.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetral continuo sobre marquesina de concreto</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Ninguno</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Una semana</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 7,171.34 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 70, 71 y 72.- Cubierta tipo en cantiliver de 3.70 m de longitud para enfatizar el acceso al salón de fiestas.

**GIMNASIO** (Fotos 73, 74 y 75)

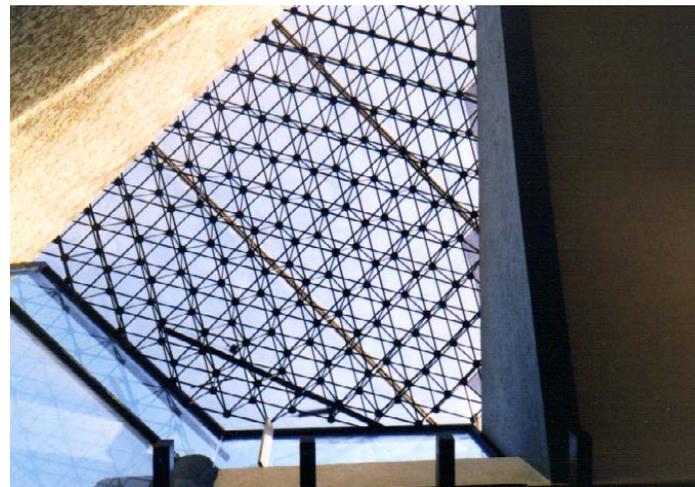
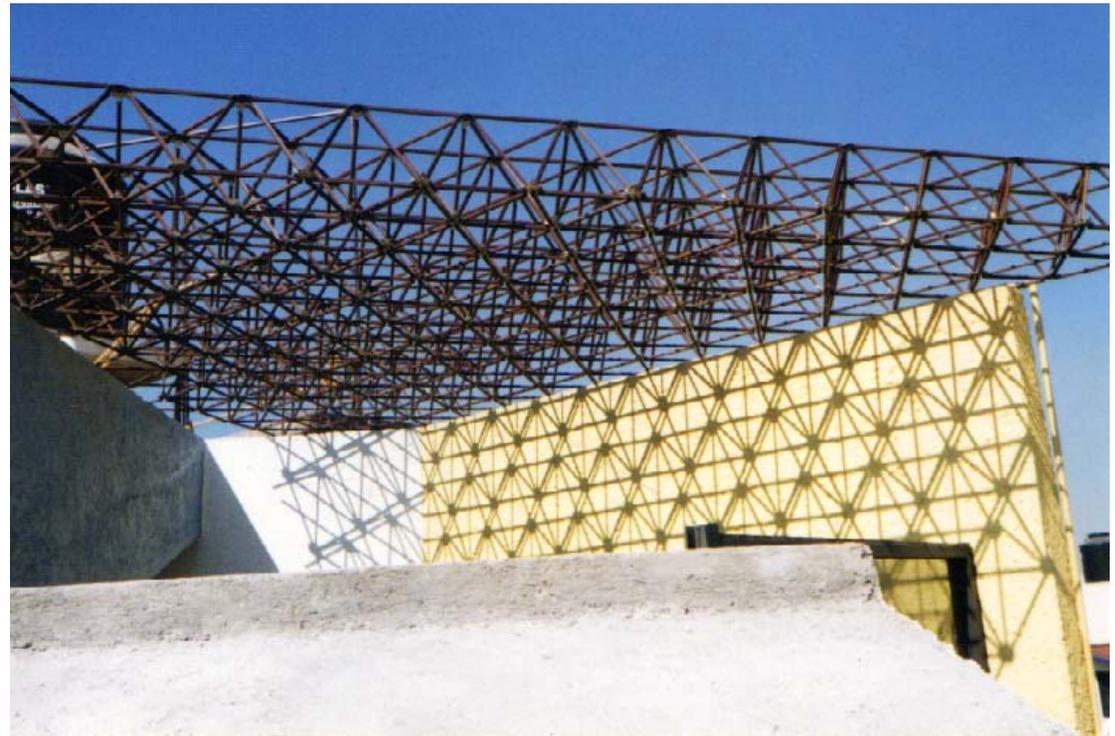
Propietario:	<b>GRUPO CHARPY</b>
Ubicación:	<b>Av. Jardines de Morelos # 249 Col. Jardines de Morelos Ecatepec, Edo. de Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2005</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo en gimnasio y bodega, formado por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra con huecos discontinuos, acabada con pintura de esmalte en color blanco mate y lámina de policarbonato en color azul de 6 mm de espesor.</b>
Medidas:	<b>10.00 x 7.00 m</b>
Área:	<b>70.00 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>20.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetral continuo sobre muros de tabique</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Instalación eléctrica</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Cinco semanas</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 40,085.50 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 73, 74 y 75.- Detalle de huecos en la estructura de la cubierta tipo, con apoyos de la capa inferior directamente sobre muro de tabique.

**ESCALERA** (Fotos 76 y 77)

Propietario:	<b>PARTICULAR</b>
Ubicación:	<b>Calle de Canal de Cuernavaca # 24 Col. Barrio XVII Xochimilco, Méx. D. F.</b>
Año:	<b>2001</b>
Descripción:	<b>Cubierta plana tipo sobre escalera de casa habitación, formado por el Sistema Celular Espacial Octa-Tetra, acabada con pintura de esmalte en color negro mate y lámina de policarbonato en color humo de 6 mm de espesor.</b>
Medidas:	<b>Forma irregular, con 4.00 m en su lado mayor</b>
Área:	<b>10.89 m<sup>2</sup></b>
Pendiente de la cubierta:	<b>5.00%</b>
Apoyos de la estructura:	<b>Perimetral continuo sobre dos muros</b>
Instalaciones sobre la cubierta:	<b>Ninguna</b>
Tiempo de ejecución:	<b>Una semana</b>
Costo directo de la cubierta:	<b>\$ 9,595.85 (costo actualizado a marzo de 2006)</b>



Fotos 76 y 77.- Detalle de cubierta ligera  
en cantiliver sobre área de escaleras.

La aplicación del sistema celular espacial octa-tetra mostrada en los ejemplos anteriores, arroja los siguientes resultados, tomando como parámetros de análisis el marco de referencia indicado anteriormente:

La retícula del sistema propuesto es factible constructivamente, por no presentar problemas en el procedimiento de armado y colocación, funcionando perfectamente como un sistema estructural y constructivo.

En los casos de aplicación se utilizó la célula tetraédrica de 50 cm de longitud en sus aristas, definida en el capítulo tres, demostrando que la retícula celular puede crecer tanto en sentido horizontal como en sentido vertical de ser necesario, no generando ningún problema en el armado y adquiriendo su capacidad estructural por su propia geometría.

La resistencia estructural mínima establecida de acuerdo a las normas técnicas complementarias manejadas como referencia, se presenta en cada una de las aplicaciones realizadas; así como, también reúne las cualidades ante los efectos por sismo y viento.

La versatilidad para cubrir cualquier espacio sin importar la forma del mismo, se hace latente en las aplicaciones del sistema, confirmando su utilización en cantiliver o volado con una longitud de 3.00 m y en espacios para cubrir claros de hasta 8.50 m de longitud, adaptable a otros sistemas constructivos, tanto en forma como en integración estética. De esta manera se confirma que, el sistema cumple el hecho de utilizarse para espacios pequeños desde 1.00 hasta 8.50 m con dos capas: una superior y otra inferior, pero con la opción de cubrir claros mayores a este valor agregando una

capa más en toda la superficie a cubrir o sólo ampliar en las áreas que tendrán mayor fatiga.

El sistema tiene la posibilidad de dejar huecos en la misma retícula, esto con la finalidad de instalar lámparas eléctricas, para efectos estéticos, como efectos de luz o para colocar cualquier tipo de instalaciones.

En lo relativo al sustento del sistema celular, la capa superior o inferior de la retícula se puede apoyar en forma continua, directamente sobre muros de tabique y trabes de concreto armado o metálicas o se puede sustentar directamente en los nodos de cualquiera de las dos capas, en apoyos aislados sobre columnas metálicas o de concreto armado o también sobre ménsulas metálicas adosadas a los muros. Así como también, se puede combinar los tipos de apoyo aislado y continuo.

La aplicación del sistema celular espacial octa-tetra es principalmente en el género de la edificación, pues su uso es muy adecuado para cubrir espacios en cocheras, escaleras, vestíbulos, áreas para jardín con o sin efecto invernadero, áreas de esparcimiento como aulas de juegos o deportivas, pórticos de entrada, terrazas, etc.

El costo directo del sistema fue bajo comparado con otros tipos de estructuras tridimensionales, llegando a ser de hasta el 10% del precio más alto manejado en el mercado actual nacional; ya que, el costo por metro cuadrado de la estructura sin indirectos es de casi \$600.00 a fecha actual.

Al armar y colocar las estructuras, el tipo de mano de obra requerida fue sencilla con una simple supervisión inicial, porque el tiempo de ejecución es rápido, ya que la cuadrilla que

está integrada por un oficial y dos ayudantes tienen un rendimiento de casi diez metros cuadrados en una semana.

Con respecto a la herramienta se confirma que ésta efectivamente es simple y que únicamente se necesitó una llave tipo allen y otra de tipo española para el armado de las estructuras.

La estructura se puede construir preferentemente en el lugar de la obra, lo cual puede ser en una superficie plana horizontal lo más cercano posible a su colocación final o directamente en la posición en que será colocada. Además en todo caso, de ser necesario, el sistema se puede armar en la planta baja de la obra, para luego izar parcial o totalmente la estructura. Un detalle importante que se pudo notar en las aplicaciones es que, la retícula se puede ampliar o reducir aún ya colocada, efectuándole ajustes.

El izaje y colocación del sistema celular espacial octa-tetra fue muy sencillo porque resulta que es ligero, pudiéndose elevar esta retícula en forma manual, sin requerir de ningún tipo de equipo. El sistema tridimensional presenta poco peso, siendo menos de los 12 kg por metro cuadrado, por lo que un tramo de armado de 8.00 de largo por 2.50 m de ancho tiene un peso igual a 288 kg, supeditando la maniobra para su instalación al tamaño y no al peso.

La estandarización y prefabricación de las barras y nodos, contribuyen un mejor control del producto terminado, al presentar un acabado base de primer y un acabado final con pintura de esmalte con una o dos capas, para posteriormente aplicar una tercer mano en la estructura únicamente para retocar.

## CONCLUSIONES

El resultado final de la *proposición* del SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA como una estructura producto de la necesidad de cubrir espacios cortos se determina como satisfactorio. Resolviendo con esto la carencia de estructuras tridimensionales espaciales en nuestro país, diagnosticadas en el marco de referencia.

Se comprobó que el sistema propuesto puede cubrir perfectamente espacios menores a los 10 metros, al aplicarse en soluciones específicas reales, como cubierta ligera para cubrir los espacios correspondientes a: cocheras, jardines, área de mesas en cafetería, terraza, patio de uso múltiple, gimnasio y pórtico de entrada, teniéndose con las *ventajas* de ser resistente, económico, ligero, prefabricado, rápido en su construcción y de agradable apariencia estética, apeándose con esto a las mejores cualidades que deben reunir las estructuras tridimensionales espaciales, en lo referente a la mejor forma de unión entre nodos y barras, al grado de dificultad de ensamblaje de sus piezas, al menor peso de la estructura, a su bajo costo de fabricación, al equipo que no requiere, a la herramienta y la mano de obra más simple que necesita durante su proceso de armado y colocación.

Es **resistente estructuralmente** porque adquiere gran rigidez al utilizar al triángulo como figura indeformable geoméricamente

en tres dimensiones, creando tetraedros o células tetraédricas con la cualidad de adquirir una gran resistencia de capacidad de carga, la cual se va disipando en el espacio a través de las barras que forman el reticulado tridimensional del sistema.

El sistema presenta un **comportamiento estructural estable** ante la combinación de los efectos por sismo y viento, aunados a su peso propio, aprobando satisfactoriamente la capacidad de carga permitida para con las barras del sistema propuesto y los límites permisibles de los desplazamientos en los nodos de acuerdo a la normatividad que rige a este tipo de estructuras.

El **costo de construcción** del sistema es económico porque los materiales empleados son también de bajo costo, son fáciles de conseguir y de transportar, se pueden prefabricadas en el taller, y colocarlos en el lugar de la obra, sin equipo alguno, sólo con una mano de obra no especializada y sin herramienta sofisticada, reduciendo de esta manera los tiempos de ejecución y por lo mismo propiciando un ahorro en el importe total.

Con la CÉLULA TETRAÉDRICA definida de 50 cm por lado, se tiene la mejor opción de **adaptabilidad** de la estructura con otros sistemas constructivos; además de que, con

esta modulación es óptimo el aprovechamiento de la capacidad de resistencia posible de las barras, principalmente ante el esfuerzo a compresión.

Las cualidades de **ligereza y rapidez en su construcción** se logra al momento de utilizar materiales metálicos laminados, como lo es el fierro, cuya resistencia se obtiene de la composición geométrica en su forma y no únicamente de su masa; es decir, utilizar la menor cantidad de materia posible para tener un menor peso y con ello, rapidez y facilidad en la maniobra de armado, izaje y colocación de la estructura en el sitio mismo. Entonces por tanto, se establece que a menor peso de la estructura, también menor es el costo de su construcción.

Al ser prefabricados en serie los elementos que componen al sistema, se logró un mejor control y estandarización de las piezas, lo que hace fácil el armado porque todas sus barras y nodos son de un solo tipo o tamaño, evitándose pérdidas de tiempo por errores de armado, por lo que adquiere la cualidad de la **autoconstrucción**.

Con este sistema se refuerza la unión de la ingeniería con **la arquitectura a través de la tecnología**, al incorporar el diseño de cubiertas ligeras pequeñas como una opción

constructiva al servicio del arquitecto o de cualquier constructor de una manera simple y segura. Creando un tipo de arquitectura pluricelular o molecular, porque se proponen materiales con menor peso colocados a una mayor velocidad de construcción, que permiten organizar espacios más versátiles ante los cambios constantes de una necesidad arquitectónica. La arquitectura podrá entonces desarrollar proyectos en los que la tendencia será la conquista del espacio utilizado al máximo, revolucionando con ello la concepción arquitectónica, por la infinidad de variantes que en formas ofrece el sistema.

Esta proposición estructural **puede construirse en cualquier parte** de la República Mexicana, sin importar el sitio, si es en costa o en zonas de alta sismicidad, y también sin influir el tipo de terreno sobre el que se desplante la construcción; que inclusive ofrece una altura máxima de hasta 10 metros sobre el nivel de suelo, esto de acuerdo a los valores positivos obtenidos en el análisis por efecto del viento.

Las **aplicaciones** del SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA son infinitas, ya que puede aplicarse en cualquier género habitacional: unifamiliar o plurifamiliar, en servicios como oficinas o centros comerciales, en la industria y en espacios abiertos, como plazas y jardines, concebida principalmente como una **CUBIERTA LIGERA TIPO**, que forme parte del espacio arquitectónico,

contribuyendo a la integración del conjunto arquitectónico. Además, el sistema propuesto no se ve limitado como una cubierta horizontal, si no que puede construirse como elemento vertical o incluso con la inclinación que se requiera, para formar parte de la fachada de una edificación.

Por otra parte se pueden dejar **líneas de investigación abiertas**, en cuanto a otros tipos de materiales, que se pueden utilizar para fabricar a la misma estructura, como sería el aluminio o el plástico, e incluso también, se pueden proponer otros tipos de sección para las barras, como lo justificaría un tubo cuadrado; con lo cual, estos cambios de inicio contribuirían a un sistema todavía de mayor resistencia y rigidez estructural, más ligero en peso, más económico en sus costos de construcción y por ende, cubrir espacios mayores y con la misma calidad estética. Otra línea de investigación posible es la referente a analizar si es posible cubrir **espacios mayores** a los 10 metros, traslapando tres o más capas de la misma retícula; es decir, una retícula formada de una capa inferior, intermedia y superior, ya que el sistema propuesto permite en sus nodos la unión de barras diagonales tanto en un sentido como en otro.

Se deja abierta también la posibilidad que el sistema se pueda aplicar para la construcción de **estructuras curvas** como lo sería las bóvedas, cúpulas o cubiertas

geodésicas, con tan sólo variar la longitud de las barras de la capa inferior y de sus diagonales, o simplemente generar bloques planos de estructuras con forma de triángulos equiláteros o módulos hexagonales, unidos entre sí, únicamente diseñando los adaptadores para unir éstos bloques.

Por último se establece la factibilidad de construir una **vivienda unifamiliar con el SISTEMA CELULAR ESPACIAL OCTA-TETRA**, con la ventaja de ser una construcción adaptable a las necesidades de los usuarios de la misma, por su capacidad de crecer o decrecer conforme a las nuevas necesidades de espacio que se requieran o para mejorar el confort de funcionalidad de la vivienda.

*Para finalizar considero que las características propias de las estructuras espaciales tridimensionales basan su éxito en su geometría y lo que hace falta es con la tecnología actual, cómo y con qué construirlas, para responder a las expectativas requeridas ante una necesidad de espacio. Por tanto, con todo este trabajo de investigación, puedo afirmar que el objetivo y alcance planteado se logra plenamente, como un resultado tangible y que deja la apertura de su aplicación a múltiples posibilidades.*

## FUENTES DE INFORMACIÓN

---

### BIBLIOGRAFÍA

- Arnal Simón Luis y Betancourt Suárez Max, **Reglamento de construcciones para el Distrito Federal**, Ed. Trillas, México, 2003
- Campos Newman Luis E., **Geodésicas trazo básico**, Ed. Universidad Iberoamericana, México 1982
- Chilton John, **Space grids structures**, Ed. Architectures Press, Oxford 2000
- Compañía Siderúrgica de Guadalajara, S.A. de C.V., **Manual para construcción en acero**, Ed. CSG, México 1993
- Engel Heino, **Sistemas de Estructuras**, Ed. G.Gilli, Barcelona 2001
- Espinoza López Enrique, **Ciudad de México compendio cronológico de su desarrollo urbano 1521 a 2000**, Ed. IPN, México 2003
- Fundación ICA, A.C. , **Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985**, Ed. Limusa, México, 1988
- García Flores Alejandro, **Estructuras Espaciales ( Una opción adaptable )**, Ed. UNAM, México 1998
- Heinen J. y Gutiérrez V.J., **Estructuras**, Ed. IPN, México 1986
- Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C. , **Manual de construcción en acero**, Ed. Limusa, México 1987
- Langagne Eduardo, **Arquitectos de la Ciudad de México, 1950-2000**, Ed. UNAM, 1999
- Makowski Z.S., **Estructuras Espaciales de Acero**, Ed. G.Gilli, Barcelona 1968
- Margarit J. y Buxadé C., **Las mallas espaciales en arquitectura**, Ed. G. Gilli, Barcelona 1994
- Margarit J. y Buxadé C. , **Cálculo Matricial de Estructuras de Barras**, Ed. G. Gilli, Barcelona XXXX
- Meade Grace, **Arquitectura Mexicana**, Ed. McGraw - Hill, México, 2000
- McCormac Elling, **Estructuras Metálicas Análisis y Diseño Tomo I**, Ed. Alfaomega, México, 1994.
- McCormac Jack C. y Nelson James K., **Análisis de estructuras método clásico y matricial**, Ed. Alfaomega, México 2002
- Mirafuentes José, **Armaduras Espaciales**, Ed. UNAM , México 1969
- Noelle Louise, **Arquitectos contemporáneos de México**, Ed. Trillas, México, 1999
- Olea Oscar y González Lobo Carlos, **Metodología para el Diseño Urbano, Arquitectónico, Industrial y Gráfico**, Ed. Trillas, México 1991
- Opre-tor, S.A. , **"Catálogo de tornillos y prisioneros"**, Ed. Opre-tor, México 2001
- Owen Roy E., **Cubiertas** , Ed. Blumer, Barcelona España 1978
- Perfiles y herrajes LM, S.A. de C.V., **"Catálogo de perfiles y tubos de acero"**, Ed. LM, México 2001
- Raeder H. Pablo, **La geometría de la forma**, Ed. UNAM, México, 1992
- Rodríguez Cuevas Neftalí, **Estructuras para grandes claros**, Ed. UNAM, México 1976
- Salvadori Marlo y Levy Matthys, **Structural Design in Architecture**, Ed. Prentice Hall, CECSA, XXXX
- Sonorio Martínez Noé, **Análisis y diseño de estructura tridimensional para techumbre irregular**, Ed. IPN, México 1994

### REVISTAS

- Centro, **Guía para caminantes**. Ross María Elena y Machorro Malja Patricia, **"El zócalo corazón de la Ciudad, 6: Gran Hotel de la Ciudad de México"**, Año 1, No. 1 Octubre-Noviembre, Ed. Fundación del centro histórico de la ciudad de México A.C., México 2002
- CICM, **Ingeniería Civil ( Revista del Colegio de Ingenieros Civiles de México ) # 295**, Ed. Obsidiana, S.A. de C.V. , México 1993
- Enlace en la industria de la construcción. Saslavsky Ricardo, **"Entrevista Juan José Díaz Infante, todo aquello que puede ser imaginado, puede ser creado"**, Año 1, Vol. 1, No. 5 Enero 1992, Ed. Recursos de Alta Calidad, S.A., México 1992.
- Obras, panorama de la construcción. Engelkin M. Segismundo, **"Diseño Estructural: 20 años después"**, Año XXII, Vol. XVII, No. 198 Junio 1989, Ed. Expansión, S.A., México 1989
- International Journal of Space Structures, Makowski Z.S. y Nooshin H. **"The architecture of space frames"**, Vol. 06 No.4, Ed. Multi-science Publishing, Co. LTD, Inglaterra 1991

## MEDIOGRAFÍA

- André Paulo B. R. "**Aplicación de las mallas espaciales en arquitectura**", Brasil 2004/  
[www.metalica.com.br/](http://www.metalica.com.br/)
- Barragán López Leticia, "**De la Plaza Mayor al Zócalo**", México 2003/  
[www.e-mexico.gob.mx/](http://www.e-mexico.gob.mx/)
- Biblioteca, "**Puentes de armadura**", México 2000/  
[www.geocities.com/](http://www.geocities.com/)
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, "**Canacero**", México 1999/  
[www.conacero.org.mx](http://www.conacero.org.mx)
- Carral Adriana, "**El teatro nacional y Bellas Artes bajo la lente de Casasola**", México 2005/  
[www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- De Haan David "**How was it built?**", Reino Unido 2002/  
[www.ironbrige.org.uk/](http://www.ironbrige.org.uk/)
- Delegación Cuauhtémoc, "**Historia colonias: Santa María La Ribera**", México 2005/  
[www.cuauhtemocdf.gob.mx](http://www.cuauhtemocdf.gob.mx)
- Delegación Cuauhtémoc, "**Monumento La Revolución**", México 2005/  
[www.cuauhtemocdf.gob.mx](http://www.cuauhtemocdf.gob.mx)
- Díaz Infante J. J. "**Entre las pieles del espacio**". México 2003/  
[www.imcyc.com/](http://www.imcyc.com/)
- Etereoestructuras de acero, [www.geometrica.com/](http://www.geometrica.com/)
- Estructuras espaciales, [www.gmitecnologia.com/](http://www.gmitecnologia.com/)
- Estructuras tridimensionales Adriann´s de México, [www.adriannsdemexico.com/](http://www.adriannsdemexico.com/)
- Estructuras tridimensionales de acero/  
[www.trimetrika.com/](http://www.trimetrika.com/)
- Estructuras tridimensionales Tridi-steel, "**Tridilosa**", [www.tridisteel.com/](http://www.tridisteel.com/)
- Fadón Salazar Fernando, "**Análisis gráfico de obras emblemáticas de Félix Candela**". España 2001 [www.felixcandela.com/](http://www.felixcandela.com/)
- Grupo IMSA, "**Historia del acero**", México 2003/  
[www.grupo imsa.com](http://www.grupo imsa.com)
- Jiménez Víctor, "**El siglo del México contemporáneo en la arquitectura**", México 1999/  
[www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- Llanas Roberto, "**La ingeniería civil, una profesión legendaria**", México 1999/  
[www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)
- Le Cuyer Annette "**Steel and Beyond: New Strategies for metals in Architecture** ", USA 2003/  
[www.arcspace.com/](http://www.arcspace.com/)
- Maia de Magalhães J. R. y Malite M. "**Estructuras metálicas espaciales: algunos aspectos relativos a su diseño y construcción**", Brasil 1998/  
[www.sef.eesc.usp.br/](http://www.sef.eesc.usp.br/)

Mendizabal José, "**Santo Domingo, historia de una restauración**", México 1996/  
[www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)

Oporto Claudia Estrela. "**La concepción estructural de Sthephané Du Chateau: Las estructuras metálicas en la evolución de los sistemas espaciales**", Brasil 2002/  
<http://copacabana.dlsi.ua.es/>

Oporto Claudia Estrela. "**Estructuras espaciales**", Brasil 2001/  
<http://copacabana.dlsi.ua.es/>

Ovalle Rodríguez Edna, "**Acero y estado**", México 2005/  
[www.uom.edu.mx](http://www.uom.edu.mx)

Reyes Fabiola, "**Techados tridimensionales**", México 2001/  
[www.obrasweb.com](http://www.obrasweb.com)

Urner Kirby. "**Alexander Graham Bell and the Octet Truss**", USA 1998/  
[www.grunch.net/](http://www.grunch.net/)

Wikipedia Enciclopedia, "**Buckminster más lleno**", 1983/  
[www.worldlingo.com/](http://www.worldlingo.com/)

Wikipedia Enciclopedia, "**Marcos del espacio**", 2005/  
[www.worldlingo.com](http://www.worldlingo.com)

<http://bebelfish.altavista.com/tr/>

<http://blong-sem.blogspot.com/>

[www.arqhys.com/](http://www.arqhys.com/)

[www.chopo.unam.mx/](http://www.chopo.unam.mx/)

[www.tampico-online.com/](http://www.tampico-online.com/)

[www.triodetic.com/](http://www.triodetic.com/)

[www.unistrut.com/](http://www.unistrut.com/)